

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9:544.55

DOI: 10.17223/00213411/64/4/96

*Р.В. САЗОНОВ, Г.Е. ХОЛОДНАЯ, Д.В. ПОНОМАРЕВ***ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ГАЗЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕМ ДЫМОВОЙ, В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ ОТ 7 ДО 101 кПа ***

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса транспортировки импульсного электронного пучка в смеси углекислого газа и азота в диапазоне давлений 7–101 кПа. Эксперименты проведены на лабораторном стенде, состоящем из ускорителя ТЭУ-500, трубы дрейфа и шунтов обратного тока.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, транспортировка пучка, труба дрейфа, шунты обратного тока, углекислый газ, азот.

Введение

Импульсные электронные пучки находят применения в науке (для исследования субъядерных процессов, свойств элементарных частиц и др.), широко используются в качестве источника ионизирующего излучения в медицине, а также для решения экологических задач. В экологии одной из главных проблем можно выделить загрязнение атмосферы. От всей массы выбрасываемых искусственных загрязняющих веществ примерно 90% приходится на газообразные загрязнители (СО, СО₂, SO₂, NO, NO₂, O₃ и др.) [1, 2]. Во всех промышленно развитых странах для уменьшения концентрации вредных веществ применяются различные методы очистки газов [3–5]. В Индианаполисе, США, и Карлсруэ, Германия, для очистки дымовых газов используются электронные ускорители непрерывного действия [6–8]. Данные ускорители обладают рядом недостатков: высокой стоимостью оборудования, значительными затратами на реализацию биологической защиты от тормозного рентгеновского излучения, большими габаритными размерами. Инициация плазмохимических процессов импульсным электронным пучком – один из активно развивающихся методов активации химических процессов. Использование импульсных электронных пучков обеспечивает формирование плазмы с высокой степенью неравновесности ионной и электронной температур, что дает ряд преимущественных особенностей такого процесса в различных промышленных производствах. Использование неравновесных, быстротекающих процессов в плазме позволит значительно повысить скорости химических процессов, а значит, и снизить издержки [9–11].

Однако одним из важных факторов, сдерживающих разработку промышленного метода очистки дымовых газов с использованием импульсных электронных ускорителей, является отсутствие экспериментальных данных процессов, происходящих при взаимодействии импульсных электронных пучков не только с модельными объектами в конденсированной и газовой фазе, но и с объектами со сложным химическим составом, которые являются основными в технологических процессах. Сложность получения таких данных определена коллективными процессами, обусловленными пучковыми неустойчивостями, которые сильно проявляются при больших давлениях газа (> 100 кПа), особенностями протекания объемной токовой и зарядовой нейтрализаций [12, 13].

Существует большое количество экспериментальных и теоретических работ по изучению распространения электронных пучков в различных газах [9–11]. Так, например, в работе [11] представлены результаты исследований распространения импульсного электронного пучка в азоте. Эксперименты проведены на ускорителе Hermes-III в диапазоне давлений от $133 \cdot 10^{-3}$ до $\sim 133 \cdot 10^3$ Па. Авторы наблюдали две области эффективного распространения электронного пучка, которые связаны с давлением азота в трубе дрейфа. Первая область – 0.133–13.3 Па (область низкого давления), вторая – от 133 до 13300 Па (область высокого давления). За пределами данных областей давлений просматривалась быстроразвивающаяся неустойчивость, которая приводит к полному развалу электронного пучка. В работе [12] импульсный электронный пучок транспорти-

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, научный проект № 17-73-10269.

ровался в азоте. Авторы приводят различные конфигурации трубы дрейфа с внешним магнитным полем. При давлении около 10 Па для азота наблюдается сжатие (пинчевание) электронного пучка. В [13] представлены результаты исследований распространения электронного пучка отдельно в азоте и двуокиси углерода. При распространении электронного пучка в азоте при давлении 7 кПа происходит недостаточная ионизация газа и наблюдается неполная зарядовая компенсация пучка. Электронный пучок рассыпается под действием электрических сил расталкивания.

При проведении аналитического обзора было отмечено, что количество работ по исследованию распространения электронного пучка в CO_2 ограничено. Отсутствуют исследования процесса распространения импульсного электронного пучка в газовых композициях на основе CO_2 и N_2 . Ранее нами проведены исследования процесса распространения импульсного электронного пучка в кислороде, аргоне, азоте, водороде, гексафториде серы [14, 15]. Цель настоящей работы – выявление закономерностей экспериментальных процессов транспортировки импульсного электронного пучка в газовых композициях CO_2 и N_2 в диапазоне давлений 7–101 кПа. Выбор данной композиции обоснован тем, что данные газы являются основными компонентами дымового газа.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования проведены на базе импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500. Импульсный электронный ускоритель ТЭУ-500 состоит из следующих основных блоков: газонаполненного генератора импульсного напряжения (собранный по схеме Аркадьева – Маркса), двойной формирующей линии, газового разрядника, автотрансформатора, диодной камеры. Наличие автотрансформатора в конструкции ускорителя обеспечивает согласование низкоомной водяной двойной формирующей линии с высокоомным импедансом взрывозмиссионного планарного диода [16]. Параметры ускорителя могут варьироваться. В настоящей работе энергия электронов составляет 400 кэВ, выведенный ток электронов – 9 кА, длительность импульса (на полувысоте) – 60 нс. Электронный пучок представлял собой поток энергии с диаметром 5 см. На рис. 1 представлены осциллограммы усредненных значений напряжения и подводимый ток пучка к диодному узлу.

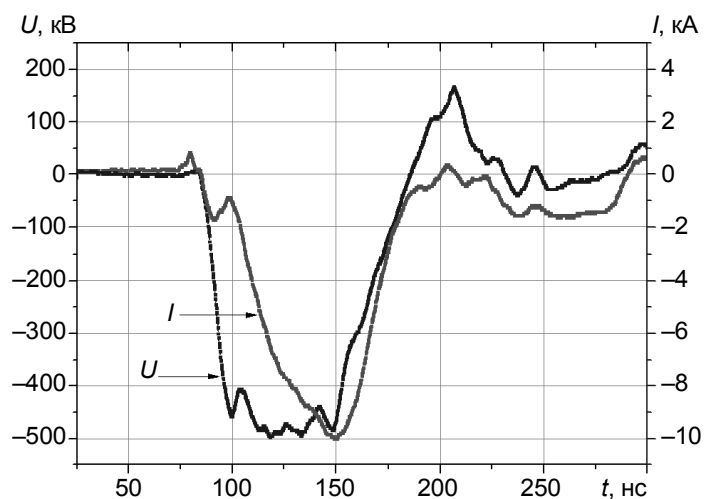


Рис. 1. Усредненные значения напряжения (U) и подводимый ток пучка (I) к диодному узлу – 10 последовательных импульсов

Для проведения исследований транспортировки импульсных электронных пучков в газовой композиции углекислый газ и азот использовался универсальный лабораторный стенд. Он включал в себя трубу дрейфа, состоящую из трех секций шунтов обратного тока, расположенных по всей длине трубы. Труба дрейфа представляла собой две металлические трубы длиной по 20 см каждая, состыкованные между собой шунтами обратного тока. Регистрация тока с помощью шунтов обратного тока производится путем снятия падения напряжения на резисторах с сопротивлением 0.06 Ом. В дальнейшем сигнал напряжения ослабляется в 25 раз, что позволяет защитить осциллограф от высокого напряжения. Чувствительность шунтов обратного тока составляет 150 А по амплитуде. Схема эксперимента описана ранее при исследовании распространения импульсно-

го электронного пучка в газовой смеси аргон – азот [14, 15]. В настоящей работе труба дрейфа наполнялась газовой смесью (последовательно углекислый газ, азот или одновременно углекислый газ и азот). В трубу дрейфа инжектировался электронный пучок и с шунтов обратного тока записывались осциллограммы (рис. 2). Первый шунт располагался сразу после выводного окна и фиксировал полный обратный ток, замкнувшийся по стенкам трубы дрейфа (первая секция + вторая секция). Второй шунт располагался посередине трубы дрейфа и регистрировал ток электронов, замыкающийся на первую секцию трубы дрейфа. Третий шунт располагался в конце трубы дрейфа, где регистрировался сигнал тока, замыкающегося на задний фланец трубы дрейфа. Из значения заряда электронного пучка, регистрируемого вторым шунтом, и значения заряда, зафиксированного третьим шунтом, получено значение заряда электронов, замкнувшихся по стенкам второй секции трубы дрейфа.

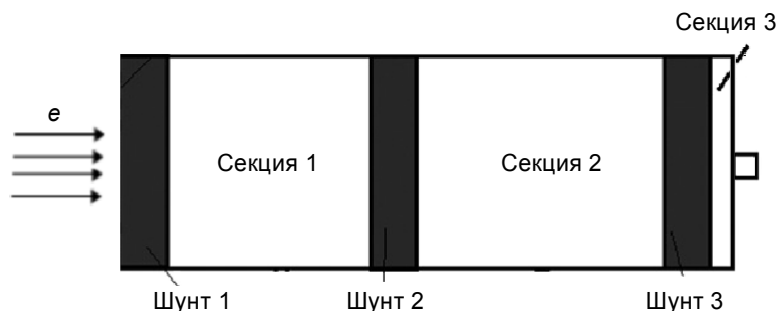


Рис. 2. Схематическое изображение трубы дрейфа с шунтами обратного тока

Исследуемый диапазон давлений составляет 7, 40 и 101 кПа. Экспериментальные исследования условно разделены на две стадии: при первой серии экспериментов электронный пучок инжектировался в однокомпонентный газ (азот), а потом в двухкомпонентный (углекислый газ). Во второй серии экспериментов пучок инжектировался в газовую композицию – углекислый газ и азот при разном концентрационном соотношении ($\text{CO}_2:\text{N}_2$ как 1:1, 2:1, 1:2).

Результаты и их обсуждение

Осциллограммы, полученные в результате экспериментальных исследований распространения импульсного электронного пучка при давлении в трубе дрейфа 7, 40 и 101 кПа для углекислого газа, представлены на рис. 3. На осциллограммах ускоряющее напряжение обозначено кривой 1, ток пучка электронов, замыкающийся на стенки первой секции трубы дрейфа, – кривой 2, ток пучка электронов, замкнувшихся по стенкам второй секции, – кривой 3, ток электронов, замкнувшихся на заднем фланце трубы дрейфа, – кривой 4, полный обратный ток, замкнувшийся по стенкам трубы дрейфа, – кривой 5. Характерные осциллограммы для азота в исследуемом диапазоне давлений представлены в работе [14].

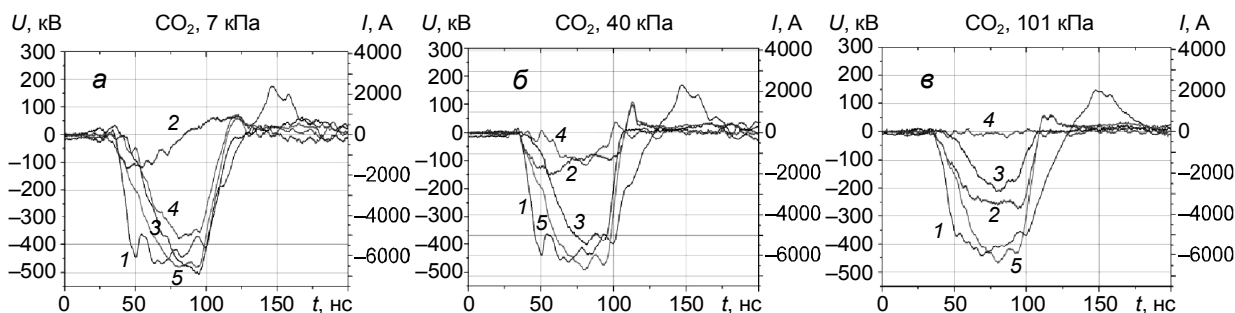


Рис. 3. Усредненные значения ускоряющего напряжения и тока пучка, зафиксированные шунтами (три последовательных импульса) при давлении в трубе дрейфа 7, 40 и 101 кПа

При давлении в трубе дрейфа 7 кПа зафиксировано максимальное значение тока электронов, замкнувшихся по стенкам второй секции трубы дрейфа (6.5 кА). При давлении 40 и 101 кПа данное значение составляло 5.5 и 2.7 кА. При давлениях 7 и 40 кПа большая часть пучка замыкается по стенкам второй секции трубы дрейфа. Максимальное кулоновское расталкивание на вторую

секцию трубы дрейфа характерно для давлений 7 и 40 кПа. При давлении в трубе дрейфа 101 кПа зафиксировано максимальное значение тока пучка электронов, замкнувшихся по стенкам первой секции трубы дрейфа (3.5 кА). Значение полного обратного тока, замкнувшегося по стенкам трубы дрейфа, при этом давлении составило 6.2 кА, а при давлениях 7 и 40 кПа – 6.5 кА. В процессе распространения импульсного электронного пучка в азоте наблюдалась тенденция затягивания заднего фронта сигнала тока при давлении в трубе дрейфа 7 кПа, что характерно и для случая, когда электронный пучок распространяется в углекислом газе при этом же значении давления. Запаздывание заднего фронта тока, фиксируемого шунтами, относительно ускоряющего напряжения, может быть связано с увеличенным временем жизни плазмы, возникшей при распространении импульсного электронного пучка в исследуемой газовой среде [14].

Анализируя результаты исследования транспортировки импульсного электронного пучка в газовой смеси углекислый газ – азот при разных соотношениях концентрации (1:1, 2:1, 1:2) и давлении 7 кПа, нами отмечено затягивание заднего фронта сигнала тока (рис. 4). При давлениях 40 и 101 кПа затягивания заднего фронта сигнала тока не наблюдалось (рис. 5).

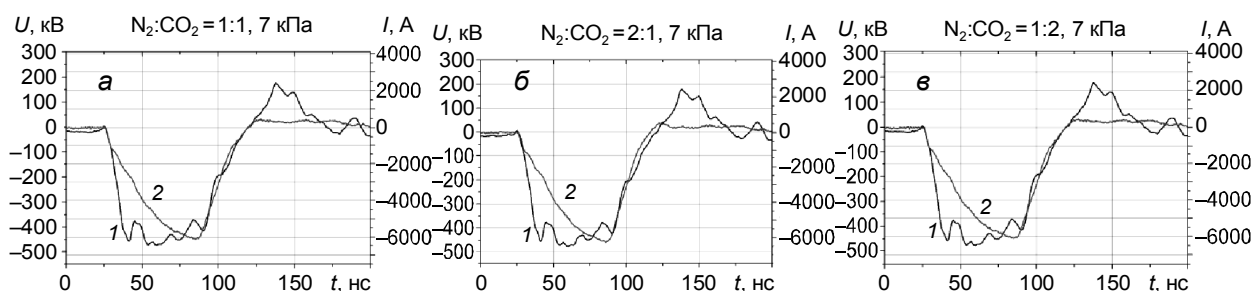


Рис. 4. Усредненные значения ускоряющего напряжения и полный обратный ток, замкнувшийся по стенкам трубы дрейфа при давлении 7 кПа

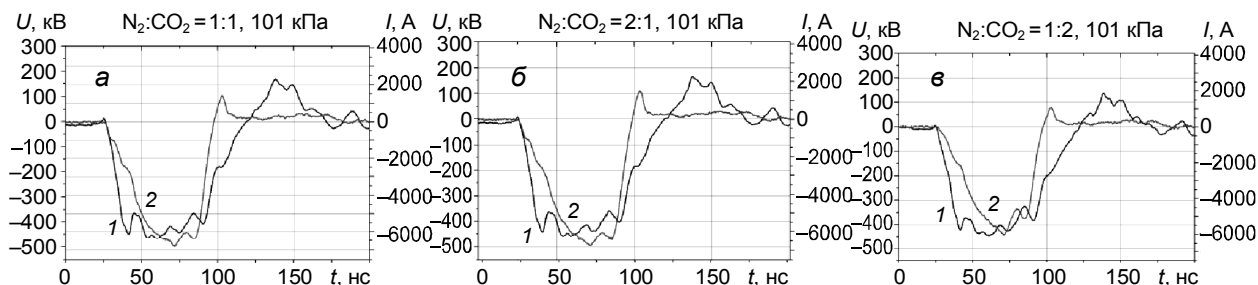


Рис. 5. Усредненные значения ускоряющего напряжения и полный обратный ток, замкнувшийся по стенкам трубы дрейфа при давлении 101 кПа

Были рассчитаны значения заряда электронов, замкнувшихся на стенки трубы дрейфа (q_1) и дошедших до заднего фланца трубы дрейфа (q_2) при суммарном давлении 7, 40 и 101 кПа при транспортировке импульсного электронного пучка в газовой смеси углекислый газ – азот при соотношениях концентрации 1:1, 2:1, 1:2. Результаты представлены на рис. 6. Видно, что поведение импульсного электронного пучка в газовой смеси азот – углекислый газ одинаково. С увеличением концентрации азота в газовой смеси ($N_2:CO_2 = 2:1$) значение заряда электронов, замкнувшихся на стенки трубы дрейфа, составляет 329 мкКл при давлении в трубе дрейфа 7 кПа и 334 мкКл – при $N_2:CO_2 = 1:2$. Аналогично и для давлений 40 и 101 кПа. Значение заряда электронов, замкнувшихся по заднему фланцу трубы дрейфа (q_2), уменьшается с увеличением давления в трубе дрейфа. При этом изменение в соотношениях концентрации также слабо влияет на это значение. Максимальное кулоновское расталкивание импульсного электронного пучка зафиксировано при давлении в трубе дрейфа 101 кПа (значение заряда электронов, замкнувшихся по заднему фланцу трубы дрейфа, составляло 8, 11 и 12 мкКл для $N_2:CO_2 = 1:2, 1:1, 2:1$ соответственно).

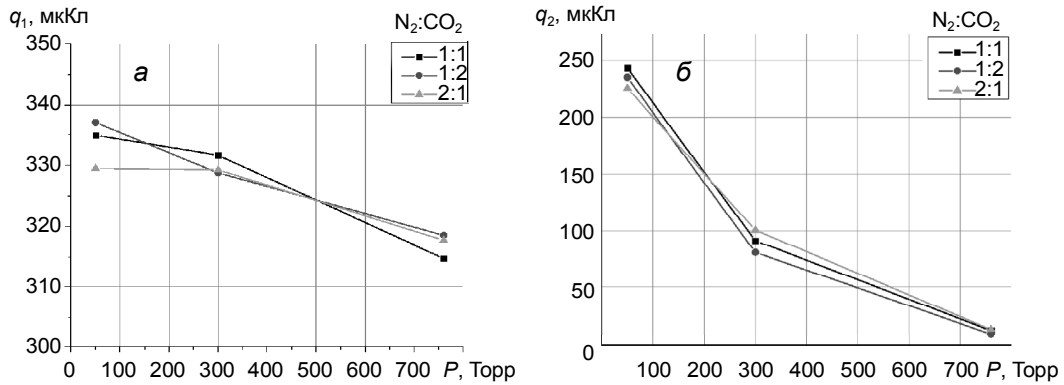


Рис. 6. Значения заряда электронов, замкнувшихся на стенки трубы дрейфа (q_1) и замкнувшихся по заднему фланцу трубы дрейфа (q_2) при суммарном давлении 7, 40 и 101 кПа при транспортировке импульсного электронного пучка в газовой смеси углекислый газ – азот при различных соотношениях концентрации

При инъекции импульсного электронного пучка в трубу дрейфа заряд электронов равен 340 мкКл. Рассчитаем разницу между зарядом электронов, инжектируемых в трубу дрейфа, и зарядом электронов, замкнувшихся на стенку трубы дрейфа (рис. 7).

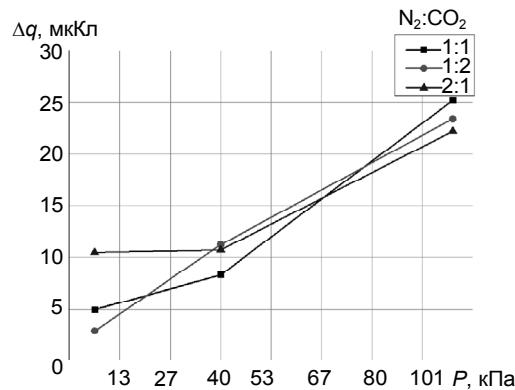


Рис. 7. Разность между зарядом электронов, инжектируемых в трубу дрейфа, и зарядом электроном, упавших на стенку трубы дрейфа

Максимальное значение разности между зарядом электронов, инжектируемых в трубу дрейфа, и зарядом электронов, замкнувшихся на стенку трубы дрейфа, определено для давления 101 кПа. Полученные значения разницы между этими зарядами, возможно, связаны с тем, что часть электронов замыкается по скин-слою плазмы, или с временем жизни плазмы, которое больше длительности импульса электронного пучка.

Заключение

В работе представлены результаты исследования транспортировки импульсного электронного пучка в углекислом газе, газовой композиции азот и углекислый газ при соотношениях концентрации 1:2, 1:1, 2:1 и суммарных давлениях в трубе дрейфа 7, 40 и 101 кПа. Характерной особенностью является затягивание заднего фронта сигналов тока при транспортировке импульсного электронного пучка в углекислом газе и газовой композиции при давлении в трубе дрейфа 7 кПа (20–30 нс). Максимальное кулоновское расталкивание импульсного электронного пучка зафиксировано при давлении в трубе дрейфа 101 кПа, которое не зависит от соотношений концентрации азота и углекислого газа в исследуемом диапазоне давлений. Эффективность транспортировки для исследуемой смеси газов также не зависит от соотношений концентрации азота и углекислого газа. Количество электронов, замкнувшихся по плазме, незафиксированных шунтами обратного тока вследствие более длительного времени жизни плазмы, увеличивается с повышением давления в

трубе дрейфа (например, для случая $N_2:CO_2$ как 1:1 количество электронов $3 \cdot 10^{13}$, $5 \cdot 10^{13}$, $16 \cdot 10^{13}$ для 7, 40 и 101 кПа соответственно).

В настоящее время отсутствуют данные о процессах, происходящих при взаимодействии импульсных электронных пучков с газами повышенного давления, со смесью газов при повышенном давлении, с объектами со сложным химическим составом, которые являются основными в технологических процессах. Выявление закономерностей процесса распространения импульсных электронных пучков и процесса диссипации заряда импульсного электронного пучка в газовых композициях, определение расчетных соотношений удельной поглощенной энергии в области повышенных давлений газовых композиций являются важными задачами импульсной плазмохимии, поскольку производительность плазмохимических технологий определяется величиной давления в реакторе и его объёмом. Полученные экспериментальные данные об особенностях транспортировки импульсного электронного пучка в углекислом газе, газовой композиции азот и углекислый газ при соотношениях концентрации 1:2, 1:1, 2:1 и суммарных давлениях в трубе дрейфа 7, 40 и 101 кПа могут быть использованы для практического определения и выбора режимов технологии очистки дымовых газов с использованием импульсных электронных ускорителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyapina I.R., Skobliakova I.V., Vlasova M.A., et al. // AISC. – 2019. – V. 726. – P. 748–757. DOI: 10.1007/978-3-319-90835-9_87.
2. Forehead H. and Huynh N. // Environ Pollut. – 2018. – V. 241. – P. 775–786. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.041.
3. Valdberg A.Y., Vaulin N.E., Simnanskii A.V., et al. // Chem. Pet. Eng. – 2009. – V. 45. – No. 11. – P. 771–774. <https://doi.org/10.1007/s10556-010-9277-x>.
4. Lee Y.W., Park J.W., Yun J.H., et al. // Environ Sci. Technol. – 2002. – V. 36. – P. 4928–4935.
5. Chen Z., Dong H., Yu H.B., and Yu H. // Chem. Eng. J. – 2017. – V. 307. – P. 553–561.
6. Chmielewski A.G., Licki J., Pawelec A., et al. // Radiat. Phys. Chem. – 2004. – V. 71. – P. 439–442. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2004.03.020.
7. Hirota K., Hakoda T., Taguchi M., et al. // Environ Sci. Technol. – 2003. – V. 37. – No. 14. – P. 3164–3170. DOI: 10.1021/es021076t.
8. Ighigeanu D., Calinescu I., Martin D., and Matei C. // J. Microw. Power Electromagn. Energy. – 2009. – V. 43. – No. 1. DOI: 10.1080/08327823.2008.11688600.
9. Nakagawa Y., Mannami A., Natsuno H., and Nishikata S. // Jpn. J. Appl. Phys. Pt 1. – 2002. – V. 41. – No. 3A. – P. 1602–1607. DOI: 10.1143/JJAP.41.1602.
10. Imada G., Sakurai T., and Yatsui K. // Proc. 15th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. BEAMS-2004. – 2004. – P. 666–669.
11. Kikuchi R. and Pelovski Y. // Proc. Safety Environment. Protect. – 2009. – V. 8. – No. 7. – P. 135–143.
12. Milleretal P.A. // J. Appl. Phys. – 1972. – V. 43. – No. 7. – P. 3001–3008.
13. Graybill S.E. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1971. – NS-18. – P. 438–442.
14. Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V., et al. // Phys. Plasmas. – 2015. – V. 22. – No. 103116. DOI: 10.1063/1.4934608.
15. Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 217. – V. 392. – P. 31–35. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.12.010.
16. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // ПТЭ. – 2004. – № 3. – С. 130–134.

Поступила в редакцию 12.11.2020.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Сазонов Роман Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. НИ ТПУ, e-mail: sazonr@mail.ru;

Холодная Галина Евгеньевна, к.т.н., науч. сотр. НИ ТПУ, e-mail: galina_holodnaya@mail.ru;

Пономарев Денис Владимирович, к.т.н., ст. науч. сотр. НИ ТПУ, e-mail: pomomarev8105@mail.ru.