

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 533.9.072

### НАГРЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА ВАКУУМНОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ ПОРТАТИВНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОВЫШЕННЫМ НЕЙТРОННЫМ ВЫХОДОМ

© 2024 г. Д. С. Степанов<sup>а</sup>, \*, А. П. Скрипник<sup>а</sup>, Э. Я. Школьников<sup>а</sup>, А. А. Исаев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

<sup>б</sup>Российский технологический университет МИРЭА, Москва, 119454 Россия

\*E-mail: apskripnik@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2024 г.

После доработки 21.06.2024 г.

Принята к публикации 28.06.2024 г.

Проанализированы генерация и динамика обратных электронных потоков в мощной вакуумной нейтронной трубке, приводящих к интенсивному нагреву элементов разрядного узла вплоть до их плавления. Рассмотрен вклад каждой компоненты обратного электронного потока в нагрев разрядного узла.

**Ключевые слова:** нейтронный генератор, ядерные реакции, плазменные потоки, дейтерий, тритий, электрон

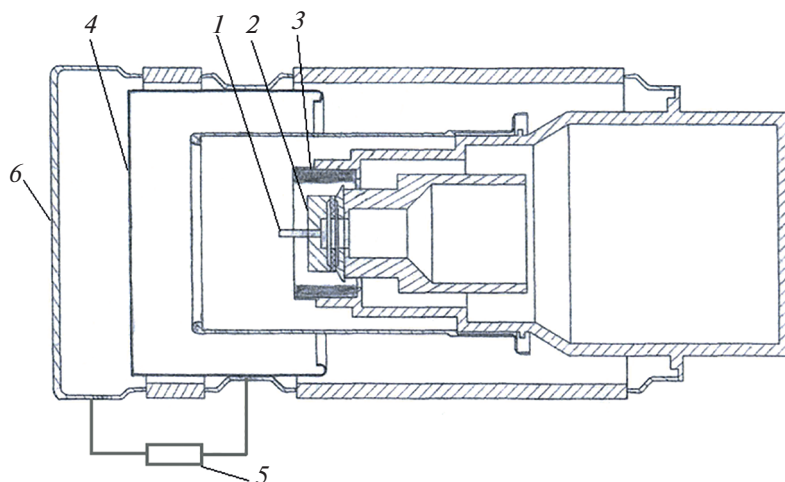
**DOI:** 10.56304/S2079562924060423

#### ВВЕДЕНИЕ

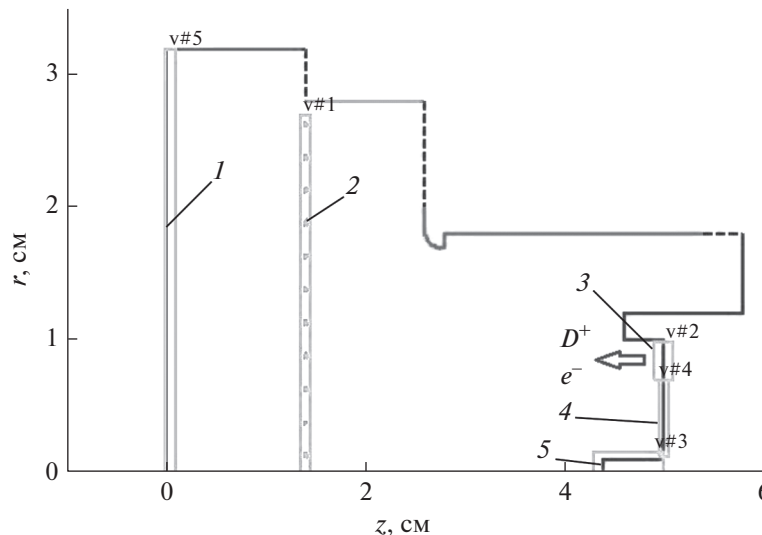
Вакуумные нейтронные трубки (ВНТ) являются важнейшей составной частью портативных нейтронных генераторов, которые в настоящее время нашли широкое применение в целом ряде промышленных технологий. В качестве примера можно указать каротаж нефтегазоносных и других скважин, медицинские применения, конвейерное производство рудных продуктов и т.д. В последние годы развитие новых технологий привело к

востребованности ВНТ с повышенным нейтронным выходом, превышающем  $10^9$  н/имп. Это повлекло за собой проблему перегрева элементов разрядного узла ионного источника, являющегося составной частью ВНТ, под воздействием вторичных электронных потоков, что может приводить к значительному сокращению ресурса его работы.

На рис. 1 представлен эскиз типичной конструкции разрядного промежутка ВНТ портативного нейтронного генератора [1–3]. Здесь 1, 2, 3 пред-



**Рис. 1.** Эскиз конструкции разрядного промежутка ВНТ портативного нейтронного генератора.



**Рис. 2.** Расчетная модель в коде KARAT: 1 – нейтронообразующая мишень, 2 – антидинаatronная сетка, 3 – поджигающий электрод, 4 – катод, 5 – шпилька.

ставляют собой элементы разрядного узла, 4 – антидинаatronную сетку, 5 – резистор, 6 – мишень.

Мишень находится под высоким отрицательным синусоидальным напряжением, а амплитуда напряжения на сетке меньше этой величины. Ионный поток, образующийся в результате вакуумного дугового разряда, содержащий главным образом атомарные ионы дейтерия, проходит через сетку и взаимодействует с мишенью, содержащей дейтерий и/или тритий. Нейтроны образуются в результате протекания ядерных реакций  $D(d,n)^3\text{He}$  и  $T(d,n)^4\text{He}$ . При столкновении ускоренных частиц с мишенью, а также с другими элементами трубки возникает вторичная ионно-электронная эмиссия, и вторичный поток электронов ускоряется приложенным напряжением по направлению к разрядным электродам ионного источника, в результате чего происходит его нагрев. Часть электронного потока от нейтронообразующей мишени задерживается антидинаatronной сеткой, имеющей отрицательный относительно мишени потенциал. В то же время, сама сетка также является источником вторичных электронов, так как небольшая часть потока дейтронов на пути к мишени сталкивается с сеткой. Еще одна часть суммарного электронного потока генерируется за счет ионизации остаточного газа.

## 1. МОДЕЛЬ ВНТ

Анализ динамики потоков заряженных частиц и нагрева элементов разрядного узла ВНТ и имеющий конечной целью выработку способов защиты от перегрева осуществлялся с помощью кода KARAT [4], включающего PiC-метод. Нагрев ионного источника моделировался в пакете CST

Mphysics [5], с помощью теплового источника, с мощностью, равной мощности пучка. Охлаждение рассчитывалось согласно механизмам естественной конвекции и теплового излучения. Общая длительность циклов нагрева и охлаждения составляла 10 мин, для получения установившейся температуры электродов. Теплофизические параметры материала в модели соответствуют параметрам меди при нормальных условиях. Контрольные расчеты для некоторых режимов были сделаны с помощью пакета COMSOL Multiphysics [6], которые показали удовлетворительное соответствие нашим рабочим расчетам.

На первом этапе расчетов не учитывался газ в объеме ВНТ. Начальная концентрация дейтериевой плазмы соответствовала максимальному ионному току в 10 А и равнялась  $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При этом энергия электронов и ионов равнялась 1.6 эВ и 6 кэВ соответственно. В используемой расчетной модели (рис. 2) потенциал ионного источника (3, 4, 5) был равен нулю, синусоидальное напряжение на нейтронообразующей мишени (1) имело амплитуду –115 кВ, амплитуда синусоидального напряжения на сетке (2) была равна –120 кВ, период 8 мкс. Прозрачность сетки составляла 77%, коэффициент вторичной эмиссии в модели был равен 2, что соответствует взаимодействию дейтронов с энергией 120 кэВ со сталью. Время нагрева в тепловой модели соответствует длительности импульса ускоряющего напряжения, все остальное время источник только охлаждается. Частота срабатывания трубки в тепловой модели была равна 100 Гц, что соответствует частоте работы реальной ВНТ.

При заданных параметрах плазмы (плотность  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , скорость разлета  $10^4 \text{ м/с}$ ) численный

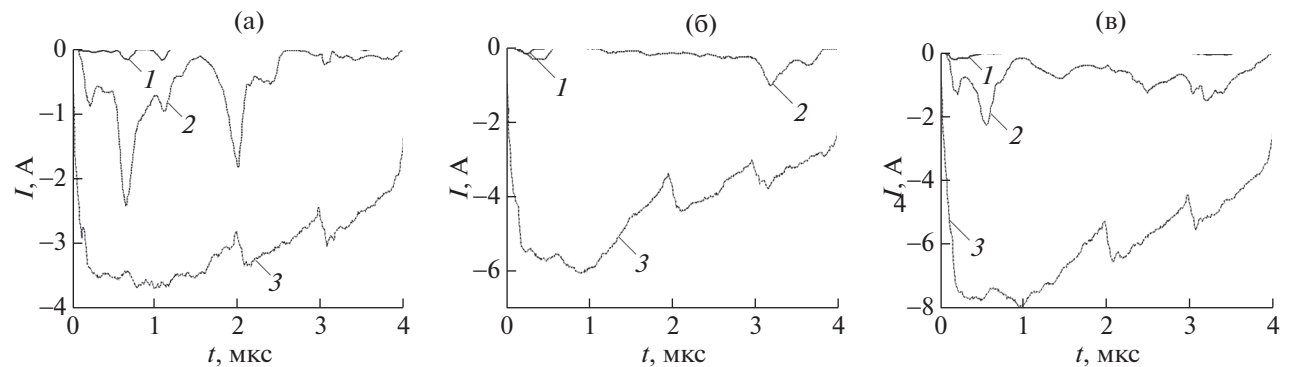


Рис. 3. Ток электронов в зависимости от времени на: (а) катоде, (б) шпильке, (в) поджигающем электроде.

анализ не представляется возможным в силу необходимости использования пространственной сетки с разрешением 1 мкм. По этой причине скорость плазмы была увеличена при соответствующем уменьшении ее концентрации, так что значение тока частиц оставалось неизменным. Динамика плазменного потока в ускоряющем промежутке определялась соотношением между предельным Ленгмюровским током и потоком частиц плазмы, который остается неизменным.

2. ДИНАМИКА ПОТОКОВ  
ОБРАТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И НАГРЕВА  
ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЯДНОГО УЗЛА

На рис. 3 показана зависимость токов электронов на элементах ионного источника от времени – электроны разделены на несколько сортов в зависимости от места их вылета: 1 – из сетки, 2 – из мишени, 3 – из плазмы дугового разряда в разрядном узле. Как можно видеть из рисунка, большая часть электронного тока на ионный источник состоит из электронов плазмы, но поскольку эти электроны имеют небольшую энергию (1.6 эВ), их влияние на нагрев элементов источника мало, по сравнению с другими источниками.

Согласно результатам теплового моделирования (табл. 1), наибольший вклад в нагрев элементов ионного источника (поджигающего электро-

да, катода и шпильки) вносят электроны от мишени, так как имеют достаточно большую энергию. Моделирование тепловой нагрузки на ионный источник показало, что за 10 мин источник нагревается до 240–250°С.

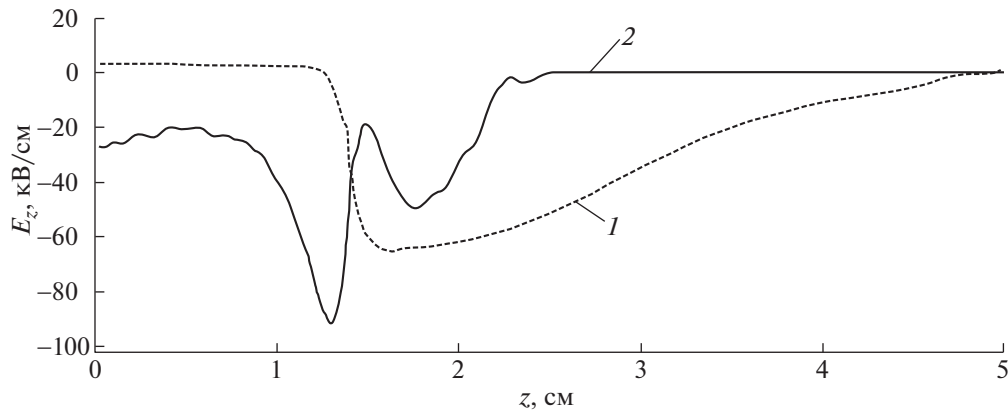
Можно было бы ожидать отсутствие электронов от мишени на ионном источнике, поскольку антидинаatronная сетка должна запирает поток этих электронов, однако моделирование показало, что они пересекают сетку. Причина этого заключается в том, что при заданном способе подачи напряжения на мишень и сетку, происходит искажение поля в промежутке мишень-сетка объемным зарядом дейтронов. Это приводит к изменению знака напряженности поля с положительного на отрицательный (рис. 4) в области между сеткой и мишенью (на графике от 0 до 1.3 см) и электроны, которые ранее тормозились в этом промежутке теперь ускоряются в сторону сетки. Скомпенсировать изменение напряженности можно уменьшив потенциал сетки, но это будет тормозить ионы, и уменьшать нейтронный выход.

3. УЧЕТ ДАВЛЕНИЯ  
ОСТАТОЧНОГО ГАЗА В ВНТ

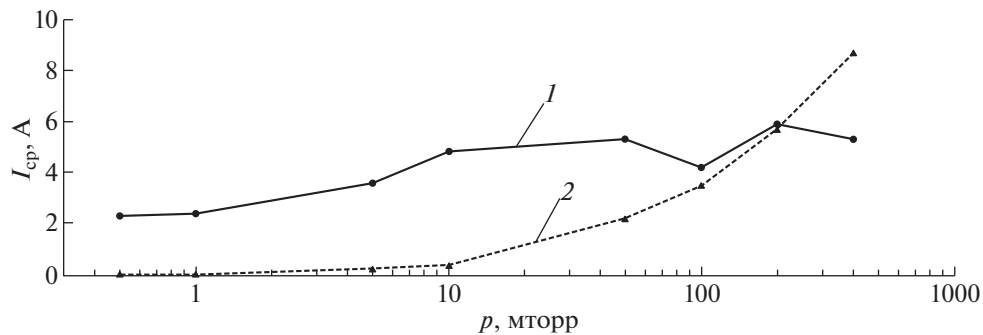
На следующем этапе проведено моделирование ВНТ с учетом остаточного газа (дейтерий), при ионизации каждой молекулы которого ускорен-

Таблица 1. Характеристики пучка и электродов: средний ток электронов на электроды ( $\langle I \rangle$ ), энергия пучка ( $\langle W \rangle$ ), мощность пучка ( $\langle P \rangle$ ), средняя мощность на электродах за все время расчета ( $P_{\Sigma}$ ),  $T$  – температура электродов

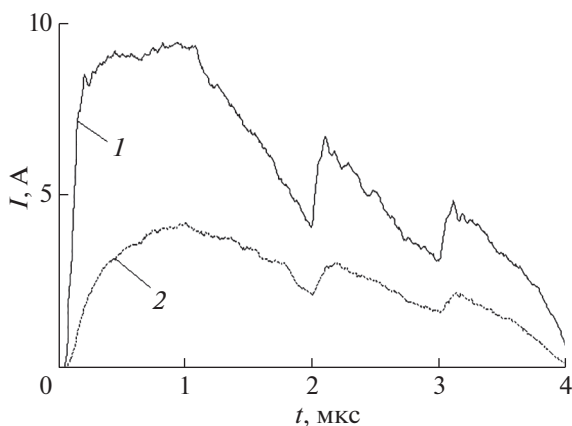
		Источник электронов	
		мишень	сетка
Области генерации обратного потока электронов	Катод ( $T = 240^{\circ}\text{C}$ )	$\langle I \rangle = 0.5 \text{ A}$ , $\langle W \rangle = 91 \text{ кэВ}$ , $\langle P \rangle = 36 \text{ кВт}$ ( $P_{\Sigma} = 14.5 \text{ Вт}$ )	$\langle I \rangle = 0.02 \text{ A}$ , $\langle W \rangle = 70 \text{ кэВ}$ , $\langle P \rangle = 0.4 \text{ кВт}$
	Шпилька ( $T = 250^{\circ}\text{C}$ )	$\langle I \rangle = 0.2 \text{ A}$ , $\langle W \rangle = 90 \text{ кэВ}$ , $\langle P \rangle = 12.9 \text{ кВт}$ ( $P_{\Sigma} = 5.2 \text{ Вт}$ )	—
	Поджигающий эл-д, ( $T = 245^{\circ}\text{C}$ )	$\langle I \rangle = 0.8 \text{ A}$ , $\langle W \rangle = 91 \text{ кэВ}$ , $\langle P \rangle = 50 \text{ кВт}$ ( $P_{\Sigma} = 20 \text{ Вт}$ )	—



**Рис. 4.** Напряженность электрического поля в ускоряющем промежутке: 1 — в отсутствии ионов, 2 — при наличии тока ионов в промежутке.



**Рис. 5.** Средний ток обратного потока электронов от мишени (1) и ток от ионизации остаточного газа (2) в зависимости от давления газа в ВНТ.



**Рис. 6.** Ток ионов на мишени в зависимости от времени: 1 — ток первичных ионов, 2 — ток вторичных ионов.

ным дейтроном, образовывался молекулярный ион и электрон.

На рис. 5 показаны средние по времени токи электронов на разрядный узел ВНТ в зависимости

сти от давления в ней газа. Увеличение тока электронов от мишени с ростом давления газа вызвано проникновением электронов за антидинатронную сетку под воздействием растущего объемного заряда молекулярных ионов дейтерия.

Как можно видеть из результатов моделирования (рис. 6), при образовании вторичных ионов в разрядном промежутке, их ток частично замещает собой ток дейтронов из плазмы. Эти ионы обладают в среднем меньшей энергией по сравнению с ионами из источника, так как они не проходят разрядный промежуток полностью, поэтому нейтронный выход такой трубки снижается. Так, средняя энергия первичных дейтронов равна 115 кэВ, а для вторичных молекулярных ионов дейтерия эта величина составляет 36 кэВ. К тому же, для молекулярных ионов доля энергии, приходящаяся на каждый дейтрон оказывается ниже, чем для атомарных ионов, ускоренных одинаковой разностью потенциалов, что также снижает нейтронный выход.

Расчет средней тепловой мощности, выделяющейся на элементах ионного источника показал (рис. 7), что эта мощность растет с увеличением

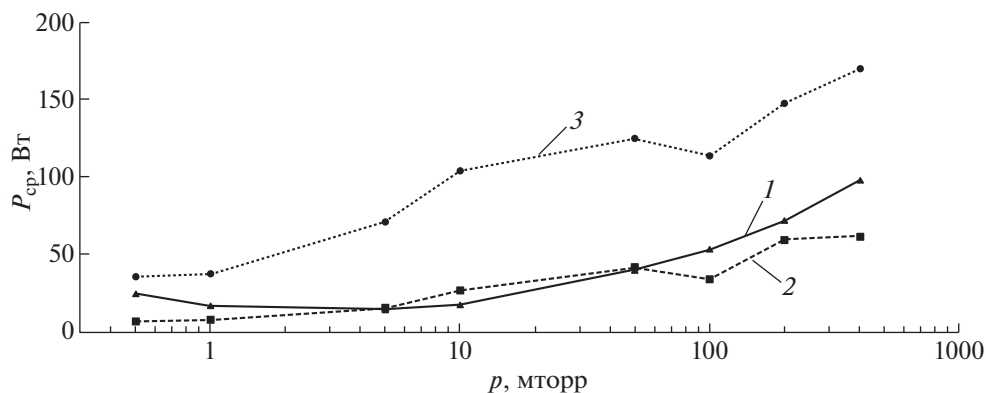


Рис. 7. Средняя мощность на элементах ионного источника в зависимости от давления остаточного газа: 1 — на катоде, 2 — на шпильке, 3 — на поджигающем электроде.

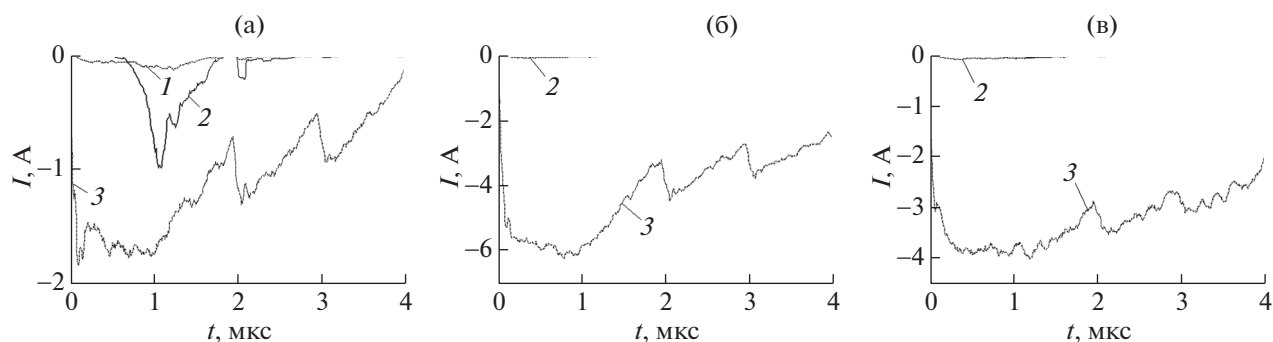


Рис. 8. Токи электронов на элементы ионного источника при наличии магнитного поля: (а) на катод, (б) на шпильку, (в) на поджигающий электрод, в зависимости от места их вылета: 1 — сетка, 2 — мишень, 3 — плазма дугового разряда.

давления газа в трубке из-за роста электронного тока на источник.

Наибольшая тепловая мощность выделяется на поджигающем электроде, при этом наиболее горячей частью ионного источника является шпилька, так как отвод тепла от тонкого стержня диаметром 2 мм через его торец затруднителен.

По результатам теплового моделирования температура источника ионов за 10 мин работы увеличивается с ростом давления остаточного газа в ВНТ. При давлении в 50 мторр температура шпильки ионного источника приближается к температуре плавления меди ( $1084.62^{\circ}\text{C}$ ).

Было рассмотрено влияние конфигурации сетки на электронные токи на ионный источник. Как показали результаты моделирования, конфигурация сетки слабо влияет на величину этих токов. Рассматривались такие варианты, как изогнутая сетка, сетка с шарами различного диаметра в середине и со штырем в середине.

Для борьбы с потоками вторичных электронов используются два метода — изоляция электронов с помощью электрического поля сетки (что было описано ранее) и магнитная изоляция. При до-

бавлении в исходную модель магнитного поля величиной  $\sim 500$  Гс, направленного перпендикулярно оси  $z$ , электроны, ускоряющиеся в сторону источника будут испытывать воздействие силы Лоренца, поворачивающей их в противоположную сторону. Из результатов моделирования видно (рис. 8), что токи электронов на ионный источник значительно снижаются — большая часть электронов от мишени (2 на рис. 8) не проходит антидинаatronную сетку, а остальные электроны отклоняются в сторону от ионного источника.

Ларморовский радиус для электронов с энергией 60 кэВ в таком поле — 0.5 см. Средняя мощность, выделяющаяся на электродах снижается — на катоде с 40 до 6.4 Вт, на шпильке — с 41.5 до 0.7 Вт, на поджигающем электроде — с 124.7 до 0.8 Вт. Тепловое моделирование варианта ВНТ с изоляцией электронов магнитным полем показало, что температура ионного источника не превышает  $70^{\circ}\text{C}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное с помощью численного моделирования исследование распределения потоков заряженных частиц в ускоряющем промежутке ВНТ,

показало, что основным источником нагрева ионного источника является ток вторичных электронов от нейтронообразующей мишени. Этот ток достигает ионного источника из-за искажения потенциала антидинатронной сетки объемным зарядом ускоренных дейтронов. Учет в модели остаточного газа приводит к замещению тока дейтронов из источника током молекулярных ионов дейтерия, и к увеличению тока электронов на ионный источник. С ростом давления в ВНТ увеличивается электронный ток на источник, что приводит к значительному его разогреву. Снизить его нагрев можно при помощи магнитного поля, направленного перпендикулярно оси трубки, и осуществляющего магнитную изоляцию вторичных электронов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Pleshakova R.P.* // Patent RU 2316835 C1. 2008.
2. *Bogoliubov E.P., Kuznetsov Yu.P., Presniakov A.Yu., et al.* // Patent RU 209633 U1. 2022.
3. *Bobylev V.T., Bragin S.I., Kuznetsov Yu.P., et al.* // Patent RU 209870 U1. 2022.
4. *Tarakanov V.P.* Doctoral Dissertation in Physics and Mathematics. 2011. Moscow.
5. CST Studio Suite. Dassault Systems. Vélizy-Villacoublay. France. 2019.
6. Multiphysics C: Introduction to COMSOL Multiphysics. Burlington, MA: COMSOL.

## Heating of Elements of the Discharge Node in a Vacuum Neutron Tube of a Portable Neutron Generator with an Increased Neutron Yield

D. S. Stepanov<sup>1, \*</sup>, A. P. Skripnik<sup>1</sup>, E. Ya. Shkolnikov<sup>1</sup>, and A. A. Isaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>2</sup> Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454 Russia

\*e-mail: [apskripnik@mephi.ru](mailto:apskripnik@mephi.ru)

Received June 21, 2024; revised June 21, 2024; accepted June 28, 2024

**Abstract**—The generation and dynamics of reverse electron flows in a high-power vacuum neutron tube leading to the intense heating of the elements of the discharge node up to their melting are analyzed. The contribution of each component of an reverse electron flow to the heating of the discharge node is considered.

**Keywords:** neutron generator, nuclear reactions, plasma flows, deuterium, tritium, electron