

Система сканирования пучка промышленного ускорителя электронов

М. А. Борисов,^{1,2,*} В. И. Шведун^{1,2,†}¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ» (ООО «ЛЭУ МГУ»)

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5

(Поступила в редакцию 10.03.2023; после доработки 18.01.2024; подписана в печать 31.01.2024)

Для создания компактной системы сканирования пучка поперек конвейера в данной работе рассматривается горизонтальное размещение ускорителя с магнитной системой поворота пучка на 90° . Было произведено трехмерное моделирование магнитной системы и динамики электронов в ней. Также были получены дозовые распределения в приповерхностной области облучаемого объекта, на основе которых определены оптимальные законы изменения тока и напряжения магнита развертки, обеспечивающие требуемые условия облучения продукта.

PACS: 29.20.-c, 29.27.-a, 29.27.Fh УДК: 621.384.6.01

Ключевые слова: ускорители электронов, магнитная система сканирования, моделирование.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2421001](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2421001)

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов с энергией пучка до 10 МэВ и мощностью от единиц до десятков киловатт находят широкое применение для различных целей, например антимицробной обработки пищевой продукции, стерилизации медицинских изделий, модификации свойств материалов и т.п. Все эти применения требуют использования системы сканирования пучка для облучения движущейся по конвейеру продукции. Наиболее простой является система сканирования с использованием одного магнита с переменным полем (магнита развертки), поворачивающего пучок в пределах 30° относительно оси, камеры развертки с выпускным окном и, возможно, установленным на ее выходе корректирующим магнитом, направляющим пучок на продукцию параллельно оси, независимо от угла поворота.

Подобная схема удобна для бокового облучения движущейся по конвейеру продукции. Однако боковое облучение подходит далеко не для всех видов продукции. Более универсальной является схема облучения с вертикально направленным пучком, причем для обеспечения высокой производительности, высокой эффективности облучения и снижения риска остановки процесса обработки из-за поломки ускорителя желательнее облучать продукцию сверху и снизу двумя ускорителями. Подобная схема с вертикальным расположением двух ускорителей реализована, например, в проекте, описанном в [1]. Однако вертикальное расположение двух ускорителей приводит к большой высоте радиационно-защищенной части здания, соответственно, к боль-

шим затратам на капитальное строительство, последующее обслуживание и ремонт.

Известны схемы с горизонтальным размещением ускорителя с магнитной системой поворота пучка, после которой располагается классическая система сканирования [2]. Такие схемы также требуют многоуровневой конструкции здания.

В работе [3] была предложена схема сканирования пучка с одновременным поворотом пучка на 90° , эта схема была использована и в других проектах, например для ускорителя РОДОТРОН [4]. В основе схемы лежит сканирование пучка магнитом развертки относительно горизонтального направления, как и в классической схеме, с последующим поворотом сканируемого пучка магнитом с постоянным полем, далеко выходящим за пределы полюсного наконечника; далее, система сканирования с поворотом в краевом поле. Подобная схема весьма компактна в вертикальном направлении, что позволяет разместить в пределах одного этажа конвейер и два ускорителя, обеспечивающих облучение продукции сверху и снизу. Также следует упомянуть систему сканирования «Электрон-10», разработанную в НИИЭФА имени Д.В. Ефремова, позволяющую отклонять пучок на 90° от горизонтально расположенного ускорителя.

В настоящей работе предложена модификация схемы [3], более компактная в направлении сканирования, выполнено численное моделирование системы магнитов, динамики пучка и процесса формирования равномерного поля облучения.

1. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ

1.1. Требования к системе сканирования

Оптимизация системы сканирования проводилась нами исходя из следующих требований.

* E-mail: muchmaxx@gmail.com† E-mail: shvedunov@gmail.com

- Система должна обеспечивать сканирование пучка электронов с максимальной энергией 10 МэВ с одновременным поворотом его на угол 90° относительно оси ускорителя с максимальной длиной сканирования 70 см. Так как угол поворота частиц в магнитном поле пропорционален импульсу частиц, полученную магнитную систему можно использовать для менее энергичных частиц за счет снижения уровня магнитного поля. Ширина сканирования может регулироваться за счет изменения диапазона изменения поля магнита развертки.
- Система должна быть оптимизирована по массогабаритным характеристикам. Учитывая типичные размеры помещения ускорителя и лабиринта с конвейером, габариты системы ограничиваем значениями: 150 см по направлению сканирования и 75 см по высоте.
- Характеристики магнита развертки для сообщения малых доз (без изменения тока и энергии пучка) некоторым продуктам должны обеспечивать возможность сканирования с частотой вплоть до 20 Гц, при разумных требованиях к параметрам его источника питания. В данной работе в качестве таких требований взяты максимальные значения тока и напряжения 20 А и 60 В соответственно.
- Система сканирования должна обеспечивать равномерность распределения сообщаемой дозы на поверхности облучаемого объекта в соответствии с нормативными требованиями¹ с учетом энергетического спектра сканируемого пучка. Так, из-за поворота пучка на 90° низкоэнергетичный «хвост» может иметь широкий диапазон координат вылета и давать определенный вклад в итоговое распределение.

1.2. Методика расчета

В классической системе сканирования с помощью одного магнита развертки, обеспечивающего небольшие углы отклонения относительно оси пучка, оптические и дисперсионные свойства системы слабо изменяются при перемещении пучка вдоль направления сканирования. Расчеты такой системы в хорошем приближении могут быть выполнены с использованием аналитических выражений. Особенностью системы, изучаемой в данной работе, являются существенные изменения ее оптических и дисперсионных свойств в пределах длины сканирования, соответственно, сильные изменения

распределения тока пучка в направлении движения конвейера. В этой связи задача получения равномерного распределения дозы, сообщаемой продукции, требует детального численного моделирования.

Расчеты магнитных полей системы сканирования выполнялись с помощью программы CST². Расчеты проводились на тетраэдральной сетке для половины системы с учетом ее зеркальной симметрии.

На начальном этапе оптимизации для увеличения скорости счета расчет поля, создаваемого обмотками одного из магнитов, выполнялся при выключенных обмотках второго магнита, но с учетом присутствия его ярма. Рассчитанные распределения полей импортировались в программу расчета динамики пучка. Моделирование процесса сканирования осуществлялось посредством изменения амплитуды поля магнита развертки умножением величины магнитной индукции в массиве распределения его поля на некоторый коэффициент, т.е. без пересчета распределения поля для различных значений тока обмоток. Силы пространственного заряда при этом не учитывались.

Для окончательных расчетов системы сканирования был разработан алгоритм оптимизации, в котором программа расчета динамики пучка осуществляет изменение характеристик магнитов — тока обмоток, взаимного положения магнитов, геометрии полюсов, иницируя пересчет распределений магнитного поля программой CST. Данный алгоритм заметно увеличивает время счета, но позволяет автоматизировать процесс оптимизации и обеспечивает лучшие результаты оптимизации.

Расчеты проводились как для монохроматического пучка электронов с энергией 10 МэВ, так и для ансамбля частиц, полученного в результате моделирования динамики пучка с помощью программы CST в линейном ускорителе.

1.3. Описание системы сканирования

Общий вид системы сканирования, синтезированной в результате оптимизации, вместе с направлением координатных осей показан на рис. 1, а. Синим и красным цветами показаны ярма поворотного магнита и магнита развертки соответственно, состоящие из железа. Начало координат находится в центре магнита развертки. Поворот частиц происходит в плоскости $Y-Z$, вдоль оси Z осуществляется сканирование пучка. Ось X соответствует направлению движения конвейера. Вакуумная камера располагается между полюсами магнита. Траектории пучка для различных углов поворота приведены на рис. 1, б. Основные параметры системы даны в табл. 1.

¹ ГОСТ 34157-2017, Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением

² CST, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>

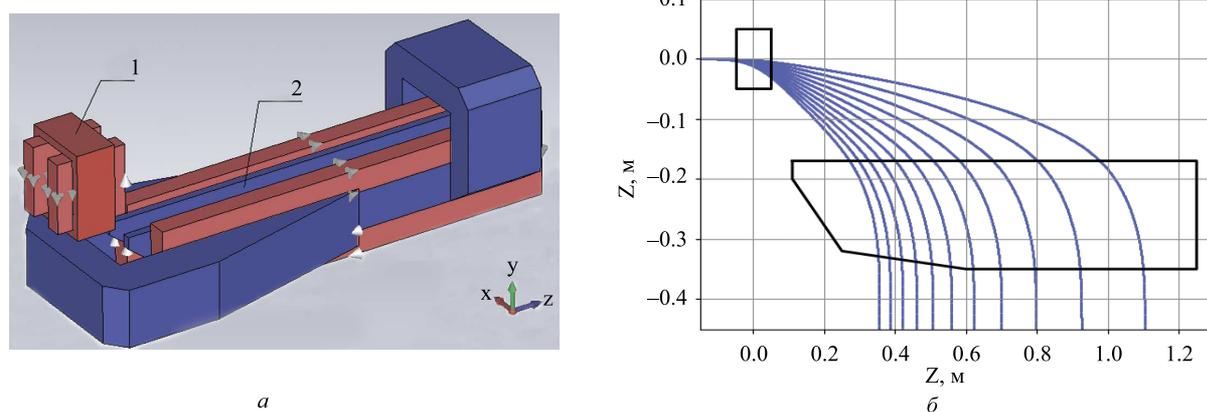


Рис. 1. *a* — Общий вид системы сканирования: 1 — магнит развертки, 2 — поворотный магнит. *б* — Траектории пучка для различных углов поворота. Показана форма полюсных наконечников

Таблица 1. Основные параметры системы сканирования

Масса поворотного магнита, кг	386
Габариты системы сканирования – XYZ, м	$0.42 \times 0.48 \times 1.29$
Межполюсной зазор, см	6
Диапазон изменения поля магнита развертки, Тл	0.02 ... 0.12
Максимальное поле поворотного магнита, Тл	0.165

Рабочий участок вдоль оси Z , в пределах которого осуществляется сканирование пучка, находится в диапазоне $0.4 \text{ м} \leq z \leq 1.1 \text{ м}$. На рис. 2 показана связь индукции поля магнита развертки с координатой пучка вдоль направления сканирования. Как видно, соотношение величины индукции и координаты носит существенно нелинейный характер, что необходимо учитывать при определении закона изменения поля во времени в процессе сканирования.

Важное значение для обеспечения равномерности распределения тока пучка по поверхности объекта имеют минимизация отклонения угла поворота от 90° и изменение оптической силы системы вдоль направления сканирования. Последнее обстоятельство особенно важно учитывать из-за того, что сканируемый пучок входит в поворотный магнит под большим углом к краю полюсного наконечника (рис. 1, б).

На рис. 3, *a* показано изменение вдоль направления сканирования отклонения угла поворота пучка от 90° . Видно, что отклонение угла поворота не превышает ± 10 мрад. На рис. 3, *б* и *в* показаны зависимости от координаты Z оптической силы магнитной системы в направлении движения конвейера f_x^{-1} и направлении сканирования f_z^{-1} соответственно. Видно, что f_x^{-1} изменяется в пределах от -0.32 до -0.17 м^{-1} , обеспечивая фокусировку пучка с оптической силой, убывающей с ростом Z , а f_z^{-1} — в пределах от -6.0 м^{-1} до 6.0 м^{-1} , обеспечивая фокусировку пучка вдоль большей части полосы сканирования. На рис. 3, *г* приведена зависимость от Z

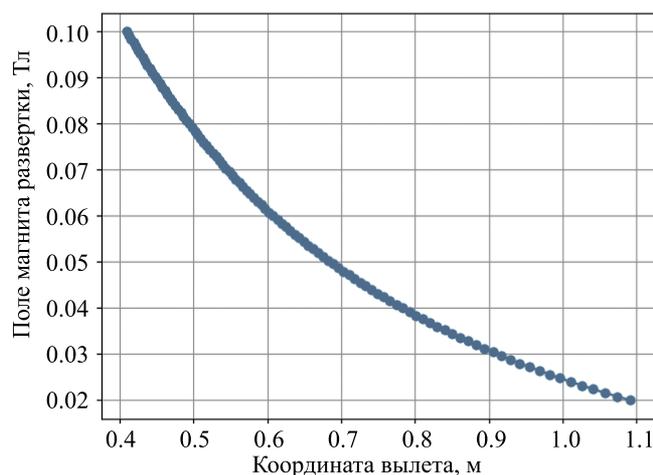


Рис. 2. Связь индукции поля магнита развертки с координатой пучка вдоль направления сканирования. Энергия пучка 10 МэВ

угловой дисперсии, которая может быть использована для оценок увеличения размеров пучка вдоль направления сканирования из-за наличия энергетического разброса.

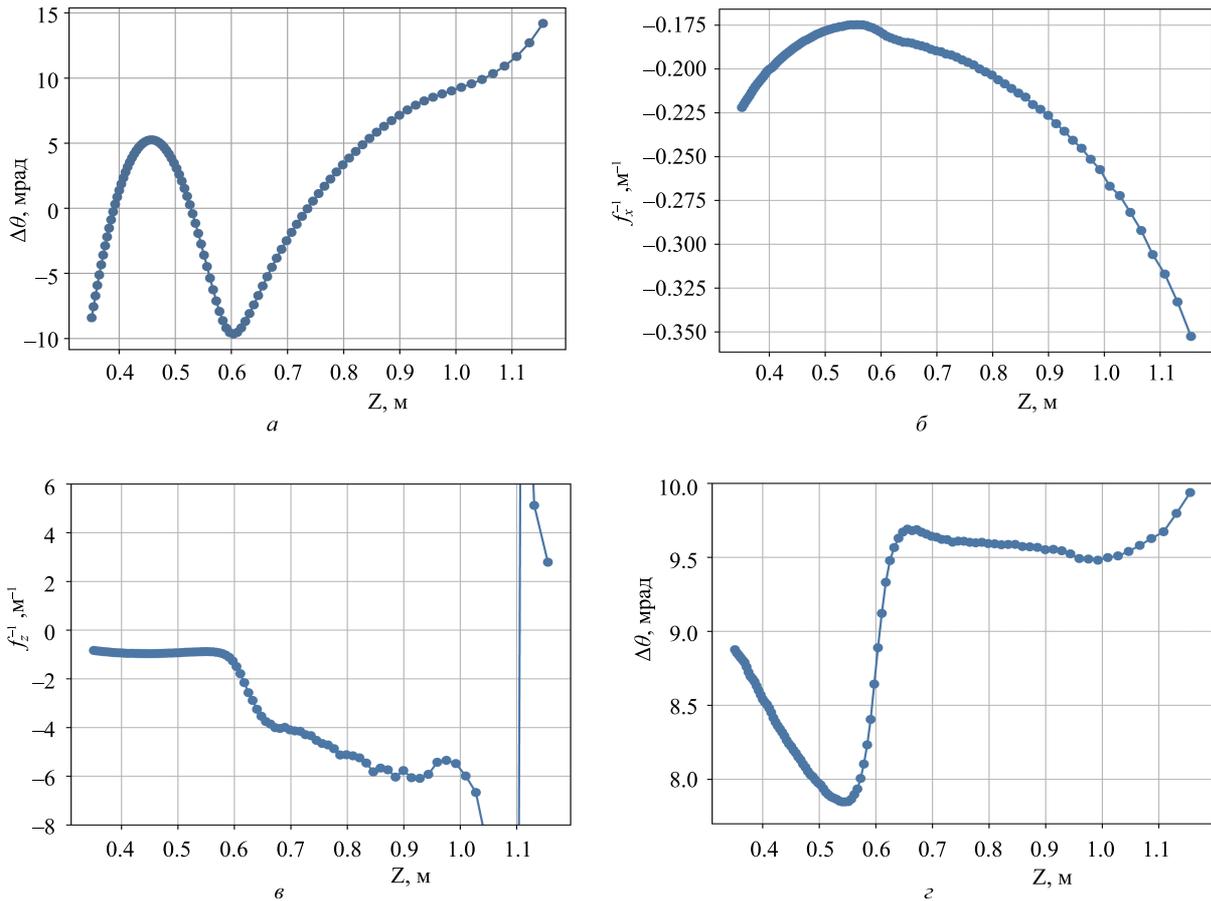


Рис. 3. Изменение вдоль направления сканирования: *a* — отклонения угла поворота пучка от 90° , *б* — оптической силы в направлении движения конвейера, *в* — оптической силы в направлении сканирования, *z* — угловой дисперсии

1.4. Учет характеристик пучка линейного ускорителя и рассеяния на фольге

Распределение электронов на облучаемом объекте, помимо оптических свойств системы сканирования, зависит от распределения частиц в поперечных и продольной проекциях фазового пространства на ее входе и от рассеяния электронов на фольге выпускного окна вакуумной камеры.

Для учета фазовых распределений нами были выполнены расчеты динамики пучка для линейного ускорителя, описанного в [5], для которого и осуществляется проектирование системы сканирования. На рис. 4, *a* показан расчетный энергетический спектр пучка, на рис. 4, *б* портрет пучка на входе системы сканирования, расположенном на расстоянии 1.5 м от выхода ускоряющей структуры.

Учет рассеяния на фольге проводился с использованием данных о среднеквадратичном угле рассеяния, приведенных в [6] для различных энергий электронов и различных материалов. В данном случае в качестве рассеивателя выступала титановая фольга выпускного окна толщиной 50 мкм.

Учет рассеяния на фольге осуществлялся следующим образом. Для каждой *i*-й частицы из ан-

самбля частиц, дошедших до фольги, $i = 1, \dots, N$, N — число частиц в ансамбле, с помощью генератора случайных чисел формировался вторичный ансамбль из \bar{N} дополнительных частиц с нормальным распределением по углам относительно ее направления движения со среднеквадратичным отклонением, соответствующим энергии частицы. Например, среднеквадратичный угол рассеяния для электронов с энергией 10 МэВ в данном случае составлял 0.064 рад. При этом рассеяние частиц в воздухе не учитывалось.

2. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ СКАНИРОВАНИЯ

2.1. Расчет распределения тока по поверхности объекта

На первом этапе расчета дозовых распределений была решена задача получения равномерного распределения линейной плотности тока пучка dI/dz вдоль направления сканирования (оси Z) на поверхности облучаемого объекта, перемещаемого с помощью конвейера в направлении оси X . Для решения этой задачи были рассчитаны распределения тока пучка на фольге в плоскости $X-Z$ для 1051 значе-

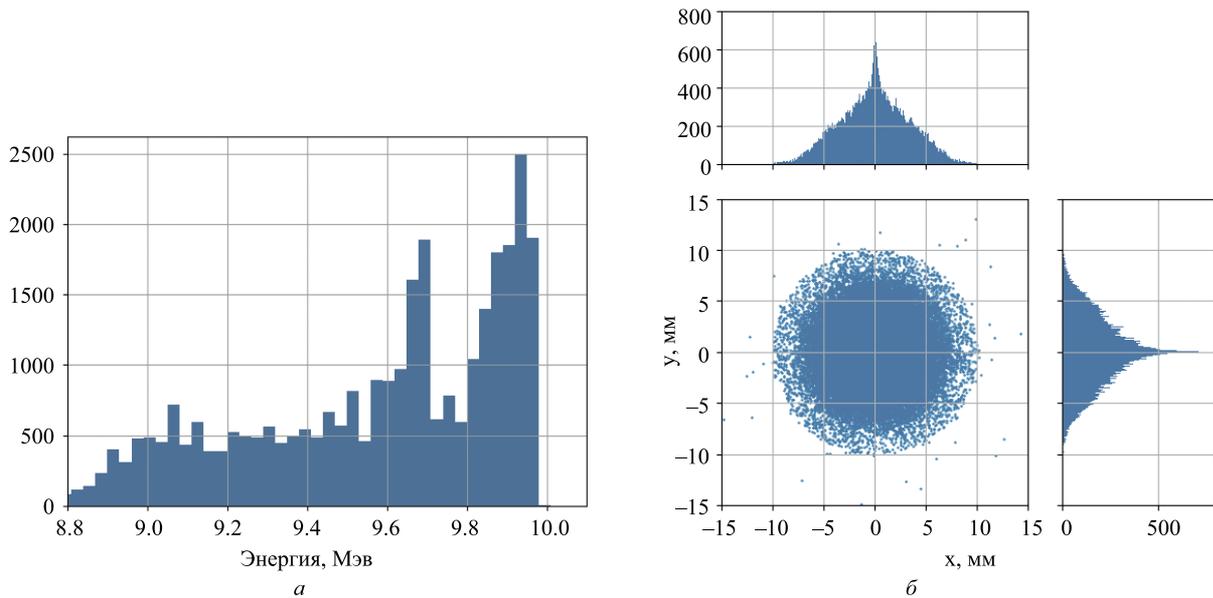


Рис. 4. *a* — Энергетический спектр пучка на выходе из ускорителя. *б* — Портрет пучка на входе системы сканирования

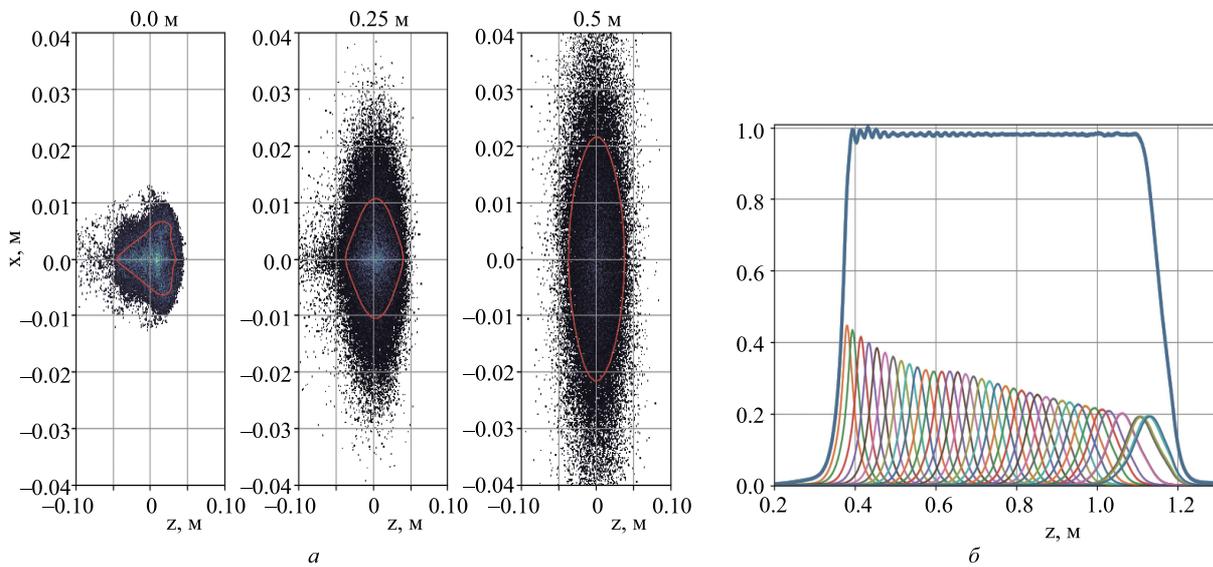


Рис. 5. *a* — Распределение частиц пучка на фольге и на расстоянии 0.25 и 0.5 м от нее. Координаты частиц z даны относительно значения координаты центра тяжести пучка $z_0 = 0.54$ м. *б* — Пример распределения линейной плотности тока вдоль направления сканирования для 40 гистограмм без учета движения конвейера

ний угла поворота магнита развертки. После расчета рассеяния на фольге с учетом пространства дрейфа были получены 1051 распределений в плоскости объекта. Каждое распределение содержало $N \times \tilde{N} \approx 36000 \times 1000 = 3.6 \cdot 10^7$ частиц.

Для ускорения расчетов все результаты распределений сохранялись в виде двумерных гистограмм с величиной бина 1×1 мм, уменьшение которого при данной статистике слабо влияло на конечный результат. Гистограммы для промежуточных углов поворота рассчитывались при помощи линейной интерполяции. Пример распределений частиц пучка для угла поворота, соответствующего положению

центра тяжести пучка на фольге $z_0 = 0.54$ м, приведен на рис. 5, *a* для различных расстояний от фольги. Красной огибающей представлена область, содержащая внутри 50 % всех частиц. На рис. 5, *б* показан пример распределения линейной плотности тока вдоль направления сканирования Z , полученного суммированием 40 одномерных гистограмм, которые, в свою очередь, были получены суммированием содержимого ячеек двумерных диаграмм в направлении оси X , для учета перемещения объекта конвейером в процессе облучения. Далее такие распределения плотности тока называем одномерными.

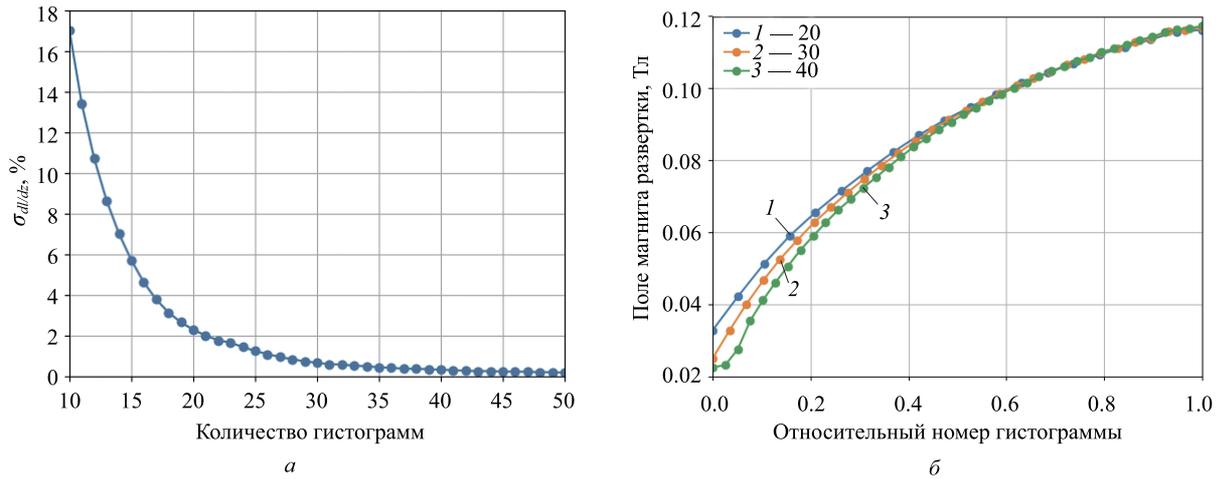


Рис. 6. а — Среднеквадратичное отклонение плотности тока в зависимости от количества одномерных гистограмм. б — Связь индукции поля магнита развертки с относительным номером гистограммы

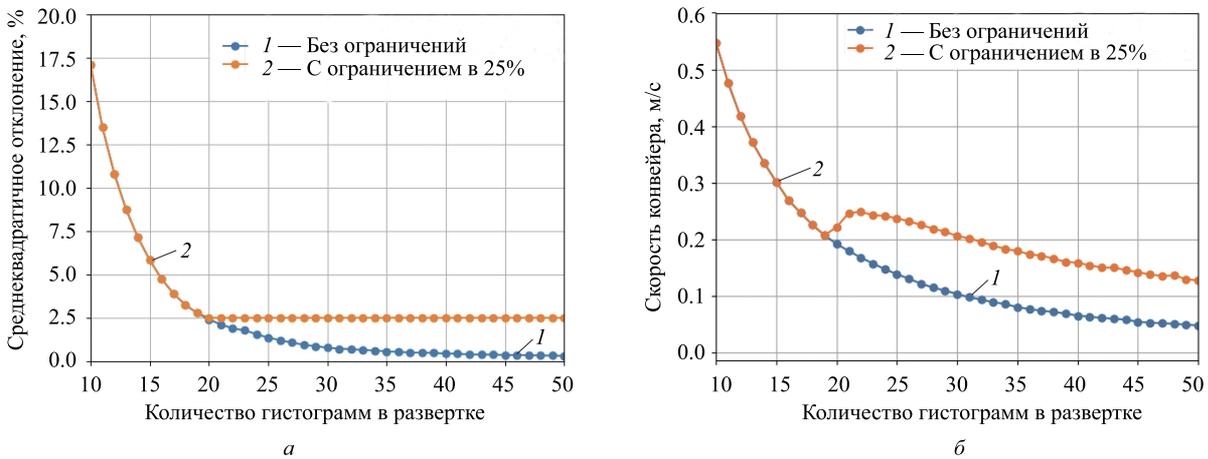


Рис. 7. а — Зависимость среднеквадратичного отклонения плотности тока от количества гистограмм вдоль оси Z. б — Максимальная скорость конвейера для различного числа гистограмм, при которой достигается указанное на рис. 7, а среднеквадратичное отклонение. Синие кривые — неоднородность убывает с увеличением числа гистограмм вдоль осей X и Z. Желтые кривые — неоднородность вдоль оси X сохраняется на уровне 2.5 % после достижения этого значения вдоль оси Z

В качестве критерия достижения равномерного распределения линейной плотности тока пучка вдоль направления сканирования мы использовали величину среднеквадратичного отклонения плотности тока в пределах $\sigma_{dI/dz} \leq 2.5\%$. Для достижения указанной величины среднеквадратичного отклонения для заданной ширины сканирования W осуществлялось варьирование номеров гистограмм (что может быть интерпретировано как варьирование углов поворота пучка магнитом развертки) для заданного количества гистограмм на одно сканирование. На рис. 6, а для одномерного случая представлено среднеквадратичное отклонения плотности тока от среднего значения в зависимости от числа одномерных гистограмм для ширины развертки 70 см. Видно, что для достижения равномерности распределения лучше, чем 2.5%, необходимо использовать 20 или более гистограмм. На рис. 6, б представлены примеры законов изменения

поля магнита развертки для 20, 30 и 40 таких гистограмм.

Рассмотренный выше случай суммирования одномерных гистограмм является существенным упрощением реального процесса облучения. Он предполагает наличие некоторого количества перекрывающихся непрерывных пучков, размещенных вдоль направления сканирования, падающих на поверхность движущейся по конвейеру продукции. Рассмотрим более общий случай облучения продукции импульсным ускорителем с длительностью импульса тока T_b , периодом следования импульсов T_{rep} , периодом сканирования T_{sc} , причем $T_b \ll T_{rep} \ll T_{sc}$. Отметим, что число гистограмм вдоль оси Z определяется соотношением $N_{hist} \approx T_{rep}/T_{sc}$.

Движения конвейера моделировалось путем смещения каждой последующей гистограммы по оси X на величину $\Delta x = vT_{rep}$, где v — скорость конвейера. Очевидно, что наибольшую сложность пред-

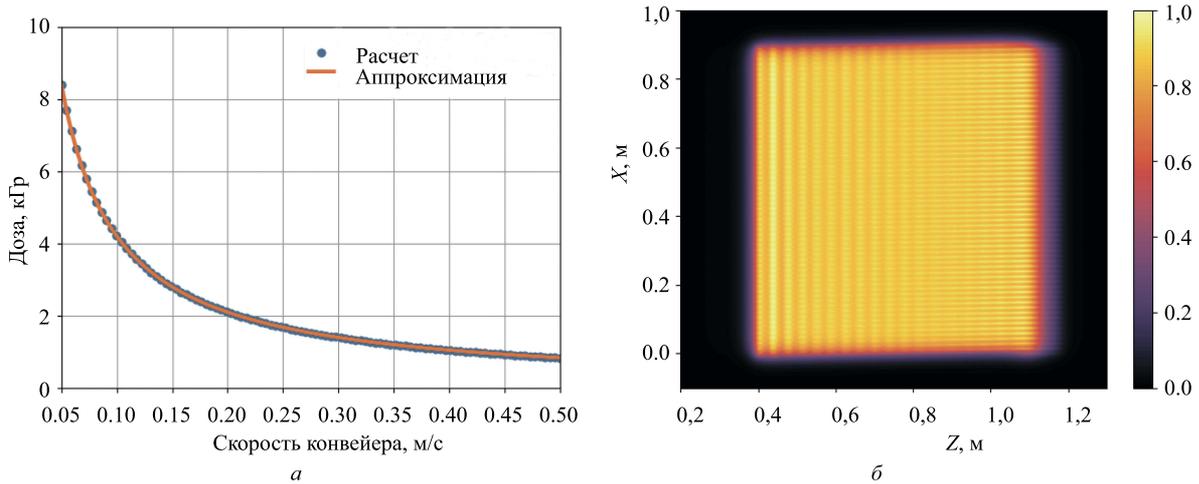


Рис. 8. *a* — Зависимость дозы от скорости конвейера. *б* — Пример распределения относительной дозы для 20 гистограмм вдоль направления сканирования и скорости конвейера 0.3 м/с

ставляет получения однородности плотности тока вдоль оси X при сообщении малых доз, когда скорость конвейера велика.

На рис. 7, *a* показана зависимость среднеквадратичного отклонения плотности тока от количества гистограмм вдоль оси Z . График синего цвета получен при условии убывания неоднородности вдоль направления движения конвейера с увеличением числа гистограмм примерно по такому же закону, как и вдоль направления сканирования, он фактически повторяет зависимость, показанную на рис. 6, *a*. График желтого цвета получен при условии постоянства неоднородности на уровне 2.5% вдоль направления движения конвейера, начиная с числа гистограмм, при котором этот уровень неоднородности достигается вдоль направления сканирования. Так, при использовании больше 20 гистограмм происходит повышение скорости конвейера (что отражено на рис. 7, *б*, поэтому неравномерность не уменьшается аналогично синему графику. На рис. 7, *б* показана максимальная скорость конвейера, при которой возможно достижение среднеквадратичного отклонения, указанного на рис. 7, *a* синим и желтым цветами. Резкое повышение скорости конвейера на желтом графике связано с близкой подстройкой по неоднородности синего графика к графику линейной плотности тока, практически повторяя его.

2.2. Расчет распределения абсолютной дозы

Для оценки величины абсолютной дозы, сообщаемой объекту в приповерхностном слое, используем приближенное выражение, связывающее величину дозы D и флюенс F , полученное на основании оценки удельных потерь электронов в веществе [7]:

$$D(\text{Гр}) \approx 3.4 \times 10^{-14} F (\text{м}^{-2}). \quad (1)$$

Средняя величина флюенса при заданной скоро-

сти конвейера и длине сканирования определяется средним током пучка:

$$F = \frac{\bar{I}_b}{evw}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, $\bar{I}_b = I_b T_b f_{rep}$, $f_{rep} = 1/T_{rep}$. Для характерных для ускорителя [5] значений $T_b = 10$ мкс, $f_{rep} = 400$ Гц, $I_b = 0.4$ А, полагая $w = 0.7$ м, получаем $D(\text{Гр}) \approx 486/v(\text{м/с})$.

Условия (1) и (2), определяя связь дозы с параметрами пучка и скоростью конвейера, ничего не говорят о равномерности распределения дозы, которая зависит от поперечного распределения тока пучка, частоты сканирования, частоты следования импульсов и скорости конвейера. На рис. 8, *a* представлена рассчитанная зависимость дозы на гипотетической плоскости облучаемых объектов от скорости конвейера для указанных выше параметров пучка, полученная при условии сохранения среднеквадратичной неравномерности дозы в пределах 2.5%, что обеспечивается 20 гистограммами пучка на ширину сканирования или частоту сканирования $f_{sc} = 1/T_{sc} = 20$ Гц при частоте следования импульсов $f_{rep} = 400$ Гц. Рассчитанная зависимость может быть аппроксимирована формулой: $D(\text{Гр}) \approx 426/v(\text{м/с})$, что весьма близко к зависимости, полученной на основании выражений (1) и (2). На рис. 8, *б* показана двумерная картина распределения относительной дозы для 20 гистограмм и скорости конвейера 0.3 м/с.

На рис. 9, *a* и *б* для $f_{rep} = 400$ Гц, $I_b = 0.4$ А, $w = 0.7$ м и длительности импульса тока пучка $T_b = 10$ мкс и 4 мкс соответственно, представлены графики соотношения дозы (ось ординат слева), количества гистограмм вдоль оси сканирования (ось абсцисс) и скорости конвейера (ось ординат справа), обеспечивающие указанное цветом и числами внутри прямоугольников среднеквадратичное отклонение дозы от среднего значения (в процентах).

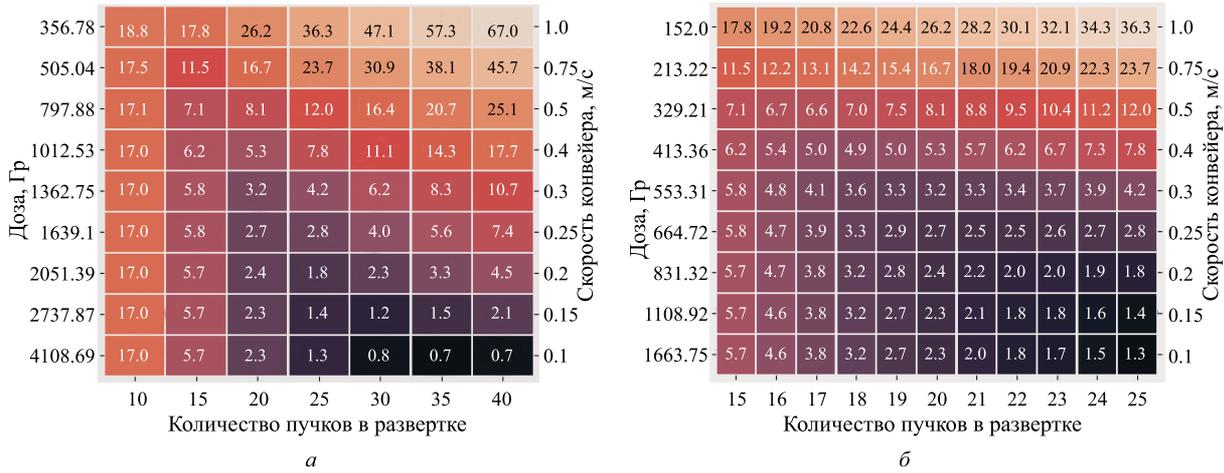


Рис. 9. Соотношения дозы (ось ординат слева), количества гистограмм вдоль оси сканирования (ось абсцисс) и скорости конвейера (ось ординат справа), обеспечивающие указанное цветом и цифрами внутри прямоугольника среднее квадратичное отклонение дозы от среднего значения (в процентах). а — $T_b = 10 \text{ мкс}$, б — $T_b = 4 \text{ мкс}$

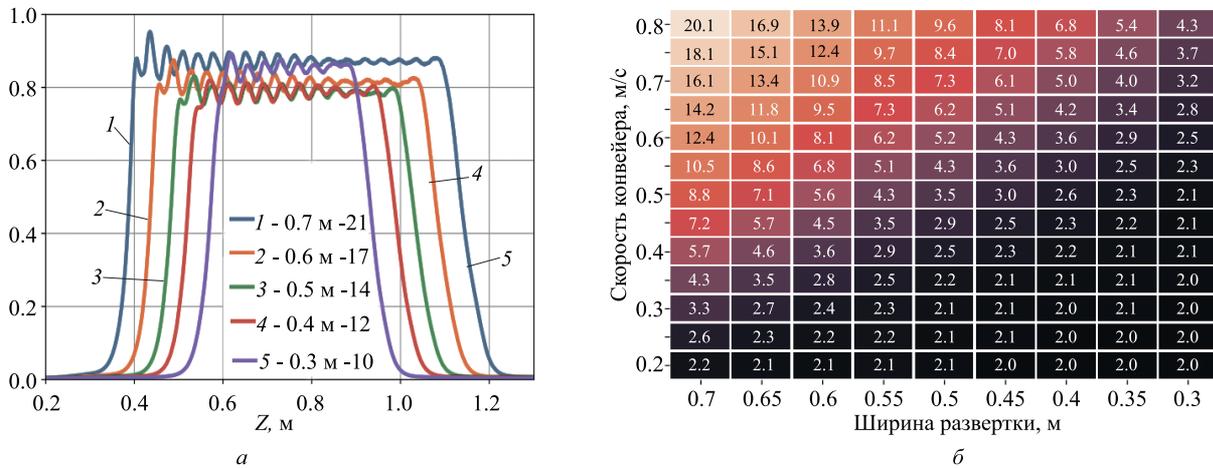


Рис. 10. а — Распределение плотности тока вдоль направления сканирования для различных ширины области сканирования. б — Соотношение максимальной скорости конвейера и ширины области сканирования при которых достигается среднее квадратичное отклонение дозы от среднего значения, приведенное в прямоугольниках

Видно, что допустимое среднее квадратичное отклонение можно получить при использовании 20 гистограмм и более. Из представленных результатов также следует, что для $T_b = 4 \text{ мкс}$ минимальная доза составляет 664 Гр при допустимом уровне неоднородности и достигается при использовании 21-й гистограммы (частота сканирования 19 Гц) и скорости конвейера 0.25 м/с. При выборе иного режима облучения параметры режима могут быть получены интерполяцией данных, приведенных на рис. 9, а.

Возможность регулирования длины области сканирования иллюстрирует рис. 10, а, где приведены результаты расчета, основанного на суммировании одномерных гистограмм. Среднее квадратичное отклонение плотности тока составляет менее 2% при количестве гистограмм $N_{hist} \approx \text{Int}(33w(\text{м}))$. На рис. 10, б приведен график, показывающий соотношение максимальной скорости конвейера и дли-

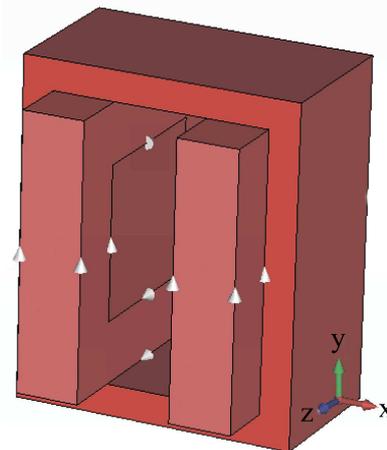


Рис. 11. Общий вид магнита развертки

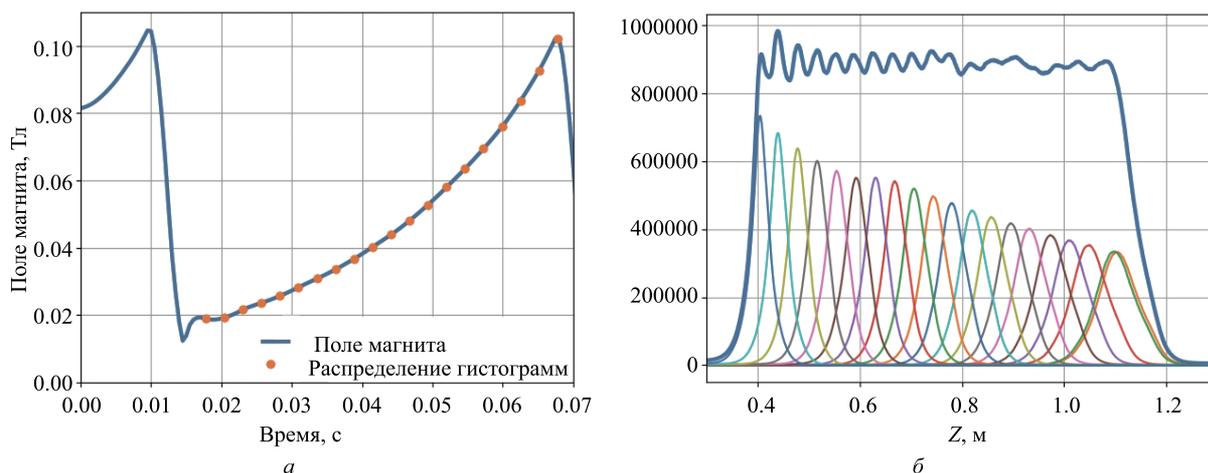


Рис. 12. *а* — Зависимость поля магнита развертки от времени при изменении тока обмоток. *б* — Распределение линейной плотности тока вдоль направления сканирования для полученной на рис. 12, *а* зависимости

Таблица 2. Основные параметры магнита развертки

Размеры полюса, см	10 × 10
Высота межполюсного зазора, см	6
Количество витков обмотки	160
Общее сечение обмотки, см ²	16
Величина индукции при токе в 20 А, Тл	0.125

ны развертки, при которых достигается среднеквадратичное отклонение дозы, приведенное в прямоугольниках.

3. МАГНИТ РАЗВЕРТКИ

Высокая, на уровне 20 Гц, частота сканирования пучка, необходимость использования закона изменения поля, приближенного к пилообразному, требует минимизации индуктивности магнита развертки с целью сокращения требований к источнику его питания. Общий вид магнита развертки приведен на рис. 11. В качестве сердечника магнита в расчетах использовалось железо. Также для упрощения ярмо моделировалось как цельнометаллическое ввиду сложности расчета шихтованного варианта, который необходимо использовать на практике. Основные параметры магнита представлены в табл. 2. За счет компактности ярма и малого количества витков обмотки магнит позволяет получать требуемую величину магнитной индукции около 0.11 Тл с током на обмотках менее 20 А в стационарном режиме, а также он обладает индуктивностью, позволяющей достаточно быстро менять величину поля в нем.

Расчет зависимости тока и напряжения на обмотках магнита, обеспечивающих требуемую зависимость магнитного поля от времени, проводился с по-

мощью программы CST. Изменение магнитного поля во времени показано на рис. 12, *а*, точками показаны моменты прохождения пучка при частоте повторения 400 Гц с условием выключения ускорителя на обратном ходе. На рис. 12, *б* показано распределение плотности тока пучка вдоль направления сканирования, полученное суммированием 20 одномерных гистограмм, соответствующим углам поворота, определяемым значениями поля, отмеченным на рис. 12, *а*.

Период сканирования в рассмотренном примере составляет 58 мс (частота сканирования 17 Гц), время обратного хода при этом равно 8 мс. Среднеквадратичное отклонение плотности тока от среднего значения при расчете по двумерными гистограммам составило 2.7% при скорости конвейера 0.2 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами представлены результаты расчета системы сканирования пучка с энергией 10 МэВ с одновременным его поворотом на 90°, использование которой существенно сокращает размеры помещений радиационно-технологического комплекса.

Изучены оптические и дисперсионные свойства магнитной системы, разработана методика и выполнены расчеты равномерности распределения дозы в приповерхностной области облучаемого объекта. Для варианта промышленного ускорителя, описанного в [5], выполнены расчеты соотношения длительности импульса, частоты сканирования, частоты следования импульсов, скорости конвейера, обеспечивающие сообщение заданной дозы продукту при ограничениях на величину среднеквадратичного отклонения дозы, вытекающих из действующих стандартов. На основании рис. 9 и 10, *б* для ускорителя [5] может быть определено минимальное значение дозы для требуемой неоднородности распределения.

Выполнены расчеты закона изменения тока и напряжения магнита развертки, определяющие требо-

вания к источнику питания, которые обеспечивают необходимые условия облучения продукта

-
- [1] *Shvedunov V.I.* et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. **159**. 95 (2019).
- [2] *Bailey M.* et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. **46**, № 4–6. 465 (1995).
- [3] *Ivanov A.S.* et al. // *Proceedings of International Conference on Particle Accelerators*. IEEE. 555 (1993).
- [4] *Jongen Y.* et al. // *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 97CH36167)*. IEEE. **3**. 3857 (1997).
- [5] *Ermakov A.N.* et al. // *Proc. RuPAC2016, St. Petersburg, Russia p. WECDMH01*. (2016). <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/wecdmh01.pdf>
- [6] *Pitchford G.* *Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV*, in: ICRU Report 35, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Md.(1984). (1986). <https://www.nist.gov/system/files/documents/calibrations/icru-35.pdf>
- [7] *Swanson W.P.* *Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators*. 1979. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs188_web.pdf

Beam Scanning System for an Industrial Electron Accelerator

M. A. Borisov^{1,2,a}, V. I. Shvedunov^{1,2,b}

¹*Department of General Nuclear Physics,, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

²*Laboratory of electron accelerators MSU Ltd (LEA MSU Ltd), Moscow 119191, Russia*
E-mail: ^amuchmaxx@gmail.com, ^bshvedunov@gmail.com

To create a compact system for scanning the beam along the conveyor, this paper considers the horizontal placement of the accelerator with a magnetic system with rotating the beam by 90°. A three-dimensional simulation of the magnetic system and the dynamics of electrons in it was performed. Dose distributions were also obtained in the near-surface region of the irradiated object, on the basis of which the optimal laws of change in the current and voltage of the scanning magnet were determined, which provide the required conditions for irradiating the product.

PACS: 29.20.-c, 29.27.-a, 29.27.Fh

Keywords: electron accelerators, magnetic scanning system, modeling.

Received 10 March 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 2. Pp. .

Сведения об авторах

- Борисов Максим Антонович — аспирант; e-mail: muchmaxx@gmail.com.
- Шведунов Василий Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shvedunov@gmail.com.