

## Характеристики рентгеновского излучения микропинчевого разряда в зависимости от полярности электродов разрядной системы

А. В. Баловнев, О. А. Башутин, И. Г. Григорьева, И. Л. Манохин, Г. Х. Салахутдинов

*Описана методика и приведены результаты исследования спектрального состава и выхода рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда, получаемой на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» в зависимости от полярности электродов разрядной системы. Измерения проводились с помощью созданных диагностических систем, функционирующих на основе термолюминесцентных и сцинтилляционных детекторов. Это позволило производить измерения в диапазоне энергий рентгеновских квантов 1–300 кэВ.*

*Ключевые слова:* рентгеновское излучение, плазма, ток разряда, разрядные электроды, камера обскуры.

### Введение

Интерес к сильноточным импульсным электроразрядным устройствам (т.н. Z-пинчам) связан с высокой эффективностью преобразования вкладываемой в разряд электрической энергии в энергию рентгеновского излучения [1–4].

К классу сильноточных импульсных электроразрядных устройств относятся и установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра», в которых при определенных условиях реализуется режим микропинчевания, сопровождающийся образованием уникального объекта, называемого плазменной точкой (ПТ) или микропинчем. Он представляет собой область плотной горячей плазмы ( $N_e \approx 10^{20} \div 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \approx 1 \div 10 \text{ кэВ}$ ) микронного размера, интенсивно излучающей рентгеновское излучение (до  $10^{16}$  квантов за вспышку), но с временем жизни не более 10 нс [1, 2]. Данные установки имеют высокие параметры образованной плазмы, относительно простую конструкцию, надежны в эксплуатации, что делает их перспективными как для фундаментальных исследований, так и для решения чисто прикладных задач в качестве

мощных импульсных источников рентгеновского излучения.

Явление микропинчевания имеет достаточно общий характер для всех Z-пинчевых установок (низкоиндуктивная вакуумная искра; плазменный фокус; Z-пинчи с импульсной инъекцией газа) [1–4].

Исследованию процессов микропинчевания посвящено много статей, обзор которых приведен в работе [2]. Однако физическая картина явлений в плазме, получаемой на сильноточных электроразрядных установках, всё еще далека от полного понимания и является предметом интенсивных исследований, которые, естественно, невозможно проводить без создания диагностической аппаратуры, позволяющей получать надежную информацию о физических процессах в плазме. Рентгеновское излучение плазмы является одним из таких основных источников получения необходимой информации [5–10].

В данной работе с целью получения информации о физических процессах, происходящих в плазме микропинчевого разряда, и оптимизации конструкции разрядной системы были проведены исследования абсолютного выхода и спектров рентгеновского излучения в диапазоне энергий рентгеновских квантов 1–300 кэВ в зависимости от полярности и конфигурации электродов разрядной системы.

### Описание установки и методика проведения экспериментов

Эксперименты производились на сильноточной импульсной электроразрядной установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» «Зона-2» (НИЯУ МИФИ), конструкция и параметры которой приведены в [11, 12].

---

Баловнев Алексей Владимирович, аспирант.  
Башутин Олег Алексеевич, научный сотрудник.  
Григорьева Ирина Гаяровна, аспирант.  
Манохин Илья Леонидович, аспирант.  
Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор.  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.  
Тел. 8 (495) 344-14-99. E-mail: saip07@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 марта 2017 г.

---

© Баловнев А. В., Башутин О. А., Григорьева И. Г., Манохин И. Л., Салахутдинов Г. Х., 2017

Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откаченной до вакуума не хуже  $10^{-5}$  Торр. Иницирование разряда производилось вспомогательным триггерным разрядом. Емкость накопительной конденсаторной батареи  $C_0 = 20$  мкФ. Рабочим веществом разряда являлись пары материала электродов разрядного устройства, изготовленных из железа. Период разряда – 8,5 мкс.

Общая схема разрядной камеры установки показана на рис. 1. Плоский электрод имел вид цилиндра диаметром 20 мм с плоской торцевой поверхностью. Стержневой электрод имел диаметр 4 мм и длину 15 мм и был на конце заострен. Расстояние между электродами составляло 6 мм.

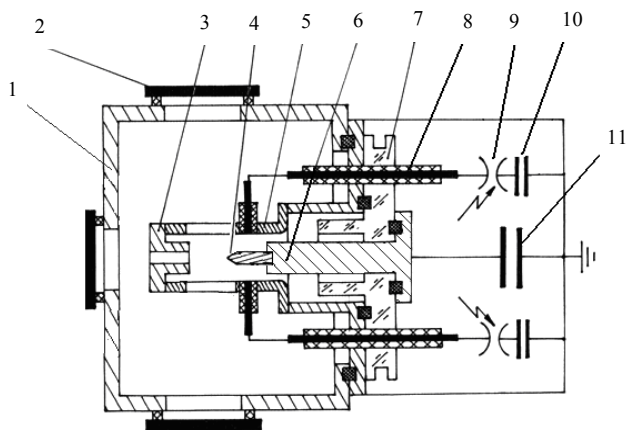


Рис. 1. Общая схема разрядной камеры: 1 – вакуумная камера; 2 – диагностические окна; 3 – катод; 4 – анод; 5 – внешний токовод; 6 – внутренний токовод; 7 – разделительный изолятор; 8 – триггерное устройство; 9 – разрядник; 10 – конденсаторная батарея триггерного устройства; 11 – конденсаторная батарея в контуре основного разряда.

Конструкция данной установки позволяла использовать различную полярность и конфигурации электродов (два острия, острие-плоскость, две плоскости и другие комбинации).

Измерение спектров рентгеновского излучения плазмы сильноточных импульсных электрических разрядов имеет ряд сложностей, связанных с тем, что при импульсе излучения малой длительности (от единиц до сотен наносекунд) возникает большое число квантов рентгеновского излучения ( $\approx 10^{16}$ ), сопровождаемое сильной электромагнитной наводкой. Спектр рентгеновского излучения имеет довольно сложный вид с максимумом в области 1 кэВ. Интенсивность рентгеновского излучения плазмы с ростом энергии квантов падает на несколько порядков [1, 2].

При таких условиях эксперимента для получения информации о спектре излучения применяются различные многоканальные спектрометрические системы [5–10] с разделением квантов по энергиям с помощью фильтров поглощения раз-

личной толщины. В другом методе определялась т. н. кривая ослабления, представляющая собой зависимость поглощенной в детекторе энергии рентгеновского излучения, прошедшего сквозь фильтр, от толщины данного фильтра. По показаниям с детекторов и строилась кривая ослабления, а затем уже по виду кривой ослабления проводилось восстановление спектров рентгеновского излучения различными математическими методами [5–10].

В нашем случае для проведения исследований импульсного рентгеновского излучения плазмы в широком энергетическом диапазоне квантов 1÷300 кэВ был создан специальный комплекс спектрометров рентгеновского излучения [13–18]. Так, для исследования спектрального состава импульсов рентгеновского излучения плазмы в диапазоне энергий квантов 1,0÷25 кэВ был использован малогабаритный семиканальный спектрометр ( $\varnothing 20$  мм, длина 20 мм) рентгеновского излучения на основе термолюминесцентных детекторов фторида лития LiF монокристаллической структуры. Каналы спектрометра построены по следующей схеме: фильтр поглощения + сборка из десяти детекторов LiF (каждый детектор имел размер:  $\varnothing 5$  мм и толщину 0,9 мм) [13]. Спектрометр помещали в разрядную камеру установки.

Интенсивность рентгеновского излучения с ростом энергии квантов падает на несколько порядков и от регистрирующей аппаратуры требуется достаточно высокая чувствительность и эффективность регистрации слабоинтенсивного, но высокоэнергетичного ( $E > 25$  кэВ) рентгеновского излучения. Поэтому для измерения спектрального состава рентгеновского излучения в диапазоне от 15 до 100 кэВ был использован помехоустойчивый многоканальный спектрометр на основе сцинтилляторов из кристаллического иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) (с большим зарядом ядра атома  $Z_{эф} = 54$  и размером  $\varnothing 15 \times 20$  мм), размещенными в непосредственном оптическом контакте с входными окнами малогабаритного фотоэлектронного умножителя ФЭУ-60 [14].

Более подробно исследования спектра в его жесткой части (свыше 80 кэВ) проводились с использованием четырехканального сцинтилляционного спектрометра. Для увеличения эффективности регистрации и точности измерения были использованы кристаллы иодида цезия с активационной добавкой таллия CsJ(Tl) ( $\varnothing 30 \times 35$ ) больших размеров в непосредственном оптическом контакте с спектрометрическим ФЭУ-85 [14].

Калибровка и работоспособность спектрометров предварительно проводилась с помощью точечных радиоактивных источников с различны-

ми энергиями гамма-квантов и импульсной рентгеновской трубки с эмиттерами характеристического излучения из различных материалов, что аналогично методике калибровки, проводившейся в работах [8, 14].

Проверка работоспособности спектрометров осуществлялась путем измерения кривых ослабления интенсивности излучения импульсной рентгеновской трубки. Спектр излучения импульсной рентгеновской трубки был предварительно измерен методом амплитудного анализа. По полученным кривым ослабления были восстановлены спектры импульсной рентгеновской трубки [8]. Восстановленные по кривой ослабления рентгеновские спектры (методом эффективных энергий) и спектр импульсной рентгеновской трубки, измеренный методом амплитудного анализа, совпали с точностью не хуже 5 %.

Динамический диапазон комплекса спектрометров достигал  $10^{14}$ .

В основных экспериментах сцинтилляционные спектрометры крепились к диагностическим окнам разрядной камеры и регистрировали рентгеновское излучение из области микропинчового разряда. Контроль момента микропинчевания регистрировался по «особенностям» на осциллограмме разрядного тока, полученным с пояса Роговского, и импульсам рентгеновского излучения, зарегистрированным  $p-i-n$ -диодом [12, 14]. Изо-

бражение плазмы микропинчового разряда в диапазоне рентгеновского излучения с энергией более 3 кэВ регистрировалась камерой-обскурой с разрешением не хуже 0,2 мм. Это изображение фиксировалось на рентгеновской фотопленке РТ-1 и ядерной эмульсии типа Р [5]. Диафрагма камеры-обскуры представляла собой свинцовую пластину толщиной 1 мм с отверстием 0,1 мм и была направлена перпендикулярно к оси разряда, что позволяло фотографировать всю разрядную зону. Объем камеры-обскуры была отделен от разрядной вакуумной камеры бериллиевой фольгой толщиной 0,1 мм. Расстояние от оси разряда до рентгеновской пленки составляло 200 мм, а до диафрагмы – 100 мм.

### Экспериментальные результаты и их анализ

В ходе экспериментов были получены изображения плазмы (рис. 2) микропинчового разряда в диапазоне рентгеновского излучения с энергией более 3 кэВ при токе разряда меньшим 50 кА. В работе [1] приведено расчетное значение критического тока для разряда в плазме микропинчового разряда. Для плазмы железа значение критического тока составляет  $I_{кр} = 50$  кА. При токах  $I < I_{кр}$  микропинчевание не происходит, что зафиксировано обскурограммой (т.е. образование «плазменных точек» не происходит).

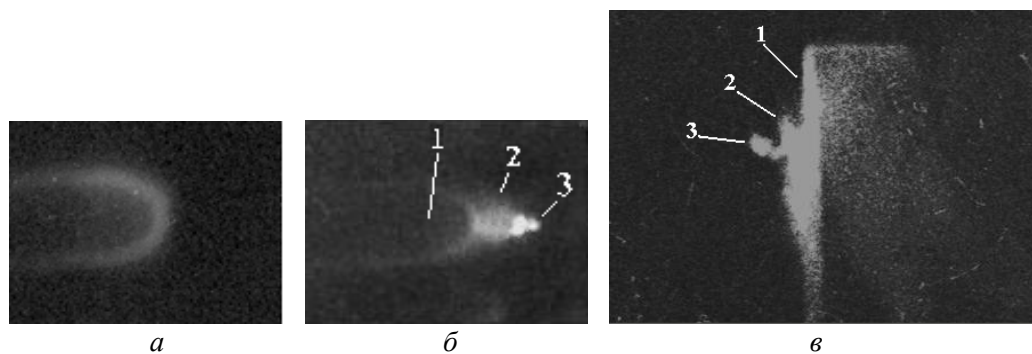


Рис. 2. Обскурограммы ( $h\nu > 3$  кэВ) сильноточного вакуумно-искрового разряда при токах  $< 50$  кА (а) и  $> 50$  кА (б, в), когда анодом является стержневой (а, б) или плоский электрод (в): 1 – электрод (анод); 2 – приэлектронная плазма (прианодная плазма); 3 – плазменные точки.

На рис. 2, б, в показаны типичные обскурограммы, полученные при токе 150 кА. На обскурограммах четко видны элементы разрядной камеры, приэлектронной плазмы и самой «плазменной точки». В ходе эксперимента менялась конфигурация электрического поля в промежутке между разрядными электродами посредством изменения полярности электродов разрядной системы. В зависимости от полярности электродов (конфигурации электрического поля) меняется область расположения приэлектродной плазмы и её concentra-

ция. На обскурограммах видно, что интенсивность рентгеновского излучения в случае с стержневым анодом выше, чем с плоским анодом.

Проведенные с помощью спектрометров исследования показали, что в разрядной системе, где стержневым электродом является анод, выход рентгеновского излучения в 10 раз больше по сравнению с разрядной системой, где плоским электродом является анодом. Спектры рентгеновского излучения, полученные при различной полярности электродов, представлены на рис. 3.

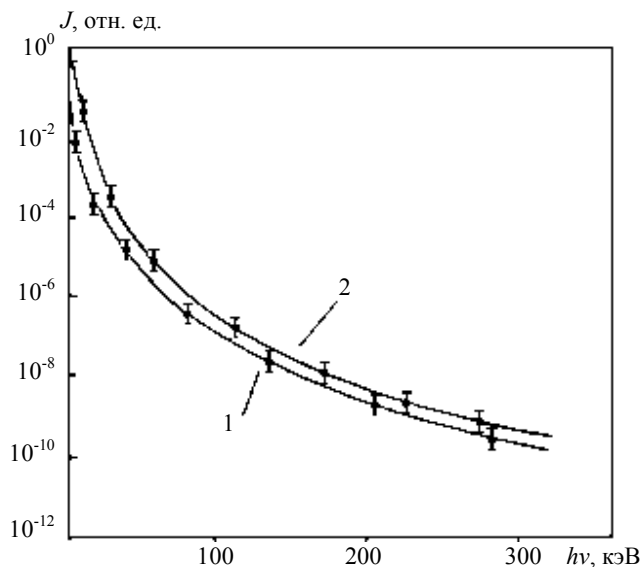


Рис. 3. Типичные спектры излучения плазмы с электродами из железа, полученные при токе разряда 150 кА: 1 – анодом является плоский электрод; 2 – анодом является стержневой электрод.

Согласно классической модели «радиационного сжатия» [1, 2] и проведенным исследованиям, образование плазмы импульсного сильноточного электрического разряда в вакууме на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра» образуется в основном в продуктах эрозии материала анода. Разрядная система, состоящая из плоского катода и стержневого заостренного анода, излучает рентгеновское излучение больше, чем система «плоский анод» и стержневой заостренный катод (см. рис. 1 и 3). Это связано с формированием электрических полей в межэлектродном пространстве разрядной системы, которое и определяет интенсивность поступления рабочего вещества, необходимого для образования плазмы [11]. На обскурограммах показано, что область взаимодействия плазменных потоков с поверхностью плоского анода превышает область взаимодействия данного потока со стержневым анодом. Концентрация прианодной плазмы в случае с плоским анодом меньше, чем со стержневым анодом, что приводит к более худшим условиям пинчевания плазмы.

Изменение полярности электродов в разрядном устройстве, т. е. конфигурация электрического поля, влияет на образование мягкого рентгеновского излучения в большей степени, чем на образование жесткого рентгеновского излучения. Данный экспериментальный факт позволяет сделать предположение, что механизмы образования мягкой и жесткой спектральной составляющей рентгеновского излучения существенно разные. Согласно работам [12, 17], жесткое рентгеновское

излучение возникает в результате ускорительных процессов.

При стержневом аноде условия для разряда складываются оптимальным образом, а именно, концентрация электрических полей и количество продуктов эрозии, вовлекаемое в процесс пинчевания, выше, чем в случае с плоским анодом, вследствие чего и происходит рост плотности плазмы и электронной температуры  $T_e$  на стадии формирования микропинча [11]. Это приводит к повышению интенсивности мягкой компоненты рентгеновского излучения и к росту образованного в результате ускорительных процессов жесткого рентгеновского излучения. Чем выше электронная температура  $T_e$  стадии формирования микропинча, тем выше интенсивность жесткого рентгеновского излучения, образованного в результате ускорительных процессов на финальной стадии формирования микропинча.

Одним из основных механизмов ускорительных процессов, приводящих к рождению жесткого рентгеновского излучения ( $h\nu > 80$  кэВ), является возникновение спонтанных электрических полей с большими напряжениями, чем на разрядных электродах. Данные электрические поля образуются в результате аномального роста омического сопротивления  $R$  перетяжки плазменного столба, возникающего на стадии развала микропинча [4, 18]. С ростом электронной температуры  $T_e$  микропинча происходит и рост омического сопротивления  $R$  перетяжки, что приводит к росту напряжения в возникших электрических полях и, соответственно, к росту интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

### Заключение

С помощью разработанной и созданной диагностической аппаратуры были получены результаты исследования импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда.

В ходе экспериментов было установлено, что в разрядной системе, где стержневым электродом является анод, выход рентгеновского излучения в 10 раз больше по сравнению с разрядной системой, где плоский электрод является анодом. Данный результат может быть объяснен тем, что спектральные характеристики рентгеновского излучения плазмы микропинчевого разряда зависят от конфигурации электрического поля в промежутке между разрядными электродами, которое и определяет количество продуктов эрозии, вовлекаемое в процесс пинчевания, вследствие чего и происходит рост плотности плазмы и ее излучательных характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.
2. Короп Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Сухоруков С. Т. // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 1. С. 87.
3. Александров В. В., Грабовский Е. В., Зукакишвили Г. Г., Митрофанов К. Н., Медовицков С. Ф., Фролов И. Н. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 901.
4. Вихрев В. В., Баронова Е. О. // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 71.
5. Кушин В. В., Ляпидевский В. К., Пережогин В. Б. Ядерно-физические методы диагностики плазмы. – М.: МИФИ, 1985.
6. Аверкиев В. В., Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савёлов А. С., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 1991. № 2. С. 173.
7. Аверкиев В. В., Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савёлов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 6. С. 596.
8. Киреченко Н. Н., Ляпидевский В. К., Пережогин В. К., Салахутдинов Г. Х., Самойлова Л. Б. // ПТЭ. 1992. № 3. С. 206.
9. Долгов А. Н., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 103.
10. Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 88.
11. Башутин О. А., Алхимова М. А., Вовченко Е. Д., Додулат Э. И., Савёлов А. С., Саранцев С. А. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1006.
12. Григорьева И. Г., Савёлов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 449.
13. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.
14. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Салахутдинов Г. Х. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89.
15. Баловнев А. В., Визгалов И. В., Салахутдинов Г. Х. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 7–8. С. 649.
16. Крашевская Г. В., Курнаев В. А., Салахутдинов Г. Х., Цвентух М. М. // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 43.
17. Колтунов М. В., Лемешко Б. Д., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х., Юрков Д. И., Сидоров П. П. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 52.
18. Вовченко Е. Д., Григорьева И. Г., Макаров В. В., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1076.

PACS: 52.38 Ph

## Characteristics of X-ray radiation of a micropinch discharge in dependence on the polarity of the electrodes of the discharge system

*A. V. Balovnev, O. A. Bashutin, I. G. Grigoryeva, I. L. Manohin,  
and G. Kh. Salakhutdinov*

National Research Nuclear University MEPHI  
31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115191, Russia  
E-mail: saip07@mail.ru

*Received March 23, 2017*

*We have described methods and represented results of the research of a micropinch plasma discharge spectral composition and X-ray emission received at the low inductivity vacuum spark device. The measurements have been conducted by means of developed diagnostic systems based on thermoluminescent and scintillator detectors that gave us an opportunity to measure in the X-ray quanta energy range such as 1–300 keV.*

*Keywords:* X-ray, plasma, discharge current, electrodes, camera obscura.

## REFERENCES

1. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, Plasma Phys. Rep. **8**, 1211 (1982).
2. E. D. Korop, B. E. Meiyerovich, Yu. V. Sidelnikov, and S. T. Sukhorukov, Phys. Usp. **129**, 87 (1979).
3. V. V. Aleksandrov, E. V. Gabovskiy, G. G. Zukakishvili, et al., Plasma Phys. Rep. **34**, 901 (2008).
4. V. V. Vikhrev and E. O. Baronova, Prikl. Fiz., No. 5, 71 (1999).
5. V. V. Kushin, V. K. Lyapidevskiy, and V. B. Perezhogin, Nuclear Physics Methods of Plasma Diagnostics (MIFI, Moscow, 1985) [in Russian].
6. V. V. Averkiev, A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskiy, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, Instrum. Exp. Tech. No. 2, 173 (1991).

7. V. V. Averkiev, A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskiy, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **18**, 596 (1992).
8. N. N. Kirichenko, V. K. Lyapidevskiy, V. K. Perezhgin, G. Kh. Salakhutdinov, and L. B. Samoiloova, *Instrum. Exp. Tech.* No. 3, 206 (1992).
9. A. N. Dolgov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 103 (2008).
10. A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevskiy, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 88 (2007).
11. O. A. Bashutin, M. A. Alkhimova, E. D. Vovchenko, et al., *Plasma Phys. Rep.* **39**, 1006 (2013).
12. I. G. Grigor'eva, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4**, 449 (2016).
13. A. V. Balovnev, I. G. Grigor'eva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.* No. 1, 100 (2015).
14. A. V. Balovnev, I. G. Grigor'eva, and G. Kh. Salakhutdinov, *Instrum. Exp. Tech.* No. 2, 89 (2015).
15. A. V. Balovnev, I. V. Vizgalov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Nuclear Physics and Engineering* **5**, 649 (2014).
16. G. V. Krashevskaya, V. A. Kurnaev, G. Kh. Salakhutdinov, and M. M. Tsventukh, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 43 (2010).
17. M. V. Koltunov, B. D. Lemeshko, A. S. Savelov, G. Kh. Salakhutdinov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 4, 52 (2010).
18. E. D. Vovchenko, I. G. Grigor'eva, V. V. Makarov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Plasma Phys. Rep.* **38**, 1076 (2012).