

## Моделирование движения ионов и распыления электродов в миниатюрном линейном ускорителе

И.А. Каньшин<sup>1</sup>, Н.В. Мамедов<sup>1,2,\*</sup>, А.А. Солодовников<sup>3</sup>, Н.Е. Ефимов<sup>2</sup>, А.С. Рохманенков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

\*m\_nikitos@mail.ru

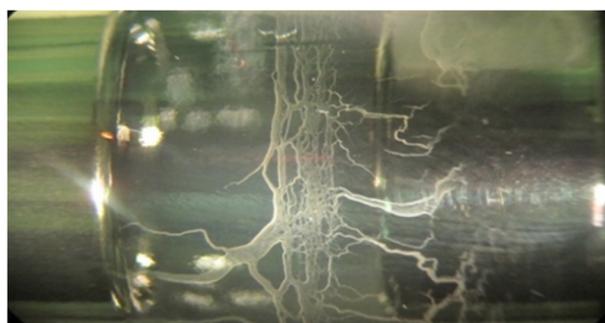
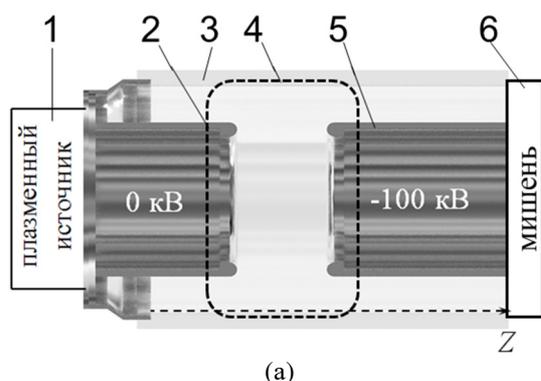
**Аннотация.** В данной работе приводятся расчет движения ионного пучка в ионно-оптической системе (ИОС) миниатюрного линейного ускорителя (МЛУ). Результаты моделирования используются для оценки распыления электродов и напыления их материала на высоковольтный изолятор ИОС. Приведены оценки скорости напыления, преимущественной области запыления изолятора и их сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** миниатюрный линейный ускоритель, распыление электродов, моделирование движения ионного пучка.

### 1. Введение

Миниатюрные линейные ускорители широко используются в различных областях науки и техники [1, 2]. Общий вид миниатюрного линейного ускорителя (МЛУ) представлен на Рис.1. МЛУ состоит из пеннинговского ионного источника [3], ионно-оптической системы (в нашем случае фокусирующего и ускоряющего электродов) [4] и мишени [5].

Одна из основных причин снижения электрической прочности миниатюрного линейного ускорителя (МЛУ) – это изменение поверхностной проводимости высоковольтного изолятора, в том числе из-за запыления его внутренней поверхности в процессе длительной работы (см. Рис.1). При напылении на изоляторе определённой толщины проводящего слоя между ускоряющим и фокусирующим электродами провоцируется высоковольтный пробой, приводящий к выходу из строя МЛУ.



(а)

(б)

Рис.1. а) Общий вид МЛУсПИИ. 1 – пеннинговский ионный источник, 2 – фокусирующий электрод, 3 – высоковольтный изолятор, 4 – напыляемая область, 5 – ускоряющий электрод, 6 – мишень. б) Результаты высоковольтного пробоя.

В данной работе приводится оценка распыления электродов ИОС МЛУ и их влияния на местоположение области запыления высоковольтного изолятора. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения ресурса МЛУ за счет увеличения электрической прочности высоковольтного изолятора путем снижения скорости его запыления в межэлектродном зазоре. Поэтому целью работы являлось создание расчетной модели, позволяющей оценить границы и толщину напыленного слоя на изоляторе МЛУ, а также указать места наибольшего распыления материалов нейтронной трубки.

## 2. Моделирование процесса запыления

Исследование процесса запыления проходило по следующему алгоритму:

1. Расчет траекторий заряженных ионов с учетом взаимодействия с нейтральным газом на основании выбранных начальных условий (в среде Comsol Multiphysics [6]);
2. Расчет распыления электродов в кодах Scatter [7], TRIM [8], SdTrimSP [9] с учетом угловых и энергетических распределений бомбардирующих частиц;
3. Расчет движения распыленных частиц в Comsol Multiphysics и получение распределения частиц на изоляторе МЛУ.
4. Оценка границ и толщины напыленного слоя.

В качестве исходных данных моделирования ионного пучка выступал эмиттанс в плоскости выходной апертуры фокусирующего электрода ИОС, методика вычисления которого описана в работе [10]. Поскольку моделирование динамики движения пучка частиц, в этом случае не учитывает движение частиц в фокусирующем электроде, были также использованы данные PIC моделирования пеннинговского ионного источника [11]. При моделировании учитывалась резонансная перезарядка молекулярного иона на молекулярном нейтрале с образованием быстрого молекулярного нейтрала и медленного молекулярного иона, а также перезарядка с последующей диссоциацией молекулярного нейтрала на атомы. Также принимались во внимание процессы ионизации остаточного газа молекулярными ионами и упругие соударения ионов и нейтральных частиц. В качестве характеристики процессов взаимодействия частиц выступали сечения указанных процессов [12]. Давление в ИОС ввиду отсутствия откачки принималось равным 5 мТорр, что соответствует рабочему давлению ионного источника [3].

На Рис.2 представлен результат моделирования (в Comsol Multiphysics) траекторий корпускулярных потоков в ИОС. Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что формируемый на выходе из фокусирующего электрода ИОС первичный пучок ионов будет проходить через апертуру ускоряющего электрода ИОС практически беспрепятственно, тем самым, не приводя к его распылению (см. Рис.2а). Рассеянные быстрые ионы и холодные ионы (образованные при ионизации) бомбардируют внутреннюю поверхность ускоряющего электрода.

Образованные вследствие перезарядки ионов первичного пучка, нейтральные атомы бомбардируют кромку и внутреннюю поверхность ускоряющего электрода (см. Рис.2б), а также внутреннюю поверхность фокусирующего электрода (но с меньшей интенсивностью).

Для различия корпускулярных потоков, падающих на соответствующие поверхности, внутренняя поверхность фокусирующего электрода, кромка и внутренняя поверхность ускоряющего электрода были разбиты на определённые области. Для каждой области построены вычисленные в Comsol Multiphysics угловое и энергетическое распределения падающих нейтральных атомов перезарядки и рассеянных ионов. В качестве примера на Рис.3 показаны данные распределения по углу и энергии нейтралов перезарядки и ионов, падающих на внутреннюю область ускоряющего электрода (обозначена зеленым на Рис.2).

Для оценки степени распыления электродов МЛУ и определения области напыления проводящего слоя на высоковольтный изолятор проводилось моделирование распыления поверхности нержавеющей стали (материал электродов ИОС МЛУ) атомами дейтерия в программных пакетах SCATTER [9], SRIM [10] и SDTrimSP [11]. В данных программах моделировались энергетические и угловые спектры отраженных и распыленных частиц. При этом для каждой области электродов учитывалось начальные угловые и энергетические распределения падающих ионов и нейтралов дейтерия. Полученные в ходе моделирования

данные загружались «обратно» в Comsol Multiphysics для расчета движения расплывённых и отражённых частиц в МЛУ.

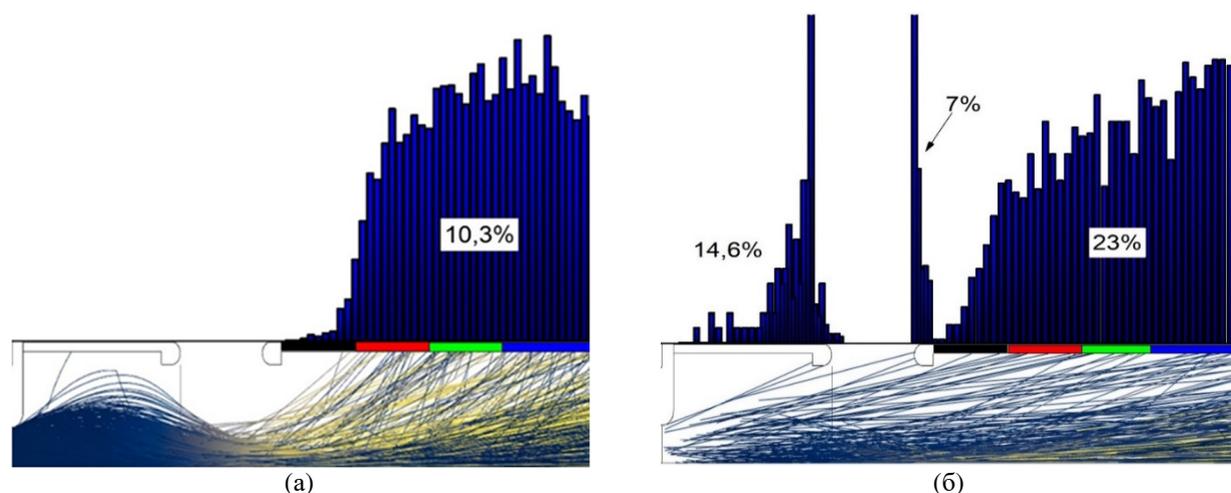


Рис.2. Расчетные траектории ионного пучка и «холодных» ионов в ИОС (а), а также расчетные траектории нейтралов на фоне основного ионного пучка в ИОС (б). Показаны 0,1% от полного промоделированного числа частиц. Гистограммой и процентами указано количество частиц от первоначального числа, упавших на различные области фокусирующего и ускоряющего электрода. Цветом выделены области, на которые условно разбита внутренняя поверхность ускоряющего электрода.

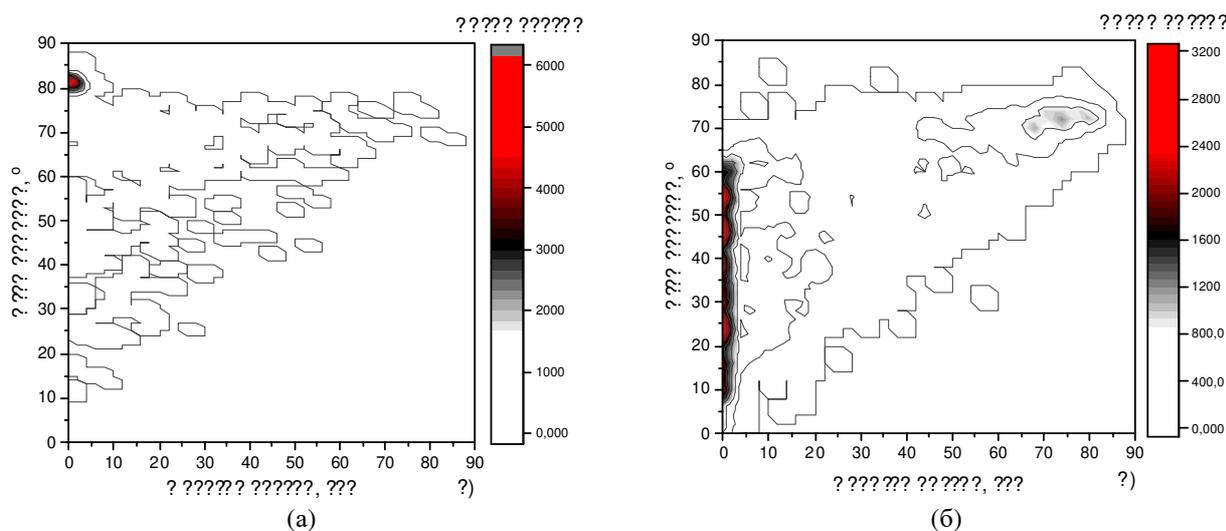


Рис.3. Распределения по углу и энергии нейтралов перезарядки (а) и ионов (б), падающих на внутреннюю область ускоряющего электрода.

### 3. Результаты моделирования и их сравнение с экспериментом

В качестве примера на Рис.4 представлены промоделированные распределения расплывённых атомов Fe, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ. Показаны области напыления частиц, расплывённых с внутренней поверхности фокусирующего электрода (1), внутренней поверхности (2) и кромки ускоряющего электрода (3). На рисунке также представлено экспериментально полученное (путем оцифровки фотоизображения) распределение напыленного слоя после 170 часов работы МЛУ. Как видно, экспериментальные данные и промоделированное распределение качественно совпадают – точно определена общая площадь напыляемого слоя.

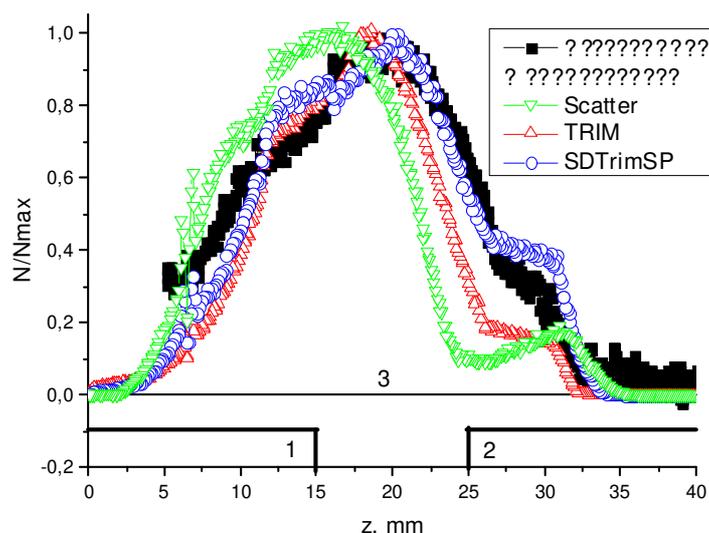


Рис.4. Распределения распыленных атомов, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ (Эксперимент и моделирование). 1 – Фокусирующий электрод, 2 – Ускоряющий электрод 3 – Высоковольтный изолятор.

На Рис.5 показаны результаты моделирования в SDTrimSP - распределения распыленных атомов Fe, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ, вылетевших с различных зон ускоряющего и фокусирующего электродов.

Как видно, основной вклад в промоделированное распределение дают частицы, распыленные с середины внутренней поверхности ускоряющего электрода. Частицы, распыленные с кромки ускоряющего электрода, перепыляются в область между фокусирующим и ускоряющим электродом ( $10 < z < 25$  мм). В зависимости от зоны внутренней поверхности ускоряющего электрода, напыляемый слой располагаются в областях:  $10 < z < 25$  мм – 1-ая зона внутренней поверхности,  $5 < z < 20$  мм - 2-ая и 3-ая зона внутренней поверхности,  $0 < z < 15$  мм – 4-ая зона внутренней поверхности. Распыление внутренней поверхности фокусирующего электрода приводит к образованию напыляемой области за ускоряющим электродом ( $15 < z < 35$  мм). Как видно из Рис.5, в центральной области изолятора (межэлектродное пространство  $15 < z < 25$  мм) напыленный слой является суперпозицией от распыления кромки и середины внутренней поверхности ускоряющего электрода.

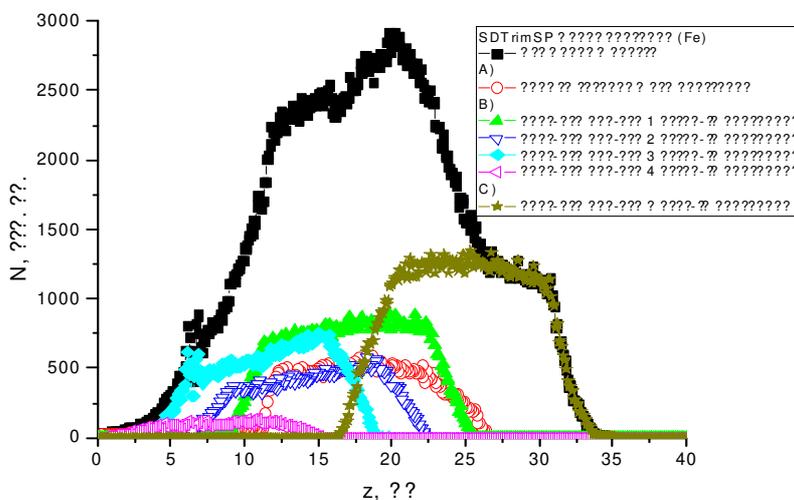


Рис.5. Распределения распыленных атомов Fe, попавших на высоковольтный изолятор МЛУ (моделирование в SDTrimSP).

#### 4. Оценка толщины и динамики напыления металлического слоя

Толщина напыляемого слоя и скорость его роста может быть оценена из следующих соображений. Количество частиц в объеме вещества можно выразить как

$$N = \frac{\rho \cdot V}{M} \cdot N_a$$

где  $\rho$  – плотность,  $V$  – объем,  $M$  – молярная масса,  $N_a$  – постоянная Авогадро.

Выражая число частиц через ток трубки, получим толщину слоя на изоляторе МЛЮ:

$$h[\text{см}] = \frac{N \cdot M}{\rho \cdot S \cdot N_a} \cdot N_a = 1.19 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{N}{S} = 7.4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{I[\text{А}] \cdot \alpha_{\text{Fe}}}{S[\text{см}^2]}$$

где  $S$  – площадь напыленного слоя,  $I$  – ток трубки,  $\alpha_{\text{Fe}} = \sum_i N_i / \sum_i N_{oi}$  – коэффициент осаждения,  $\sum_i N_i$  – общее число атомов Fe осажденных на изоляторе,  $\sum_i N_{oi}$  – общее число ионов D упавших на различные поверхности электродов.

На основе моделирования имеем:

- площадь напыленного слоя  $S = 23.2 \text{ см}^2$  (при толщине слоя 18.5 мм и диаметре баллона 20 мм);
- с учетом коэффициента распыления (на основании расчетов в SDTrimSP) и геометрическими факторами (на основании расчетов в COMSOL) коэффициент напыления (т.е. отношения напыленных на изолятор металлических частиц к потоку частиц на электроды) равен  $\alpha_{\text{Fe}} = 1.5 \cdot 10^{-1}$ ;
- при токе трубки 100 мкА, с учетом, что на электроды падает 50% эквивалентного тока.

Итого, динамика напыления слоя:

$$\rho = \frac{I \cdot \alpha_{\text{Fe}}}{e \cdot n_{\text{Fe}} \cdot S} = (4.7 \cdot 10^{13} \text{ част./с}) / (2 \cdot 10^{17} \text{ част./с}) = 2.35 \cdot 10^{-4} \text{ нм/с или } 0.85 \text{ нм/ч}$$

За характерное время работы МЛЮ в 350 часов напыленного слоя будет почти 300 нм.

#### 5. Заключение

Проведено моделирование по оценке распыления электродов ИОС МЛЮ и напыления материала электродов на высоковольтный изолятор ИОС. Полученная область запыления изолятора находится в качественном соответствии с экспериментальными данными. Показаны области электродов ИОС МЛЮ, распыление которых приводит к наибольшему вкладу в напыляемый на изолятор металлический слой. Оценена величина напыляемого слоя металла на изолятор  $\rho = 0.85 \text{ нм/ч}$ .

#### 6. Литература

- [1] Vladivoj V., *14 MeV Neutrons. Physics and Applications*. (New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016).
- [2] *Neutron Generators for Analytical Purposes in IAEA Radiation Technology Reports, No. 1*. (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012).
- [3] Mamedov N.V., Gubarev A.V., et al., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**(2), 025001, 2020; doi: 10.1088/1361-6595/ab6758
- [4] Kanshin I.A., *Proceeding of 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 474, 2020; doi:10.1109/EFRE47760.2020.9241976

- [5] Syromukov S.V., *Atomic Energy*, **128**(1), 35, 2020; doi: 10.1007/s10512-020-00647-x
- [6] Comsol Multiphysics [online]; [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
- [7] Trifonov N.N., et al., *Vacuum*, **56**, 253, 2000; doi: 10.1016/S0042-207X(00)00136-6
- [8] TRIM [online]; [www.srim.org](http://www.srim.org)
- [9] Eckstein W., Dohmen R., Mutzke A., Schneider R., *SDTrimSP: A Monte-Carlo Code for Calculating Collision Phenomena in Randomized Targets (IPP 12/3)*, 3, 1, 2007; doi: 11858/00-001M-000-0027-04E8-F
- [10] Kanshin I.A., Solodovnikov A.A., *Instruments and Experimental Techniques*, **3**, 315, 2020; doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111194
- [11] Mamedov N.V., Rohmanenkov A. S., et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 123310 (2019); doi: 10.1063/1.5127921
- [12] Tabata T., Shirai T., *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **76**, 1, 2000; doi: 10.1006/adnd.2000.0835