

12

## Конкурирующие типы эмиссии электронов в сеточном плазменном эмиттере на основе дуги низкого давления

© Р.А. Карташев<sup>1</sup>, М.А. Мокеев<sup>1</sup>, М.С. Воробьев<sup>1,2</sup>, А.А. Гришков<sup>1</sup>, Н.Н. Коваль<sup>1</sup>, С.Ю. Дорошкевич<sup>1</sup>, П.В. Москвин<sup>1</sup>, Д.А. Горьковская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: maks\_tok@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2025 г.

В окончательной редакции 16 июля 2025 г.

Принято к публикации 16 июля 2025 г.

В электронном источнике с сеточным плазменным эмиттером и плазменным анодом с открытой границей плазмы проведены исследования эмиссии электронов в широком диапазоне изменения параметров. Экспериментально продемонстрирована конкуренция двух типов эмиссии электронов с поверхности катодных электродов сеточных плазменных эмиттеров под действием ускоренных ионов, поступающих из ускоряющего промежутка. Показано, что рост тока в ускоряющем промежутке приводит к перераспределению токов в сеточных плазменных эмиттерах и сопровождается увеличением тока ионно-электронной эмиссии и пропорциональным уменьшением тока эмиссии электронов из катодного пятна вплоть до нулевого значения.

**Ключевые слова:** плазменный источник электронов, дуга низкого давления, ионно-электронная эмиссия, катодное пятно, анодная плазма.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61401.20415

Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером (СПЭ) находят широкое применение в научных и технических сферах [1,2]. Такие источники способны генерировать широкий электронный пучок субмиллисекундной длительности, обладая при этом широким диапазоном плотности энергии (до 100 J/cm<sup>2</sup>). Благодаря этим характеристикам применение СПЭ в материаловедческих исследованиях является актуальным и востребованным [3–6].

Одним из представителей источников электронов данного типа является источник „СОЛО“ с СПЭ на основе дугового разряда низкого давления. Генерируемый этим источником электронный пучок имеет следующие предельные параметры: диаметр пучка до 50 mm, длительность импульса до 1 ms, ток в ускоряющем промежутке до 300 A и ускоряющее напряжение до 25 kV. Принцип работы источника описан в работах [7–9].

Отличительной особенностью источников с СПЭ типа „СОЛО“ является наличие анодной плазмы, формирующейся в процессе транспортировки электронного пучка к коллектору и оказывающей значительное влияние на работу источника в целом. С одной стороны, анодная плазма способствует улучшению условий транспортировки пучка, повышая первоначально ускоряющего промежутка и позволяя получить электронный пучок с током, превышающим ток Чайлда–Ленгмиора, за счет ионной компенсации объемного заряда электронного пучка. С другой стороны, ускоренные ионы, извлекаемые ускоряющим полем с границы анодной плазмы и движущиеся навстречу электронному пучку, могут вызывать неконтролируемый рост тока в ускоряющем промежутке.

В работе [10] исследован эффект усиления эмиссии при ионной бомбардировке эмиссионного электрода. Авторами было показано, что увеличение тока в ускоряющем промежутке напрямую зависит от рода рабочего газа и энергии ионов, а также определяется материалом эмиссионного электрода. Экспериментальные данные, полученные в работе [10], свидетельствуют о значительном вкладе в энергетику генерируемого электронного пучка вторичных ионно-электронных процессов. При этом часть ускоренных ионов проникает в область плазменного эмиттера через отверстия эмиссионной сетки [11–14]. Однако в настоящее время отсутствуют количественные оценки, направленные на исследование механизма перераспределения токов в плазменном эмиттере в отношении эмиссионных процессов на поверхности катода разрядной системы.

Ток, протекающий в ускоряющем промежутке источника электронов с СПЭ, удовлетворяет следующей формуле [9,11]:

$$I_0 = \alpha I_d + I_i + I_i(1 - \Gamma)\gamma_2 + I_i\Gamma\gamma_p, \quad (1)$$

где  $I_0$  — ток в ускоряющем промежутке,  $\alpha$  — коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера,  $I_d$  — ток, измеряемый в цепи источника питания СПЭ,  $I_i$  — ток ускоренных ионов, извлеченных из анодной плазмы,  $\Gamma$  — эффективная геометрическая прозрачность эмиссионного электрода,  $\gamma_2$  — коэффициент ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионного электрода,  $\gamma_p$  — коэффициент ионно-электронной эмиссии из эмиссионной плазмы. Величина тока  $I_d$  определяется источником питания  $U_d$  и остается квазипостоянной на

протяжении всего импульса. В отсутствие ускоренного потока ионов (т.е. когда ускоряющее напряжение  $U_0 = 0$ ) ток  $I_d$  представляет собой ток катодного пятна  $I_{cs}$  с долей низкоэнергетических плазменных ионов  $I_{i1e}$ , также замыкающихся в цепи катода:

$$I_d(U_0 = 0) = I_{cs} + I_{i1e}. \quad (2)$$

При подаче ускоряющего напряжения ( $U_0 \neq 0$ ) поток ускоренных ионов, проникающий в пространство СПЭ через отверстия в эмиссионной сетке и бомбардирующими катодные электроды дугового разряда, инициирует ионно-электронную эмиссию, что приводит к перераспределению токов в СПЭ и сопровождается уменьшением тока эмиссии из катодного пятна

$$I_d(U_0 \neq 0) = I_{cs} + I_{i1e} + I_{iee}, \quad (3)$$

где  $I_{iee}$  — ток ионно-электронной эмиссии с поверхности катода дугового разряда, равный

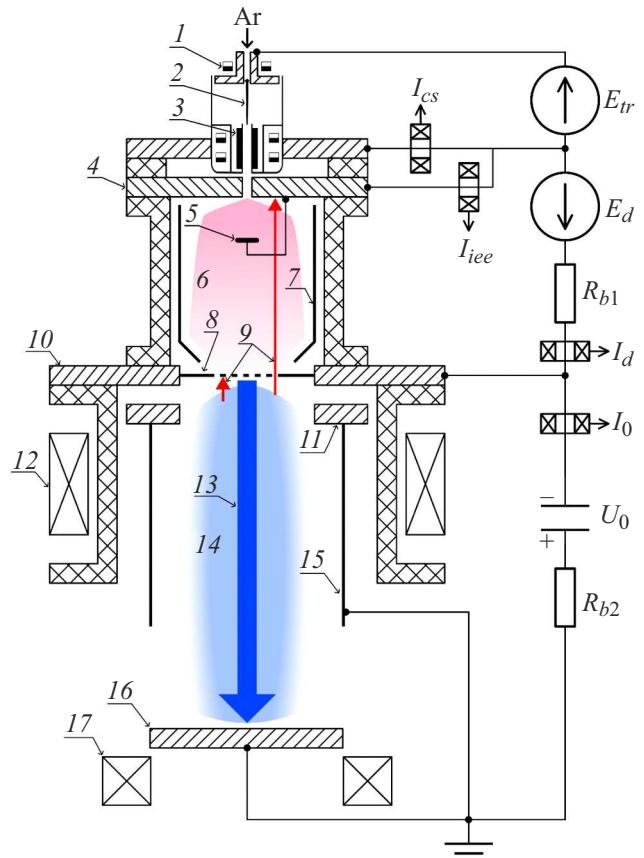
$$I_{iee} = I_i \Gamma (1 + \gamma_1), \quad (4)$$

$\gamma_1$  — коэффициент ионно-электронной эмиссии.

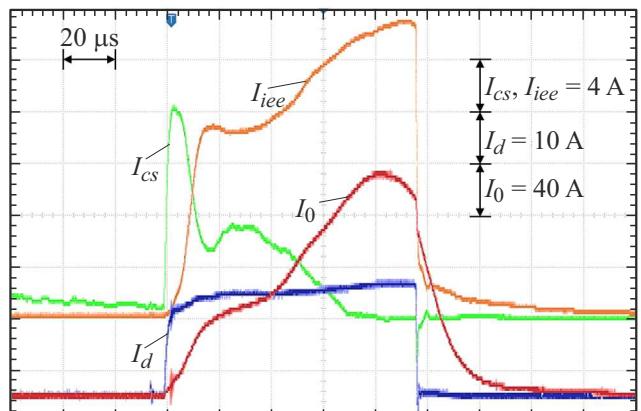
Целью настоящей работы является проведение экспериментов по разделению тока  $I_d$  на составляющие, обусловленные функционированием катодного пятна  $I_{cs}$  и бомбардировкой ускоренными ионами поверхности катода дугового разряда  $I_{iee}$ .

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Для разделения тока эмиссии электронов с поверхности катода дугового разряда в конструкцию СПЭ был введен дополнительный катод 4, выполняющий функцию коллектора для ускоренных ионов и выполненный из алюминия. Алюминий отличается сравнительно высоким коэффициентом ионно-электронной эмиссии, что позволяет явно продемонстрировать влияние ускоренных ионов на работу СПЭ. В центре катода 4 выполнено отверстие диаметром 12 mm, через которое обеспечивается выход дуги в область СПЭ. Для перехвата ускоренных ионов, поступающих в пространство СПЭ по оси симметрии системы, установлен алюминиевый электрод 5 диаметром 26 mm, размещенный на расстоянии 40 mm от электрода 4 и накоротко с ним соединенный. Таким образом, удается разделить области эмиссии в СПЭ: катодное пятно функционирует на магниевом вставке электрода 3, а ионно-электронные процессы, связанные с воздействием ускоренных ионов, происходят на электродах 4 и 5.

Типичные осциллограммы токов представлены на рис. 2. В начальный момент времени между поджигающим электродом 2 и катодом 3 прикладывается импульс высокого напряжения, инициирующий образование катодного пятна и возбуждение дугового разряда, горящего между катодом 3 и эмиссионным электродом 10 с эмиссионной сеткой 8. На осциллограмме этот процесс проявляется резким увеличением тока  $I_{cs}$ .



**Рис. 1.** Схема модернизированного источника электронов „СОЛО“. 1 — постоянные магниты, 2 — поджигающий электрод, 3 — магниевый катод дугового разряда, 4 — электрод для регистрации тока ионно-электронной эмиссии, 5 — перераспределяющий электрод, 6 — катодная/эмиссионная плазма, 7 — анодная вставка, 8 — эмиссионная сетка, 9 — поток ускоренных ионов, 10 — эмиссионный электрод, 11 — извлекающий электрод, 12, 17 — соленоиды, 13 — электронный пучок, 14 — анодная/пучковая плазма, 15 — труба дрейфа, 16 — коллектор.



**Рис. 2.** Характерные осциллограммы токов для условий  $p = 60 \text{ mPa}$ ,  $U_0 = 17 \text{ kV}$ ,  $I_d = 20 \text{ A}$ .

Пространство эмиттера заполняется эмиссионной плазмой 6, из которой под действием высокого напряжения через отверстия эмиссионной сетки 8 электроны извлекаются, ускоряются и транспортируются к коллектору в магнитном поле катушек 12 и 17. В процессе транспортировки в пространстве дрейфа электроны ионизуют рабочий газ, что приводит к образованию анодной плазмы 14. Ионы анодной плазмы извлекаются и ускоряются в сторону СПЭ, бомбардируя поверхность эмиссионной сетки 8 или проникая в пространство СПЭ. Этот процесс на осциллограмме проявляется как рост тока  $I_0$  и при постоянном значении произведения  $\alpha I_d$  [9] обусловлен повышением роли слагаемых  $[I_i + I_i(1 - \Gamma)\gamma_2 + I_i\Gamma\gamma_p]$  в формуле (1).

Ускоренные ионы, прошедшие через отверстия эмиссионной сетки 8, бомбардируют поверхность катодного электрода 4 и перераспределяющего электрода 5, выбивая при этом вторичные  $\gamma$ -электроны, которые вносят вклад в ток  $I_{iee}$ . С увеличением тока в ускоряющем промежутке  $I_0$  наблюдается соответствующий рост тока  $I_{iee}$ , в то время как ток  $I_{cs}$  снижается.

Токи ионов и электронов в основном промежутке согласованы и взаимосвязаны. Если говорить о природе роста тока пучка, то в начале его импульса первоначальной являются электроны, извлекаемые из СПЭ. Именно они нарабатывают плазму в дрейфовом пространстве и приводят к появлению тока вторичных электронов, что в свою очередь приводит к самоподдержанию этого процесса, если амплитуда тока достигает некоторой величины. Электроны, которые извлекаются из катодного пятна, и вторичные электроны, появившиеся благодаря вторичной ионно-электронной эмиссии, могут отличаться только начальной энергией, с которой они поступают в ускоряющий промежуток, однако таких энергетических измерений в настоящей работе не проводилось. Из экспериментов следует, что пока эмиссионные процессы из катодного пятна доминируют (и это видно по осциллограмме тока  $I_{cs}$ ), можно считать, что причиной роста тока  $I_0$  являются электроны из катодного пятна, а если доминирует вторичная ионно-электронная эмиссия, то причиной роста тока  $I_0$  является уже увеличение тока  $I_i$ .

Во время генерации пучка происходит интенсивная десорбция газа с поверхности электродов, а также частичное плавление и испарение коллектора, что приводит к росту давления и изменению газового состава. Это затрудняет измерение мгновенного значения давления в системе, поэтому при анализе экспериментальных результатов используется значение давления до начала генерации электронного пучка (начальное давление). При относительно высоком давлении ( $p \geq 60 \text{ mPa}$ ) возможны условия, при которых энергии и концентрации ионов, поступающих в область СПЭ, будет достаточно для полного подавления эмиссии из катодного пятна ионно-электронной эмиссией с этих электродов (электроды 4 и 5 на схеме). В этом случае ток  $I_{cs}$  прекращается, и перенос тока в плазменном эмиттере осу-

ществляется исключительно за счет ионно-электронных процессов.

Для доказательства того, что в рассматриваемом случае не происходило инициирования катодного пятна на электродах, подверженных ионной бомбардировке, приведем пример инициирования катодного пятна на электродах 4 и 5 (рис. 3). При  $100 \mu\text{s}$  импульса разряда наблюдается процесс инициирования катодного пятна на электродах 4 или 5, что сопровождается резким увеличением тока  $I_{iee}$  при одновременном снижении до нуля тока  $I_{cs}$ . При этом на осциллограмме тока  $I_0$  каких-либо ступенчатых изменений не наблюдается. Этот факт свидетельствует о том, что перераспределение токов, происходящее на электродах 3, 4 и 5, не связано с изменением ускоренного потока ионов, а вызвано образованием катодного пятна на электродах 4 и 5.

По экспериментальным данным была построена зависимость отношения токов  $I_{iee}/I_d$  от величины рабочего давления  $p$  (рис. 4). Для всех зависимостей измерения проводились в момент максимума тока в ускоряющем

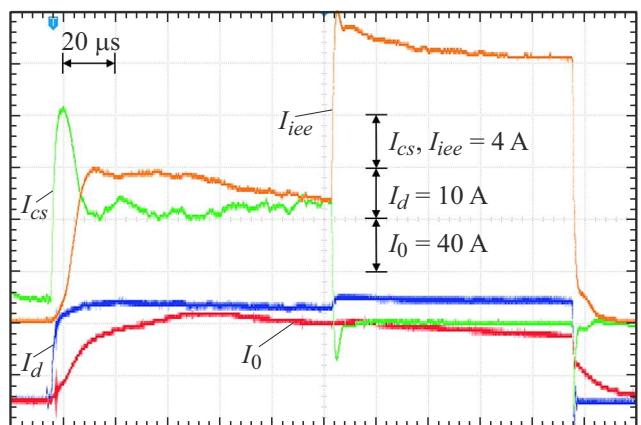


Рис. 3. Характерная осциллограмма при инициировании катодного пятна на электроде 4 или 5,  $p = 60 \text{ mPa}$ ,  $U_0 = 12 \text{ kV}$ ,  $I_d = 20 \text{ A}$ .

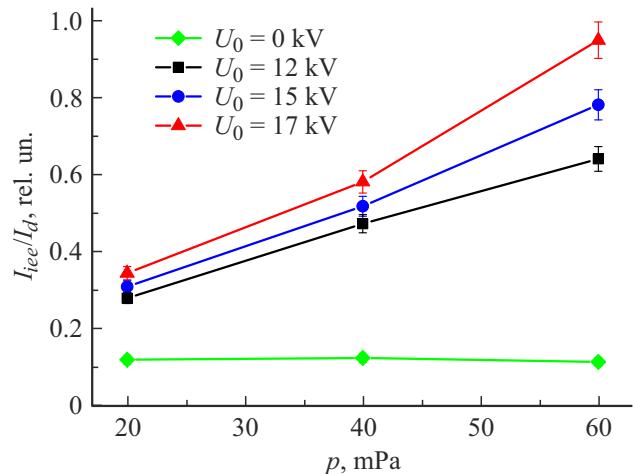


Рис. 4. Зависимость отношения токов  $I_{iee}/I_d$  от давления газа  $p$  при различных величинах ускоряющего напряжения  $U_0$ .

промежутке. В условиях, когда отсутствует ускоряющее напряжение, на электроды 4 и 5 замыкаются низкоэнергетические плазменные ионы  $I_{i1e}$ , доля которых не превышает 15 % от полного тока дугового разряда  $I_d$ .

С появлением ускоряющего напряжения начинается формирование анодной плазмы, и как по мере повышения энергии ионов (с увеличением  $U_0$ ), так и при увеличении концентрации анодной плазмы (за счет повышения давления газа) роль ионно-электронных процессов становится все более значимой, что в конечном итоге может привести к полному прекращению тока  $I_{cs}$ . В этом случае можно считать, что изменяется тип разряда с самостоятельного дугового на несамостоятельный тлеющий разряд. Это подтверждается снижением напряжения катод–анод дугового разряда, что наблюдалось в работах [15–17], так как весь ток вызван лишь ионно-электронной эмиссией с катодных электродов 4 и 5.

Необходимо отметить, что вследствие гауссовского радиального распределения плотности тока ускоренных ионов из анодной плазмы на перераспределяющий электрод 5 приходится максимум плотности тока ионов [7–11,18]. При этом для источника „СОЛО“ в стандартной конфигурации электрод 5 соединен через сопротивление с эмиссионным электродом 10. В этой конфигурации происходит компенсация поступающего на электрод 5 тока ионов и эмитированных с его поверхности электронов током из катодного пятна. В этом случае снижение тока  $I_{cs}$  не наблюдается. Тем не менее небольшая доля ионов в стандартной конфигурации СПЭ все же попадает на катод 3, что приводит к снижению тока эмиссии из катодного пятна, хотя и не к столь значительному.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии потока ускоренных ионов на работу СПЭ и способствуют более глубокому пониманию принципов работы плазменных источников электронов с СПЭ. Полученные результаты могут быть полезны при разработке и конструировании источников электронов с СПЭ для расширения диапазона его параметров и стабилизации тока генерируемого электронного пучка, что крайне важно для использования источников такого типа в практических приложениях.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00745 (<https://rscf.ru/project/25-19-00745/>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, *Эмиссионная электроника* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2009).
- [2] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков, *Форвакуумные плазменные источники электронов* (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2014).
- [3] V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov, *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams* (Cambridge, 2015).
- [4] В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.М. Глазер, В.Е. Кормышев, С.В. Коновалов, Изв. РАН. Сер. физ., **81** (11), 1505 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517110138 [V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.M. Glezer, V.E. Kormyshev, S.V. Konovalov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **81** (11), 1353 (2017). DOI: 10.3103/S1062873817110107].
- [5] Н.Н. Коваль, В.Н. Девятков, М.С. Воробьев, Изв. вузов. Физика, **63** (10), 7 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/10/7 [N.N. Koval, V.N. Devyatkov, M.S. Vorobyev, Russ. Phys. J., **63** (10), 1651 (2021). DOI: 10.1007/s11182-021-02219-3].
- [6] Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов, под общ. ред. Н.Н. Ковали, Ю.Ф. Иванова (Изд-во НТЛ, Томск, 2016).
- [7] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval, Laser Part. Beams, **21** (2), 243 (2003). DOI: 10.1017/S026303460321212X
- [8] П.В. Москвин, М.С. Воробьев, А.А. Гришков, М.С. Торба, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, Р.А. Картавцов, Письма в ЖТФ, **49** (11), 43 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55538.19557 [P.V. Moskvin, M.S. Vorobyov, A.A. Grishkov, M.S. Torba, V.I. Shin, N.N. Koval, S.Yu. Doroshkevich, R.A. Kartavtsov, Tech. Phys. Lett., **49** (6), 38 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.06.56376.19557].
- [9] Р.А. Картавцов, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль, А.А. Гришков, В.Н. Девятков, М.С. Торба, Письма в ЖТФ, **51** (4), 15 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59836.20104 [R.A. Kartavtsov, M.A. Mokeev, M.S. Vorobyov, P.V. Moskvin, S.Yu. Doroshkevich, N.N. Koval, A.A. Grishkov, V.N. Devyatkov, M.S. Torba, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 70 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60636.20104].
- [10] С.В. Григорьев, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, А.Д. Тересов, Письма в ЖТФ, **36** (4), 23 (2010). [S.V. Grigor'ev, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, A.D. Teresov, Tech. Phys. Lett., **36** (2), 158 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010020203].
- [11] В.А. Груздев, Ю.Е. Крейндель, Ю.М. Ларин, ТВТ, **11** (3), 482 (1973).
- [12] М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин, *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* (Энергоатомиздат, М., 1989).
- [13] Ю.А. Бурачевский, В.А. Бурдовицин, А.В. Мытников, Е.М. Окс, ЖТФ, **71** (2), 48 (2001). [Yu.A. Burachevskii, V.A. Burdovitsin, A.V. Mytnikov, E.M. Oks, Tech. Phys., **46** (2), 179 (2001). DOI: 10.1134/1.1349272].
- [14] Н.В. Гаврилов, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких, ЖТФ, **78** (10), 59 (2008). [N.V. Gavrilov, D.R. Emlin, A.S. Kamenetskikh, Tech. Phys., **53** (10), 1308 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208100083].
- [15] С.В. Григорьев, П.В. Москвин, Изв. вузов. Физика, **59** (9), 59 (2016).

- [16] В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, Изв. вузов. Физика, **61** (9), 3 (2018).
- [17] P.V. Moskvin, S.S. Kovalsky, M.S. Vorobyov, J. Phys.: Conf. Ser., **1115** (2), 022004 (2018).  
DOI: 10.1088/1742-6596/1115/2/022004
- [18] М.С. Воробьёв, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашуррова, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, В.А. Леванисов, ТВТ, **60** (4), 488 (2022). DOI: 10.31857/S0040364422040160 [M.S. Vorobyov, P.V. Moskvin, V.I. Shin, T.V. Koval, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, K.T. Ashurova, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Torba, V.A. Levanisov, High. Temp., **60** (4), 438 (2022). DOI: 10.1134/S0018151X22040162].