

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.893.3:536.7:546.63

МЕХАНИЗМЫ РАСФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КОНВЕРСИОННОЙ МИШЕНЬЮ

© 2026 г. А. Р. Ахметов*, И. В. Крюков, О. А. Никитин, В. Ю. Политов,
В. Ю. Эверт

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики

им. академика Е.И. Забабахина

Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

**E-mail: a.r.akhmetov@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 08.06.2026

После доработки 13.08.2026

Принята к публикации 26.08.2026

Исследованы физические причины расфокусировки электронного пучка линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) при взаимодействии с конверсионной мишенью. Рассмотрены механизмы деградации фокусного пятна: генерация ионного потока и формирование плазменно-пылевого облака, вызывающего динамическую расфокусировку пучков первого и второго импульсов. Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований для ускорителей ЛИУ-2 и ЛИУ-20. Показана эффективность метода предварительной десорбции поверхностных примесей мишени расфокусированным “подготовительным” импульсом для ЛИУ-2: достигнуто уменьшение эффективного размера источника тормозного излучения в 1.4 раза. Для двухимпульсного режима ЛИУ-20 определены критические временные задержки (до ~5–7 мкс), при которых влияние остаточного облака разлетающегося вещества мишени на второй импульс пренебрежимо мало. Результаты численного моделирования верифицированы экспериментальными данными и могут быть использованы для оптимизации режимов импульсной рентгенографии быстротекущих процессов.

Ключевые слова: линейный индукционный ускоритель, источник тормозного излучения, диагностика электронного пучка, поперечный профиль пучка, расфокусировка, конверсионная мишень.

1. ВВЕДЕНИЕ

Линейные индукционные ускорители являются основным инструментом импульсной рентгенографии объектов с высокой оптической плотностью [1]. Критическим параметром, определяющим пространственное разрешение теневых изображений, является эффективный размер источника тормозного излучения (ТИ) [2]. На данный параметр оказывает влияние ряд факторов, связанных как с динамикой пучка в ускорительном тракте (неустойчивости, абберрации), так и с физическими процессами в конверсионной мишени [3–5]. При воздействии мощного электронного импульса на мишень из тяжелого металла (Ta, W)

происходит интенсивный нагрев поверхностного слоя. Первыми из мишени эмитируются легкие ионы, распространяющиеся навстречу электронному пучку и вызывающие его частичную расфокусировку. Далее, продолжающее взаимодействие электронного импульса с мишенью инициирует испарение материала и образование плазменно-пылевого облака. Поэтому в многокадровом режиме работы ЛИУ последующие импульсы взаимодействуют не с твердотельной мишенью, а с разлетающимся облаком частиц, что так же увеличивает фокусное пятно (ФП) и, соответственно, размер источника ТИ.

Целью настоящей работы является исследование процессов, приводящих к увеличению размера источника ТИ, а также определение условий, при которых в одноимпульсном и двухимпульсном режимах работы размер источника излучения минимален и стабилен.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСТОЧНИКА В ОДНОИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе ЛИУ-2 [6]. В ходе работ была выявлена нестабильность размера ФП при неизменных параметрах ускорителя. Для исследования причин данного явления выполнено численное моделирование энерговыведения [7] в танталовой мишени толщиной 1.4 мм при воздействии электронного пучка с энергией до 2 МэВ и током до 2 кА. На рис. 1 представлена зависимость плотности энергии от глубины мишени z (где $z = 0$ соответствует облучаемой поверхности) и цилиндрического радиуса r . Плотность энергии приведена в логарифмической шкале, поскольку она практически экспоненциально убывает с глубиной распространения.

Рис. 1. Распределение объемной плотности энергии E в мишени толщиной 1.4 мм по глубине z и радиусу r (направление распространения электронного пучка – слева направо)

Результаты моделирования показали, что основное энерговыведение сосредоточено в поверхностном слое толщиной 0.2–0.3 мм. Объемная плотность энергии в области фокусного пятна достигает порядка 28 кДж/г, что на несколько порядков превышает пороги плавления (0.58 кДж/г) и испарения (4.9 кДж/г) тантала. Для легких поверхностных примесей испарение начинается при плотности энергии около 6 Дж/г, что обуславливает их преимущественную эмиссию.

Наиболее вероятным источником легких ионов, инициирующих расфокусировку пучка, являются адсорбированные поверхностные примеси материала мишени. В работах [8, 9] продемонстрирована эффективность “очистки” мишени путем термической десорбции примесей расфокусированным “подготовительным” импульсом. Следует отметить, что экспериментальные данные, представленные в указанных работах, ограничены дискретными измерениями профиля источника излучения на начальных временных интервалах импульса.

Интегральная картина поведения пучка на протяжении всего импульса, а также временная устойчивость эффекта “очистки” мишени оставались неисследованными. Для восполнения указанного пробела проведены дополнительные исследования в соответствии со схемой постановки эксперимента, представленной на рис. 2.

Рис. 2. Схема постановки экспериментальных исследований на ускорителе ЛИУ-2

Конверсионная мишень представляет собой танталовую пластину. Слева от мишени расположена финальная фокусирующая линза, обеспечивающая управление степенью фокусировки/расфокусировки пучка на мишени. Размер источника излучения определялся методом полной ширины на полувысоте (FWHM) с использованием камеры-обскуры [10]. В экспериментах применялась многокадровая система регистрации (МСП) [11], обеспечивающая дистанционную обработку изображений.

Исследования проводились в два этапа:

- измерение размера источника при воздействии основного импульса на необработанную (“непрогретую”) область мишени;
- измерение размера источника при воздействии основного импульса на область мишени, предварительно прошедшую термическую обработку расфокусированным подготовительным импульсом.

В каждом этапе проведена серия экспериментов, из которых получены рентгенограммы источника излучения до и после обработки подготовительным импульсом.

На рис. 3 приведены характерные рентгеновские изображения источника ТИ и их трехмерная визуализация, полученные в ходе исследований. Обработка изображений подтверждает улучшение фокусировки основного импульса после “прогрева” мишени (рис. 3б).

Рис. 3. Рентгенограммы и 3D-визуализация распределения яркости источника излучения в фокальном пятне: **а** – до обработки подготовительным импульсом, **б** – после обработки подготовительным импульсом

Для количественной оценки эффективности очистки мишени введен коэффициент $k_{\text{ЛИУ-2}}$, определяемый как отношение размера источника излучения до обработки подготовительным импульсом к размеру источника после обработки мишени расфокусированным подготовительным импульсом. Значение $k_{\text{ЛИУ-2}} > 1$ свидетельствует об улучшении фокусировки. Данный коэффициент показывает, во сколько раз повышается пространственное разрешение рентгеновского снимка за счет удаления поверхностных примесей.

Обработка рентгенограмм позволила выполнить расчет размера источника ТИ и оценить улучшение фокусировки (табл. 1). В среднем по серии экспериментов фокусировка улучшилась примерно в 1.4 раза.

Таблица 1. Размеры источника ТИ ЛИУ-2 до и после предварительной термической обработки мишени подготовительным импульсом

№	Размер источника ТИ, мм		$k_{\text{ЛИУ-2}}$
	До обработки	После обработки	
1	2.10	1.57	1.34
2	2.20	1.43	1.54
3	2.00	1.40	1.43
4	2.10	1.53	1.37
5	1.90	1.42	1.34
6	1.90	1.51	1.26
7	2.30	1.55	1.59
8	2.30	1.47	1.56
9	1.80	1.42	1.27
Среднее значение	2.07	1.48	1.40 ± 0.09

Практически значимым аспектом является подтверждение временной устойчивости эффекта “очистки” мишени, поскольку перед основным импульсом при проведении газодинамических экспериментов требуется технологический интервал примерно 20 мин для коммутации измерительной аппаратуры и оборудования методик с объектом исследования. С этой целью выполнены измерения размера источника излучения при последовательном увеличении задержки между расфокусированным подготовительным и основным импульсами. На каждом временном интервале проведено несколько измерений и определены средние значения размера источника излучения основного импульса до и после прогрева мишени подготовительным импульсом и коэффициент $k_{\text{ЛИУ-2}}$ (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения размеров источника ТИ ЛИУ-2 при временных задержках от 1 до 20 мин после термической обработки мишени подготовительным импульсом

№	Задержка, мин	Размер источника ТИ, мм		$k_{\text{ЛИУ-2}}$
		До обработки	После обработки	
1	1	2.10	1.52	1.38
2	3	2.20	1.55	1.42
3	4	2.07	1.49	1.39
4	5	2.10	1.50	1.40
5	10	2.06	1.48	1.39
6	15	2.05	1.49	1.38
7	20	2.15	1.54	1.40
Среднее значение	—	2.10	1.51	1.39 ± 0.01

Во всем исследованном диапазоне эффект “очистки” мишени сохраняется, обеспечивая стабильное улучшение фокусировки примерно в 1.4 раза (рис. 4).

Рис. 4. Зависимость отношения усредненных размеров источника излучения ЛИУ-2 до и после термической обработки мишени от величины временной задержки между импульсами

Таким образом, предварительная “очистка” мишени от поверхностных примесей обеспечивает стабильное уменьшение размера источника излучения примерно в 1.4 раза на протяжении не менее 20 мин, что является достаточным для проведения штатных газодинамических экспериментов.

3. АНАЛИЗ ДВУХИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА (ЛИУ-20)

Эксперименты на ускорителе ЛИУ-20 [12] подтвердили наличие расфокусировки второго импульса. Для исследования причин данного явления выполнено численное моделирование энерговыделения [7] в танталовой мишени толщиной 2 мм при энергии электронов до 20 МэВ и токе до 2 кА. Результаты расчета показали, что плотность энерговыделения в мишени достаточна для ее сквозного разогрева и испарения материала по всей толщине (рис. 5). Шкала плотности энергии является логарифмической, белые изолинии обозначают границы зон плавления и испарения.

Рис. 5. Распределение объемной плотности энергии E в мишени толщиной 2 мм по глубине z и радиусу r (направление распространения электронного пучка – слева направо)

На основе полученных данных было выполнено газодинамическое моделирование эволюции плотности разлетающегося облака продуктов испарения мишени [7] (рис. 6).

Рис. 6. Пространственное распределение плотности паров разлетающейся танталовой мишени после воздействия первого импульса в моменты времени $t = 1, 2, 5, 10$ и 15 мкс

Результаты расчетов показывают, что вблизи оси облучения при временных задержках не более 10 мкс после первого импульса сохраняется область достаточно плотного вещества ($\rho > 1$ г/см³), способная генерировать ТИ при воздействии второго импульса. При увеличении временной задержки эффективный размер излучающей области возрастает, плотность вещества уменьшается. Для визуализации процесса выполнена высокоскоростная фоторегистрация разлета плазменно-пылевого облака (рис. 7), зафиксировавшая симметричный разлет вещества мишени со скоростью примерно 0.35 см/мкс [13]. На фотографиях стрелка указывает на торец мишени; направление распространения электронного пучка – слева направо.

Рис. 7. Динамика разлета плазменно-пылевого облака в три характерных момента времени после воздействия первого электронного пучка на плоскую мишень...

Полученные результаты газодинамического моделирования осевого распространения паров тантала качественно согласуются с экспериментальными данными о динамике разлета мишени.

С использованием метода Монте-Карло выполнено моделирование изображений источника ТИ второго импульса в полях плотности энергии, формируемых воздействием первого электронного импульса с мишенью (рис. 8). Для сравнения на рис. 9 приведена расчетная рентгенограмма источника излучения первого импульса на детекторе, при которой мишень еще находится в твердотельном состоянии.

Рис. 8. Моделирование изображения источника излучения второго электронного импульса для плоской мишени на детекторе.

Рис. 9. Моделирование изображения источника излучения на поверхности детектора от первого электронного импульса (плоская мишень, твердотельное состояние).

Для количественной оценки деградации фокусного пятна в двухимпульсном режиме введен коэффициент $k_{\text{ЛИУ-20}}$, определяемый как отношение эффективного размера источника ТИ второго импульса к размеру источника первого импульса. Чем выше значение коэффициента, тем меньше пространственное разрешения рентгеновского изображения. Данный коэффициент позволяет оперативно оценивать пригодность двухимпульсного режима для задач импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов. Допустимым для практических задач импульсной рентгенографии считается диапазон задержек, при которых $k_{\text{ЛИУ-20}} \leq 1.2$.

Расчетные значения размера источника тормозного излучения (ТИ) второго импульса в зависимости от временной задержки между импульсами демонстрируют ухудшение качества фокусировки (рис. 8). Уже при задержке 10 мкс наблюдается заметное расширение источника излучения второго импульса, а при задержке 15 мкс его размер возрастает в 1.6 раза относительно первого импульса.

Результаты расчета $k_{\text{ЛИУ-20}}$ в зависимости от временной задержки между импульсами представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные размеры источника излучения первого и второго импульсов ТИ ЛИУ-20 в зависимости от временной задержки между ними

Задержка, мкс	Размер источника ТИ 1-го имп., мм	Размер источника ТИ 2-го имп., мм	$k_{\text{ЛИУ-20}}$
2.5	1.8	1.8	1.00
5	1.8	2.0	1.11
10	1.8	2.3	1.28
15	1.8	2.9	1.61

Схема постановки экспериментальных исследований для верификации результатов численного моделирования представлена на рис. 10.

Рис. 10. Схема постановки экспериментальных исследований на ускорителе ЛИУ-20

Размер источника определялся методом “полутени от резкого края” с использованием тест-объекта “сегмент цилиндра” [14]. Для каждой временной задержки проведена серия измерений, рассчитаны средние значения размеров источников излучения первого и второго импульсов и вычислен коэффициент $k_{\text{ЛИУ-20}}$ (табл. 4).

Таблица 4. Экспериментальные значения размеров источника излучения первого и второго импульсов ТИ ЛИУ-20 в зависимости от временной задержки между ними

Задержка, мкс	Размер источника ТИ 1-го имп., мм	Размер источника ТИ 2-го имп., мм	$k_{\text{ЛИУ-20}}$
2.5	1.25	1.30	1.04
5	1.13	1.27	1.12
7	1.30	1.60	1.23
10	1.30	1.80	1.38
13	1.25	1.90	1.52
16	1.20	2.15	1.79
18	1.20	2.40	2.00
20	1.28	2.70	2.11
25	1.15	5.75	5.00

Коэффициент фокусировки ЛИУ-20 закономерно возрастает с увеличением временной задержки, что соответствует нарастающей деградации фокусного пятна второго импульса. Для анализа эволюции фокусного пятна сопоставлялись экспериментальные и расчетные данные по зависимости отношения размера источника второго импульса к первому от времени задержки (рис. 11).

Рис. 11. Зависимость отношения усредненных размеров источника излучения второго импульса к первому в двухимпульсном режиме работы ЛИУ-20 от временной задержки между импульсами

Сравнение расчетных и экспериментальных данных демонстрирует удовлетворительное согласие в пределах достигнутой точности измерений. Установлено, что

при задержках между импульсами до 5 мкс размер источника второго импульса изменяется незначительно (примерно от 11% до 13%). При задержках не менее 7 мкс наблюдается устойчивый рост размера источника второго импульса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексных экспериментальных и расчетных исследований определены основные факторы, влияющие на эффективный размер источника ТИ в ЛИУ. Для количественной оценки эффектов фокусировки/расфокусировки введены и обоснованы коэффициенты фокусировки ЛИУ-2 ($k_{\text{ЛИУ-2}}$) и ЛИУ-20 ($k_{\text{ЛИУ-20}}$).

1. Для ускорителя ЛИУ-2 экспериментально подтверждена эффективность предварительной “очистки” конверсионной мишени от поверхностных примесей расфокусированным импульсом. Коэффициент фокусировки составил в среднем $k_{\text{ЛИУ-2}} = 1.40 \pm 0.091$, что означает уменьшение эффективного размера источника ТИ в 1.4 раза. Доказана временная устойчивость данного эффекта на протяжении не менее 20 мин, что подтверждает его применимость в условиях штатных рентгенографических экспериментов.

2. Для ускорителя ЛИУ-20 экспериментально зафиксирована динамика разлета плазменно-пылевого облака продуктов испарения мишени. Показано, что в двухимпульсном режиме расфокусировка второго импульса становится существенной при задержках, превышающих 7 мкс ($k_{\text{ЛИУ-2}} > 1.2$), что свидетельствует о критической деградации источника излучения. При меньших задержках различие в размерах источника ТИ первого и второго импульсов незначительно.

3. Получено удовлетворительное соответствие между экспериментальными данными и результатами численного моделирования, свидетельствующее об адекватности примененных физических моделей в пределах достигнутой точности измерений.

Установленные временные задержки в двухимпульсном режиме ЛИУ-20 и предварительная “очистка” мишени ЛИУ-2 от поверхностных примесей снижают влияние расфокусировки электронного пучка на качество рентгенографических изображений. Для ЛИУ-2 достигнута стабильность снижения размера источника ТИ в 1.4 раза в течение примерно 20 мин, а на ЛИУ-20 критическое время между импульсами составляет 5–7 мкс. Корреляция экспериментальных и расчетных данных подтверждает их применимость при проведении газодинамических экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wei Hao, Sun Fengju, Qiu Aici, et al. High Power Laser Part. Beams. 2022. V. 34. № 9. P. 094001. <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210444>

2. *Козловский В.Н.* Информация в импульсной рентгенографии. Под ред. Б.В. Литвинова. Снежинск: Изд. РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19452217>
3. *Pincosy P.A., Back N., Bergstrom P.M., Chen Y.-J., Poulsen P.* Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. № 6. P. 2599. <https://doi.org/10.1063/1.1369628>
4. *McCarrick J., Caporaso G., Chambers F. et al.* IEEE Proc. 2003 Part. Accel. Conf. V. 1. P. 563. <https://doi.org/10.1109/PAC.2003.1288977> .
5. *Sampayan S., Buckles R., Caporaso G. et al.* IEEE Proc. of the 18th Part. Accel. Conf. 1999. V. 2. P. 1303. <https://doi.org/10.1109/PAC.1999.795529>
6. *Логачев П.В., Кузнецов Г.И., Корепанов А.А. и др.* ПТЭ. 2013. Т. 6. С. 42 <https://doi.org/10.7868/S0032816213060220>
[*Logachev P.V., Kuznetsov G.I., Korepanov A.A. et al.* Instrum. Exp. Tech. 2013. V. 56. № 6. P. 672. <https://doi.org/10.1134/S0020441213060195>].
7. *Kandiev Y.Z., Kashaeva E.A., Khatuntzev K.E. et al..* Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 82. P. 116. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.006>
8. *Skovorodin D.I., Trunев Yu.A., Arakcheev A.S. et al.* AIP Conf. Proc. 2016. V. 1771. P. 060014. <https://doi.org/10.1063/1.4964222>
9. *Trunев Yu.A., Skovorodin D.I., Burdakov A.V. et al.* IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. № 6. P. 2125. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2991841>
10. *Qin Li, Yi Wang, Yunlong Liu et al.* X-ray spot size measurement with pinhole High Power (in Chinese) Laser and Part. Beams. 2021. V. 33. № 4. P. 044007.
11. *Эверт В.Ю., Каплунов А.В., Сысков Д.В., Хренков С.Д.* Исследование основных параметров макета многокадровой системы регистрации Инструменты статической и импульсной рентгенографии. Сб. науч. тр. Под ред. О.А. Никитина и Р.В. Протаса. Снежинск: Изд. РФЯЦ–ВНИИТФ, 2023. С. 73.
12. *Ахметов А.Р., Никитин О.А., Бак П.А. и др.* Источник тормозного излучения на базе линейного индукционного ускорителя. Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений. Сб. тр. науч.-техн. конф. Снежинск: Изд. РФЯЦ–ВНИИТФ, 2022. С. 428.
13. *Trunев Yu.A., Kurkuchekov V.V., Skovorodin D.I. et al.* Observation of 18 MeV electron beam spot dynamics and accompanying disassemble of target in double pulse mode of LIA. Book of Abstracts XL Fortov International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, 1–6 March 2025), 2025. С 76.

14. *Richardson R.A.* IEEE Proc. of the 18th Part. Accel. Conf. 1999. V. 3. P. 2149.
<https://doi.org/10.1109/PAC.1999.794402>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Распределение объемной плотности энергии E в мишени толщиной 1.4 мм по глубине z и радиусу r (направление распространения электронного пучка – слева направо)
- Рис. 2.** Схема постановки экспериментальных исследований на ускорителе ЛИУ-2
- Рис. 3.** Рентгенограммы и 3D-визуализация распределения яркости источника излучения в фокальном пятне: **а** – до обработки подготовительным импульсом, **б** – после обработки подготовительным импульсом
- Рис. 4.** Зависимость отношения усредненных размеров источника излучения ЛИУ-2 до и после термической обработки мишени от величины временной задержки между импульсами
- Рис. 5.** Распределение объемной плотности энергии E в мишени толщиной 2 мм по глубине z и радиусу r (направление распространения электронного пучка – слева направо)
- Рис. 6.** Пространственное распределение плотности паров разлетающейся танталовой мишени после воздействия первого импульса в моменты времени $t = 1, 2, 5, 10$ и 15 мкс). Шкала плотности представлена в логарифмическом масштабе. Размер расчетной области значительно расширен: по горизонтали (z) – до 10 см в обе стороны от мишени, по вертикали (r) – до 5 см
- Рис. 7.** Динамика разлета плазменно-пылевого облака в три характерных момента времени после воздействия первого электронного пучка на плоскую мишень. Снимки предоставлены Ю.А.Труневым
- Рис. 8.** Моделирование изображения источника излучения второго электронного импульса для плоской мишени на детекторе
- Рис. 9.** Моделирование изображения источника излучения на поверхности детектора от первого электронного импульса (плоская мишень, твердотельное состояние)
- Рис. 10.** Схема постановки экспериментальных исследований на ускорителе ЛИУ-20
- Рис. 11.** Зависимость отношения усредненных размеров источника излучения второго импульса к первому в двухимпульсном режиме работы ЛИУ-20 от временной задержки между импульсами

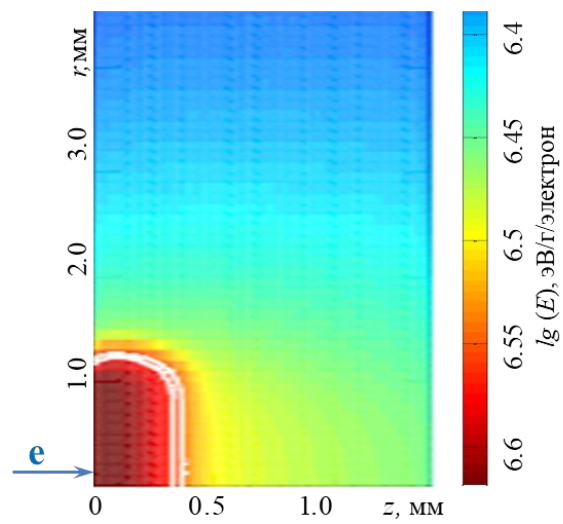


Рис. 1.

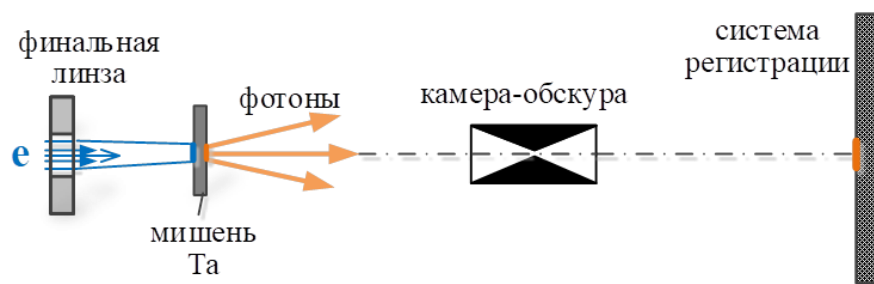


Рис. 2.

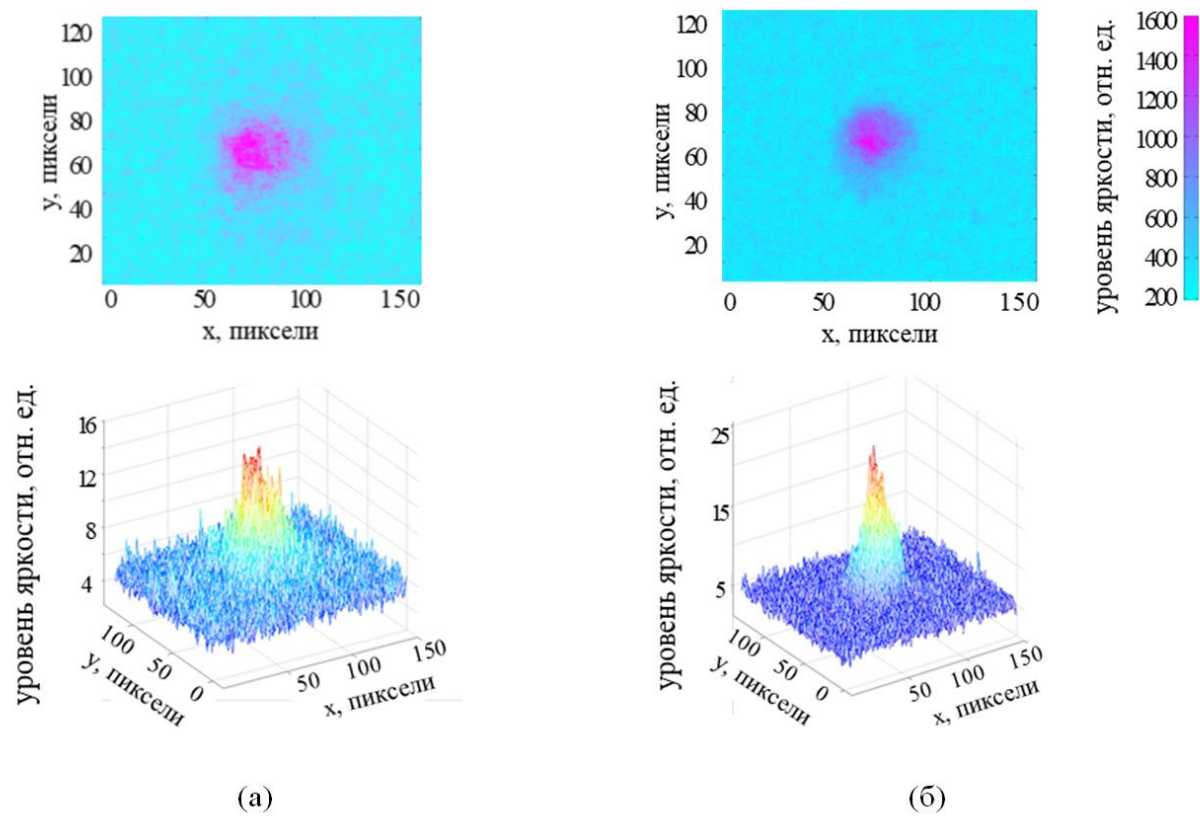


Рис. 3.

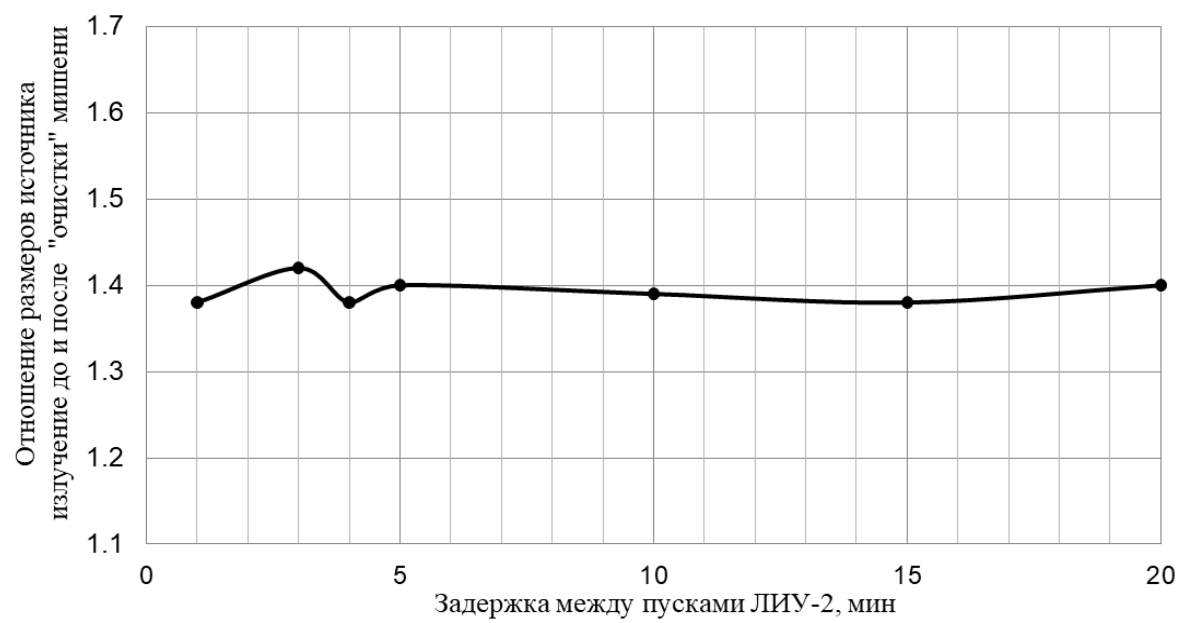


Рис. 4.

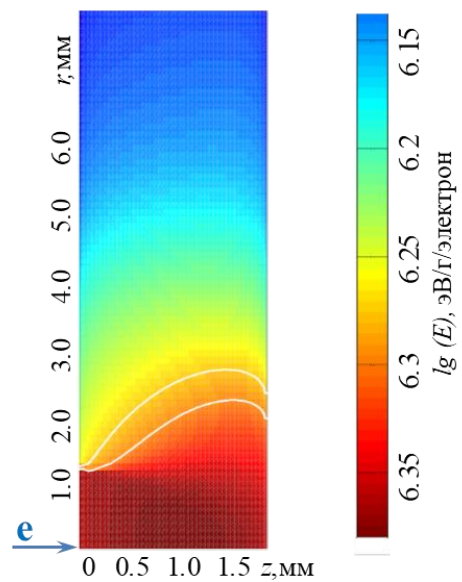


Рис. 5.

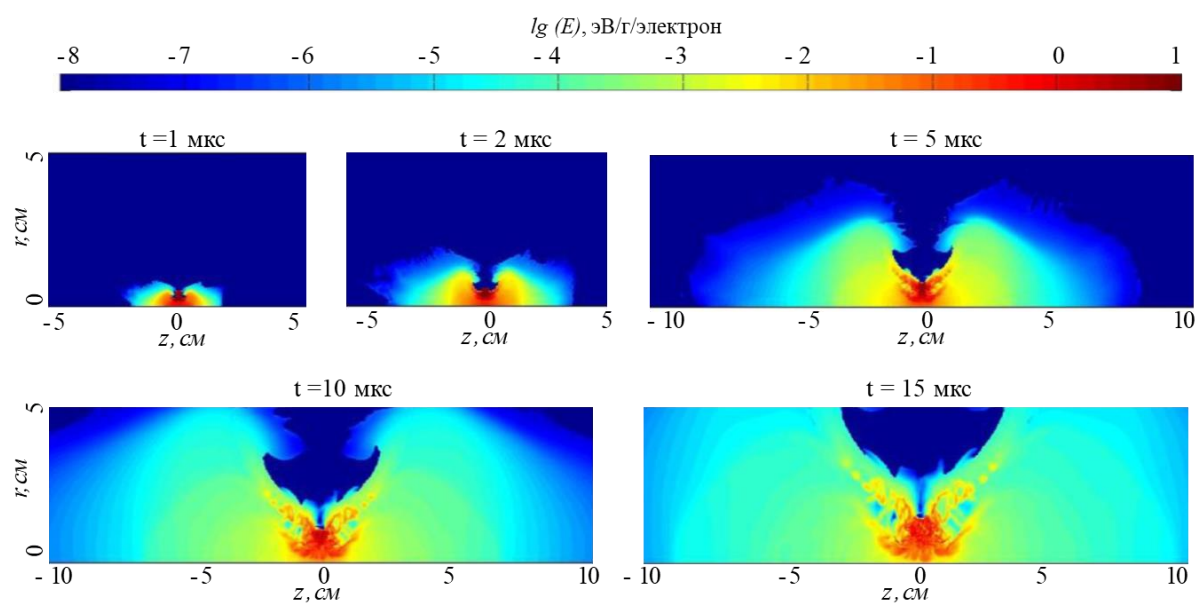


Рис. 6.

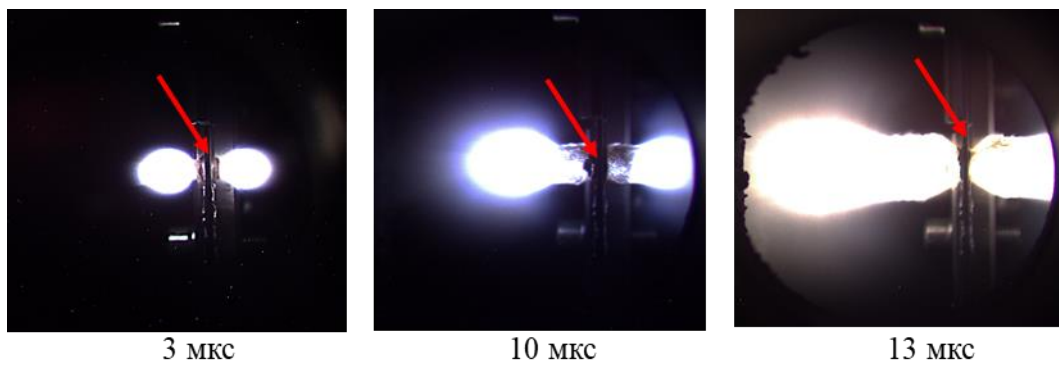


Рис. 7.

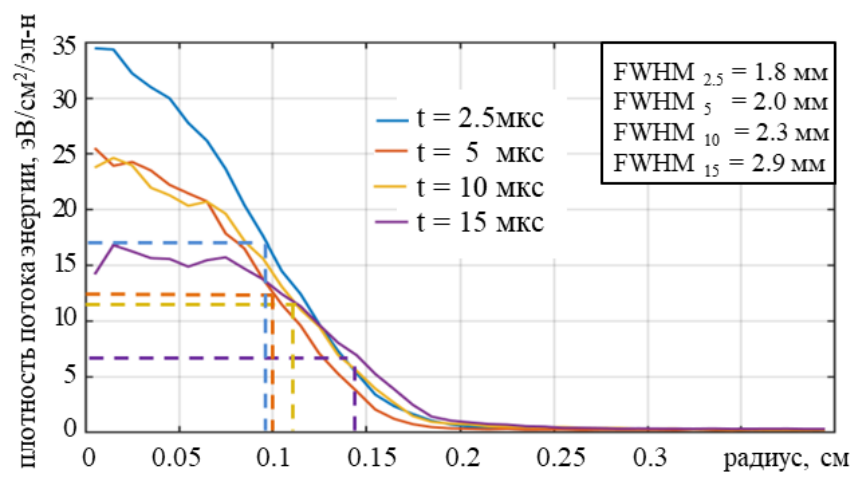


Рис. 8.

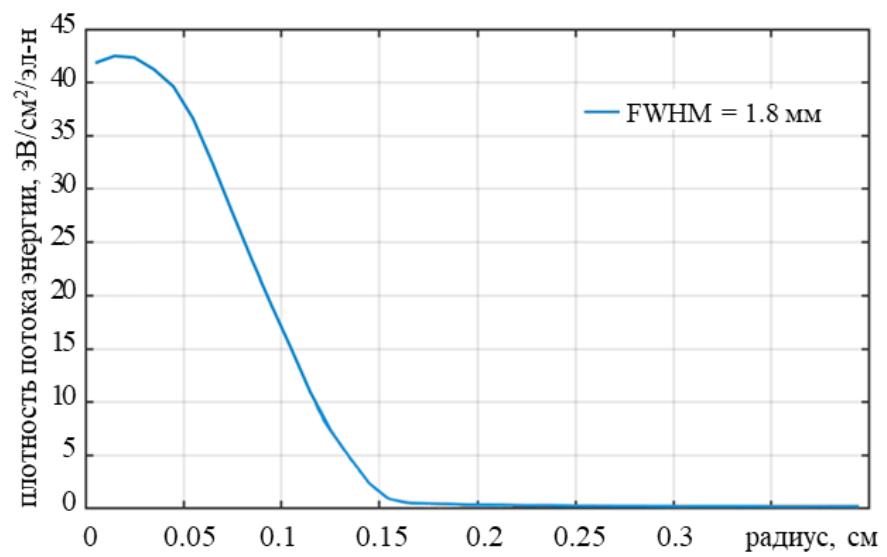


Рис. 9.

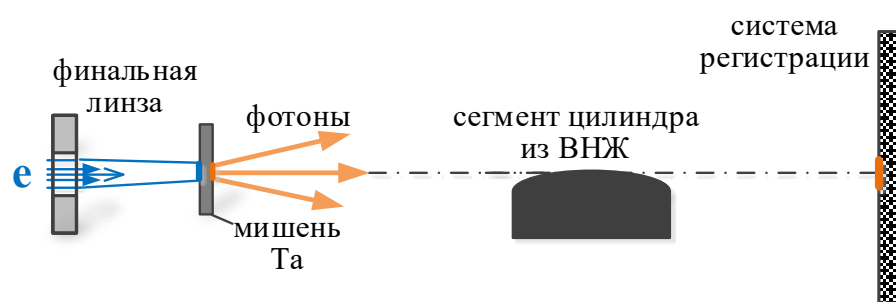


Рис. 10.

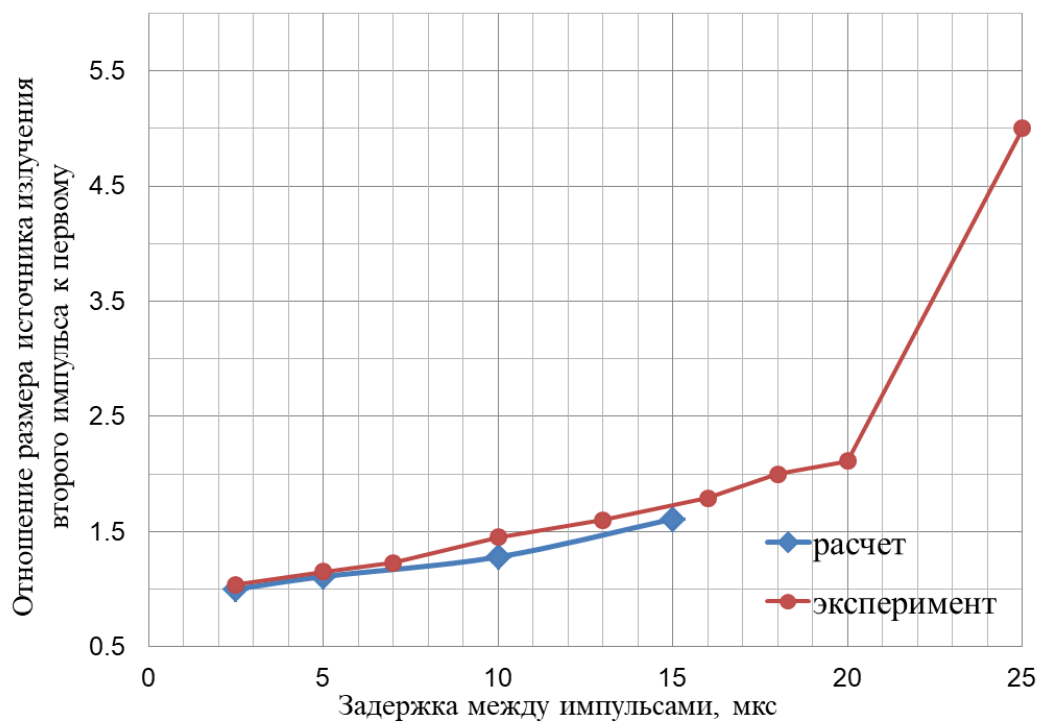


Рис. 11.