

**INCREASING THE ELECTRICAL STRENGTH AND OPERATION STABILITY  
OF A SMALL-SIZED ION ACCELERATOR***Ilya Alexandrovich Kanshin*Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Sushevskaya str. 22, Moscow, 127030, Russia  
ilia.kanshin2011@yandex.ru

---

**ABSTRACT**

When developing a small-sized ion accelerator designed for neutron generation, special attention is paid to its electrical strength and operational stability. The presence of oxide films and sorbed gases on the device accelerating system high-voltage gap surfaces stimulates the occurrence of emission processes, leading to a decrease in the electric strength of the accelerator. At the same time, an increase in the pressure of sorbed residual gases in the closed volume of the device leads to a decrease in the concentration of the working gas (deuterium and tritium). This is one of the reasons for the decrease in the neutron flux and the decrease in the stability of the accelerator. One of the ways to improve the electrical strength and stability of its operation is to improve the technological methods of manufacturing the device. This is the subject of this work, which studied the effect of a new method for manufacturing a small-sized ion accelerator, the method of ion-plasma treatment (IPT) of accelerating system parts in an inert gas medium. To determine the processing parameters, the dynamics of a glow discharge in the geometry of the processed parts of the accelerator was simulated, and experimental studies were carried out that showed the effect of gas pressure, voltage, and current of the discharge on the IPT duration. As a result, the processing parameters used in the manufacture of the ion accelerator using the new technology were determined. According to the research results, it is shown that the use of IPT in the manufacture of the device makes it possible to increase its electrical strength and stability.

**KEYWORDS**

Glowing discharge; electrical strength; ion-plasma treatment; ion accelerator.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ  
МАЛОГАБАРИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ***Илья Александрович Каншин*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Россия, 127030, Москва,  
ул. Сущевская, 22  
ilia.kanshin2011@yandex.ru

---

**АННОТАЦИЯ**

При разработке малогабаритного ускорителя ионов, предназначенного для генерации нейтронов, уделяется особое внимание его электрической прочности и стабильности работы. Наличие окисных пленок и сорбированных газов на поверхностях высоковольтного промежутка

ускоряющей системы прибора стимулирует протекание в ней эмиссионных процессов, приводящих к снижению электропрочности ускорителя. При этом увеличение давления сорбированных остаточных газов в замкнутом объеме изделия ведет к снижению концентрации рабочего газа (дейтерия и трития). Это является одной из причин падения нейтронного потока и снижения стабильности работы ускорителя. Одним из путей повышения электрической прочности и стабильности его работы является совершенствование технологических методов изготовления изделия. Этому посвящена настоящая работа, в которой изучалось влияние нового для технологии изготовления малогабаритного ускорителя ионов метода ионно-плазменной обработки (ИПО) деталей ускоряющей системы в среде инертного газа. Для определения параметров обработки моделировалась динамика тлеющего разряда в геометрии обрабатываемых деталей ускорителя, а также проводились экспериментальные исследования, показавшие влияние давления газа, напряжения и тока разряда на длительность проведения ИПО. В результате были определены параметры обработки, применявшиеся при изготовлении ускорителя ионов по новой технологии. По результатам исследований показано, что использование ИПО в изготовлении прибора позволяет повысить его электрическую прочность и стабильность работы.

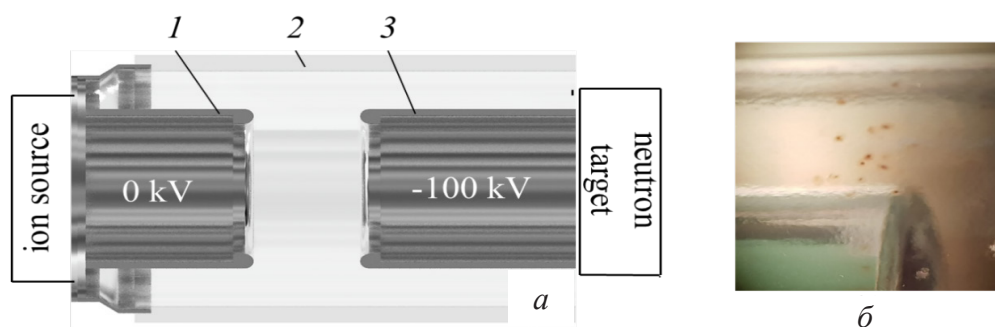
## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Тлеющий разряд; электрическая прочность; ионно-плазменная обработка; ускоритель ионов.

### Введение

Электрическая прочность и стабильность работы малогабаритного ускорителя ионов для генерации нейтронов (рис. 1, а) являются его основными рабочими характеристиками [1–4]. Отрицательное влияние на указанные параметры оказывают окисные пленки, сорбированные газы и микродефекты на поверхностях высоковольтного промежутка ускоряющей системы ускорителя ионов. В частности, перечисленные дефекты на поверхности высоковольтного электрода приводят к эмиссионным процессам и об-

лучению изолятора ускоряющей системы корпускулярными потоками, способствующим его заряджению [6, 7] и деградации (рис. 1, б). Одновременно с этим в объеме малогабаритного ускорителя могут протекать десорбционные процессы, обусловленные воздействием повышенной температуры окружающей ускоритель среды и корпускулярных потоков. Это приводит к росту давления остаточных газов в объеме прибора и снижению концентрации рабочего газа, что является одной из причин падения нейтронного потока в ходе эксплуатации ускорителя и снижения стабильности его работы [5].



**Рис. 1.** Схематичное изображение малогабаритного ускорителя ионов (а) и следы деградации вакуумной оболочки после ее облучения и заряджения (б): 1 – заземленный электрод ускоряющей системы; 2 – изолятор (вакуумная оболочка) ускоряющей системы; 3 – высоковольтный электрод ускоряющей системы

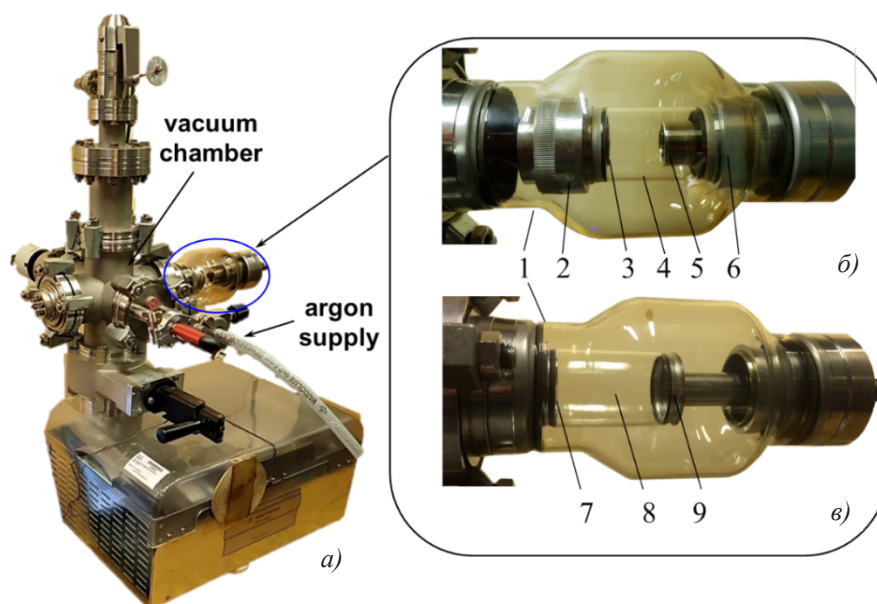
**Fig. 1.** Schematic image of small-sized ion accelerator (a) and traces of vacuum shell degradation after its irradiation and charging (b): 1 – grounded electrode of accelerating system; 2 – accelerating system insulator; 3 – high-voltage electrode of accelerating system

На сегодняшний день для устранения влияния перечисленных процессов применяется химическая и высокотемпературная обработка деталей и узлов, их защита барьерными слоями и покрытиями [8, 9], модификация пучками заряженных частиц [10, 11]. Наряду с этим в литературе приводятся сведения о применении ионно-плазменной обработки (ИПО) как для очистки поверхностей деталей ряда ЭВП [12, 13], так и поверхностей, на которые предполагается, например, нанесение покрытий [14]. На сегодняшний день ИПО не применяется при изготовлении малогабаритных ускорителей ионов для генерации нейтронов, поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании влияния ИПО на электрическую прочность и стабильность работы изделия. В данной статье приведены результаты разработки метода ИПО изолятора и электродов ускоряющей системы малогабаритного ускорителя, а также результаты исследова-

ований приборов, детали и узлы которых подвергались ИПО.

### 1. Методика исследований

ИПО изолятора и электродов ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов проводилась на установке, состоящей из стандартного (ISO) вакуумного элемента, смонтированного на безмасляном высоковакуумном откачном посту (рис. 2, *а*). Рабочим (плазмообразующим) газом являлся аргон, подача которого регулировалась с помощью прецизионного натекавателя (рис. 2, *а*), а давление контролировалось широкодиапазонным датчиком, показания которого передавались через контроллер на компьютер. Управление высоковольтными источниками питания (ВИП) также осуществлялось с помощью персонального компьютера. Процесс ИПО и управления узлами установки был автоматизирован, а его контроль выполнялся с помощью программного обеспечения, написанного в среде LabVIEW [15–17].



**Рис. 2.** Внешний вид установки для проведения ИПО (*а*), оснастка для ИПО электродов (*б*) и изолятора (*в*) ускоряющей системы (цифровые обозначения поясняются в тексте)

**Fig. 2.** Appearance of the IPT installation (*a*), equipment for IPT of electrodes (*b*) and insulator (*c*) of the accelerating system (numbers are explained in the text)

На рис. 2, б представлена оснастка для проведения ИПО электродов ИОС. Она состоит из цанговых патронов 2 и 6, плотно фиксирующих изолятор 4, предназначенный для их гальванической развязки. Внутри каждого патрона вмонтированы втулки. Во втулке патрона 2 размещается плоский анод 3 с отверстием по центру для поступления рабочего газа в объем оснастки, а на втулке патрона 6 – обрабатываемый электрод 5. Собранный комплект монтируется внутри вакуумного объема 1, представляющего собой металлостеклянный изолятор диаметром 110 мм, посредством резьбового соединения цангового патрона 6 со штоком. В таком виде вакуумный объем 1 пристыковывается к вакуумной камере откачного поста через фланцы стандарта ISO. Цанговый патрон 2 и, соответственно, анод 3 заземляются, а цанговый патрон 6 и, соответственно, электрод 5 находятся под отрицательным потенциалом смещения относительно анода 3. После откачки установки и последующей подачи газа в системе «анод 3 – электрод 5 (катод)» зажигается разряд, в плазме которого осуществляется ИПО электрода 5.

На рис. 2, в показана оснастка для проведения ИПО изолятора ускоряющей системы 8, который размещается между двумя круглыми пластинами 7 и 9 посредством стыковки с ними металлических фланцев обрабатываемого изолятора 8. Собранный комплект монтируется внутри вакуумного объема 1, который пристыковывается к вакуумной камере через фланцы стандарта ISO. Пластина 7 (анод) заземляется, а пластина 9 (катод) находится относительно нее под отрицательным потенциалом смещения. В промежутке между ними зажигается разряд, и выполняется ИПО изолятора 8.

Физический эксперимент на описанной выше установке дополнялся численным моделированием динамики горения разряда в геометрии обрабатываемых деталей в среде COMSOL Multiphysics.

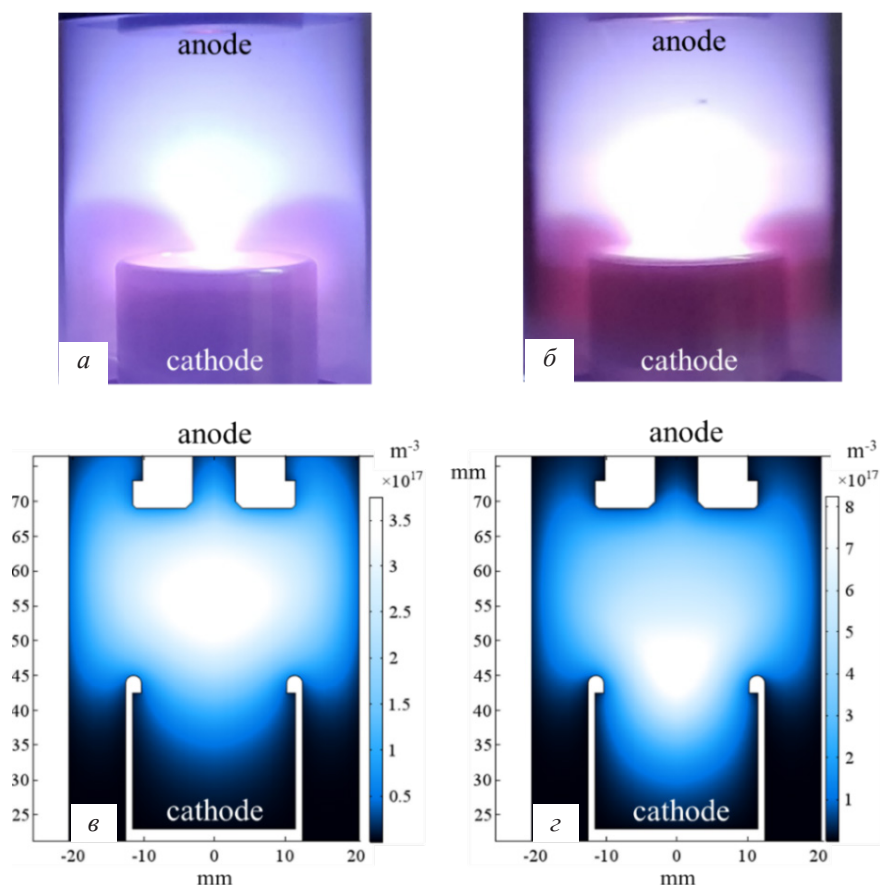
## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1. Ионно-плазменная обработка электродов ускоряющей системы

Приведем результаты экспериментальных исследований, направленных на определение параметров процесса ИПО электродов высоковольтного промежутка ускоряющей системы: давления газа, напряжения и тока разряда, длительности обработки. И для начала рассмотрим особенности горения разряда в системе «анод – обрабатываемый электрод». В такой электродной системе при зажигании разряда ВИП автоматически стабилизируется по току разряда и удерживает его значение, понижая при этом заданное напряжение. После размещения оснастки с обрабатываемым электродом в вакуумной камере установка откачивалась до давления порядка  $10^{-6}$  Торр, и далее на электрод от ВИП подавалось напряжение минус 1,5 кВ. В этот момент времени разряд еще не горел.

Последующее повышение давления аргона до величины 0,06 Торр приводит к зажиганию и локализации разряда между кромками входной апертуры обрабатываемого электрода и анодом (рис. 3, а). Далее по достижении давления 0,1 Торр происходит резкое уменьшение разрядного напряжения с 1 до 0,4 кВ, а область горения разряда смещается в полость обрабатываемого электрода (рис. 3, б). Эта же тенденция обнаруживается в результатах численного моделирования, представленных на рис. 3, в и г в виде плотности возбужденных атомов аргона, которые при девозбуждении испускают фотоны. Из рисунка видно, что с увеличением давления наблюдается смещение области с наибольшей концентрацией возбужденных атомов (наиболее ярко светящейся области) от анода вглубь апертуры обрабатываемого электрода (катода). Это влечет за собой изменение характера распределения радиальной компоненты плотности ионного тока, за счет которой происходит обработка поверхности электрода.





**Рис. 3.** Фотографии разряда, локализованного между анодом системы и кромками обрабатываемого электрода (*a*), между анодом системы и в полости обрабатываемого электрода (*б*); плотность возбужденных атомов аргона при напряжении разряда 1 кВ и давлении 0,06 Торр (*в*), при напряжении разряда 400 В и давлении 0,1 Торр (*г*)

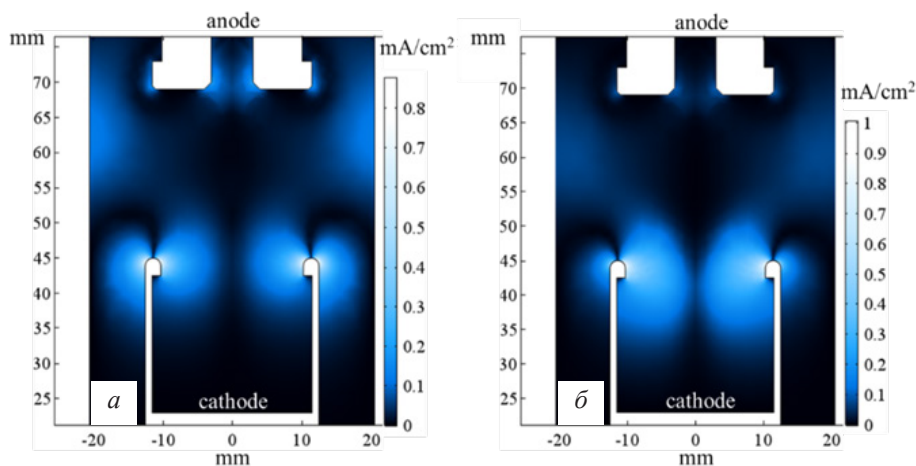
**Fig. 3.** Photos of the discharge localized between the anode of the system and the edges of the electrode being processed (*a*), between the anode of the system and in the cavity of the electrode being processed (*b*); density of excited argon atoms at a discharge voltage of 1 kV and a pressure of 0.06 Torr (*v*), at a discharge voltage of 400 V and a pressure of 0.1 Torr (*z*)

Из рис. 4, *a* видно, что при давлении аргона 0,06 Торр радиальная компонента плотности тока затрагивает около 10 мм внешней поверхности электрода, часть внутренней и внешней поверхности кромки апертуры электрода и около 5 мм его внутренней поверхности. При повышении давления до 0,1 Торр (рис. 4, *б*) область внешней поверхности электрода, где локализована радиальная компонента плотности тока, уменьшается, а соответствующая область внутренней поверхности наоборот увеличивается. Это связано с наблюдавшимся выше смещением области локализации разряда.

Из зависимости радиальной компоненты плотности ионного тока на поверхности электрода (рис. 5) определим ее площадь, обрабатываемую разрядом. Из рис. 5, *a* видно, что плотность тока в обоих случаях давления аргона близка к нулю на расстоянии 15 мм (1,5 см) от кромки электрода. Тогда при его внешнем диаметре 2,5 см площадь внешней поверхности, подвергаемой ИПО, составит около 12 см<sup>2</sup>. К внешней поверхности также относятся кромки апертуры электрода площадью 2,5 см<sup>2</sup>, которые обрабатываются в обоих режимах горения разряда. В свою

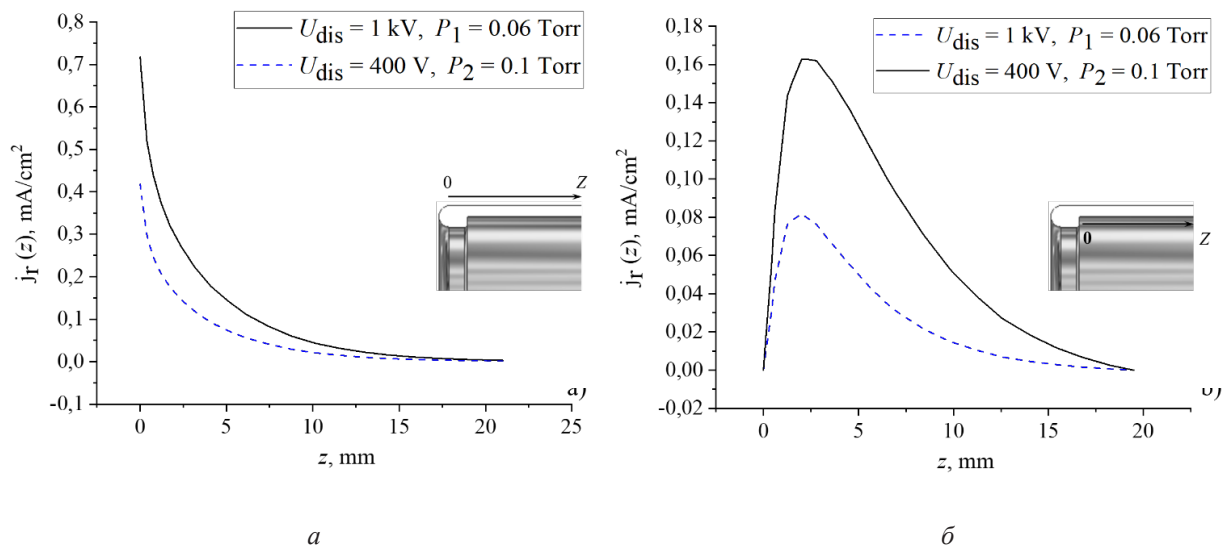
очередь, из рис. 5, б видно, что в случае реализации разряда при давлении газа 0,06 Торр обрабатывается внутренняя поверхность длиной не более 15 мм. Если же разряд реализован при давлении 0,1 Торр, то длина внутренней поверхности электрода, подвер-

гаемой ИПО, увеличивается до 20 мм. Тогда при внутреннем диаметре электрода 2,3 см площадь внутренней поверхности, подвергаемой ИПО, составит около 11 см<sup>2</sup> в случае, когда разряд реализован при давлении 0,06 Торр и 14 см<sup>2</sup> – при давлении 0,1 Торр.



**Рис. 4.** Пример распределения радиальной компоненты плотности ионного тока в системе «анод – обрабатываемый электрод»: при давлениях  $P_1 = 0,06$  Торр (а) и  $P_2 = 0,1$  Торр (б). Ток разряда 6 мА

**Fig. 4.** An example of the ion current radial density distribution in the «anode – treated electrode» system: at a pressure  $P_1 = 0.06$  Torr (a) and  $P_2 = 0.1$  Torr (b). Discharge current 6 mA



**Рис. 5.** Зависимость радиальной компоненты плотности тока на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях электрода от длины рассматриваемой поверхности. Ток разряда 6 мА

**Fig. 5.** Dependence of the current density radial component on the outer (a) and inner (b) electrode surfaces on the length of the considered surface. Discharge current 6 mA

Для определения исследуемого диапазона тока разряда ИПО предположим, что на поверхности железного электрода имеются наиболее распространенные окислы железа  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Поскольку их толщина при межоперационном хранении деталей может достигать и превышать 500 ангстрем [18], то для оценки сверху примем толщину окисной пленки 1000 ангстрем или 0,1 мкм, которую необходимо удалить в ходе ИПО длительностью не более 10 минут, что не окажет влияния на длительность уже существующего техпроцесса подготовки электродов к монтажу в изделие. Время распыления слоя толщиной  $h$  [см] вещества с атомной массой  $M$  и плотностью  $\rho$  [г/см<sup>3</sup>] связано с плотностью тока распыляющих ионов  $j$  [А/см<sup>2</sup>] и коэффициентом распыления  $Y$  выражением [19]:

$$t[c] = \frac{h \cdot \rho}{1,04 \cdot 10^{-5} \cdot Y \cdot M \cdot j} \quad (1)$$

При ИПО кромок и внешней поверхности электрода напряжение разряда составляет 1 кВ, следовательно энергия бомбардирующих катод ионов, приобретаемая ими при прохождении прикатодной разности потенциалов, составит около 1 кэВ. В свою очередь, при ИПО внутренней поверхности электрода энергия ионов аргона в среднем составляет около 0,4 кэВ. Вычисленный с помощью пакета TRIM коэффициент распыления окисла  $\text{FeO}$  для энергии ионов аргона 1 кэВ составил 2,23 ат/ион, а для энергии ионов 0,4 кэВ – 1,34 ат/ион. Аналогичные рассуждения можно провести и для окислов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . С учетом вычисленной выше площади поверхности электрода, подвергающейся ИПО, по формуле (1) определен диапазон тока, необходимый для удаления 0,1 мкм каждого из рассматриваемых окислов железа в зависимости от времени обработки. По результатам расчетов в него вошли значения токов 4, 6, 8 и 10 мА.

## 2.2. Экспериментальная реализация ионно-плазменной обработки электродов

Дальнейшие эксперименты направлены на определение конкретного значения тока разряда из исследуемого диапазона и длительности обработки электродов ускоряющей системы. В ходе экспериментов разряд сначала инициировался при давлении 0,06 Торр, а затем при 0,1 Торр. В обоих случаях отслеживались изменения давления в системе и разрядного напряжения от времени. В ходе экспериментов затвор между системой откачки и вакуумной камерой установки перекрывался, и исследования по отработке режимов ИПО электродов проводились в три этапа длительностью около 300 секунд каждый, между которыми выполнялась откачка и смена порции рабочего газа. На рис. 6 приведены поэтапные зависимости напряжения разряда и давления в системе на примере тока разряда ИПО 10 мА при начальном давлении аргона 0,06 Торр (рис. 6, а) и 0,1 Торр (рис. 6, б).

Общим для всех рассмотренных случаев является то, что на каждом этапе происходит интенсивный рост давления в системе за счет удаления загрязнений с поверхности обрабатываемого разрядом электрода и его обезгаживания. Одновременно с ростом давления наблюдается быстрое падение напряжения разряда, а затем замедление его скорости с течением времени и стремление выйти на плато. Это говорит о том, что при обезгаживании меняется скорость выделения остаточного в электродах газа. Каждый график зависимости разрядного напряжения от времени, представленный на рис. 6, аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$U_{\text{dis}}(t) = U_{\text{off}} + C \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где  $\tau$  [с] – постоянная спада функции напряжения от времени. Она определяет момент времени, когда практически прекращается изменение напряжения, т.е. процесс газовой выделения заканчивается.

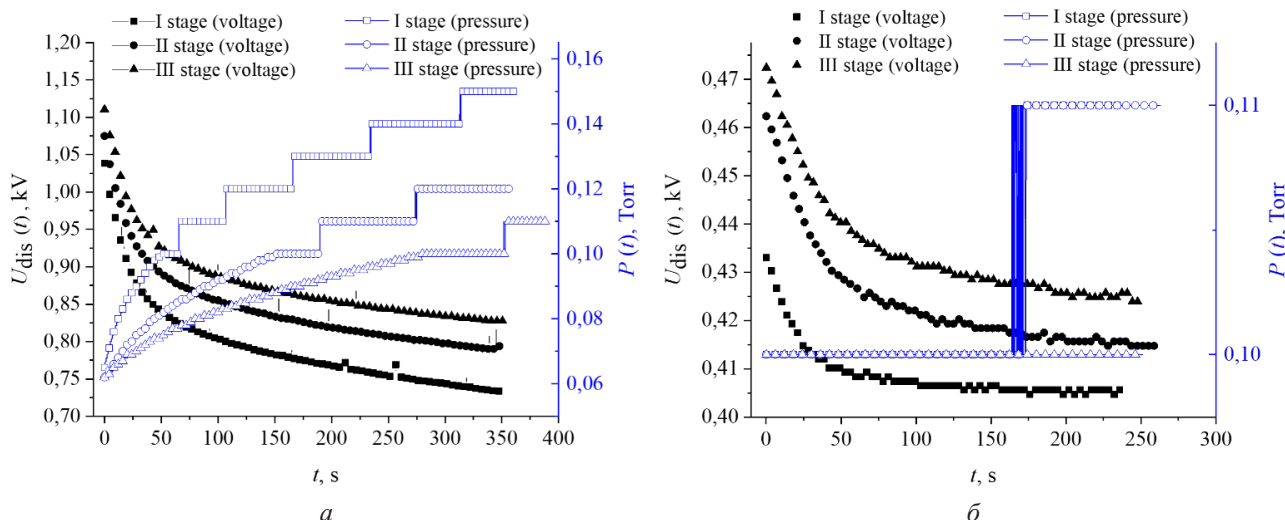


Рис. 6. Поэтапное изменение разрядного напряжения и давления в системе при ИПО поверхности электрода при начальном давлении газа 0,06 Торр (а) и 0,1 Торр (б). Ток 10 мА

Fig. 6. Change in the discharge voltage and pressure in the system during IPT of the electrode surface at an initial gas pressure of 0.06 Torr (a) and 0.1 Torr (b). Current 10 mA

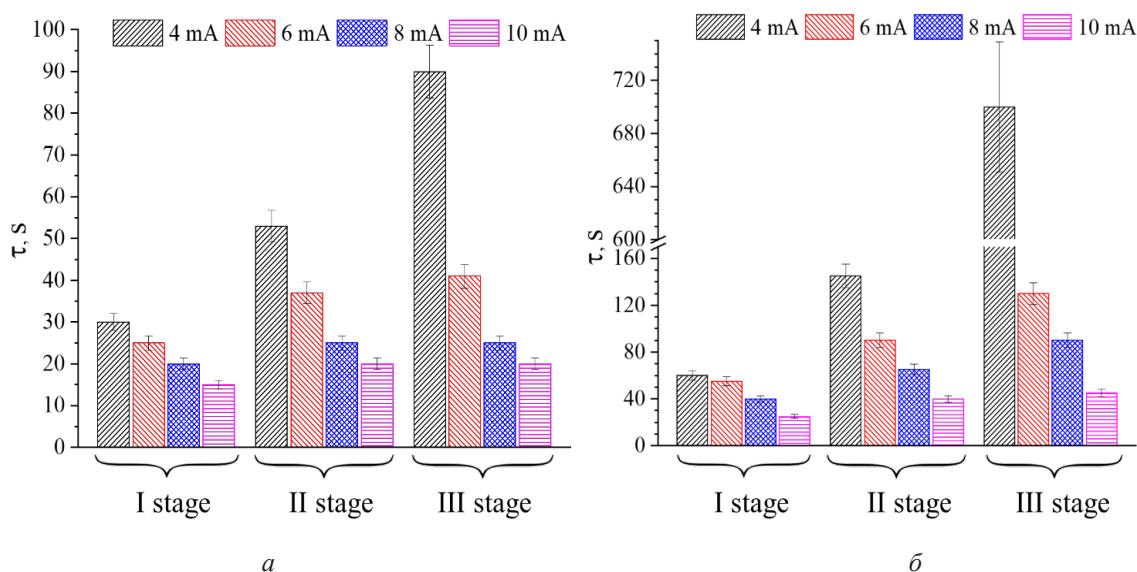


Рис. 7. Значения постоянных спада в зависимости от тока ИПО для каждого этапа обработки при начальном давлении аргона 0,06 Торр (а) и 0,1 Торр (б)

Fig. 7. Values of the decay constants depending on the IPT current for each processing stage at an initial argon pressure of 0.06 Torr (a) and 0.1 Torr (b)

На рис. 7 приведены результаты расчетов параметра  $\tau$  для всех зависимостей напряжения от времени, полученных в ходе экспериментальных исследований воздействия ИПО на поверхность электродов ускоряющей системы. Видно, что на каждом этапе ИПО характерное время обезгаживания уменьшается с ростом силы разрядного тока

обработки электрода, что объясняется соответствующим увеличением интенсивности распыления загрязнений. По мере перехода от I к III этапу ИПО при наименьшем токе обработки 4 мА наблюдается рост времени обезгаживания более чем в 10 раз, т.е. процесс обезгаживания затягивается. При наибольшем значении тока 10 мА, разница между  $\tau$

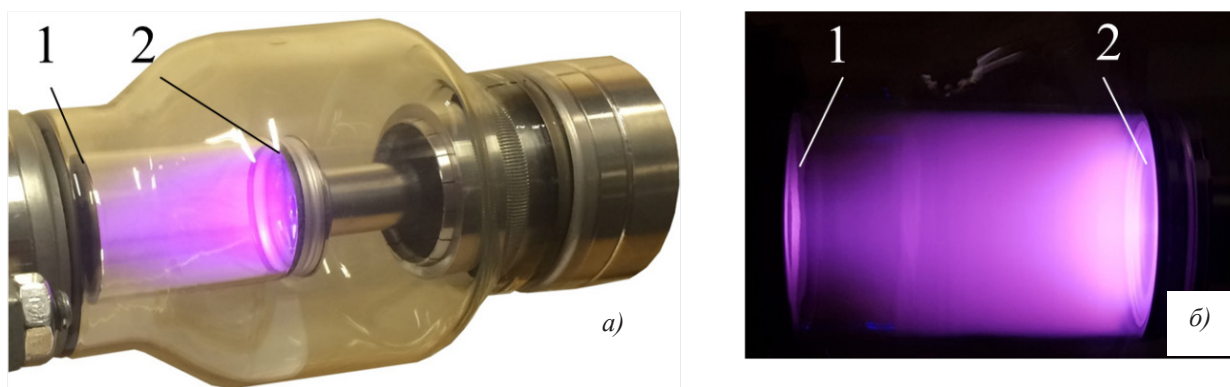


на II и III этапе отсутствует в пределах погрешности. Кроме того, при таком токе достигается наименьшее время обработки поверхности на каждом этапе. На основании полученных результатов определены параметры и сформирован процесс ИПО электродов ускоряющей системы: это величина тока разряда 10 мА в режиме стабилизации источника питания по току. Затем разряд сначала инициируется при давлении 0,06 Торр, и в три этапа каждый длительностью 20 секунд проводится ИПО. Затем разряд зажигается при давлении 0,1 Торр, и также в три этапа длительностью каждого 40 секунд осуществляется ИПО.

### 2.3. Ионно-плазменная обработка изолятора ускоряющей системы

После размещения оснастки с обрабатываемым изолятором в вакуумной камере установка откачивалась до давления порядка  $10^{-6}$  Торр, и далее на высоковольтную пластину изолятора (рис. 2, в) от ВИП подавалось напряжение отрицательной полярности. После подачи аргона в объеме изолятора зажигался тлеющий разряд (рис. 8).

Особенность данной разрядной системы состоит в том, что она представляет собой промежуток, при зажигании разряда в котором ВИП автоматически стабилизируется по напряжению и поддерживает его значение 400 В, а ток разряда меняется. Поэтому в ходе экспериментов при ИПО изоляторов отслеживались изменения тока разряда и давления в системе от времени. При этом в каждом случае проводились три этапа измерений, между которыми откачивались десорбированные газы и осуществлялась смена порции рабочего газа так же, как и при ИПО электродов. Наименьшее начальное давление аргона, при котором зажигался стабильный разряд, составляло 0,1 Торр. При меньших значениях разряд не инициировался. При повышении давления свыше 0,2 Торр разряд стягивался к катоду и очистки поверхности изолятора не происходило. Совокупность указанных обстоятельств определила следующие значения давления аргона в системе, влияние которых на ИПО изолятора исследовалась в настоящей работе: 0,1 Торр, 0,15 Торр и 0,2 Торр.



**Рис. 8.** Фотография разряда, инициируемого при ИПО изолятора ускоряющей системы  
(а – вид в составе станда; б – увеличенный вид):

1 – заземленная пластина оснастки (анод); 2 – высоковольтная пластина оснастки (катод)

**Fig. 8.** Discharge photo initiated during IPT of the accelerating system insulator  
(a – view as part of the stand; б – enlarged view):

1 – grounded equipment plate (anode); 2 – high-voltage equipment plate (cathode)

На рис. 9, а приведены поэтапные зависимости разрядного тока и давления в системе от начального давления аргона на примере его значения 0,1 Торр. Видно, что во всех рассмотренных случаях на каждом этапе обработки происходит рост разрядного тока в системе, обусловленный повышением интенсивности газовыделения с поверхности обрабатываемого изолятора, подтверждаемым увеличением давления в системе. Аналогично тому, как поступали при обработке экспериментальных результатов, полученных при исследовании процесса ИПО электродов, выполнялась аппроксимация зависимостей разрядного тока от времени экспоненциальной функцией вида

$$I_{\text{dis}}(t) = I_{\text{off}} + C \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{curr}}}\right),$$

где параметр  $\tau_{\text{curr}}$  [с] – постоянная роста функции тока от времени. В данном случае

$\tau_{\text{curr}}$  есть характерное время обезгаживания изолятора в процессе ИПО, исходя из тех же рассуждений, что были представлены относительно характерного времени обезгаживания электрода ускоряющей системы. На рис. 9, б приведены вычисленные значения постоянной роста  $\tau_{\text{curr}}$  в зависимости от устанавливаемого давления аргона при ИПО изолятора для каждого этапа. Из представленного рисунка видно, что при начальном давлении аргона 0,1 Торр постоянная роста тока на всех трех этапах остается высокой по сравнению с тем, когда давление составляет 0,15 и 0,2 Торр. На I этапе ИПО наименьшее время обезгаживания наблюдается при давлении аргона 0,2 Торр (70 с), на II и III этапах наименьшее время (150 и 170 с соответственно) при давлении 0,15 Торр. На основании полученных результатов был сформирован процесс ИПО изолятора ускоряющей системы.

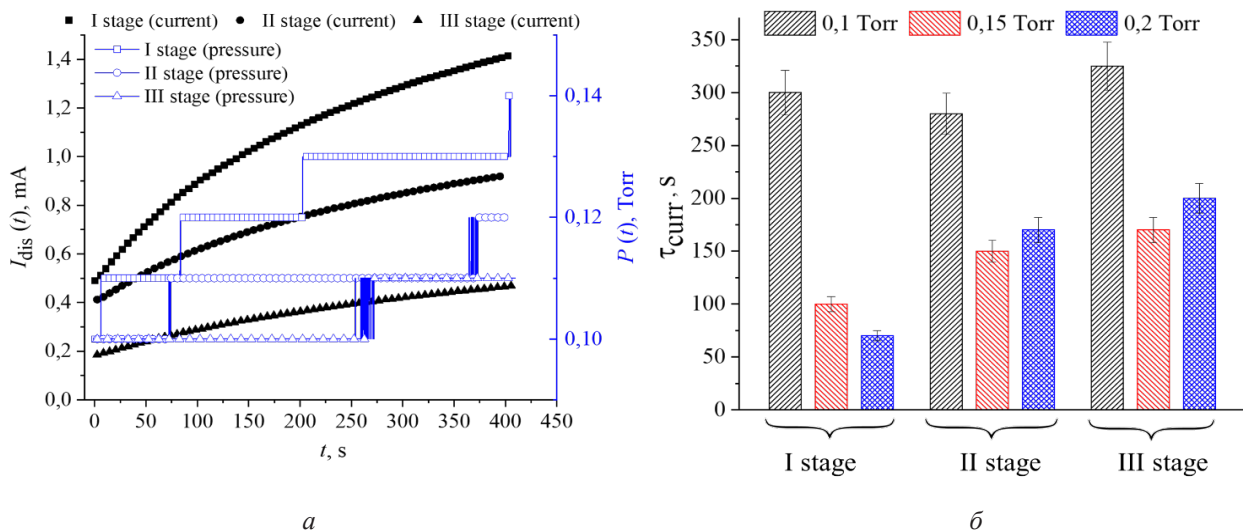


Рис. 9. Поэтапное изменение разрядного тока и давления в системе при ИПО изолятора при начальном давлении аргона 0,1 Торр (а), значения постоянной роста  $\tau_{\text{curr}}$  в зависимости от устанавливаемого давления аргона при ИПО изолятора для каждого этапа (б)

Fig. 9. Change of the discharge current and pressure in the system at the insulator IPT at the initial argon pressure of 0.1 Torr (a), the values of the growth constant  $\tau_{\text{curr}}$  depending on the installed argon pressure (b)

2.4. Экспериментальная апробация ионно-плазменной обработки и критерии ее эффективности

Дефекты на поверхности высоковольтного электрода ускоряющей системы ускорителя ионов (рис. 1, а) выступают эмиссионным центром для электронов, которые при подаче на высоковольтный электрод трубки отрицательного напряжения дают вклад в межэлектродный ток. Момент его резкого усиления при возрастании ускоряющего напряжения соответствует переходу тока в предпробойную фазу (рис. 10) и падению электрической прочности ускорителя. Ввиду того, что рожденные на поверхности высоковольтного электрода и ускоренные в межэлектродном промежутке электроны при торможении на его заземленных частях вызывают генерацию рентгеновского излучения, то характерные для межэлектродного тока изменения могут быть зафиксированы также и на зависимости величины интенсивности рентгеновско-

го излучения от ускоряющего напряжения (рис. 10). На основе статистики испытаний малогабаритных ускорителей ионов были определены критерии, достаточные для оценки электрической прочности и стабильности работы изделия. Это мощность дозы рентгеновского излучения в ускоряющей системе и давление остаточных газов [20]. Экспериментально установлено, что при значении мощности дозы рентгеновского излучения свыше 1 мкЗв/ч и сопутствующем ему давлении остаточных газов выше 1 мТорр наблюдается свечение изолятора, пробой и деградация его поверхности. Поэтому условиями электрической прочности и стабильности работы изделия и, соответственно, критериями эффективности ИПО являются значения мощности дозы рентгеновского излучения меньше 1 мкЗв при максимальном ускоряющем напряжении и давлении остаточных газов меньше 1 мТорр.

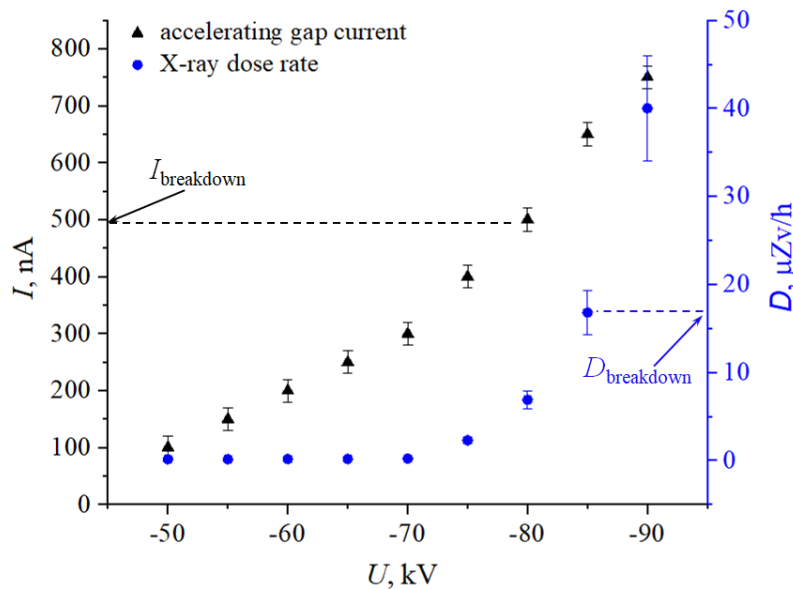


Рис. 10. Зависимость величины межэлектродного тока и мощности дозы рентгеновского излучения от напряжения на высоковольтном электроде ускорителя ионов

Fig. 10. Dependence of the electrode current and X-ray dose rate on the voltage at the high-voltage electrode of the ion accelerator

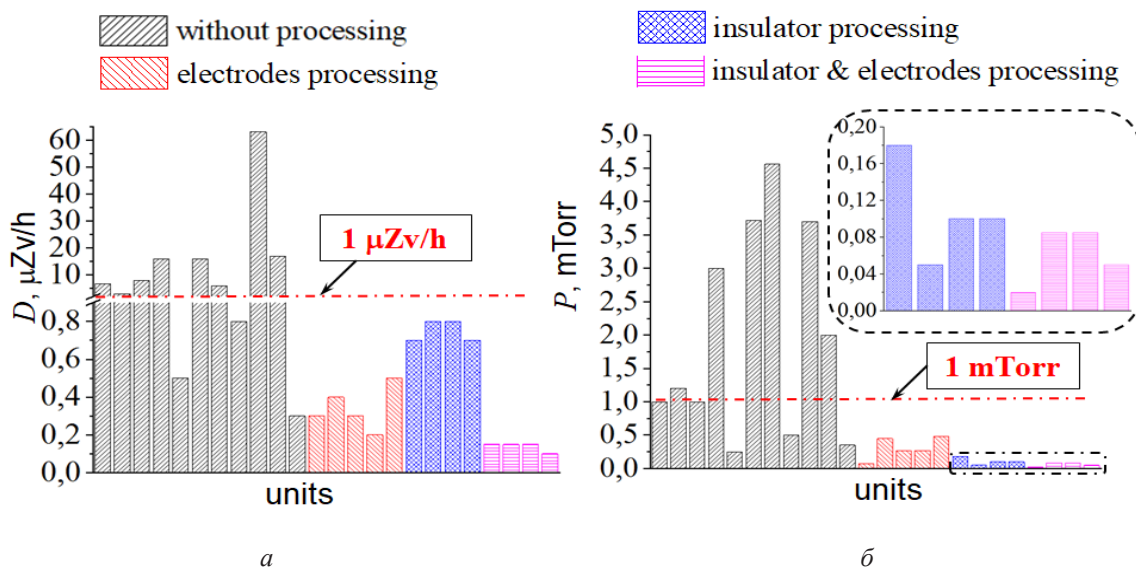


Рис. 11. Сравнительные результаты исследований групп изделий по мощности дозы рентгеновского излучения (а) и давлению остаточного газа (б)

Fig. 11. Comparative results of device group studies according to X-ray radiation dose rate (a) and residual gas pressure (b)

Для проведения исследований влияния ИПО электродов и изолятора ИОС на электропрочность и величину давления остаточных газов были изготовлены 4 группы изделий: I группа – штатные изделия без ИПО (11 штук), II группа – изделия с ИПО электродов (5 штук), III группа – изделия с ИПО изолятора (4 штуки) и IV группа – изделия с ИПО как электродов, так и изолятора (4 штуки). В ходе исследований регистрировалась и анализировалась зависимость мощности дозы рентгеновского излучения от величины ускоряющего напряжения в ускорителе (рис. 11, а) и определялось давление остаточных газов в приборе (рис. 11, б).

Из рис. 11 видно, что в изделиях, в которых применялась ИПО, мощность дозы рентгеновского излучения не превышает  $1 \text{ мкЗв/ч}$ , а давление остаточных газов не превышает  $0,5 \text{ мТорр}$ . Поэтому в соответствии с критериями оценки электрической прочности и стабильности работы малогабаритного ускорителя ионов можно сделать вывод о том, что ИПО изолятора и электродов ускоряющей системы изделия позволяет

повысить его электрическую прочность и стабильность работы.

### Выводы

В работе изучалось влияние ИПО изолятора и электродов ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов на его электрическую прочность и стабильность работы. Проведены численное моделирование динамики разряда в геометрии обрабатываемых деталей ускорителя, а также экспериментальные исследования, показавшие влияние давления газа, напряжения и тока разряда на длительность проведения ИПО. Установлено, что посредством вариации давления плазмообразующего газа (аргона) в вакуумной камере установки от  $0,06$  до  $0,1 \text{ Торр}$  можно менять площадь обработки поверхности электрода. На основании полученных результатов сформирована схема процесса ИПО электродов ускоряющей системы. По результатам экспериментальных исследований также определены параметры процесса ИПО изолятора ускоряющей системы ускорителя.



Для оценки эффективности ИПО были введены следующие параметры: мощность дозы рентгеновского излучения, генерируемого в высоковольтном промежутке ускорителя, и давление остаточных газов в его объеме. Низкая мощность дозы рентгеновского излучения и низкие пики газовыделения остаточных газов у изделий, к узлам которых применяли ИПО, по сравнению с изделиями, где ИПО не применялась, свидетельствуют о повышении электропрочности и стабильности работы малогабаритного ускорителя ионов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mamedov N. V., Prokhorovich D. E., Yurkov D. I., Kanshin I. A., Solodovnikov A. A., Kolodko D. V., Sorokin I. A. Measurements of the Ion-Beam Current Distribution over a Target Surface under a High Bias Potential // *Instruments and Experimental Techniques*. 2018. V. 61, No. 4. P. 530–537. DOI: 10.1134/S0020441218030223.
- Рачков Р. С., Пресняков А. Ю., Юрков Д. И. Исследование влияния магнитного поля скважины на нейтронную трубку геофизической аппаратуры // *Атомная энергия*. 2019. Т. 126, № 6. С. 334–337.
- Kanshin I. A. Simulation of charged particle beam dynamics extracted from a plasma source // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2064. Article number 0120113. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012113.
- Каншин И. А. Повышение электрической прочности газонаполненных нейтронных трубок для обеспечения стабильности генерируемых нейтронных импульсов // *Технологии ЭМС*. 2018. № 3 (66). С. 26–35.
- Кирьянов Г. И. Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 223 с.
- Evstaf'eva E. N., Zaitsev S. V., Rau E. I., Tatarintsev A. A. Charging Potential of Dielectrics and Insulated Conductors as a Function of the Angle of Incidence of an Electron Beam // *Moscow University physics bulletin*. 2014. V. 69, No. 1. P. 61–65. DOI: 10.3103/S0027134914010056.
- Minnebaev K. F., Rau E. I., Tatarintsev A. A. Charging Dielectrics when Bombarded with Ar<sup>+</sup> Ions of Medium Energies // *Physics of the solid state*. 2019. V. 61, No. 6. P. 1013–1016. DOI: 10.1134/S1063783419060118.
- Бочков В. В. Высоковольтный электронный прибор. Патент № WO 2011/093746A1, МПК H 01 J 5/08, B 82 Y 30/00. Оpubл. 04.08.2011.
- Vafin R. K., Asylbaev A. V., Mamontov D. V., Sklizkov I. D., Raab G. I., Khairtdinov E. F., Esipov R. S. Effect of ion nitriding by glow discharge on the physical and mechanical properties of the plastically deformed tool steel R6M5 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2064 (1). Article number 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012052.
- Teresov A. D., Petrikova E. A., Krysina O. V., Prokopenko N. A., Ivanov Yu. F., Akhmadeev Yu. H., Semenov G. V. Structure and mechanical properties of stainless-steel specimens, made by additive method, after pulsed electron beam treatment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2064 (1). Article number 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012076.
- Teresov A. D., Petrikova E., Ivanov Yu. F., Krysina O., Prokopenko N. Electron-Beam Surface Processing of Metal Materials Manufactured by Additive Methods // *Russian Physics Journal*. 2023. V. 65, Iss. 2. P. 1971–1978. DOI: 10.1007/s11182-023-02858-8.
- Крютченко О. Н. Способ изготовления электродов электронных приборов. Патент РФ № 2599389, МПК H 01 J 9/02. Оpubл. 10.10.2016.
- Боголюбов Е. П., Васин В. С., Губарев А. В., Якубов Р. Х. Способ изготовления газонаполненной нейтронной трубки. Патент РФ № 2327239, МПК G 21 G 4/02, H 01 J 9/02. Оpubл. 20.06.2008.
- Bakeev I. Yu. Application of an electron beam generated by a fore-vacuum plasma source to initiate a non-self-sustained glow discharge in long narrow metal tubes // *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022): Abstracts*. Tomsk: TPU Publishing House, 2022. 582 p.
- Mamedov N. V., Kolodko D. V., Sorokin I. A., Kanshin I. A., Sinelnikov D. N. Energy & mass-charge distribution peculiarities of ion emitted from penning source // *IOP Conf. Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. V. 830, No. 1. Article number 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012063.
- Mamedov N. V., Schitov N. N., Lobok M. G., Kanshin I. A. The penning discharge experimental study and its simulation // *Plasma Physics and Technology*. 2016. V. 3, No. 3. P. 158–162. DOI: 10.14311/ppt.2016.3.158.
- Mamedov N. V., Prokhorovich D. E., Kanshin I. A., Solodovnikov A. A., Kolodko D. V., Sorokin I. A. Comparison of the ion beam profile measuring methods // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 2011. Article number 080006. DOI: 10.1063/1.5053361.
- Черепнин Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1973. 384 с.
- Плешивцев Н. В., Бажин А. И. Физика воздействия ионных пучков на материалы. М.: Вузовская книга, 1998. 232 с.
- Kanshin I. A., Markov V. G. Preparation of high-voltage vacuum gap surfaces by the glowing discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1393. Article number 012093. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012093.