

Investigation of the Dependency of Penning Ion Source Operational Characteristics on its Geometric Parameters

N.V Mamedov, N.N. Schitov, I.A. Kanshin

*All-Russia Research Institute of Automatics (VNIIA),
Moscow, 127055, Russia
m_nikitos@vniia.ru*

Abstract

Experimental setup and methodology of complex study of discharge processes in ion sources are described. The main aim of this work is the optimization of the penning ion source working-characteristics. The results of the physical characteristics dependency investigation on geometrical parameters (the ratio of anode length to its diameter, the length of the gap between cathode/anode and anticathode/anode) are presented. The use of ring and mesh anodes allows to visualize the region of the discharge and its structure depending on pressure, discharge voltage and geometry. It was shown that peaks of extraction current depending on the anode size can be observed (or cannot for some conditions) at different position of the anode relative to cathodes. The conditions of «parasitic» discharges ignition at the outer edge of the cathode (that significantly increase power consumption and decreases energy efficiency) were found. Strict compliance of the maximum discharge intensity with the region of the maximum magnetic field and the dependence of extraction current on it was confirmed.

Keywords: Penning discharge, ion source.

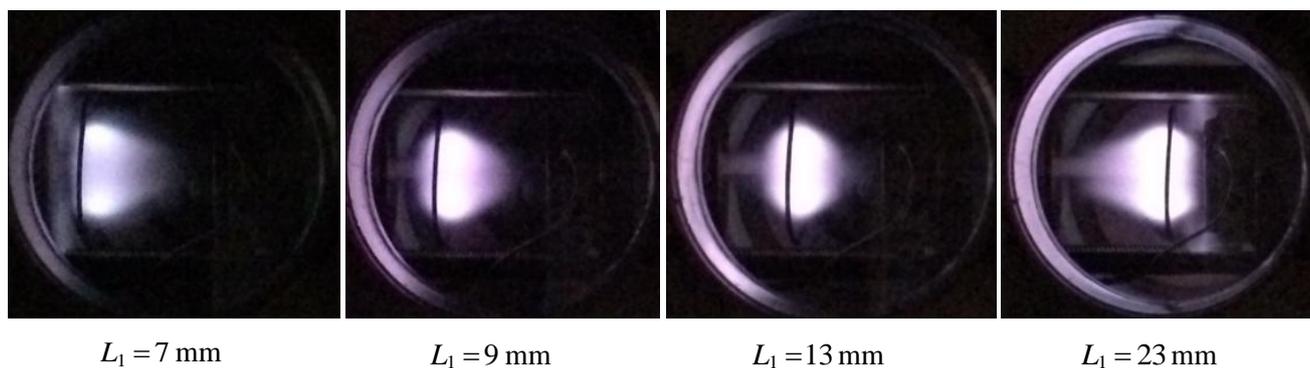


Fig. 1. Photos of the discharge area (in Penning source) depending on the ring anode position (Parameters: $P = 2 \text{ mTorr}$, $U_{\text{discharge}} = 2 \text{ kV}$, $U_{\text{extraction}} = 40 \text{ kV}$). L_1 – distance between anode and cathode

УДК 621.384.2/621.384.6, 533.924

Исследование зависимостей эксплуатационных характеристик источника ионов Пеннинга от его геометрических параметров

Н.В. Мамедов, Н.Н. Щитов, И.А. Каньшин

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,
Россия, Москва, 127055, ул. Суцневская, 22
m_nikitos@vniia.ru

Аннотация

Приведено описание экспериментального стенда и методики комплексного изучения разрядных процессов в источниках ионов типа Пеннинга с целью оптимизации их эксплуатационных характеристик. Представлены результаты исследований зависимостей некоторых характеристик от их геометрических параметров: отношения длины анода к его диаметру; длины зазоров между катодом/анодом и антикатодом/анодом. Использование кольцевых и сеточных анодов позволило визуализировать области горения разряда и их структуру в зависимости от давления, напряжения и геометрии ячейки. Показано, что в зависимости от размеров анода могут, как наблюдаться, так и нет максимумы вытягиваемого тока при различном положении анода относительно катодов. Установлены условия зажигания «паразитных разрядов» по внешней кромке катодов, существенно увеличивающих потребляемую мощность и уменьшающих энергетическую эффективность. Подтверждено строгое соответствие максимума интенсивности горения разряда области максимальной напряженности магнитного поля и зависимость вытягиваемого тока от неё.

Ключевые слова: разряд Пеннинга, ионный источник.

1. Введение

Как известно, Пеннинговские ионные источники уже много лет используются в миниатюрных линейных ускорителях для генерации потоков нейтронов с помощью дейтерий-тритиевой (или дейтерий-дейтериевой) реакции [1]. При создании газонаполненных нейтронных генераторов, применяемых для каротажа нефтегазовых и рудных месторождений, необходимо уменьшать не только габариты ионного источника, но и его энергопотребление [2]. Поэтому оптимизация геометрических параметров источника (отношения длины анода к его диаметру; длины зазоров между катодом/анодом и антикатодом/анодом; длины разрядного промежутка; длины и диаметра выходной апертуры антикатада, положения анода) для улучшения его эксплуатационных характеристик (эффективное извлечение необходимых ионных токов и формирования на мишени пятна нужного диаметра) крайне важна.

В работах [3–7] проведено всестороннее исследование влияния геометрии пеннинговской ячейки на состояние горения в ней разряда, в особенности на его динамические характеристики. В частности исследовалось влияние относительной длины разрядного промежутка – L/D (здесь L – длина ячейки Пеннинга, D – ее диаметр) на динамику разряда, рассмотрены механизмы процессов, обуславливающих распределение положительных ионов по поверхности катода. На основании экспериментальных данных показано, что выбором параметров ячейки и разряда (относительная длина, анодное напряжение, давление и индукция магнитного поля) можно добиться как образования узкого коллимированного ионного пучка, так и равномерного распределения плотности ионного тока по всей поверхности катода. Тем не

менее, при попытке использовать данные результаты для оптимизации ионного источника в нейтронной трубке возникают существенные сложности. В первую очередь конструкционные особенности (сильное ограничение в габаритных размерах), во-вторых – наличие неоднородного магнитного поля (из-за использования постоянных магнитов, а не токового соленоида) и, в-третьих, присутствие сильного ускоряющего потенциала на выходе из источника (провисание ускоряющего поля в зависимости от геометрии антикатода). Например, в работах [8–9] показано, что форма плазменного мениска (зависящая от геометрии антикатода) влияет не только на извлекаемый ток, но и на ток разряда. В данных работах исследованы три типа антикатодов, выбрана наиболее удачная форма, в которой так же варьировался угол раствора диафрагмы с целью определения наилучшего (увеличение вытягиваемого тока в 2 раза). Однако в экспериментах [8–9] использовался только кольцевой анод, хотя в работе [10] продемонстрировано, что увеличение высоты цилиндрического анода в 2 раза (до отношения высоты анода к его диаметру $h_a/D_a \approx 2$) приводит увеличению извлекаемого тока в более чем в 3 раза. В то же время, значения извлекаемых токов из ионных источников из работ [9, 10] существенно меньше в сравнении с аналогичным ионным источником из [11]. Таким образом, в зависимости от параметров конкретного эксперимента (который может отличаться в деталях от другого) нет возможности адекватно сравнивать данные работы и использовать полученные выводы в конструкциях ионного источника нейтронного генератора. Поэтому необходимо исследование влияния геометрии не только самой пеннинговской ячейки, но и всего ионного источника на его эксплуатационные характеристики в одной экспериментальной геометрии с возможностью широкого варьирования других физически параметров (напряжение разряда, давление, величина магнитного поля, значение вытягивающего напряжения).

К основным характеристикам ионных источников, которые использовались в приведенных экспериментах, относятся:

1. Полный ток вытягиваемого ионного пучка $I_{extraction}$
2. Коэффициент эффективности извлечения ионов – отношение вытягиваемого тока к току разряда

$$\alpha = \frac{I_{extraction}}{I_{discharge}} \quad (1)$$

3. Коэффициент энергетической эффективности разряда – отношение вытягиваемого тока к мощности разряда

$$\mu = \frac{I_{extraction}}{I_{discharge} \times U_{discharge}} = \frac{I_{extraction}}{W_{discharge}} \quad (2)$$

4. Коэффициент энергетической эффективности источника $\eta = \frac{W_{extraction}}{W_{discharge} + W_{extraction}}$. По-

скольку, в нейтронных трубках один из основных критериев для сравнения является ток на мишень, удобно определить коэффициент энергетической эффективности источника, как отношение вытягиваемого тока к суммарной мощности источника

$$\eta = \frac{I_{extraction}}{W_{discharge} + W_{extraction}} = \frac{1}{\frac{U_{discharge}}{\alpha} + U_{extraction}} \quad (3)$$

В данной работе представлены описание и результаты испытаний разборного ионного источника, предназначенного для изучения разрядных процессов в источниках ионов типа Пеннинга с целью оптимизации их геометрических параметров для улучшения эксплуата-

ционных характеристик. Причем речь идет лишь о качественном сравнении вытягиваемых токов при различных геометрических размерах электродной системы, но одинаковых условиях извлечения и параметрах разряда.

2. Описание экспериментального стенда

Разработана электродная система разборного ионного источника (ИИ) и узлы крепления к экспериментальному стенду, основанному на стандартном (ISO) вакуумном элементе «6-waycross» и откачной системе TPS-compact (турбомолекулярный насос TV81M и спиральный IDP-3) производства Varian (рис. 1).

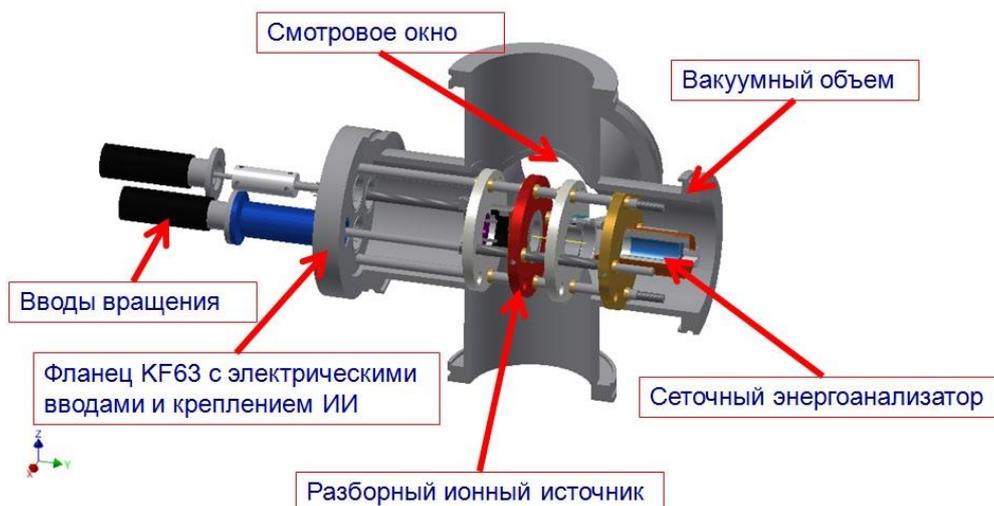


Рис. 1. Схема разборного ионного источника в вакуумной камере установки «TPS-compact»

Поскольку, разборный ИИ установлен через диэлектрические прокладки на направляющие шпильки, имеется возможность с помощью вводов вращения двигать электроды источника по оси как вместе, так и по отдельности (рис. 2).

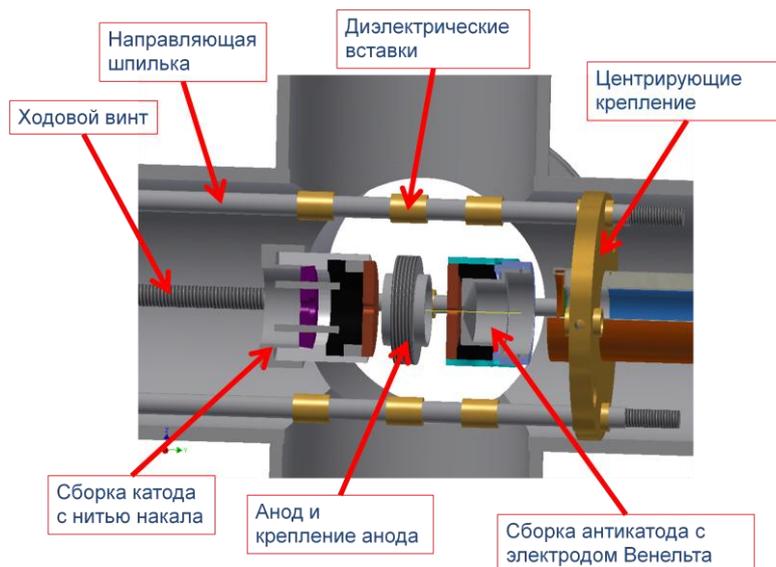


Рис. 2. Схема расположения электродов разборного ионного источника

Катод и антикатод, выполненные из различных материалов с различными геометрическими параметрами, могут легко заменяться. Вся конструкция разборного ионного источника смонтирована около смотрового окна, что позволяет визуально наблюдать область горения

разряда. Для этой цели магнитная система представляла собой – кольцевые магниты установленные за катодом и антикатодом. Распределение осевого магнитного поля при таком варианте размещения (в зависимости от расстояния от катода до антикатада) показано на рис. 3, а. Как видно, в области между катодами магнитное поле меняет знак. На рис. 3, б представлен модуль осевого магнитного поля между катодами при расстоянии $L = 30$ мм (для алюминиевого катода), при котором в центральной области разрядной ячейки имеется "плато" магнитного поля. Поэтому все эксперименты проводились с данной магнитной системой.

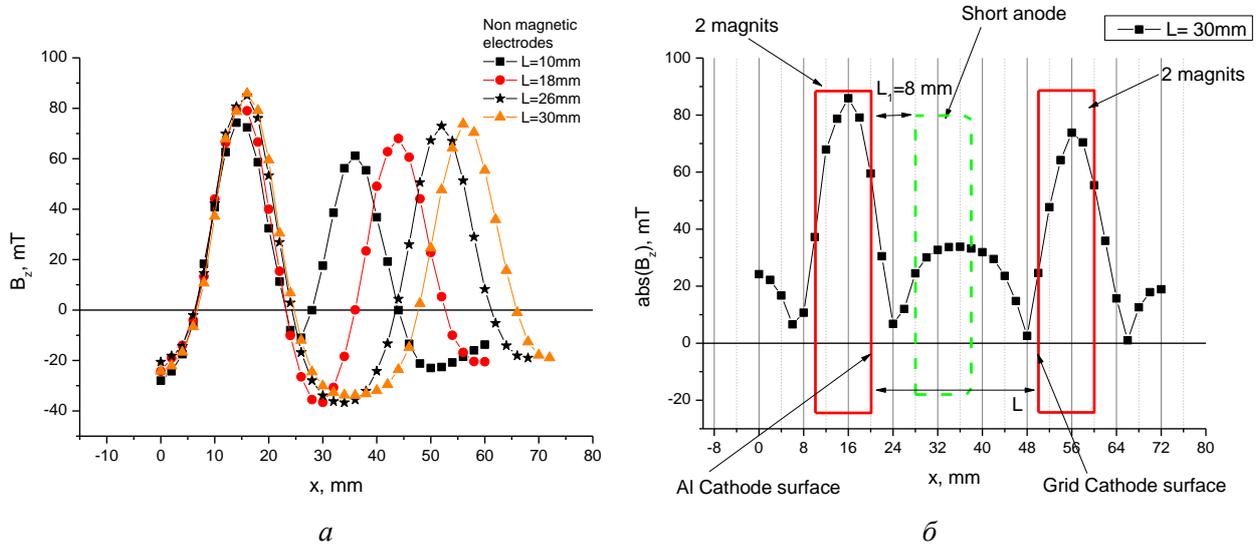


Рис. 3. Положение электродов и распределение аксиальной составляющей магнитной индукции по оси Z между катодами в зависимости от расстояния между ними (слева – модуль индукции)

С помощью данного ионного источника планируется проводить эксперименты по: определению оптимального отношения высоты анода к его диаметру h_a/D_a ; варьированию высоты анода h_a и расстояния катод-анод L_1 , анод-антикатод L_2 , длины разрядной ячейки L ; незначительному варьированию диаметра анода D_a и диаметров катодов D_k ; варьированию длины l и диаметра d выходной апертуры; оптимизации магнитной системы (рис. 4).

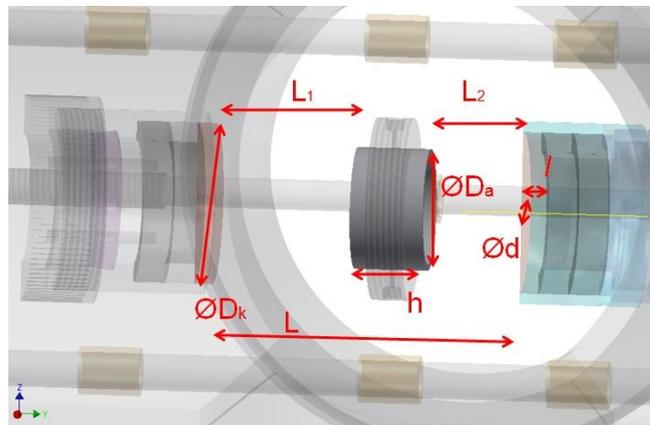


Рис. 4. Обозначения геометрических параметров ионного источника: h – высота анода; D_a – диаметр анода; L_1 – расстояние катод-анод; L_2 – расстояние анод-антикатод; D_k – диаметры катодов; L – длина разрядной ячейки (расстояние катод-антикатод); l – длина выходной апертуры; d – диаметр выходной апертуры

Для автоматизации измерений был написан ряд программ (в среде Labview), отвечающих за управление как отдельными блоками стенда, так и всеми вместе. Данная программа позволяет: дистанционно управлять анодным и вытягивающим напряжением, измерять анодный, катодный и экстрагируемый токи, автоматически регистрировать ВАХ разряда и вытягиваемого тока, измерять давления, вести запись данных в журнал эксперимента. Так же, при помощи видеокамеры Canon G6 и программы Icescream Screen Recoder в режиме реального времени производится видео-регистрация процесса горения пеннинговского разряда внутри источника

3. Результаты эксперимента

В данной работе представлены первые результаты исследований, в которых сравнивались вытягиваемые токи, потенциалы зажигания и диапазоны давлений при различных размерах анода и его положения относительно разрядной ячейки. Данная серия экспериментов проведена для трех вариантов анода: кольцевой анод (кольцо из молибденовой проволоки диаметра 0.5 мм с соотношением $D_a/h_a \gg 1$), короткий анод (цилиндр из сетки 12X18Н10Т с соотношением $D_a/h_a = 2$) и длинный анод (цилиндр из сетки 12X18Н10Т с соотношением $D_a/h_a = 1$). Катод выполнен из алюминия ($D_k < D_a$), антикатод представлял собой никелевую сетку с размером ячейки 2×2 мм (для того чтобы устранить влияние конечности выходной апертуры). В ходе измерений кольцевой и короткий анод могли двигаться вдоль оси источника относительно катода и антикатада, благодаря вводам вращения. Экстрагируемый ток регистрировался Цилиндром Фарадея ($D_{цф} \approx D_a$) с магнитной системой подавления вторичных электронов, расположенным на расстоянии $S \approx 130$ мм до экстрагирующего электрода.

На рис. 5 и 6 представлены изменение тока разряда и вытягиваемого тока в зависимости от положения анода относительно катода, для кольцевого и короткого анода соответственно. Приведенные здесь и далее графики построены без сглаживания, которое может само внести существенное искажение в полученные зависимости. Видна небольшая асимметрия в случае кольцевого катода. Максимальный экстрагируемый ток соответствует $L_1 = 13$, т.е. анод смещен от центра к катоду на 2 мм.

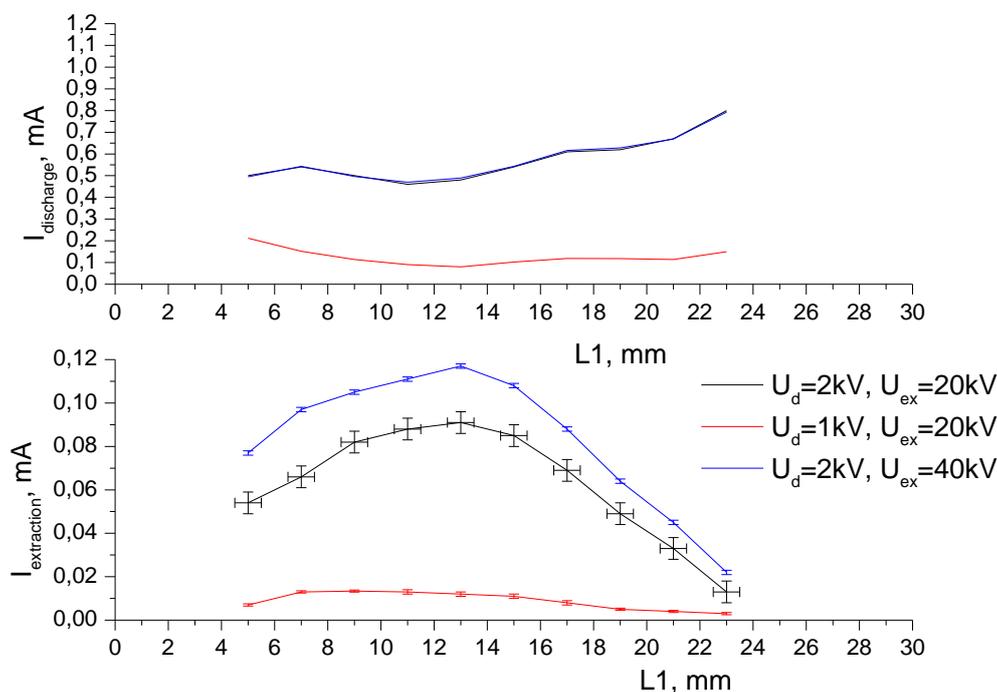


Рис. 5. Изменение тока разряда и вытягиваемого тока в зависимости от положения анода относительно катода при давлении $P = 2 \times 10^{-3}$ Торр для трех вариантов: $U_d = 2$ кВ, $U_{ex} = 40$ кВ; $U_d = 2$ кВ, $U_{ex} = 20$ кВ; $U_d = 1$ кВ, $U_{ex} = 20$ кВ

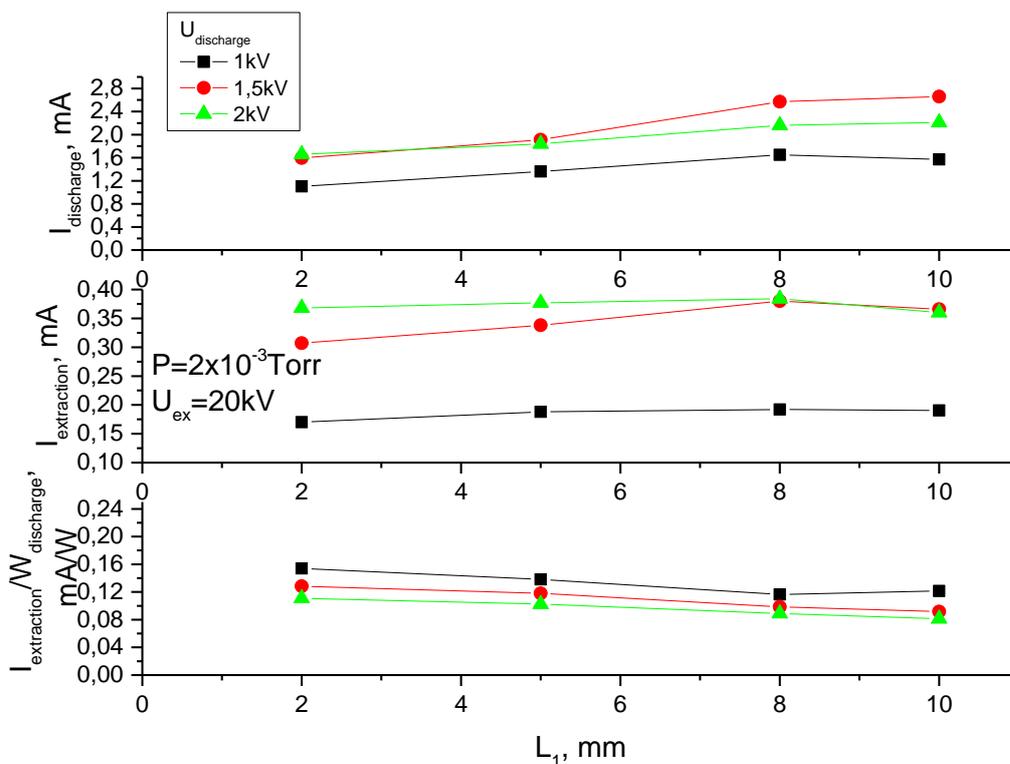


Рис. 6. Зависимости тока разряда, вытягиваемого тока и коэффициента энергетической эффективности от положения анода относительно катода (при вытягивающем напряжении $U_{extraction} = 20$ кВ и давлении $P = 2 \times 10^{-3}$ Торр)

На рис. 7 приведены фотографии разряда при различных расстояниях от анода до катода. Видно стягивания разряда к оси при смещении анода из центра ячейки. Что и является в половине ячейки, прилегающей к антикатоде. На крайних фотографиях отчетливо видно зажигание "паразитного" разряда по внешней кромке катодов, что объясняет увеличение потребляемой мощности и падение извлекаемого тока.

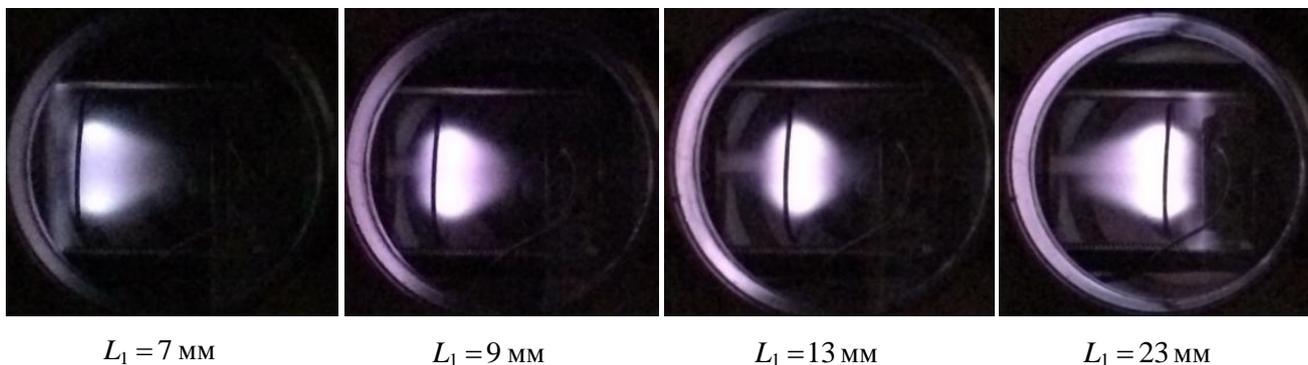


Рис. 7. Изображения области горения разряда в зависимости от положения кольцевого анода при $P = 2 \times 10^{-3}$ Торр, $U_d = 2$ кВ, $U_{ex} = 40$ кВ

В случае короткого анода при изменении L_1 от 2 до 10 мм экстрагируемый ток практически не меняется, но разрядный ток меняется, что приводит к изменению энергетической эффективности ИИ. Она так же ухудшается при приближении анода к антикатоде. По фотографиям (рис. 8) можно констатировать, что форма свечения разряда близка к эллиптической и заполняет все пространство анода, только когда он полностью находится на «плато магнитного поля» (см. рис. 3). Часть анода, находящаяся около катода, но в области минимума маг-

нитного поля, не «работает». Это видно на первых фото – когда разряд горит не только внутри анода, но и в области максимального магнитного поля. Часть анода около катода – темная при $L_1 = 2 \div 3$ мм, тогда как анод посередине полностью засвечен. Поскольку в экспериментах с длинным анодом его высота была практически равна длине разрядной ячейки, все измерения проводились при положении посередине между катодами. Фотографии формы разряда (при различных давлениях) с длинным анодом представлены на рис. 9.

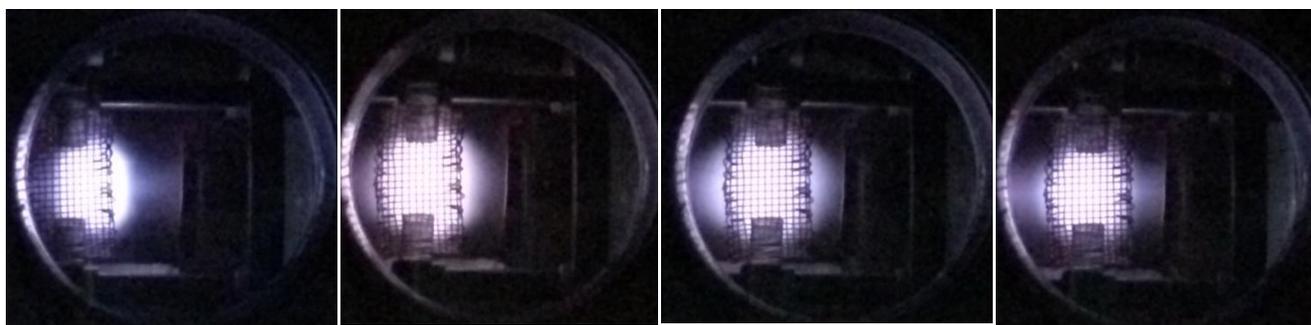
 $L_1 = 2$ мм $L_1 = 5$ мм $L_1 = 8$ мм $L_1 = 10$ мм

Рис. 8. Изображения области горения разряда в зависимости от положения короткого анода при $P = 2 \times 10^{-3}$ Торр, $U_d = 2$ кВ, $U_{ex} = 20$ кВ

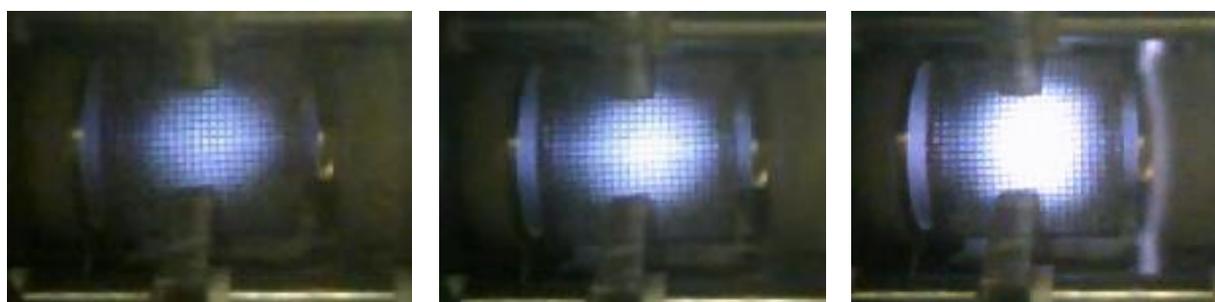
 $P = 5 \times 10^{-4}$ Торр $I_{discharge} = 1187$ мкА, $I_{extraction} = 167$ мкА $P = 1 \times 10^{-3}$ Торр $I_{discharge} = 2166$ мкА, $I_{extraction} = 317$ мкА $P = 4 \times 10^{-3}$ Торр $I_{discharge} = 4966$ мкА, $I_{extraction} = 638$ мкА

Рис. 9. Фотографии разрядов с длинным анодом при различных давлениях, $U_d = 2$ кВ, $U_{ex} = 20$ кВ

Видно, что в этом случае разряд сосредоточен в центре, и при увеличении давления растет интенсивность свечения. Таким образом, разряд автоматически стянут к оси, что отражается на коэффициенте вытягивания, который не зависит от давления. При давлениях больше $P > 4 \times 10^{-3}$ Торр видно зажигание паразитного разряда, приводящего к резкому увеличению мощности разряда и являющемуся инициатором последующих пробоев в источнике.

Из вольтамперных характеристик (ВАХ) видно, что ток разряда почти линейно зависел от анодного напряжения вплоть до 2 кВ (рис. 10). Отметим снижение потенциала зажигания при увеличении размеров анода с 700 В до 300 В. Из графиков видно, что значение вытягиваемого тока в широком диапазоне давлений $5 \times 10^{-4} \div 1 \times 10^{-3}$ Торр и напряжений разряда 1 ÷ 2 кВ существенно выше для варианта длинного анода, при этом значения коэффициента α ниже 0.2.

Точно так же ток разряда почти линейно зависел от давления (рис. 11). В случае кольцевого анода при низких давлениях область свечения разряда напоминает тор, который четко соотносится с кольцом (анодом), в центре свечение менее интенсивное. Область разряда немного «вываливается» к центру разрядного промежутка. При увеличении давления внешний вид области свечения переходит в усеченный конус – интенсивность свечения увеличивается в центре. Из-за асимметрии расположения электродов происходит некое контрагирование

разряда к оси источника и вытягивание его к антикатоду. Особенно это хорошо видно при давлении порядка 10^{-2} Торр, где так же появляется приосевое свечение плазмы.

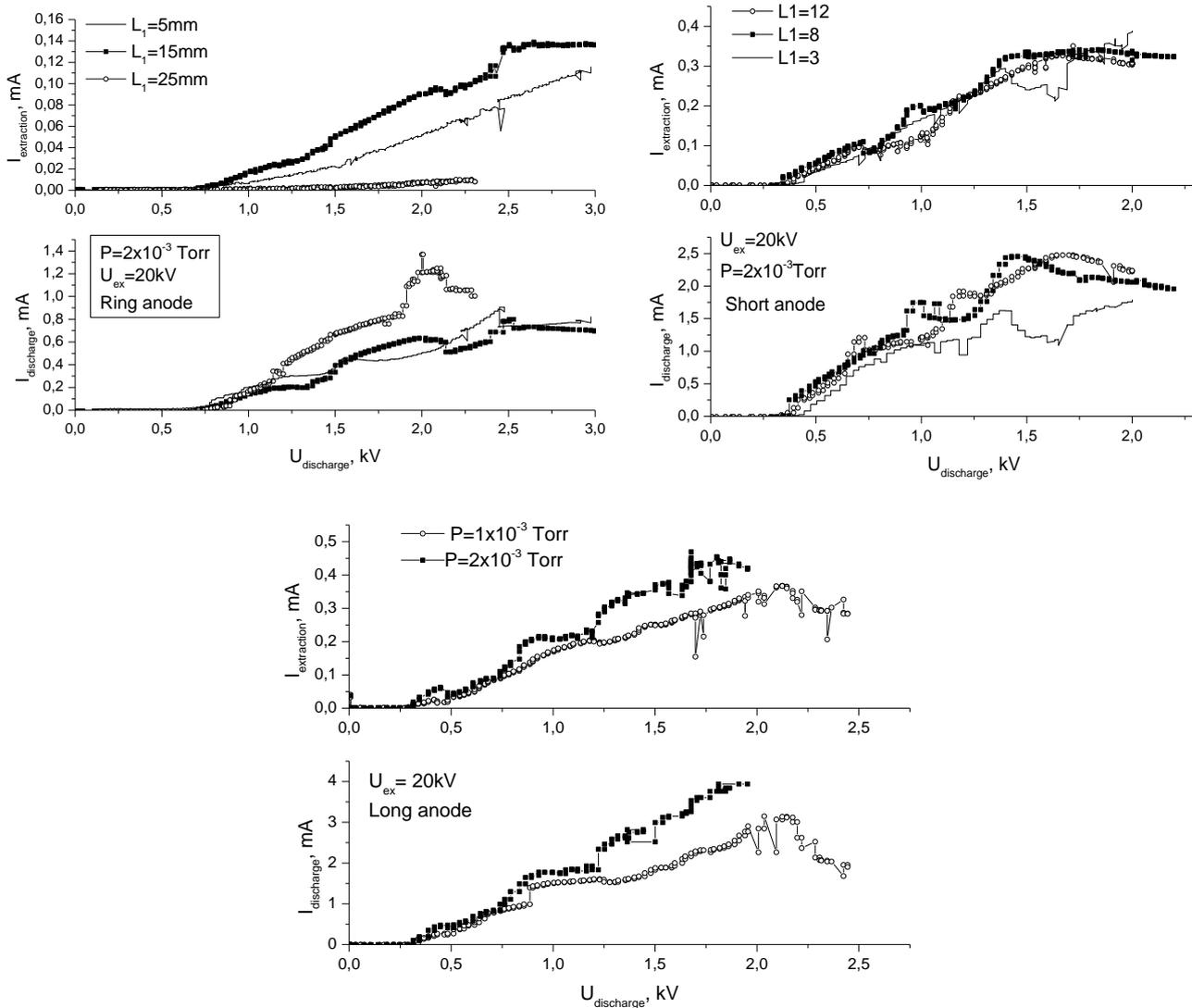


Рис. 10. Зависимости токов $I_{\text{extraction}}$, $I_{\text{discharge}}$ от напряжения разряда для кольцевого, короткого и длинного анода, соответственно

На рис. 12 показаны зависимости экстрагируемого тока, коэффициента μ от вытягивающего напряжения для лучших вариантов размещения анода. На графиках отчетливо видны максимумы всех кривых в диапазоне $1500 \div 3000$ В экстрагирующего напряжения. Возможным объяснением которых является образование виртуального антикатада в промежутке «антикатод – экстрагирующий электрод» при высоких вытягивающих напряжениях в силу большой прозрачности сетки. Разряд «переключается» на этот виртуальный антикатод и, соответственно, падает как экстрагируемый ток, так и энергетическая эффективность при постоянной потребляемой мощности. Сравнение различных вариантов ячейки по этим двум параметрам свидетельствует в пользу короткого сетчатого анода, смещенного относительно центра к катоду. В самом деле, несмотря на то, что экстрагируемый ток максимален в случае длинного анода и почти вдвое превосходит ток в случае короткого анода, энергетическая эффективность так же почти вдвое уступает. Это означает, что потребляемая мощность для длинного анода почти в 4 раза превосходит мощность в случае короткого. Или, при равной потребляемой мощности короткий анод обеспечит почти вдвое больший ток.

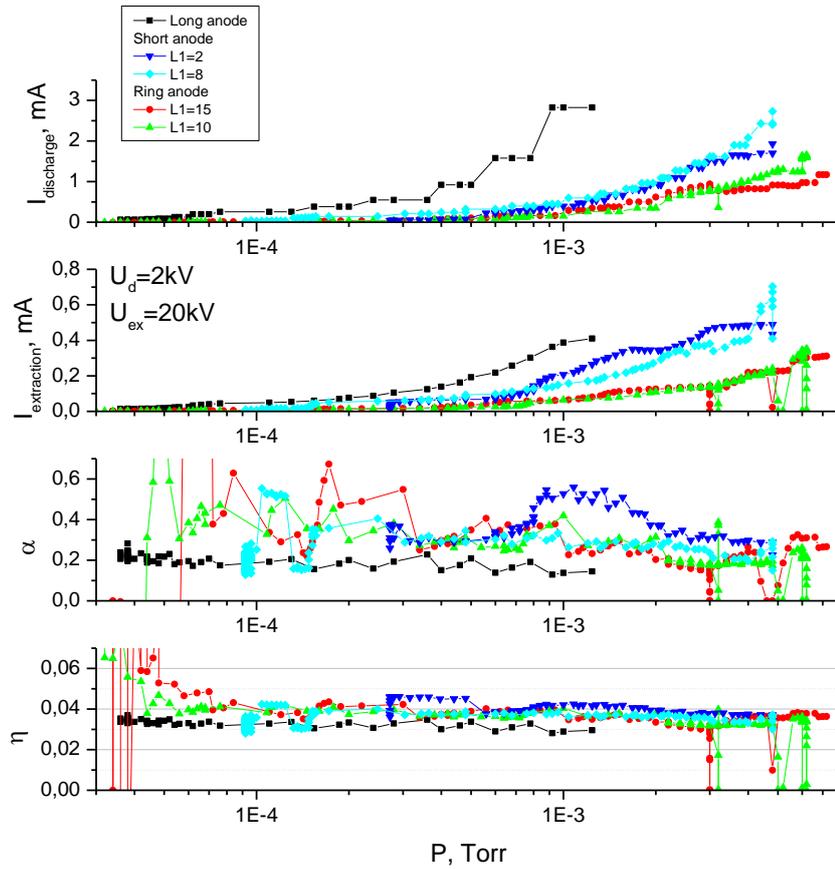


Рис. 11. Обобщенные зависимости экстрагируемого тока $I_{extraction}$, тока разряда $I_{discharge}$, коэффициента эффективности извлечения ионов α и коэффициента энергетической эффективности источника η от давления в камере (при напряжении разряда $U_{discharge} = 2$ кВ, вытягивающем напряжении $U_{extraction} = 20$ кВ) для длинного анода, 2-х положений короткого анода и 2-х положений кольцевого анода

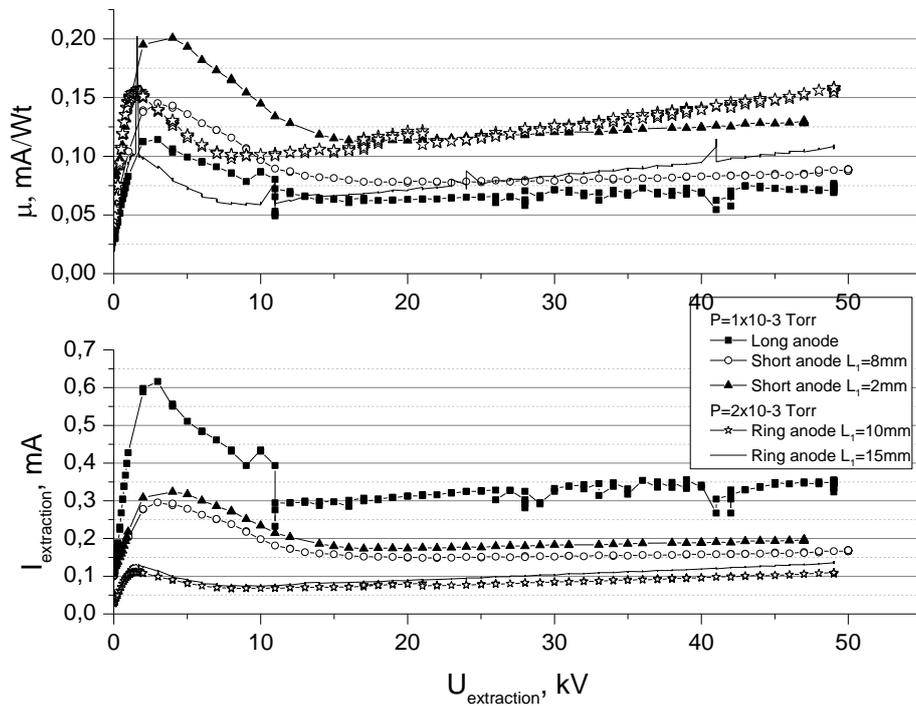


Рис. 12. Зависимости экстрагируемого тока и энергетической μ от вытягивающего напряжения для лучших вариантов размещения анода (при $U_d = 2$ кВ)

4. Заключение

Благодаря созданному экспериментальному стенду впервые визуализирован отражательный разряд во всей области разрядной ячейки, зафиксирована его форма и структура в зависимости от размеров и положения анода. Получено экспериментальное подтверждение стягивания разряда к оси ячейки при определенных комбинациях геометрических (положение и размер анода) и физических (давление и напряжение разряда) параметров. Показана зависимость вытягиваемого тока от различных положений кольцевого анода относительно катодов, однако для короткого анода – такой зависимости нет. Установлены условия зажигания (геометрическое положение анода и давление) «паразитных разрядов» по внешней кромке катодов, существенно увеличивающих потребляемую мощность и уменьшающих энергетическую эффективность для двух вариантов размеров анода. Подтверждены строгое соответствие максимума интенсивности горения разряда области максимальной напряженности магнитного поля и зависимость вытягиваемого тока от неё, которое четко наблюдается для случая короткого анода. Среди исследованных конфигураций ячейки с модельными электродами выявлена наилучшая по вытягиваемому току.

Литература

1. F.M. Penning, J.H.A. Moubis, *Physica (Amsterdam)* 4, 1190 (1937).
2. Bernhard Ludewight, Qing Ji, Arun Persaud, Amy Sy, and Thomas Schenkel (LNBL) Neutron Source R&D – from Compact Generators to Neutron Beams // *Proceedings of FNDA 2011*, November 9, 2011
3. Баберця́н Р.П., Егиазарян Г.А., Тер-Геворкян Э.И. Диаграммы неустойчивости пеннинговского разряда с холодными катодами при низких давлениях // *ЖТФ*, 1994, т. 64, вып. 10, с. 202–207.
4. Баберця́н Р.П., Бадаля́н Э.С. и др. Оптимизация некоторых параметров пеннинговского ионного источника методом подвижного катода // *ЖТФ*, 1996, т.66, вып.6, с.77–83.
5. Баберця́н Р.П., Бадаля́н Э.С. и др. О распределении тока положительных ионов по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами // *ЖТФ*, 2000, т. 70, вып. 4, с. 24–28.
6. Егиазарян Г.А., Хачатрян Ж.Б. и др. О распределении электронных потоков по поверхности катода в разряде с осциллирующими электронами // *ЖТФ*, 2006, т. 76, вып.2, с.62– 68.
7. Баберця́н Р.П., Бадаля́н Э.С. и др. Механизм влияния геометрического параметра на электрические характеристики пеннинговского ионного источника // *ЖТФ*, 1998, т. 68, вып. 9, с. 29–32.
8. Das B.K., Shyam A. Development of compact size penning ion source for compact neutron generator // *Rev. of Sci. Instrum* 79, 123305, 2008.
9. Das B.K., Shyam A., Das R., Rao A.D.P. Development of hollow anode penning ion source for laboratory application // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 669, 2012, pp. 19–21.
10. A. Sy, Q. Ji, A. Persaud, O. Waldmann, and T. Schenkel // *Novel methods for improvement of a Penning ion source for neutron generator applications* // *Rev. of Sci. Instrum* 83, 02B309 (2012).
11. Joshua L. Rovey, Brandon P. Ruzic, and Thomas J. Houlahan Simple Penning ion source for laboratory research and development applications // *Rev. of Sci. Instrum.* 78, 106101, 2007, pp. 1–3.

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2015 г.