

Линейный ускоритель электронов на энергию 8–50 МэВ с инжекцией от источника электронов на основе кластерных плазменных систем*

И. А. Ашанин, Ю. Д. Ключевская, С. М. Полозов, В. И. Ращиков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация,
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Для цитирования: Ашанин И. А., Ключевская Ю. Д., Полозов С. М., Ращиков В. И. Линейный ускоритель электронов на энергию 8–50 МэВ с инжекцией от источника электронов на основе кластерных плазменных систем // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18. Вып. 4. С. 473–486. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.403>

Много лет к ключевым задачам современной ускорительной физики относится увеличение темпа ускорения в линейных ускорителях электронов. Физические пределы напряженности ускоряющего поля для металлических ускоряющих структур практически достигнуты, поэтому рассматриваются новые схемы ускорения, в первую очередь ускорение в плазме и кильватерное. Вторая задача — это генерация сверхкоротких (100 фс и менее) электронных сгустков, для чего традиционно используются высокочастотные фотопушки. При этом для фотопушек серьезной проблемой, ограничивающей интенсивность электронов в сгустке, является влияние объемного заряда при эмиссии и ускорении в прикатодной области, где пучок слаборелятивистский и велико влияние объемного заряда на его динамику. Рассматривается возможность применения плазменного катода в качестве инжектора ускорителя. В перспективе это может позволить обойти ограничения, присущие фотопушкам (большое влияние объемного заряда на динамику пучка в прикатодной области) и ускорению в лазерно-плазменном канале (низкий коэффициент захвата электронов в режим ускорения, широкий энергетический спектр — 10 % и более при энергии в десятки и сотни мегаэлектронвольт). Предлагается разработать комбинированный ускоритель, в котором для инжекции в традиционную металлическую структуру используется сгусток, генерируемый в лазерно-плазменном канале. Данный источник дает возможность генерации короткого (от 0.1 до 1.0 пс) сгустка электронов с энергией в несколько сотен килоэлектронвольт, что позволит считать такой источник альтернативой фотокатоду. Далее пучок необходимо захватить в режим ускорения в нормально проводящей секции и ускорить до энергии 50 МэВ с возможностью перестройки энергии. Описаны особенности такого ускорителя, особенности захвата электронного сгустка в режим ускорения и возможные значения энергетического спектра в этой системе.

Ключевые слова: синхротронное излучение, лазер на свободных электронах, ускоряющая структура, динамика пучка, поперечный эмиттанс.

1. Введение. Источники электронов высокой яркости, в которых пучок электронов имеет поперечный эмиттанс порядка 100 пм·рад и менее, обычно основаны на высокочастотных (ВЧ) пушках с фотокатодом (фотопушках), генерирующих заряды до нескольких нКл в сгустке. Фотоинжекторы должны решать ряд задач, значительно различающихся по параметрам сгустка и режимам работы. Фотопушки первого типа используются для генерации пучков высокой интенсивности для лазеров на

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-15-2021-1358 от 12 сентября 2021 г.).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

свободных электронах (ЛСЭ) с энергией пучка, составляющей несколько гигаэлектронвольт, таких как European-XFEL или LSLS [1, 2]. В таких установках должны генерироваться сгустки с зарядом 1 нКл, длиной сгустка 1 пс, поперечным эмиттансом менее 10 мм·мрад и частотой следования до тысяч герц. Второй тип фотопушек применяется для компактных ЛСЭ и требует небольших зарядов сгустка (не выше 100 пКл/сгусток), но и длина сгустка должна быть 100–300 фс с тенденцией к десяткам фемтосекунд. Для третьего типа требуются сгустки с зарядами 100 пКл, но со значительной частотой следования 10–100 кГц. Заряд сгустка в фотопушке ограничен квантовой эффективностью катода и нелинейными эффектами в катоде и прикатодной области. При эмиссии электронов из фотокатода с очень низкой энергией (несколько электронвольт) доминирующее влияние оказывает объемный заряд, что вынуждает использовать соленоиды с большими (1 Тл и выше на оси) магнитными полями для компенсации роста поперечного эмиттанса и высокие градиенты ускоряющего поля для быстрого достижения пучком ультрарелятивистских энергий. Срок службы фотокатода также ограничен и составляет не более нескольких сотен часов для полупроводниковых (Cs₂Te и др.) катодов, а время жизни также ограничено суммарным зарядом, извлеченным из катода.

В современных образцах ускоряющих ВЧ-резонаторов достигнуты градиенты полей свыше 200 МВ/м, а в серийных — от 50 до 100 МВ/м. Физический предел напряженности ускоряющего поля практически достигнут, в связи с чем рассматриваются различные новые схемы ускорения, прежде всего ускорение в плазме и кильватерное. Идея ускорения в модулированном плазменном канале была предложена Я. Б. Файнбергом в конце 1950-х годов [3]. Разделяют два подхода к созданию каналов в плазме: пучковый и лазерный. В первом из них высокоэнергетичный (с энергией несколько гигаэлектронвольт) пучок электронов инжектировался в плазменный канал и доускорялся [4, 5]. Данная идея была успешно реализована экспериментально в Стэнфордском университете [6]. При этом напряженность поля в плазме составляет десятки и сотни гигаВольт на 1 м.

Второй способ предложили Т. Таджима и Дж. Доуссон — создание модулированного канала в плазме с помощью лазерного импульса (см. [7]). В настоящее время в мире действуют несколько коллабораций, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями в этой области. Однако до последнего времени не удалось пройти путь от «метода ускорения» к действующим установкам. Данный метод имеет серьезные недостатки, не позволяющие использовать ускоренные пучки для коллайдеров или источников, а именно низкий по сравнению с традиционными ускорителями коэффициент захвата электронов в режим ускорения, слишком широкий энергетический спектр (около 10 % при энергии в сотни мегаэлектронвольт без применения специальных мер для модуляции сгустка) и низкую частоту повторения импульсов, лимитированную возможностями лазерных систем с экстремальными параметрами [8–15]. В связи с этим появилось много работ, посвященных предварительной модуляции пучка в плазменном канале, что позволяет примерно в 3–4 раза улучшить спектр ускоренных электронов [16–27].

В связи с вышеизложенным предлагается рассмотреть возможность использования для инъекции в традиционную структуру, построенную на основе ВЧ-резонаторов, сгустков, сгенерированных в лазерно-плазменном источнике. Предполагается, что такой источник электронов позволит создать короткий (от 0.1 до 1.0 пс) сгусток электронов с энергией несколько сотен килоэлектронвольт [28–30] и, в свою очередь, считать этот источник альтернативой фотокатоду.

2. Компоновка ускорителя. Предлагается использовать линейный ВЧ-ускоритель, состоящий из двух секций. Обе секции будут основаны на бипериодической ускоряющей структуре (БУС), работающей на стоячей волне. Ускоряющие структуры для применения со специфическим источником электронов на основе кластерной плазмы ранее не разрабатывались. Для электронных пучков при инжекции характерны нестандартные для инжекции в ускоритель параметры: пикосекундная длительность пучков при разбросе по энергии до 50 %, по некоторым оценкам, высокая энергия инжекции в несколько сотен килоэлектронвольт. Ускоряющая структура в этом случае должна иметь некоторые нетипичные особенности, например, для захвата и согласования короткого пучка не требуется использовать адиабатический группирователь. Однако необходимость захвата в режим ускорения пучка с разбросом по энергии в несколько десятков процентов требует разработки специальной схемы согласования. В структуре придется применять укороченную первую ячейку длиной $(0.5-0.6) \beta_{\text{ф}} \lambda/2$, аналогично тому, как делается в ускорителях с фотопушками, что дает возможность сразу захватить в режим ускорения пучок с большим продольным эмиттансом, так как при влете в ячейку с большой амплитудой поля продольный аксептанс будет достаточно велик. Однако требование к увеличению амплитуды ускоряющего поля, в свою очередь, приведет к повышению мощности, необходимой для питания секции. Из-за высокой амплитуды поля в начале ускорения будет наблюдаться рост амплитуды поперечных колебаний пучка, что потребует большей апертуры канала ускорителя. Это приведет к снижению эффективного шунтового сопротивления БУС и дальнейшему повышению мощности, потребляемой секцией.

Далее ускорение пучка будет происходить в ячейках с медленным ростом фазовой скорости волны, что позволит обеспечить дальнейшее согласование пучка с продольным аксептансом канала. Таким образом, можно условно назвать первую секцию «динамическим согласователем» по аналогии с традиционным динамическим или адиабатическим группирователем, используемым в ВЧ-ускорителях для захвата пучка в режим ускорения, возрастания коэффициента захвата и уменьшения разброса частиц по энергии. Согласователь используется как для захвата пучка, так и для выполнения «гимнастики» пучка для снижения энергетического спектра. Предложенный вариант секции будет включать в себя семь ускоряющих ячеек и шесть ячеек связи. Ранее уже проводился расчет, в котором первая ячейка будет иметь нормированную на скорость света фазовую скорость 0.95, а вторая 0.96 для энергии инжекции 800 кэВ [31]. Остальные пять ускоряющих ячеек будут регулярными с фазовой скоростью, равной $\beta = v/c = 1$, и в одной из этих ячеек должен располагаться ввод СВЧ-мощности.

Вторая — «регулярная» — секция будет состоять из одинаковых ячеек с $\beta = 1$. В этой секции за счет изменения подводимой СВЧ-мощности может регулироваться амплитуда ускоряющего поля, что позволит менять энергию пучка. При этом мощность питания первой секции и распределение поля в ней должны оставаться постоянными.

В рассмотренном варианте ускорителя длина секций составит 33 и 214 см соответственно. Обе секции работают на частоте 3000 МГц. Для поперечной фокусировки пучка потребуется соленоид с относительно большим полем на оси около 0.4 Тл для первой секции и небольшим (0.1 Тл) для второй. Общий вид двухсекционной ускоряющей системы представлен на рис. 1.

3. Методы исследования динамики пучка. Для численного моделирования динамики пучка в линейном ускорителе применялась программа BEAMDULACBL,

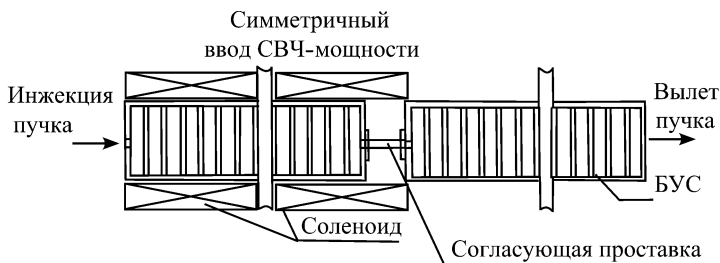


Рис. 1. Общий вид двухсекционной ускоряющей системы

разработанная в МИФИ и позволяющая самосогласованным образом учитывать и квазистатическую, и ВЧ-компоненты собственного поля [32–38]. Квазистатическая компонента собственного поля пучка в BEAMDULAC рассчитывается с помощью метода «крупных частиц», уравнение Пуассона решается методом быстрых преобразований Фурье (БПФ). Учет нагрузки током проводится на основе электродинамического подхода по методу, предложенному Э. С. Масуновым в работе [39], который позволяет рассматривать возбуждение пучком периодических резонаторных и волноводных структур.

4. Динамика пучка в согласователе. Было выполнено численное моделирование динамики для ступков электронов в согласующей секции. Амплитуда ускоряющего поля, достаточная для захвата ступка с энергетическим спектром 50 %, составила 400 кВ/см на оси ускорителя. В начальных трех ячейках, первая из которых была укорочена до $0.6\beta_{\Phi}\lambda/2$ для обеспечения необходимого мгновенного продольного акцептанса, происходит захват пучка в режим ускорения и его продольное согласование с каналом. В следующих двух ячейках с нарастающей фазовой скоростью волны проводится гимнастика ступка для уменьшения разброса по энергии за счет увеличения длины ступка. При этом прирост энергии во всех трех ячейках невелик и не превышает 1 МэВ. Фазовая скорость для первых трех периодов структуры составляет 0.935, 0.975 и 0.99 для энергии инжекции 400 кэВ. Длины ячеек связи выбраны одинаковыми для всех ячеек (4 мм). Общая длина секции составила 32.6 см, энергия на выходе — 8.3 МэВ. Радиус апертуры канала в первой секции — 5 мм.

Далее было осуществлено моделирование при разных энергиях инжекции от 300 до 800 кэВ. В табл. 1 представлены значения энергии на выходе из согласователя W_{out} при разных величинах энергии W_{inj} и энергетического спектра при инжекции $\Delta\gamma/\gamma$ (1, 10, 30 и 50 %), а также оптимальные фазы инжекции $d\phi$. Коэффициент токопрохождения составил 100 % для всех вариантов моделирования. Зависимость энергии на выходе секции от энергии инжекции для различных величин разброса энергии иллюстрирует рис. 2. Значения энергетического спектра на выходе при разных $\Delta\gamma/\gamma$ составляют 0.089, 0.4, 1.3 и 2.1 % соответственно. На рис. 3 приведены фазовые портреты пучка на плоскости (γ, z) , поперечные сечения пучка (x, y) на входе и выходе и энергетические спектры после первой секции.

5. Динамика пучка в регулярной секции. Затем было проведено численное моделирование динамики пучка во второй (регулярной) секции (рис. 4, табл. 2). Секция включает 40 ускоряющих ячеек и 39 ячеек связи, ее общая длина составляет 214 см. Рассмотрим вариант с энергией инжекции в первую секцию 400 кэВ. В ходе моделирования было подобрано оптимальное значение фазы инжекции во вторую

Таблица 1. Результаты численного моделирования динамики пучка в согласователе при различной энергии инжекции W_{inj}

W_{inj} , кэВ	W_{out} , МэВ				dfi			
	1 %	10 %	30 %	50 %	1 %	10 %	30 %	50 %
300	7.81	7.9	7.89	7.86	3.2	2.9	3	3.2
400	7.98	8.04	8	7.93	3.2	3.1	3	3.1
500	8.13	8.3	8.11	8.06	3.2	3.1	3.1	3.1
600	8.25	8.32	8.21	8.17	3.2	3.1	3.1	3.2
700	8.35	8.34	8.31	8.28	3.2	3.2	3.1	3.2
800	8.45	8.45	8.42	8.39	3.2	3.2	3.2	3.2

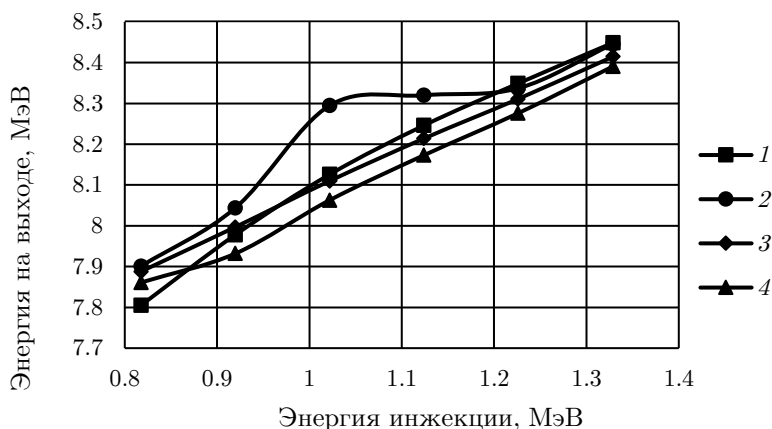


Рис. 2. Зависимость энергии на выходе из согласователя от энергии инжекции при значениях энергетического спектра сгустка при инжекции 1 (1), 10 (2), 30 (3) и 50 % (4)

секцию, равное 2.8. Моделирование также проводилось для разброса энергий при инжекции 1, 10, 30 и 50 %. При амплитуде ускоряющего поля во второй секции 400 кВ/см энергия сгустка на выходе достигает 54.85 МэВ. Коэффициент токопрохождения Kt равен 98 % для всех вариантов моделирования.

Таблица 2. Результаты численного моделирования динамики пучка в регулярной секции (энергия на выходе, энергетический спектр, фаза инжекции)

$\Delta\gamma/\gamma$, %	W_{out} , МэВ	$\Delta\gamma/\gamma$ FWHM, %	dfi
1	54.85	0.031	1.8
10	54.79	0.06	1.8
30	54.79	0.18	1.7
50	54.25	0.34	1.7

Далее была определена зависимость конечной энергии пучка от амплитуды напряженности поля в регулярной секции. Амплитуда менялась в диапазоне от 100 до 400 кВ/см, что позволило варьировать энергию от 19.96 до 54.85 МэВ. Результаты моделирования показаны на рис. 5, I-IV и в табл. 3. Для регулярной секции радиус апертуры канала пришлось увеличить до 7 мм.

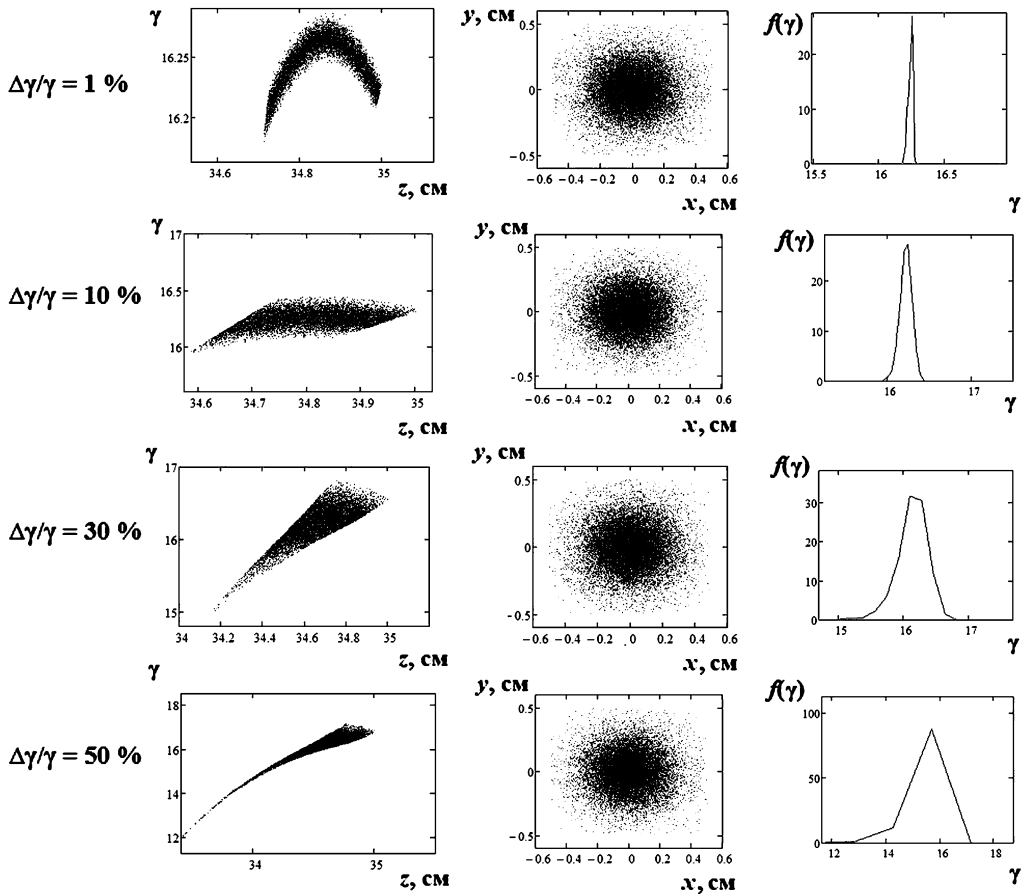


Рис. 3. Фазовые портреты пучка на плоскости (γ, z) , поперечные сечения пучка (x, y) на входе и выходе и энергетические спектры после первой секции

Таблица 3. Значения энергии на выходе регулярной секции при варьировании амплитуды напряженности поля от 100 до 300 кВ/см и величинах энергетического спектра при инжекции 1, 10, 30 и 50 %

E , кВ/см	W_{out} , МэВ							
	1 %	10 %	30 %	50 %	1 %	10 %	30 %	50 %
100	19.96	19.93	19.92	19.72	0.047	0.2	0.45	0.67
200	31.6	31.54	31.51	31.21	0.033	0.13	0.3	0.44
300	43.23	43.17	43.13	42.74	0.029	0.11	0.23	0.38

По результатам численного моделирования динамики пучка можно сделать вывод, что при соблюдении необходимых распределений фазовой скорости в согласователе и достаточном энергетическом акцептансе можно обеспечить захват сгустка с достаточно большим разбросом по энергии и его дальнейшее ускорение, а также значительно уменьшить при этом спектр пучка. Результаты моделирования делают потенциально возможным использование источника на основе кластерной плазмы как альтернативу фотопучкам. Проведенное моделирование носит предварительный характер и будет уточняться на следующем этапе исследовательской программы, в том

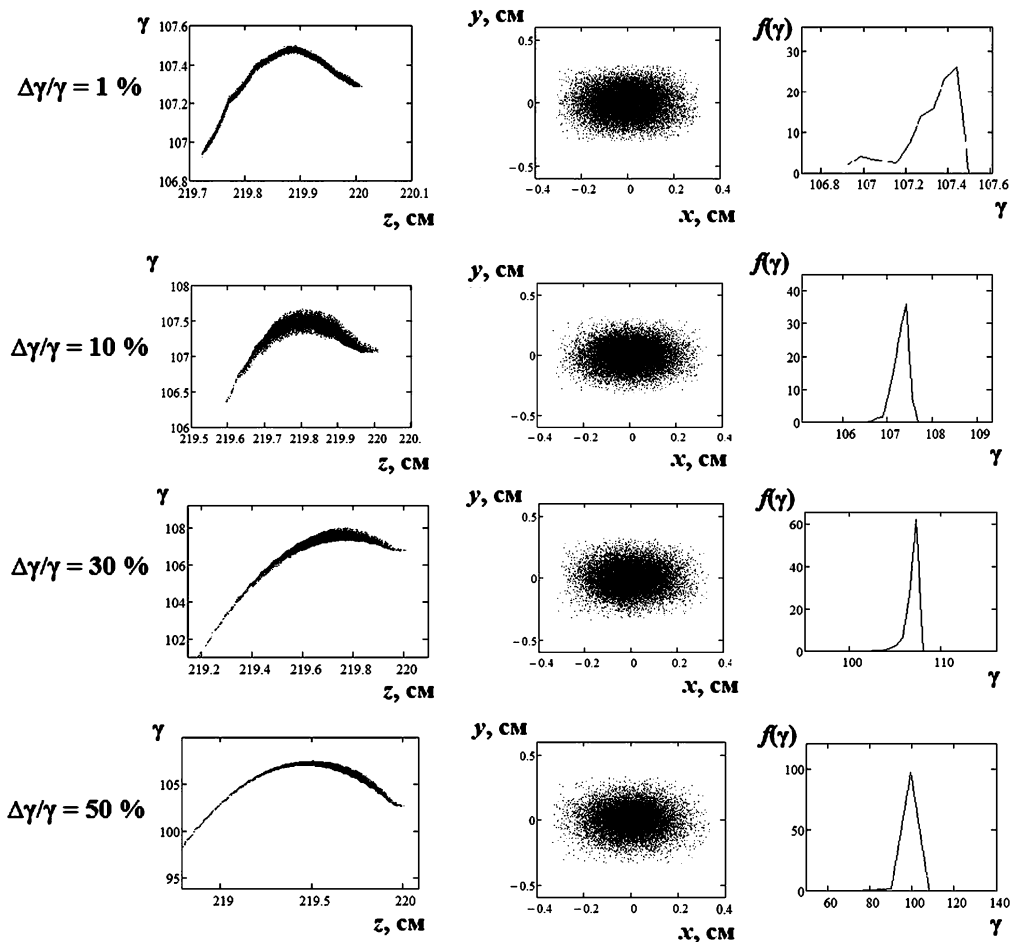


Рис. 4. Результаты численного моделирования динамики пучка в регулярной секции при амплитуде ускоряющего поля 400 кВ/см

числе с учетом полученных экспериментальных данных по новому электронному источнику. Также планируется провести оптимизацию электродинамических характеристик секций.

6. Заключение. Были рассмотрены результаты численного моделирования динамики пучка, инжектируемого из лазерно-плазменного канала, в линейном ВЧ-ускорителе. Было показано, что захват в режим ускорения и эффективное дальнейшее ускорение коротких (от 0.1 до 1.0 пс) ступков электронов с энергией в несколько сотен килоэлектронвольт в данной системе возможны даже при очень большом начальном разбросе по энергии. Путем оптимизации распределения фазовой скорости в ячейках, а также фаз инжекции в секции были определены ожидаемые значения энергетического спектра (не выше 1 % при начальной величине $\Delta\gamma/\gamma = 50\%$). Полученные результаты позволяют перейти к следующему этапу исследовательской программы и ожидать экспериментальные данные по источнику, а также начать разработку электродинамических моделей секций ускорителя.

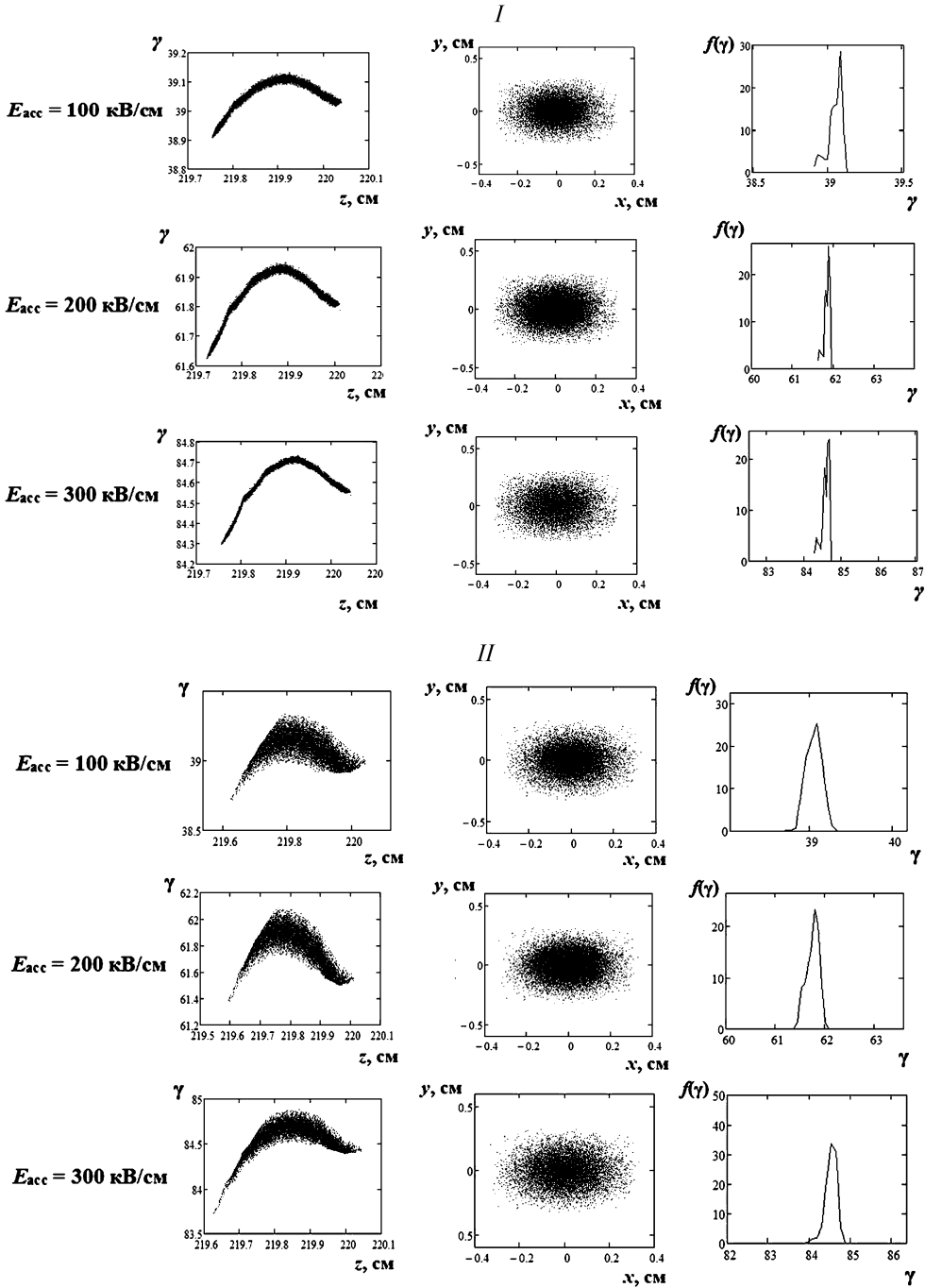


Рис. 5. Результаты численного моделирования динамики пучка в регулярной секции при разных амплитудах напряженности поля (начальный разброс по энергии $\Delta\gamma/\gamma = 1$ (I), 10 (II), 30 (III) и 50 % (IV))

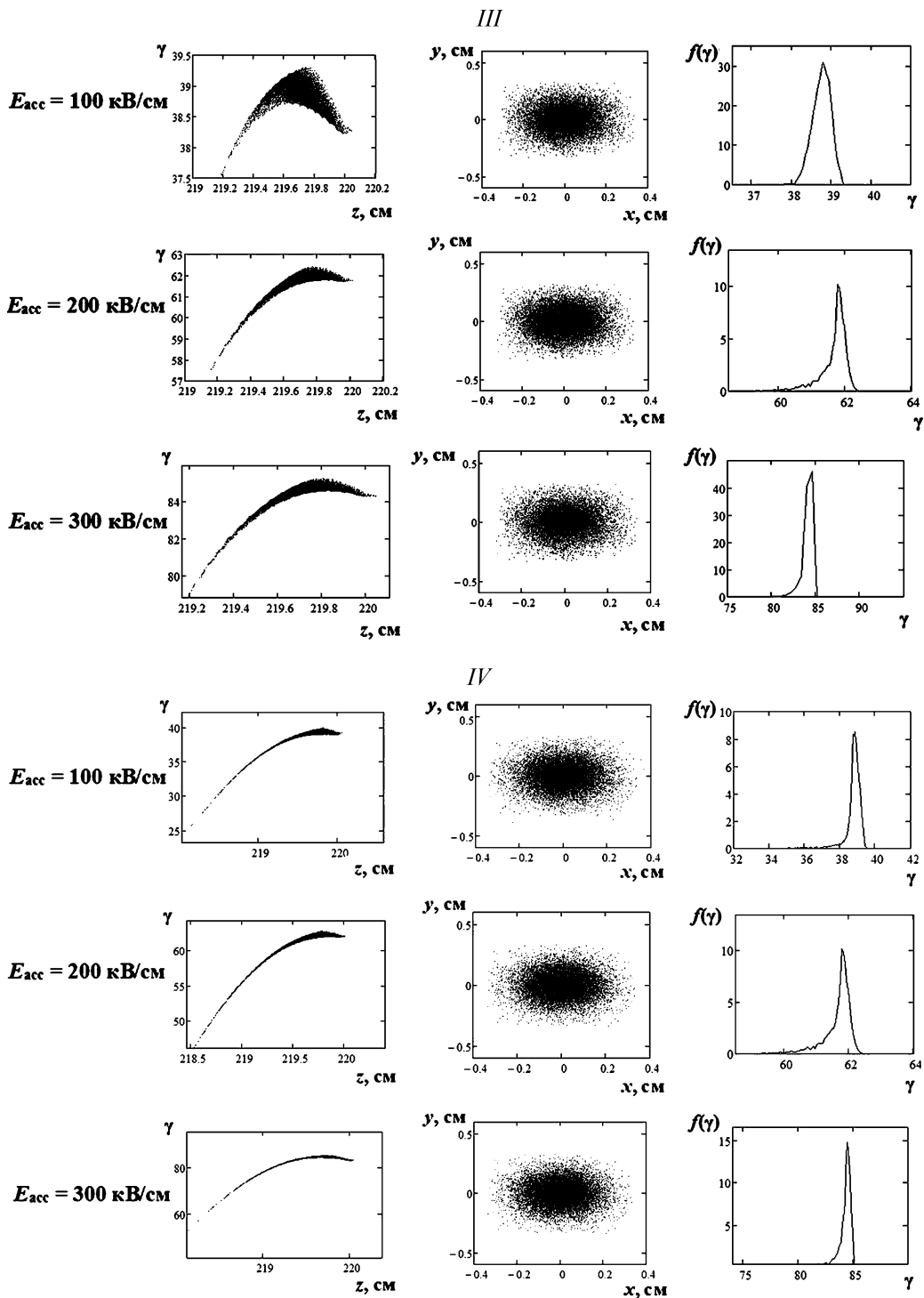


Рис. 5. Окончание

Литература

1. *Brinker F.* Commissioning of the European XFEL injector // Proceedings of the Intern. Particle Accel. Conference IPAC'16. Busan, 2016. P. 1044–1047.
2. *Dowell D. H., Akre R., Ding Y., Emma P., Frisch J., Gilevich S., Hays G., Hering Ph., Huang Z., Iverson R., Limborg-Deprey C., Loos H., Miahnahri A., Schmerge J., Turner J., Welch J., White W., Wu J., Froelich L., Limberg T., Prat E.* Commissioning results of the LCLS injector // Proceedings of 29th Intern. Free Electron Laser Conference FEL'2007. Novosibirsk, 2007. P. 276–278.
3. *Feinberg Ya. B.* Particles acceleration in plasma // Sov. Atomic Energy. 1959. N 6. 431 p.
4. *Muggli P., Kimura W., Kallos E., Katsouleas T., Kusche K., Pavlishin I., Stolyarov D., Yakimenko V.* Plasma wakefield acceleration experiments using two subpicosecond electron bunches // Proceedings of 22nd Particle Accel. Conference PAC'07. Albuquerque, 2007. P. 3073–3075.
5. *Hogan M. J., Barnes C. D., Clayton C. E., Decker F. J., Deng S., Emma P., Huang C., Iverson R. H., Johnson D. K., Joshi C., Katsouleas T., Krejcik P., Lu W., Marsh K. A., Mori W. B., Muggli P., O'Connell C. L., Oz E., Siemann R. H., Walz D.* Multi-GeV energy gain in a plasma-wakefield accelerator // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. Iss. 054802. P. 1–4.
6. *Tajima T., Dawson J. M.* Laser electron accelerator // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. Iss. 4. P. 267–270.
7. *Leemans W., Esarey E.* Laser-driven plasma-wave electron accelerators // Phys. Today. 2009. Vol. 62. P. 44.
8. *Leurent V., Michel P., Clayton C. E., Pollock B., Doepfner T., Ralph J., Pak A., Wang T., Joshi C., Tynan G., Divol L., Palaastro J., Glenzer S., Froula D.* Experimental demonstration of X-ray betatron radiation spectrum from laser accelerated electron beams // Proceedings of 11th European Particle Accel. Conference EPAC'08. Genoa, 2008. P. 2809–2811.
9. *Wiggins S. M., Welsh G. H., Wiggins S. M., Welsh G. H., Issac R. C., Brunetti E., Shanks R. P., Cipiccia S., Anania M. P., Manahan G. G., Aniculaesei C., Ersfeld B., Islam M. R., Jaroszynski D. A., Gillespie W. A., MacLeod A. M.* The production of high quality electron beams in the ALPHA-X laser wakefield accelerator // Proceedings of 2nd Intern. Particle Accel. Conference IPAC'11. Geneva, 2011. P. 1956–1958.
10. *Leemans W., Esarey E., Geddes C. G. R., Schroeder C. B., Toth Cs., Van Tilborg J., Cary J. R., Nieter C.* Mono-energetic beams from laser plasma interactions // Proceedings of Particle Accel. Conference PAC'05. Knoxville, 2005. P. 69–71.
11. *Kotaki H., Hayashi Y., Kawase K., Mori M., Kando M., Homma T., Koga J. K., Bulanov S. V.* Control and pulsewidth-measurement of laser accelerated electron beams // Proceedings of the 1st Intern. Particle Accel. Conference IPAC'10. Kyoto, 2010. P. 3608–3610.
12. *Yamazaki A., Maekawa A., Tsujii R., Uesaka M., Kinoshita K., Hosokai T., Zhidkov A.* Manipulation of electron beam generation with modified magnetic circuit on laser-wakefield acceleration // Proceedings of 22nd Particle Accel. Conference PAC'07. Albuquerque, 2007. P. 2790–2792.
13. *Clayton C., Ralph J., Albert F., Fonseca R., Glenzer S., Joshi C., Lu W., Marsh K., Martins S., Mori W., Pak A., Tsung F., Pollock B., Ross J., Silva L., Froula D.* Laser wakefield acceleration beyond 1 GeV using ionization induced injection // Proceedings of 11th Particle Accel. Conference PAC'11. Rochester, 2011. P. 707–711.
14. *Hubbard R. F., Gordon D. F., Jones T. G., Penano J. R., Sprangle P., Ting A., Hafzi B., Zigler A., Kaganovich D.* Simulation of accelerated electron spectra in laser wakefield accelerators // Proceedings of Particle Accel. Conference PAC'03. Portland, 2003. P. 716–718.
15. *Malka V., Faure J., Glinec Y., Lifschitz A.* Laser-plasma wakefield acceleration: concepts, tests and premises // Proceedings of European Particle Accel. Conference EPAC'06. Edinburgh, 2006. P. 10–13.
16. *Bulanov S., Naumova N., Pegoraro F., Sakai J.* Particle injection into the wave acceleration phase due to nonlinear wake wave breaking // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. N R5257.
17. *Bulanov S. V., Brantov A. V., Esirkepov T. Zh., Kando M., Kotaki H., Bychenkov V.* Controlled electron injection into the wake wave using plasma density inhomogeneity // Physics of Plasmas. 2008. Vol. 15. N 073111.
18. *Bulanov S. V., Tajima T., Esirkepov T., Pirozhkov A., Jinglong Ma, Kando M., Fukuda Y., Chen L., Daito I., Ogura K., Homma T., Hayashi Y., Kotaki H., Sagisaka A., Mori M., Koga J., Kawachi T., Daido H., Kimura T., Kato Y.* Frequency multiplication of light back reflected from a relativistic wake wave // Phys. of Plasmas. 2007. Vol. 14. N 123106.
19. *Tomassini P., Galimberti M., Giuliotti A., Giuliotti D., Gizzi L. A., Labate L., Pegoraro F.* Production of high-quality electron beams in numerical experiments of laser wakefield acceleration with longitudinal wave breaking // Phys. Rev. Spec. Topics Acc. and Beams. 2003. Vol. 6. N 121301.
20. *Umstadter D., Kim J. K., Dodd E.* Laser injection of ultrashort electron pulses into wakefield plasma waves // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. P. 2073–2076.

21. *Esarey E., Hubbard R. F., Leemans W. P., Ting A., Sprangle P.* Electron injection into plasma wakefields by colliding laser pulses // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 79. P. 2682.
22. *Esarey E., Leemans W. P.* Nonparaxial propagation of ultrashort laser pulses in plasma channels // *Phys. Rev. E.* 1999. Vol. 59. P. 1082–1095.
23. *Polozov S. M.* A possible scheme of electron beam bunching in laser plasma accelerators // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* 2013. Vol. 729. P. 517–521.
24. *Polozov S. M.* 2D beam dynamics simulation in linear mode LPWA channel with pre-modulation stage // *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations.* 2013. Vol. 6. N 88. P. 29–34.
25. *Polozov S. M., Rashchikov V. I.* Capturing coefficient increase and energy spread decrease in LPWA // *Journal of Physics: Conference Series.* 2016. Vol. 747. N 012075.
26. *Polozov S. M., Rashchikov V. I.* Longitudinal motion stability of electrons inside the plasma channel of LPWA // *Cybernetics and Physics.* 2018. Vol. 7 (4). P. 228–232.
27. *Polozov S. M., Rashchikov V. I.* Simulation studies on the radiofrequency gun saturated emission // *Cybernetics and Physics.* 2020. Vol. 9 (2). P. 103–106.
28. *Semenov T. A., Zhvaniya I., Ivanov K., Dzhidzhoev M. S., Volkov R., Tsybalov I., Savelev A., Gordienko V. M.* Electron acceleration up to MeV level under nonlinear interaction of subterawatt femtosecond laser chirped pulses with Kr clusters // *Laser Phys. Lett.* 2019. Vol. 16. N 115401.
29. *Shkurinov A. P., Balakin A., Dzhidzhoev M. S., Gordienko V., Esaulkov M., Zhvaniya I., Ivanov K., Kotelnikov I., Kuzechkin N., Ozheredov I., Panchenko V., Savelev A. B., Smirnov M., Solyankin P.* Interaction of high-intensity femtosecond radiation with gas cluster beam: effect of pulse duration on joint terahertz and X-ray emission // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2017. Vol. 7. P. 70–79.
30. *Shkurinov A. P., Balakin A., Gildenburg V., Gordienko V., Kuzechkin N., Yiming Zhu, Solyankin P., Pavlichenko I., Semenov T.* Directional terahertz beam generation under interaction of an intense femtosecond laser pulse with a cluster jet // *Journal of the Optical Society of America.* 2021. Vol. B 38 (11). N 3515.
31. *Polozov S. M., Rashchikov V. I.* Simulation studies of beam dynamics in 50 MeV linear accelerator with laser plasma electron gun // *Cybernetics and Physics.* 2021. Vol. 10 (4). P. 260–264.
32. *Masunov E. S., Polozov S. M.* High intensity ion beams in rf undulator linac // *Phys. Rev. ST.* 2008. Vol. AB 11. N 074201.
33. *Masunov E. S., Polozov S. M.* The new version of BEAMDULAC code for high intensity ion beam dynamics // *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations.* 2006. Vol. 3 (47). P. 119–121.
34. *Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2006. Vol. A 558. P. 184–187.
35. *Воронков А. В., Масунов Э. С., Полозов С. М., Ращиков В. И.* Расчет динамики пучка в ускорителях, работающих на бегущей волне, с учетом эффекта нагрузки током // *Атомная энергия.* 2019. Т. 109. Вып. 2. С. 84–89.
36. *Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V.* Stationary and transient beam dynamics simulation results comparison for traveling wave electron linac with beam loading // *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations.* 2012. Vol. 4 (80). P. 96–99.
37. *Kluchevskaia Yu. D., Polozov S. M.* Beam dynamics simulation in a linear accelerator for CERN Future Circular Collider // *Cybernetics and Physics.* 2020. Vol. 9 (2). P. 98–102.
38. *Ашанин И. А., Ключевская Ю. Д., Махоро А. А., Механикова В. Ю., Мосолова О. А., Полозов С. М., Проников А. И., Ращиков В. И.* Динамика пучка в линейном ускорителе-инжекторе Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4 // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* 2019. Т. 15. Вып. 1. С. 126–139. [https:// doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110](https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110)
39. *Масунов Э. С.* Эффекты нагрузки током в ускорителях заряженных частиц. М.: Изд-во МИФИ, 1999. 122 с.

Статья поступила в редакцию 2 августа 2022 г.

Статья принята к печати 1 сентября 2022 г.

Контактная информация:

Ашанин Илья Андреевич — ilya.ashanin@mail.ru

Ключевская Юлия Денисовна — канд. техн. наук; kluchevskaia@mail.ru

Полозов Сергей Маркович — д-р физ.-мат. наук; smpolozov@mephi.ru

Ращиков Владимир Иванович — канд. техн. наук; virashchikov@mephi.ru

Linear electron accelerator for energy 8–50 MeV with injection from an electron source based on cluster plasma systems*

I. A. Ashanin, Yu. D. Kluchevskaia, S. M. Polozov, V. I. Rashikov

National Research Nuclear University “MEPhI”, 31, Kashirskoe sh., Moscow, 115409, Russian Federation

For citation: Ashanin I. A., Kluchevskaia Yu. D., Polozov S. M., Rashikov V. I. Linear electron accelerator for energy 8–50 MeV with injection from an electron source based on cluster plasma systems. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 473–486. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.403> (In Russian)

For many years, one of the key problems of modern accelerator physics has been an increase of the rate of the energy gain in RF linear electron accelerators. The physical limits of the accelerating field intensity for metallic accelerating structures have been practically reached; therefore, new acceleration schemes are being considered, primarily acceleration in plasma and wakefield acceleration. The second aim is the generation of ultrashort (100 fs and less) electron bunches, for which RF photoguns are traditionally used. In this case, for RF photoguns, a serious problem that limits the intensity of electrons in a bunch is the influence of the own space charge during emission and acceleration in the near-cathode region, where the beam is weakly relativistic and the influence of the space charge on its dynamics plays the determinative role. The possibility of using a plasma cathode source as an injector for RF accelerator will be considered. In the future, this may make it possible to bypass the limitations inherent in RF photoguns (sufficient influence of the space charge on the beam dynamics in the near-cathode region) and acceleration in the laser-plasma channel (low electron capture coefficient in the acceleration mode, wide energy spectrum — 10 % or more at energies of tens and hundreds of mega-electrons). It is proposed to develop a combined accelerator in which a bunch generated in a laser-plasma channel is injected into a traditional metal structure. It is supposed that it could be possible to generate a short (from 0.1 to 1.0 ps) electron bunches with an energy of several hundred kiloelectrons, which will make it possible to consider such source as an alternative to the photocathode. Next, the beam must be captured in the acceleration mode in a normally conducting section and accelerated to an energy of 50 MeV with the possibility of energy tuning. The features of such accelerator, the features of the electron bunch capturing in the acceleration mode, and the possible values of the energy spectrum in such a system will be considered.

Keywords: synchrotron radiation, free electron laser, accelerating structure, beam dynamics, transverse emittance.

References

1. Brinker F. Commissioning of the European XFEL injector. *Proceedings of the Intern. Particle Accel. Conference IPAC'16*. Busan, 2016, pp. 1044–1047.
2. Dowell D. H., Akre R., Ding Y., Emma P., Frisch J., Gilevich S., Hays G., Hering Ph., Huang Z., Iverson R., Limborg-Deprey C., Loos H., Miahnahri A., Schmerge J., Turner J., Welch J., White W., Wu J., Froelich L., Limberg T., Prat E. Commissioning results of the LCLS injector. *Proceedings of 29th Intern. Free Electron Laser Conference FEL'2007*. Novosibirsk, 2007, pp. 276–278.
3. Feinberg Ya. B. Particles acceleration in plasma. *Sov. Atomic Energy*, 1959, no. 6, 431 p.
4. Muggli P., Kimura W., Kallos E., Katsouleas T., Kusche K., Pavlishin I., Stolyarov D., Yakimenko V. Plasma wakefield acceleration experiments using two subpicosecond electron bunches. *Proceedings of 22nd Particle Accel. Conference PAC'07*. Albuquerque, 2007, pp. 3073–3075.

* This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (contract N 075-15-2021-1358 dated September 12, 2021).

5. Hogan M. J., Barnes C. D., Clayton C. E., Decker F. J., Deng S., Emma P., C. Huang, Iverson R. H., Johnson D. K., Joshi C., Katsouleas T., Krejcik P., Lu W., Marsh K. A., Mori W. B., Muggli P., O'Connell C. L., Oz E., Siemann R. H., Walz D. Multi-GeV energy gain in a plasma-wakefield accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 95, iss. 054802, pp. 1–4.
6. Tajima T., Dawson J. M. Laser electron accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, vol. 43, iss. 4, pp. 267–270.
7. Leemans W., Esarey E. Laser-driven plasma-wave electron accelerators. *Phys. Today*, 2009, vol. 62, p. 44.
8. Leurent V., Michel P., Clayton C. E., Pollock B., Doepfner T., Ralph J., Pak A., Wang T., Joshi C., Tynan G., Divol L., Palastrò J., Glenzer S., Froula D. Experimental demonstration of X-ray betatron radiation spectrum from laser accelerated electron beams. *Proceedings of 11th European Particle Accel. Conference EPAC'08*. Genoa, 2008, pp. 2809–2811.
9. Wiggins S. M., Welsh G. H., Wiggins S. M., Welsh G. H., Issac R. C., Brunetti E., Shanks R. P., Cipiccia S., Anania M. P., Manahan G. G., Aniculaesi C., Ersfeld B., Islam M. R., Jaroszynski D. A., Gillespie W. A., MacLeod A. M. The production of high quality electron beams in the ALPHA-X laser wakefield accelerator. *Proceedings of 2nd Intern. Particle Accel. Conference IPAC'11*. Geneva, 2011, pp. 1956–1958.
10. Leemans W., Esarey E., Geddes C. G. R., Schroeder C. B., Toth Cs., Van Tilborg J., Cary J. R., Nieter C. Mono-energetic beams from laser plasma interactions. *Proceedings of Particle Accel. Conference PAC'05*. Knoxville, 2005, pp. 69–71.
11. Kotaki H., Hayashi Y., Kawase K., Mori M., Kando M., Homma T., Koga J. K., Bulanov S. V. Control and pulsewidth-measurement of laser accelerated electron beams. *Proceedings of the 1st Intern. Particle Accel. Conference IPAC'10*. Kyoto, 2010, pp. 3608–3610.
12. Yamazaki A., Maekawa A., Tsujii R., Uesaka M., Kinoshita K., Hosokai T., Zhidkov A. Manipulation of electron beam generation with modified magnetic circuit on laser-wakefield acceleration. *Proceedings of 22nd Particle Accel. Conference PAC'07*. Albuquerque, 2007, pp. 2790–2792.
13. Clayton C., Ralph J., Albert F., Fonseca R., Glenzer S., Joshi C., Lu W., Marsh K., Martins S., Mori W., Pak A., Tsung F., Pollock B., Ross J., Silva L., Froula D. Laser wakefield acceleration beyond 1 GeV using ionization induced injection. *Proceedings of 11th Particle Accel. Conference PAC'11*. Rochester, 2011, pp. 707–711.
14. Hubbard R. F., Gordon D. F., Jones T. G., Penano J. R., Sprangle P., Ting A., Hafizi B., Zigler A., Kaganovich D. Simulation of accelerated electron spectra in laser wakefield accelerators. *Proceedings of Particle Accel. Conference PAC'03*. Portland, 2003, pp. 716–718.
15. Malka V., Faure J., Glinec Y., Lifschitz A. Laser-plasma wakefield acceleration: concepts, tests and premises. *Proceedings of European Particle Accel. Conference EPAC'06*. Edinburgh, 2006, pp. 10–13.
16. Bulanov S., Naumova N., Pegoraro F., Sakai J. Particle injection into the wave acceleration phase due to nonlinear wake wave breaking. *Phys. Rev. E*, 1998, vol. 58, no. R5257.
17. Bulanov S. V., Brantov A. V., Esirkepov T. Zh., Kando M., Kotaki H., Bychenkov V. Controlled electron injection into the wake wave using plasma density inhomogeneity. *Physics of Plasmas*, 2008, vol. 15, no. 073111.
18. Bulanov S. V., Tajima T., Esirkepov T., Pirozhkov A., Jinglong Ma, Kando M., Fukuda Y., Chen L., Daito I., Ogura K., Homma T., Hayashi Y., Kotaki H., Sagisaka A., Mori M., Koga J., Kawachi T., Daido H., Kimura T., Kato Y. Frequency multiplication of light back reflected from a relativistic wake wave. *Phys. of Plasmas*, 2007, vol. 14, no. 123106.
19. Tomassini P., Galimberti M., Giulietti D., Gizzi L. A., Labate L., Pegoraro F. Production of high-quality electron beams in numerical experiments of laser wakefield acceleration with longitudinal wave breaking. *Phys. Rev. Spec. Topics Acc. and Beams*, 2003, vol. 6, no. 121301.
20. Umstadter D., Kim J. K., Dodd E. Laser injection of ultrashort electron pulses into wakefield plasma waves. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 76, pp. 2073–2076.
21. Esarey E., Hubbard R. F., Leemans W. P., Ting A., Sprangle P. Electron injection into plasma wakefields by colliding laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 79, p. 2682.
22. Esarey E., Leemans W. P. Nonparaxial propagation of ultrashort laser pulses in plasma channels. *Phys. Rev. E*, 1999, vol. 59, pp. 1082–1095.
23. Polozov S. M. A possible scheme of electron beam bunching in laser plasma accelerators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2013, vol. 729, pp. 517–521.
24. Polozov S. M. 2D beam dynamics simulation in linear mode LPWA channel with pre-modulation stage. *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations*, 2013, vol. 6, no. 88, pp. 29–34.
25. Polozov S. M., Rashchikov V. I. Capturing coefficient increase and energy spread decrease in LPWA. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 747, no. 012075.

26. Polozov S. M., Rashchikov V. I. Longitudinal motion stability of electrons inside the plasma channel of LPWA. *Cybernetics and Physics*, 2018, vol. 7 (4), pp. 228–232.
27. Polozov S. M., Rashchikov V. I. Simulation studies on the radiofrequency gun saturated emission. *Cybernetics and Physics*, 2020, vol. 9 (2), pp. 103–106.
28. Semenov T. A., Zhvaniya I., Ivanov K., Dzhidzhoev M. S., Volkov R., Tsymbalov I., Savelev A., Gordienko V. M. Electron acceleration up to MeV level under nonlinear interaction of subterawatt femtosecond laser chirped pulses with Kr clusters. *Laser Phys. Lett.*, 2019, vol. 16, no. 115401.
29. Shkurinov A. P., Balakin A., Dzhidzhoev M. S., Gordienko V., Esaulkov M., Zhvaniya I., Ivanov K., Kotelnikov I., Kuzechkin N., Ozheredov I., Panchenko V., Savelev A. B., Smirnov M., Solyankin P. Interaction of high-intensity femtosecond radiation with gas cluster beam: effect of pulse duration on joint terahertz and X-ray emission. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2017, vol. 7, pp. 70–79.
30. Shkurinov A. P., Balakin A., Gildenburg V., Gordienko V., Kuzechkin N., Yiming Zhu, Solyankin P., Pavlichenko I., Semenov T. Directional terahertz beam generation under interaction of an intense femtosecond laser pulse with a cluster jet. *Journal of the Optical Society of America*, 2021, vol. B 38 (11), no. 3515.
31. Polozov S. M., Rashchikov V. I. Simulation studies of beam dynamics in 50 MeV linear accelerator with laser plasma electron gun. *Cybernetics and Physics*, 2021, vol. 10 (4), pp. 260–264.
32. Masunov E. S., Polozov S. M. High intensity ion beams in rf undulator linac. *Phys. Rev. ST*, 2008, vol. AB 11, no. 074201.
33. Masunov E. S., Polozov S. M. The new version of BEAMDULAC code for high intensity ion beam dynamics. *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations*, 2006, vol. 3 (47), pp. 119–121.
34. Masunov E. S., Polozov S. M. BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, vol. A 558, pp. 184–187.
35. Voronkov A. V., Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Raschet dinamiki puchka v uskoriteliakh, rabotaiushchikh na begushchei volne, s uchetom effekta nagruzki tokom [Beam dynamics simulation in accelerators operating on a traveling wave, taking into account the beam loading effect]. *Atomic Energy*, 2010, vol. 109 (2), pp. 84–89. (In Russian)
36. Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V. Stationary and transient beam dynamics simulation results comparison for traveling wave electron linac with beam loading. *Problems of Atomic Science and Technology. Series Nuclear Physics Investigations*, 2012, vol. 4 (80), pp. 96–99.
37. Kluchevskaia Yu. D., Polozov S. M. Beam dynamics simulation in a linear accelerator for CERN Future Circular Collider. *Cybernetics and Physics*, 2020, vol. 9 (2), pp. 98–102.
38. Ashanin I. A., Kluchevskaia Yu. D., Makhoro A. A., Mechanikova V. Yu., Mosolova O. A., Polozov S. M., Pronikov A. I., Rashchikov V. I. Dinamika puchka v lineinom uskoritele-inzhektore Spetsializirovannogo istochnika sinkhrotronnogo izlucheniia 4-go pokoleniia ISSI-4 [Beam dynamics simulation in the linear accelerator used as an injector for the 4th generation Specialized Synchrotron Radiation Source SSRS-4]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2019, vol. 15, iss. 1, pp. 126–139. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.110> (In Russian)
39. Masunov E. S. *Effekty nagruzki tokom v uskoriteliakh zariazhennykh chastits [Beam loading effects in particle accelerators]*. Moscow, Office MEPhI Publ., 1999, 122 p. (In Russian)

Received: August 2, 2022.

Accepted: September 1, 2022.

Authors' information:

Ilya A. Ashanin — ilya.ashanin@mail.ru

Yulia D. Kluchevskaia — PhD in Engineering Sciences; kluchevskaia@mail.ru

Sergey M. Polozov — Dr. Sci. in Physics and Mathematics; smpolozov@mephi.ru

Vladimir I. Rashchikov — PhD in Engineering Sciences; virashchkov@mephi.ru