

Электронные и ионные пучки

УДК 621.384

Комплексный подход в изучении динамики корпускулярного пучка в ионно-оптической системе нейтронной трубки

А.Н. Долгов, В.Г. Марков, А.А. Окулов, Д.Е. Прохорович, А.Г. Садилкин, Д.И. Юрков, И.В. Визгалов, В.И. Рашиков, Н.В. Мамедов, Д.В. Колодко

Реализован комплексный подход, заключающийся в экспериментальном исследовании параметров корпускулярных потоков на выходе из ионного источника и компьютерном моделировании с учетом зарегистрированных параметров транспортировки пучка непосредственно в ионно-оптической системе, что позволило избежать создания «сквозной» расчетной модели работы нейтронной трубки.

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Sm

Ключевые слова: нейтронная трубка, ионный источник, ионно-оптическая система, эмиттанс, ускорительный зазор, компьютерное моделирование.

Введение

Большинство работ, посвященных совершенствованию нейтронных трубок, ведутся в направлении повышения стабильности работы ионных источников [1–3], а также улучшения технических характеристик мишеней [4, 5]. Однако немаловажными (с точки зрения повышения рабочих параметров нейтронных трубок) являются процессы ускорения пучка, а также его транспортировки с минимальными потерями. Ионно-оптическая система является неотъемлемой частью нейтронной трубки и определяет энергию ускоренных дейтронов, которая, в частности, влияет на нейтронный поток. В нейтронной трубке при отсутствии должной фокусировки дейтронного (тритонного) пучка существуют проблемы рас-

пыления электродов ионно-оптической системы, приводящие, кроме всего прочего, к появлению проводящего слоя на поверхности высоковольтного изолятора и дальнейшему электрическому пробое. Кроме того, к ионно-оптической системе предъявляется требование формирования пучка ионов, как правило, с постоянной плотностью тока для обеспечения равномерной плотности теплового потока на поверхность мишени. Указанные обстоятельства повышают роль математического моделирования ионно-оптической системы, ориентированного на специфику работы нейтронной трубки. Поэтому актуальной является задача оптимизации ионно-оптической системы нейтронной трубки на основе комплексного физико-математического моделирования.

Целью представляемой работы явилось развитие комплексного подхода к изучению особенностей транспортировки пучка заряженных частиц в нейтронной трубке, заключающегося в экспериментальных исследованиях параметров корпускулярных потоков на выходе из ионного источника и компьютерном моделировании транспортировки пучка непосредственно в ионно-оптической системе с учетом зарегистрированных параметров.

Диагностические методы, представленные в данной работе, и результаты, полученные с их помощью, являются продолжением исследований, начатых в [6]. Именно, реализованы метод измерения эмиттанса корпускулярного пучка, экстрагируемого из ионного источника, и оптический метод визуализации следа этого пучка в ионно-оптической системе нейтронной трубки. Приведены результаты компьютерного моделирования процессов транспортировки корпускулярного

Долгов Александр Николаевич, вед. научный сотрудник.
Марков Виктор Григорьевич, ведущий инженер.
Окулов Алексей Алексеевич, аспирант.
Прохорович Дмитрий Евгеньевич, ст. научный сотрудник.
Садилкин Александр Геннадьевич, аспирант.
Юрков Дмитрий Игоревич, зам. главного конструктора.
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматизации им. Н.Л. Духова.
Россия, 127055, Москва, ул. Суцеская, 22.
Тел.: (499) 400–19–48. E-mail: vniia4@vniia.ru
Визгалов Игорь Викторович, доцент.
Рашиков Владимир Иванович, доцент.
Мамедов Никита Вадимович, научный сотрудник.
Колодко Добрыня Вячеславович, студент.
НИЯУ МИФИ.
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31,
E-mail: vizgalov@plasma.mephi.ru

Статья поступила в редакцию 13 мая 2014 г.

© Долгов А.Н., Марков В.Г., Окулов А.А., Прохорович Д.Е., Садилкин А.Г., Юрков Д.И., Визгалов И.В., Рашиков В.И., Мамедов Н.В., Колодко Д.В., 2014

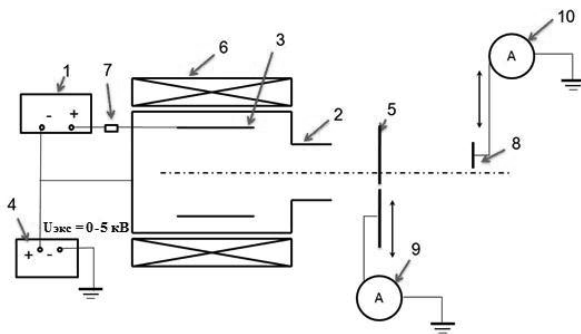


Рис. 1. Принципиальная схема измерений: 1 — блок питания ионного источника; 2 — катод ионного источника; 3 — анод ионного источника; 4 — блок питания, задающий положительное смещение ионного источника относительно земли; 5 — подвижная пластинка с круглой диафрагмой; 6 — магнитная система ионного источника; 7 — балластное сопротивление; 8 — подвижный измерительный зонд; 9, 10 — амперметры.

пучка в нейтронных трубках, где в качестве исходных данных использованы экспериментально полученные результаты.

Измерение эмиттанса корпускулярного пучка, экстрагируемого из ионного источника

Согласно работе [7], эмиттанс — критерий, позволяющий количественно характеризовать качество пучка заряженных частиц, который связан с проекцией фазового объема пучка на плоскость, перпендикулярную оси пучка. Эмиттанс отражает наличие у ионов тепловых скоростей, которые вносят вклад в расходимость пучка, и изображает «портрет» пучка в фазовом пространстве [8].

Диаграмму эмиттанса можно получить экспериментально, устанавливая соответствующие расположения щелей и экранов (рис. 1). На расстоянии 5 мм от выходного отверстия ионного

источника установлена на подвижном прецизионном вводе пластинка с круглой диафрагмой диаметром 1,6 мм. Диафрагма может смещаться относительно оси источника на 6,5 мм влево и на 5,2 мм вправо. На расстоянии 50 мм от пластинки на таком же подвижном вводе установлен измерительный прямоугольный зонд с размерами 2,5×3 мм, его ход ограничен расстоянием 12,5 мм вправо и 6,5 мм влево. Рабочее давление в камере 10^{-3} – 10^{-4} Торр, рабочий газ — водород.

Блок питания 1 использован для зажигания и поддержания разрядного тока в ионном источнике. Катод 2 и анод 3 ионного источника «оторваны» от земли и помещены под положительный потенциал смещения относительно корпуса экспериментальной установки, задаваемый с помощью блока питания 4. При этом заземленная подвижная пластина с круглой диафрагмой 5 находилась под отрицательным потенциалом относительно катода ионного источника и играла роль вытягивающего электрода для положительных ионов, генерируемых в ионном источнике.

Для того чтобы уменьшить тепловую нагрузку на ионный источник и не превзойти точку Кюри магнитной системы 6, в схему установлено охлаждаемое воздухом балластное сопротивление 7 номиналом 50 кОм. Анодный ток в цепи ионного источника был ограничен величиной 4–5 мА при максимальном напряжении на разряде 2 кВ. Величины токов корпускулярного пучка, экстрагируемого из ионного источника, на подвижной пластинке 5 и измерительном зонде 8 регистрировались с помощью амперметров 9 и 10, соответственно. Меняя положение круглой диафрагмы 5 и измерительного зонда 8, можно определить пространственную конфигурацию экстрагируемого пучка ионов.

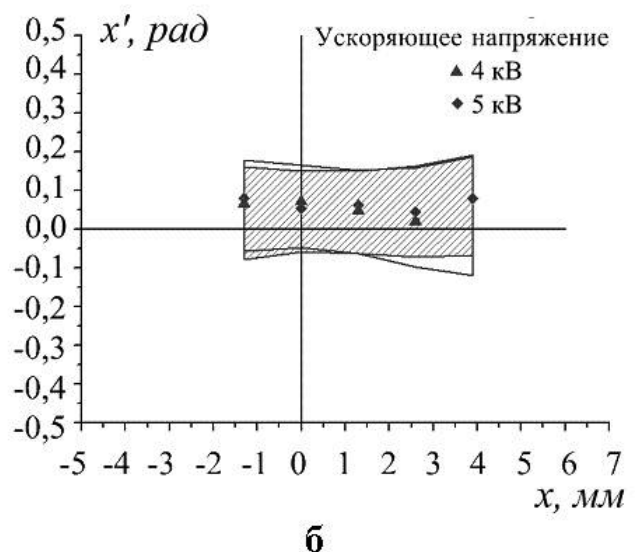
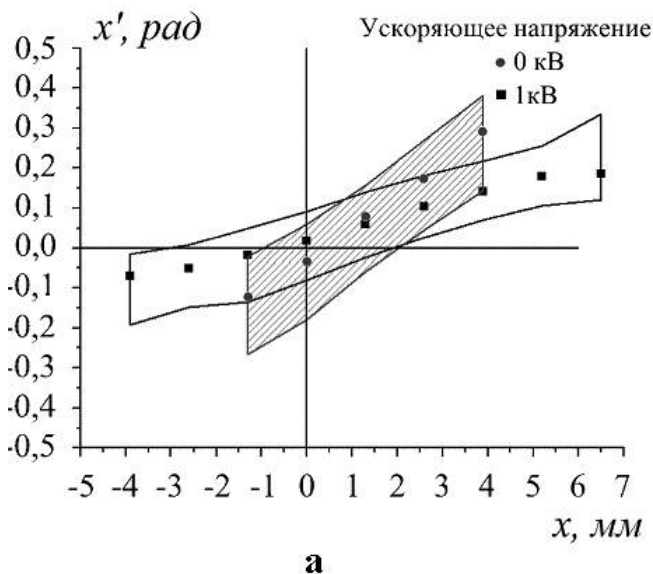


Рис. 2. Диаграммы эмиттанса корпускулярного пучка, экстрагируемого из ионного источника, при различных величинах ускоряющего напряжения: а) $U_{\text{уск}} = 0$ кВ и 1 кВ; б) $U_{\text{уск}} = 4$ кВ и 5 кВ.

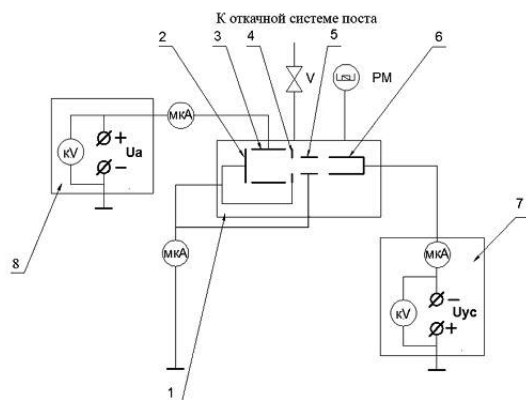


Рис. 3. Принципиальная схема эксперимента по исследованию фокусирующих свойств ускорительного зазора: 1 — вакуумная камера стенда; 2 — катод ионного источника; 3 — анод ионного источника; 4 — антикатод ионного источника; 5, 6 — электроды ионно-оптической системы ускорительного зазора; 7, 8 — стабилизированные высоковольтные источники питания.

Зарегистрированные диаграммы эмиттанса корпускулярного пучка, экстрагируемого из ионного источника, представлены на рис. 2 (для лучшего восприятия на каждом из рисунков представлены по две диаграммы эмиттанса, соответствующие разным ускоряющим напряжениям).

Пучок, экстрагируемый из ионного источника, при малых ускоряющих напряжениях не сфокусирован (рис. 2, а). Дальнейшее повышение экстрагирующего напряжения приводит к тому, что пучок становится аксиальным (рис. 2, б). Тем самым, из-за изменения ускоряющего напряжения меняется геометрия эквипотенциальных поверхностей и, соответственно, геометрия пучка экстрагируемых ионов [9]. Можно ожидать, что дальнейшее увеличение ускоряющего напряжения будет способствовать фокусировке ионного пучка в ускорительном зазоре.

Изучение фокусирующих свойств ионно-оптических систем путем визуализации следа пучка в ускорительном зазоре

Реализован экспериментальный метод «свещающихся ионных пучков» [10], который основан на визуализации траектории пучка ионов по свечению остаточного газа в видимом диапазоне спектра.

Регистрация траекторий светящегося пучка осуществлялась фотографическим способом. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 3. Ионный источник пеннинговского типа располагался в вакуумной камере 1 и функционировал при постоянном анодном напряжении 2—2,2 кВ, давлении рабочего газа (водорода) 2,4 мТорр. Ионно-оптическая система представлена двумя электродами, один из которых, а именно, 5, находится под потенциалом катодов 2 и 4 ионного

источника, а другой, т.е. 6, — под высоковольтным ускоряющим потенциалом.

Для подачи напряжения на анод 3 ионного источника использован стабилизированный высоковольтный источник питания 8 с выходным напряжением положительной полярности в диапазоне 0—6 кВ, который снабжен встроенными приборами, а именно, миллиамперметром и киловольтметром. На ускоряющий электрод подавалось отрицательное ускоряющее напряжение в диапазоне 0—60 кВ.

На рис. 4 представлены результаты визуализации траекторий пучков ионов, которые свидетельствуют об усилении фокусирующих свойств ускорительного зазора при повышении ускоряющего напряжения, что является подтверждением сделанного выше предположения. Реализованный в данной работе экспериментальный метод «свещающихся ионных пучков» даёт возможность изучения фокусирующих свойств ионно-оптических систем различных конструкций.

Компьютерное моделирование транспортировки корпускулярного пучка в ионно-оптической системе

Для моделирования движения пучка частиц в ускорительном зазоре использован 2,5-мерный релятивистский электромагнитный PIC (particle-in-cell) код СУМА (Система Уравнений Максвелла) [11—13].

Код представляет собой 2,5-мерную нестационарную модель, позволяющую описывать самосогласованным образом динамику заряженных частиц в прямоугольной, цилиндрической и полярной системах координат.

В пакете также реализована возможность расчета стационарного режима при наличии только квазистатических полей. В этом случае поле находится путем решения уравнения Пуассона на конечно-разностной сетке с использованием релаксационного метода Чебышева. На первом этапе решается уравнение Лапласа с заданными граничными условиями и распределением потенциалов на электродах. Затем либо моделируется эмиссия пучка с поверхности, являющейся ближайшей эквипотенциалью к поверхности инжекции, либо задаётся начальное распределение частиц пучка и его ток на выходе ионного источника.

Результаты компьютерного моделирования движения пучка дейтронов в ускорительном зазоре нейтронной трубки представлены на рис. 5 и находят качественное согласие с результатами экспериментальных исследований (рис. 4).

Моделирование с помощью кода СУМА процессов в нейтронной трубке при изменении элект-

тродинамических параметров ускорительного зазора, позволило проанализировать режимы генерации нейтронных импульсов с наносекундной модуляцией тока инжекции дейтронов и учесть влияние вторичных электронов, образующих-

ся как в результате ионно-электронной эмиссии с поверхности мишени в местах попадания дейтронов, так и электронов и медленных ионов, возникающих в процессе ионизации остаточного газа и образовании ионно-пучковой плазмы. Для

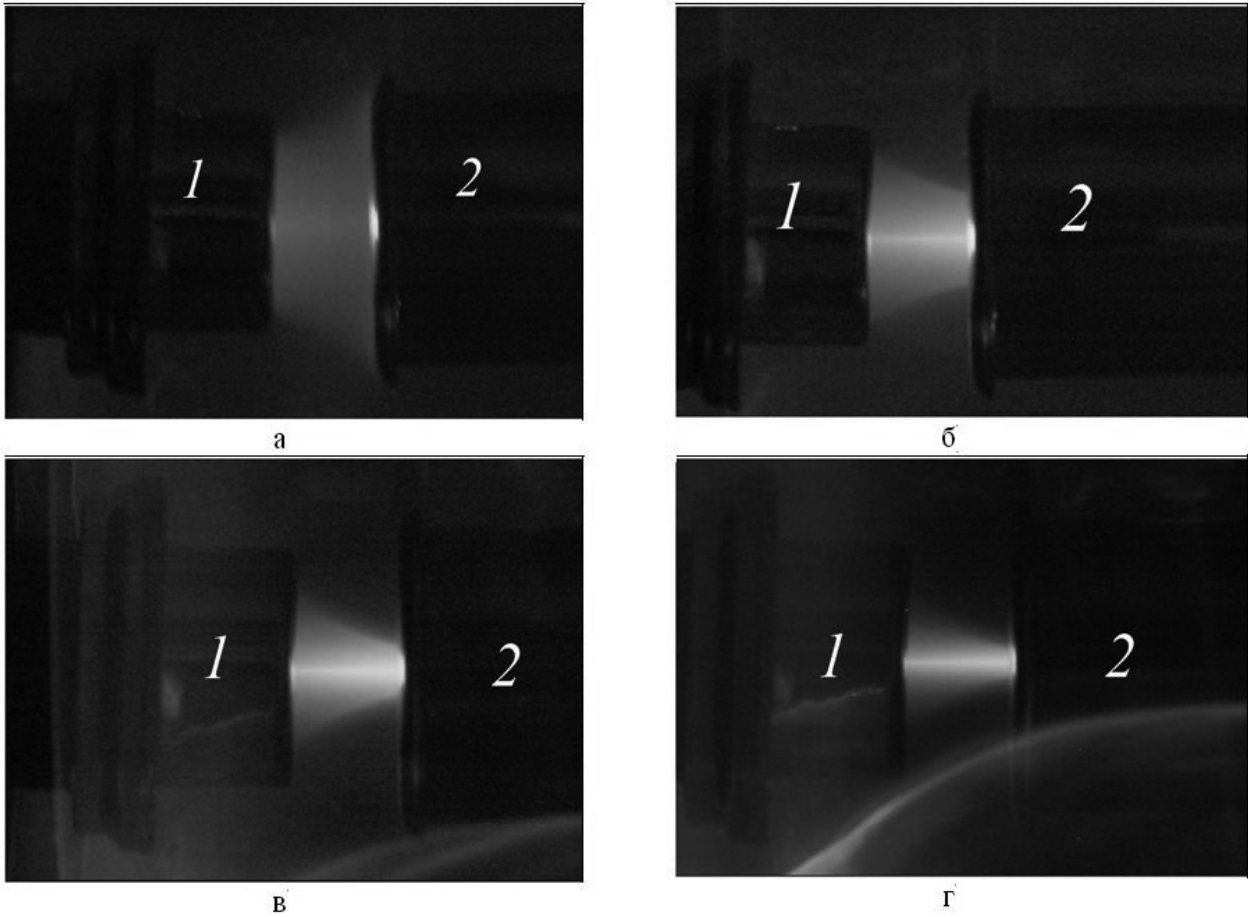


Рис. 4 Фотографическое изображение ионного пучка в ускорительном зазоре при различных величинах ускоряющего напряжения: а) $U_{\text{уск}} = 0$ кВ; б) $U_{\text{уск}} = -10$ кВ; в) $U_{\text{уск}} = -30$ кВ; г) $U_{\text{уск}} = -60$ кВ. Обозначения на рисунке: 1 — низковольтная ступень ускорительного зазора со стороны ионного источника, 2 — высоковольтная ступень ускорительного зазора со стороны мишени.

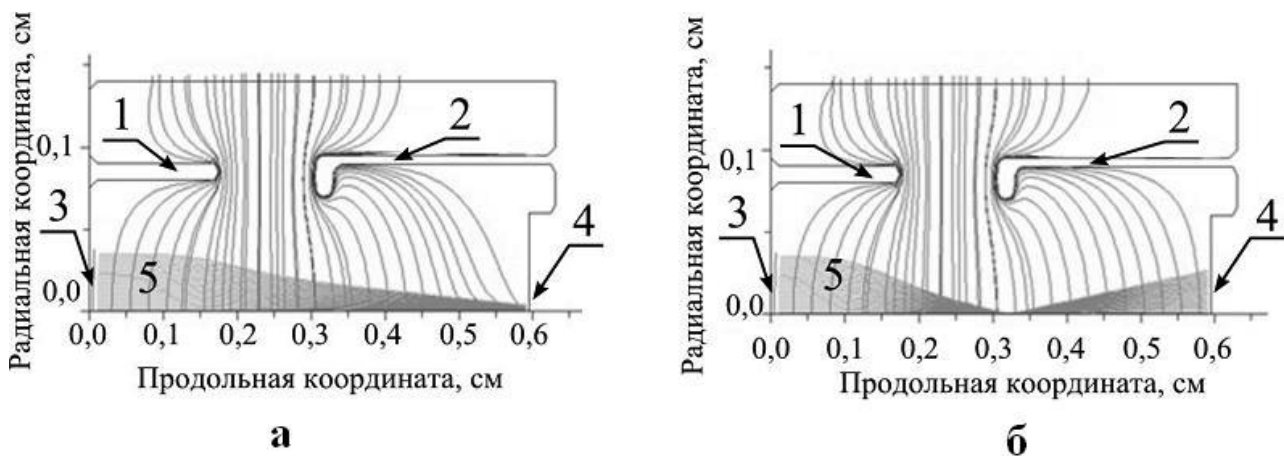


Рис. 5 Проекция эквипотенциальных поверхностей электрического поля на плоскость изображения и форма транспортируемого ионного пучка в ускорительном зазоре при различных величинах ускоряющего напряжения: а) $U_{\text{уск}} = -10$ кВ; б) $U_{\text{уск}} = -50$ кВ. Обозначения на рисунке: 1 — низковольтная ступень ускорительного зазора со стороны ионного источника, 2 — высоковольтная ступень ускорительного зазора со стороны мишени, 3 — выходное отверстие ионного источника, 4 — плоскость мишени, 5 — транспортируемый пучок ионов.

приведенных выше параметров нейтронной трубки величины собственных полей как первичных, так и вторичных заряженных частиц оказываются значительно меньше внешнего поля. Поэтому наличие вторичных частиц не приводит к существенному изменению динамики дейтронов. Однако в системе появляется ток электронов, на порядок превышающий ток дейтронов, что может привести к необходимости учёта переходных процессов в цепи источника питания для корректного моделирования.

С ростом тока дейтронов, когда величина их собственного поля оказывается сравнимой с полем внешнего источника, влияние вторичных частиц на его динамику заметно усиливается. В частности, наблюдается частичная компенсация сил пространственного заряда дейтронов вторичными электронами, захваченными их собственным полем, что приводит к значительным изменениям динамики дейтронов и, как следствие, к изменениям выходных параметров нейтронной трубки.

Заключение

Впервые реализован комплексный подход, заключающийся в экспериментальных исследованиях параметров корпускулярных потоков на выходе из ионного источника и компьютерном моделировании с учетом зарегистрированных параметров транспортировки пучка непосредственно в ионно-оптической системе, что позволило избежать создания «сквозной» расчетной модели работы нейтронной трубки.

Данная работа и работа [6] выполнены при поддержке гранта РФФИ № 12-02-13510-офи_М_РА.

Литература

1. Ludewight B, Ji Q., Arun Persaud A., et al. Neutron Source R&D — from Compact Generators to Neutron / Proceedings of FNDA 2011, November 9, 2011.
2. Jung H. D., Park M. J., Kim S. H., and. Hwang Y. S. // Review of Scientific Instruments. Vol. 75. No. 5. P. 1878
3. Schenkel Thomas. Advanced Neutron Generators for Replacement of Radiological Sources / Nuclear Engineering Colloquium, Berkeley, March 19, 2012.
4. Falabella S., Tang V., Ellsworth J., Mintz J. M. Protective over coatings on thin-film titanium targets for neutron generators / Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A (2013).
5. Баянов Б.Ф., Белов В.П., Таскаев С.Ю. Нейтроногенерирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронозахватной терапии. ИЯФ 2005—4.
6. Долгов А.Н., Марков В.Г., Окулов А.А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 739
7. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. — М.: Мир, 1980.
8. Курнаев В.А., Протасов Ю.С., Цветков И.В. Введение в пучковую электронику. МИФИ, Москва, 2008.
9. Физика и технология источников ионов. Под ред. Я. Брауна: Пер. с англ. — М.: Мир, 1998.
10. Белых С.Ф., Евтухов Р.Н., Луткова Л.В. и др. // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 6. С. 179
11. Ращиков В.И. Расчет электромагнитных полей в структурах сложной геометрии. В кн.: Вопросы атомной науки и техники Серия: Ядерно-физические исследования. Вып. 10 (18), — М.: 1990
12. Ращиков В.И. Поле пространственного заряда пучка в структуре с трубками дрейфа. В кн.: Линейные ускорители. Теория и эксперимент. — М.: Энергоатомиздат, 1991
13. Диденко А.Н., Ращиков В.И., Фортон В.Е. // Письма в ЖТФ/ 2011. Т. 37. № 6. С. 27

Integrated approach in the investigation of corpuscular beam dynamics in ion-optical system of the neutron tube

A.N. Dolgov, V.G. Markov, A.A. Okulov, D.E. Prokhorovich, A.G. Sadilkin, D.I. Yurkov, I.V. Vizgalov, V.I. Rashchikov*, N.V. Mamedov*, and D.V. Kolodko**

All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA)
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia
E-mail: vniia4@vniia.ru

*National Research Nuclear University «MEPhI» (NRNU MEPhI)
31 Kashirskoye av., Moscow, 115409, Russia,
E-mail: vizgalov@plasma.mephi.ru

Received May 13, 2014

A complex approach to the investigation of neutron tube functioning is realized. Proposed method consists of flux parameters experimental research of particles leaving ion source and mathematical modeling of particle beam transportation through the ion system taking into account experimentally registered flux parameters. This method allows to avoid modeling of neutron tube functioning in the whole.

PACS: 52.50.Dg, 52.70.Nc, 52.80.Sm

Keywords: neutrontubes, ionsource, ion-optical system, emittance, acceleration gap, mathematical modeling.

References

1. Bernhard Ludewight, Qing Ji, Arun Persaud, et al., *(LNBL) Neutron Source R&D — from Compact Generators to Neutron*, in *Proceedings of FNDA 2011* (November 9, 2011).
2. H. D. Jung, M. J. Park, S. H. Kim, and Y. S. Hwang, *Review of Scientific Instruments* **75**, 1878.
3. Thomas Schenkel, *Advanced Neutron Generators for Replacement of Radiological Sources*, in *Proceedings of the Nuclear Engineering Colloquium* (Berkeley, March 19, 2012).
4. S. Falabella, V. Tang, J. Ellsworth, J. M. Mintz, *Protective over Coatings on Thin-Film Titanium Targets for Neutron Generators*; in *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* (2013).
5. B. F. Bayanov, V. P. Belov, and S. Yu. Taskaev, *Target for Neutron Generation of the Neutron Accelerative Source for Neutron Therapy* (IYaF, Russia, 2005) [in Russian].
6. A. N. Dolgov, V. G. Markov, A. A. Okulov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 739 (2013).
7. J. D. Lawson, *The Physics of Charged Particle Beams* (Clarendon Press, Oxford, 1977; Mir, Moscow, 1980).
8. V. A. Kurnaev, Yu. S. Protasov, and I. V. Tsvetkov, *Introduction in the Beam Electronics* (MEPhI, Moscow, 2008) [in Russian].
9. *The Physics and Technology of Ion Sources*. Ed. by Ian G. Brawn (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989; Mir, Moscow, 1998)
10. S. F. Belykh, R. N. Evtukhov, L. V. Lutkova, et al., *Tech. Phys.* **62**, 179 (1992).
11. V. I. Rashchikov, *Calculation of Electromagnetic Fields in the Complicated Geometry Structures*; in *Book: Problems of Atom Science and Technique*, Issue 10 (18), 50 (1990) [in Russian].
12. V. I. Rashchikov, *A Space-Charged Field of the Beam in the Structure with Drift Tubes*; in *Book: Linear Accelerators* (Energoatomizdat, Moscow, 1991), pp. 48–55 [in Russian].
13. A. N. Didenko, V. I. Rashchikov, and V. E. Fottov, *Tech. Phys. Lett.* **37**, 27 (2011).