

УДК 519:537.533.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ИСТОЧНИКАХ ДВУХ ТИПОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ И ИХ ТРАНСПОРТИРОВКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2019 г. В. Т. Астрелин^{1, 2, *}, М. С. Воробьев³, И. В. Кандауров¹, В. В. Куркучев^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: v.t.astrelin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Для экспериментов по сравнению двух типов электронно-оптической системы ускорительного диода в источнике электронов с плазменным эмиттером на основе дугового разряда низкого давления проведено численное моделирование формирования пучков и их транспортировки в ведущем магнитном поле пробочной конфигурации. Объяснена наблюдаемая динамика токов и получены оценки на предельную величину токов, транспортируемых в системе.

DOI: 10.1134/S0367676519110036

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН ранее был разработан источник электронного пучка на основе дугового плазменного эмиттера и мультиапертурной электронно-оптической системы (ЭОС) диодного типа [1]. Мощность пучка составляет 1–7 МВт при длительности импульса тока 0.1–1 мс и энергии электронов до 100 кэВ. Этот пучок используется в материаловедческих экспериментах [2] для имитации быстрых тепловых нагрузок на поверхность вольфрама – материала облицовки стенки дивертора в перспективных токамаках реакторного класса.

Электронный пучок транспортируется до мишени в нарастающем осевом магнитном поле, что позволяет за счет магнитной компрессии пучка создавать необходимую плотность энерговыделения на мишени. Отраженные от мишени быстрые электроны (для вольфрама ~50% от тока пучка), а также обратный поток ионов, возникающий вследствие плазмообразования на поверхности мишени и в области транспортировки пучка, оказывают существенное влияние на работу диода. Обратный поток частиц, попадая в ускоряющие апертуры, может вызывать развитие лавинных процессов между металлическими электродами ЭОС, что, в итоге, ведет к электрическому пробоему диодного промежутка. Многочисленные эксперименты показывают, что длительность пучка и максимально дости-

жимая величина инжектируемого тока находятся в обратной зависимости и ограничены именно пробоем мультиапертурного диода.

Для достижения более высоких параметров пучка было принято решение применить в существующем в ИЯФ СО РАН источнике конструкцию ЭОС, ранее разработанную и успешно применяемую в электронно-пучковых установках типа SOLO [3] в ИСЭ СО РАН (г. Томск, Россия). В источнике этого типа плазменный эмиттер ограничен мелкоячеистой металлической катодной сеткой, а анодом служит плазма, нарабатываемая электронным пучком в заземленной трубе дрейфа. Таким образом, ускорение электронов должно происходить в квазиплоском слое между катодной сеткой и свободной границей анодной плазмы.

Эксперименты с новым типом ЭОС, проведенные в сопоставимых режимах генерации пучка [4], были направлены на достижение максимального энергосодержания в пучке субмиллисекундной длительности, транспортируемом на коллектор в магнитном поле пробочной конфигурации. Было показано, что энергосодержание в пучке может быть увеличено (при одинаковой длительности импульса) приблизительно в два раза по сравнению с мультиапертурным диодом с металлическим анодным электродом. При этом

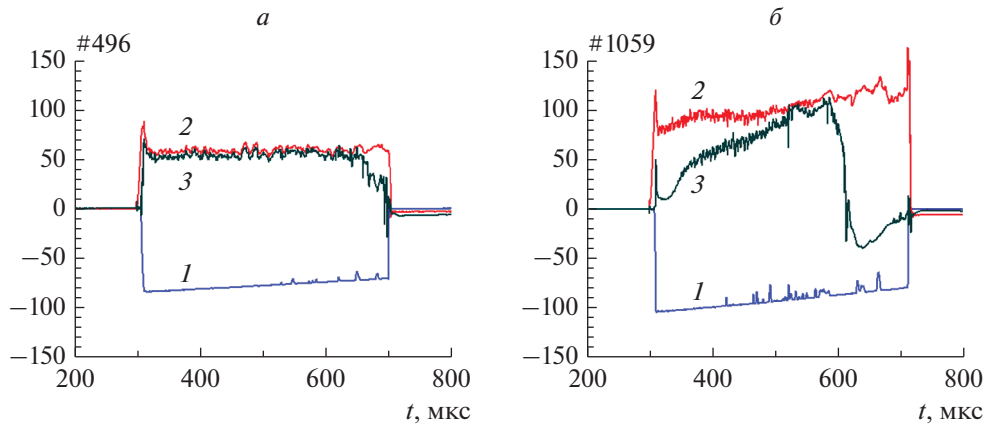


Рис. 1. Осциллограммы для мультиапертурного диода (*а*) и для диода с плазменным анодом (*б*): *1* – потенциал катода [кВ]; *2* – эмиссионный ток [А]; *3* – ток ЦФ [А].

пространственное распределение пучка по сечению и динамика тока на коллектор были существенно иными. В рамках анализа экспериментальных результатов было проведено численное моделирование условий формирования и транспортировки пучков в обоих типах ЭОС.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Источник пучка располагался внутри вакуумного бака диаметром 1 м, состыкованного с цилиндрической экспериментальной камерой с внутренним диаметром 10.6 см. Транспортировка пучка происходила в ведущем магнитном поле, нарастающем вдоль оси установки. Умеренное магнитное поле $B = 0.0051$ Тл в области диода формировалось внешними катушками на баке источника, экспериментальная камера располагалась внутри соленоида с полем 0.1–0.3 Тл. Пучок детектировали цилиндром Фарадея (ЦФ), расположенным на торце экспериментальной камеры вне соленоида, в расходящемся магнитном поле. В описываемых экспериментах, в область распространения пучка на расстоянии $Z = 0.85$ м от ЭОС (0.0092 Тл) можно было вводить диагностическую плоскую металлическую мишень. Эмитирующую плазму создавали дуговым разрядом с холодным катодом при импульсном напуске аргона. Сравнимые в экспериментах источники различались лишь устройством диодной ЭОС, в которой происходила экстракция и ускорение электронов пучка.

В ЭОС первого типа мультиапертурный диод был образован молибденовыми электродами, представляющими собой плоские “решетки” с 241 круглым отверстием в каждом электроде, просверленным по гексагональной сетке внутри окружности диаметром около 82 мм. Отверстия в электродах были выполнены соосно с высокой точностью, образуя элементарные ускорительные ячейки. Диаметры отверстий в катодном и анодном электродах бы-

ли равны 3 мм и 4.4 мм, соответственно, а величина межэлектродного зазора равнялась 10 мм.

В ЭОС второго типа область эмиссионной плазмы была ограничена катодной мелкоячеистой плетеной сеткой из нержавеющей стали. Эффективный диаметр сетки составлял 83 мм, с размером квадратной ячейки 0.4 мм и с прозрачностью ~50%. Металлическим анодом служила труба дрейфа из нержавеющей стали диаметром 90 мм и длиной 350 мм, при минимальном расстоянии между катодным и анодным электродами в 40 мм. Более детально условия экспериментов описаны в работе [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Типичные осциллограммы импульса мультиапертурного диода приведены на рис. 1*а*. Осциллограммы для диода с мелкоячеистым сеточным катодом при такой же длительности импульса пучка показаны на рис. 1*б*. Зависимость токов от времени можно объяснить следующим образом [4].

В начале импульса в обеих системах существует вакуумное распределение электрического поля. В случае мультиапертурного диода ток на ЦФ достигает максимальной величины через несколько микросекунд и далее остается практически постоянным на всей длительности импульса. Для ускоряющего напряжения 80 кВ, максимально достижимый при длительности импульса 0.4 мс ток эмиссии имел величину около 60 А.

В системе с сеточным катодом в первые 10–20 мкс от начала импульса ток ЦФ близок к ~10 А, а ~90% эмитированного тока оседает на анодную трубу дрейфа. Возникающее далее плавное нарастание тока пучка, приходящего на ЦФ, указывает на формирование так называемого “плазменного анода”. Анодная плазма создается в трубе дрейфа ионизацией электронным пучком остаточного и десорбированного со стенок трубы газа. Появление плазменного анода должно приводить к при-

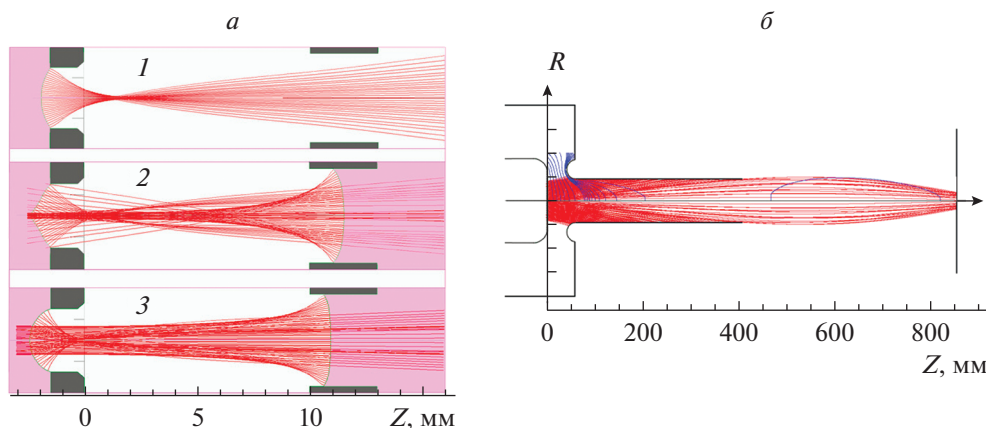


Рис. 2. *a* – Траектории частиц в ячейке мультиапертурной ЭОС: режим 1 – без анодной плазмы; 2 и 3 – с анодной плазмой ($j_i = 0.3$ и 0.7 А/см²); черным выделены: катодный (слева) и анодный (справа) электроды. *б* – Траектории электронов и эквипотенциали (–1, –2, ..., –9, –10, –20, ..., –70 кВ) в диоде с сеточным катодом в отсутствие анодной плазмы.

ближению геометрии эффективного ускоряющего зазора к плоской – аналогично тому, как это происходит в источниках типа SOLO.

При сопоставимой длительности импульсов около 0.4 мс, максимальное значение тока пучка в диоде с сеточным катодом достигало величины 100 А при ускоряющем напряжении около 80 кВ.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА В ДИОДАХ

Различие в поведении токов на ЦФ (рис. 1*a*, 1*б*) анализировали с применением численного моделирования формирования пучков в обеих системах.

Моделирование проводили при помощи программного пакета POISSON-2 [5], использующего метод интегральных уравнений для решения уравнения Пуассона, метод токовых трубок для вычисления зарядов и магнитных полей пучка на сетках и итерационный процесс для самосогласования стационарного решения. Полученные характеристики пучков использовали далее при моделировании их транспортировки до мишени.

Мультиапертурный диод

Расчет элементарной ячейки мультиапертурного диода для режима рис. 1*a* приведен на рис. 2*a*. Задавали следующие счетные параметры: диодный зазор – 10 мм, напряжение на диоде – 80 кВ. Эмиссионную способность поверхности плазмы задавали равной $j_e \sim 3.5$ А/см². Это соответствует току в каждой ячейке ~ 0.25 А и полному току пучка $I_0 \sim 60$ А. Температуру компонент катодной плазмы приближенно задавали типичной для дугового разряда – $T_{ec} \sim 10$ эВ, $T_{ic} \sim 1$ эВ, а плотность $n_c \sim 4.2 \cdot 10^{11}$ см⁻³ соответствовала плотности эмиссионного тока j_e .

Моделирование показало, что без анодной плазмы (рис. 2*a*, 1) среднеквадратичный угловой разброс пучка составил $\langle \theta \rangle \sim 0.16$ рад. Очевидно, он возникает из-за перефокусировки потока электронов в диодном зазоре, которая определяется вычисленной формой поверхности плазмы.

Влияние обратного потока ионов оценивали для двух значений плотности тока ионов: $j_i \sim 0.3$ и 0.7 А/см². Угловой разброс электронов составил $\langle \theta \rangle \sim 0.09$ и 0.06 рад, и уменьшался с ростом ионного тока (рис. 2*a*, режимы 2 и 3). Эти углы находятся в хорошем согласии с результатами измерений в эксперименте [6], где в сопоставимых условиях получены углы на выходе из диода ~ 0.07 рад. При увеличении плотности ионного тока до 1 А/см² ионный поток в диоде уширяется и начинает попадать на лицевую поверхность катодной металлической решетки. Это, как правило, приводит к лавинному пробою диодного зазора.

Диод с сеточным катодом

Задача формирования электронного пучка в системе с плазменным анодом для установки СОЛО была численно решена ранее [7]. Было показано, что в условиях СОЛО при плотности эмиссионного тока $j_e \sim 4$ А/см² электроны приобретают поперечные энергии до 0.4–0.5 кэВ в неоднородных электрических полях, такой же как здесь, катодной сетки. При их ускорении до 80 кэВ при сохранении поперечных энергий угловой разброс в пучке будет составлять величину масштаба $\langle \theta \rangle \sim 0.08$. Основным отличием условий генерации пучка является давление аргона $p \sim (2-3) \cdot 10^{-2}$ Па в дрейфовой камере СОЛО, значительно превышающее давление остаточного газа $p \sim 4 \cdot 10^{-4}$ Па на стенде ИЯФ, и меньшая энергия пучка в СОЛО, масштаба $\sim 10-20$ кэВ.

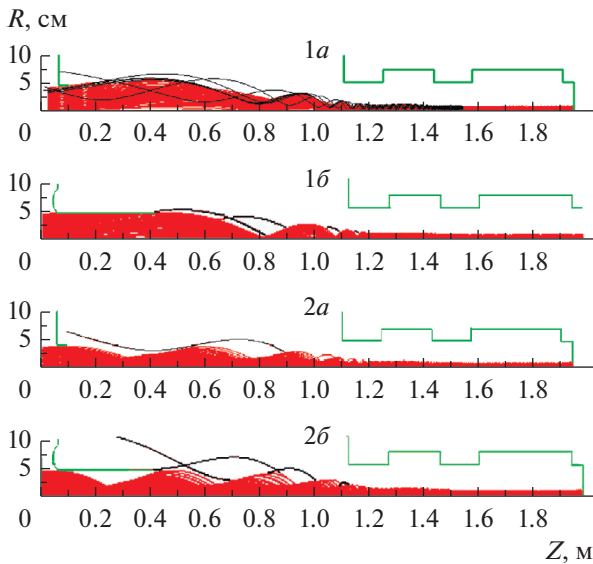


Рис. 3. Результаты моделирования транспортировки пучка. Выделены отраженные траектории. *1a, 2a* – варианты для мультиапертурного диода; *1б, 2б* – варианты для диода с сеточным катодом; где *1* – варианты с учетом всех полей пучка, *2* – варианты с плазмой в транспортном канале (без учета заряда пучка). Предельные токи эмиссии (начало отражения электронов) I_0 и токи прошедшие до цилиндра Фарадея I_F : *1a* – $I_0 = 25$ А, $I_F = 24$ А; *1б* – $I_0 = 62$ А, $I_F = 5.4$ А; *2a* – $I_0 \sim 190$ А, $I_F \sim 186$ А; *2б* – $I_0 \sim 304$ А, $I_F \sim 292$ А.

Поскольку в описываемых выше экспериментах параметры анодной плазмы и динамика заполнения ею анодной трубы и транспортного пространства определялась слабо контролируруемыми предполагаемыми факторами, моделирование процесса заполнения системы плазмой не проводили. Моделировали только начальное состояние системы без анодной плазмы и конечное, при котором анодная плазма заполняет анодную трубу и транспортный канал, нейтрализуя пространственный заряд пучка. При этом считается, что ускорение электронов происходит в плоском ленгмюровском слое между катодной сеткой и поверхностью анодной плазмы.

Результат численного моделирования генерации пучка в диоде с сеточным катодом и анодной трубой в начальной фазе показан на рис. 2б. При напряжении 80 кВ и токе эмиссии 95 А большая часть пучка поглощается на стенке трубы, а проходящий ток равен $I_0 \sim 5.4$ А. Этот результат хорошо согласуется с осциллограммами на рис. 1б, если учесть, что в численном коде отражение части электронов пучка от поверхности трубы не рассматривается. Численным моделированием было проверено, что выходной ток практически не зависит от поперечной энергии электронов на выходе из катодной сетки диода при ее изменении от 10 до 400 эВ, т.е., потери, в основном, опреде-

ляются конфигурацией ускоряющего поля в вакуумном диоде.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Результаты численного моделирования для обеих схем генерации пучка приведены на рис. 3. При транспортировке пучка по всей длине системы коэффициент компрессии по магнитному полю $R \sim 30$ такой же, как для осциллограмм на рис. 1. Для этих схем моделировались по два варианта: 1) начальное состояние без плазмы в канале транспортировки, и 2) конечное, в предположении заполнения канала плазмой с полной компенсацией заряда пучка. Магнитное поле пучка учитывается всегда.

Распределение плотности тока эмиссии по поверхности эмиттера задается близким к однородному, которое было получено в эксперименте по измерению распределения мягкого рентгеновского излучения пучка на мишени [8]. Всюду напряжение на диоде задавали равным 80 кВ.

Во всех случаях распределение скоростей по углам моделировали пятью группами траекторий (всего $5 \times 20 = 100$ траекторий) с углами, определяемыми на выходе из диода как $\theta_s = 0, \pm 0.03, \pm 0.06$ рад и равными для всех углов токами.

При моделировании ток эмиссии поднимался до появления первых отраженных траекторий. По результатам предыдущих экспериментов и моделирования их появление ассоциируется с предпробойным состоянием диода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В мультиапертурном диоде при отсутствии плазмы в канале (рис. 3, вариант *1a*) отражение электронов начинается с тока пучка ~ 25 А. Очевидно, причиной отражения является комбинированное ограничение тока потенциалом объемного заряда пучка при наличии питч-углов, возрастающих с ростом магнитного поля. При полной компенсации заряда мог бы проходить ток до ~ 190 А (вариант *2a*). Он ограничивается влиянием собственного магнитного поля пучка в диоде, приводящего с ростом тока пучка к нарастанию начального питч-угла электронов между вектором их скорости и полным магнитным полем и, в результате, к их отражению магнитной пробкой. В эксперименте до пробоя диода проходит ток ~ 60 А (рис. *1a*), больший, чем 25 А. Это означает, что в пучке происходит частичная (до 50–60%) компенсация объемного заряда плазмой.

В диоде с сеточным катодом без компенсации заряда пучка отражение электронов магнитной пробкой начинается как раз при достижении выходного тока из лайнера значения 5.4 А (рис. 3, вариант *1б*). Поскольку питч-углы электронов под действием расходящегося электрического

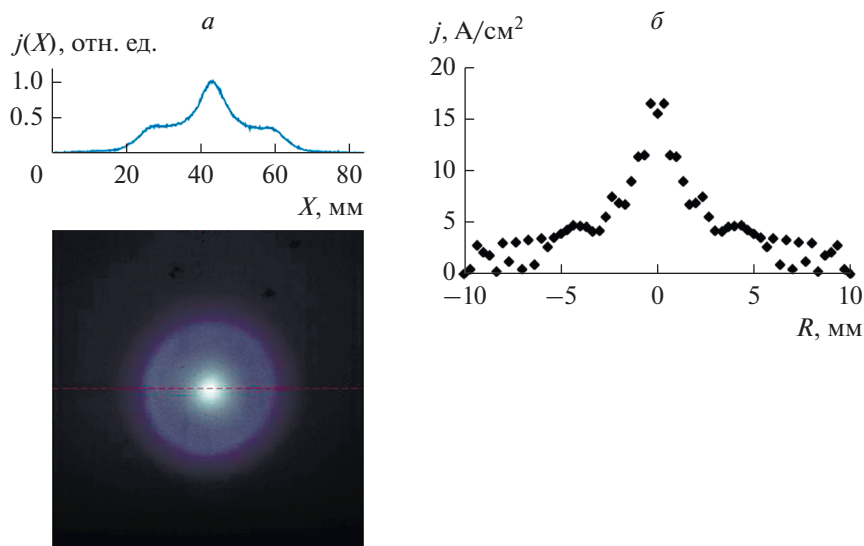


Рис. 4. Измеренный (а) и расчетный (б) профиль плотности тока пучка.

поля в лайнере нарастают по радиусу, а предпробойный ток в эксперименте близок к расчетному, то это означает, что лайнер поглощает именно те электроны пучка, питч-углы которых лежат вне конуса прохождения через пробку. При появлении анодной плазмы и полной компенсации заряда пучок может проходить через пробку без отражения с током до ~300 А. При этом потери электронов на лайнере малы. Это соответствует осциллограммам на рис. 1б при $t \sim 500\text{--}600$ мкс.

Для диода с сеточным катодом проводили также сравнение экспериментально измеренного с помощью изображающей рентгеновской диагностики профиля тока пучка на диагностической мишени ($Z = 85$ см) с вычисленным при моделировании. Рентгеновский отпечаток пучка, соответствующий ему радиальный профиль распределения плотности тока по сечению и расчетный профиль приведены на рис. 4а и 4б. Наблюдается качественное соответствие профилей. В обоих случаях в центре пучка присутствует резкий максимум тока. Измеренная ширина профиля на полувысоте составляет ~13 мм, а расчетная ширина — 4–5 мм. Форма профилей совпадает с точностью до статистических ошибок модельной дискретизации. Различие в поперечном размере профилей может быть объяснено тем, что в эксперименте измеряется усредненный по времени профиль, поскольку время высвечивания люминофора рентгеновской диагностики больше длительности импульса пучка.

Из рис. 3 видно, что циклотронное вращение электронов приводит к периодическим пульсациям сечения по длине. Их период изменяется в течение импульса из-за изменения напряжения на диоде (см. рис. 1). При этом при прохождении области сжатого пучка через мишень плотность тока в центре мишени резко возрастает, что, по-

видимому, и проявляется в центральном пике измеренного профиля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для двух типов диодной ЭОС в источнике электронного пучка с плазменным эмиттером проведено численное моделирование формирования и транспортировки пучков в ведущем магнитном поле. Результаты расчетов согласуются с данными экспериментов и подтверждают справедливость физических моделей, принятых для интерпретации наблюдаемых процессов и явлений.

Работа поддержана Комплексной программой фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН “Междисциплинарные интеграционные проекты 2018–2020 г.” (Проект СО РАН № 10).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurkuchekov V.V., Astrelin V.T., Avrorov A.P. et al. // Fusion Sci. Techn. 2013. V. 63. № 1Т. P. 292.
2. Vyacheslavov L.N., Arakcheev A.S., Bataev I.A. et al. // Phys. Scr. 2018. V. 93. № 3. Art. № 035602.
3. Devyatkov V.N., Koval' N.N., Shchanin P.M. // Techn. Phys. 1988. V. 43. P. 39.
4. Astrelin V.T., Kandaurov I.V., Koval N.N. et al. // Vacuum. 2017. V. 143. P. 495.
5. Астрелин В.Т. // Усп. прикл. физ. 2013. Т. 1. № 5. С. 571.
6. Kurkuchekov V.V., Astrelin V.T., Kandaurov I.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 830. Art. № 012031.
7. Astrelin V.T., Burdakov A.V., Grigoriev S.V. et al. // Proc. 16th Int. Symp. on High Current Electronics. (Tomsk, 2010). P. 15.
8. Kandaurov I.V., Kurkuchekov V.V., Trunev Yu.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 830. Art. № 012032.