

Научная статья

УДК 533.95, 533.9.072, 536.46

doi: 10.17223/19988621/92/13

Определение условий для формирования устойчивого дугового разряда в электроплазменном устройстве при вторичном пробое разрядного промежутка

Евгений Юрьевич Степанов¹, Александр Николаевич Ищенко²,
Виктор Владимирович Буркин³, Егор Романович Метелица⁴,
Илья Михайлович Бирюков⁵, Антон Юрьевич Саммель⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ stepanov_eu@mail.ru

² ichan@niipmm.tsu.ru

³ v.v.burkin@mail.ru

⁴ 44metelitsa@gmail.com

⁵ ilya.biryukov.2072@mail.ru

⁶ anton_sammel@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты серии экспериментов с применением электроплазменного устройства. Описана методика изготовления экспериментальных образцов. Рассмотрены особенности образования вторичного пробоя в продуктах электрического взрыва медной проволоочки длиной от 10 до 50 мм. Проведена серия экспериментальных исследований по поиску минимального зарядного напряжения емкостного накопителя энергии, при котором возникает вторичный пробой разрядного промежутка при электрическом взрыве медной проволоочки.

Ключевые слова: электрический взрыв проволоочки, вторичный пробой, электроплазменное устройство

Благодарности: Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FSWM-2020-0032.

Для цитирования: Степанов Е.Ю., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Метелица Е.Р., Бирюков И.М., Саммель А.Ю. Определение условий для формирования устойчивого дугового разряда в электроплазменном устройстве при вторичном пробое разрядного промежутка // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 92. С. 159–168. doi: 10.17223/19988621/92/13

Original article

Specification of conditions for stable arc discharge formation in an electro-plasma device during secondary breakdown in a discharge gap

Evgeniy Yu. Stepanov¹, Aleksandr N. Ishchenko², Viktor V. Burkin³,
Egor R. Metelitsa⁴, Il'ya M. Biryukov⁵, Anton Yu. Sammel⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ stepanov_eu@mail.ru

² ichan@niipmm.tsu.ru

³ v.v.burkin@mail.ru

⁴ 44metelitsa@gmail.com

⁵ ilya.biryukov.2072@mail.ru

⁶ anton_sammel@mail.ru

Abstract. This paper discusses the features of the occurrence of secondary breakdown in the products of electrical explosion of copper wires of different lengths in an electro-plasma device. The experiments are performed using a high-voltage electrical installation at the Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University. The design and overall scheme of the high-voltage installation are described in this paper. The methodology for producing a set of experimental samples with copper wires of different lengths and the results of experiments involving the produced samples are presented. The analysis of the obtained electrophysical parameters of the operating electro-plasma device with and without secondary breakdown is performed on the basis of the products of the wire explosion. The analysis of the experimental results allowed one to determine the minimum values of charging voltage of the capacitive energy storage device which are required for the occurrence of secondary breakdown with arc formation in discharge gaps of different lengths. The determined characteristics is experimentally studied depending on the parameters of the high-voltage installation. The obtained dependences can be used when developing new electro-plasma devices employed under cramped conditions in the charging chambers of ballistic installations using electrothermal-chemical throwing technology.

Keywords: electrical explosion of wires, secondary breakdown, electro-plasma device

Acknowledgments: These results were obtained within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FSWM-2020-0032.

For citation: Stepanov, E.Yu., Ishchenko, A.N., Burkin, V.V., Metelitsa, E.R., Biryukov, I.M., Sammel', A.Yu. (2024) Specification of conditions for stable arc discharge formation in an electro-plasma device during secondary breakdown in a discharge gap. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 92. pp. 159–168. doi: 10.17223/19988621/92/13

Введение

Одним из эффективных способов инициирования зарядов баллистических установок является электротермохимическая (ЭТХ) технология. В основе ЭТХ тех-

нологии лежит применение электроплазменного воздействия на метательные заряды баллистических установок [1–4]. Высокая температура электроразрядной плазмы ($\sim 10^4$ К) позволяет существенно сократить период зажигания зарядов и, что наиболее важно, компенсировать их температурный градиент. Для реализации ЭТХ технологии разработано несколько вариантов электроплазменных устройств (ЭПУ) [5, 6]. Ключевым узлом ЭПУ является электровзрыв проводника или системы проводников, инициирующих разряд емкостного источника энергии, с последующим вторичным пробоем разрядного промежутка и образованием дугового разряда. Образующиеся при этом высокотемпературные продукты разряда воздействуют на заряд установленной в камере баллистической установки и инициируют его.

Цель настоящей работы – определение минимального уровня зарядного напряжения емкостного источника энергии, необходимого для устойчивого формирования дугового разряда ЭПУ, установленного в камере баллистической установки, в зависимости от длины разрядного промежутка.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на высоковольтной электрической установке НИИ ПММ ТГУ. Принципиальная схема и внешний вид высоковольтной установки представлены на рис. 1.

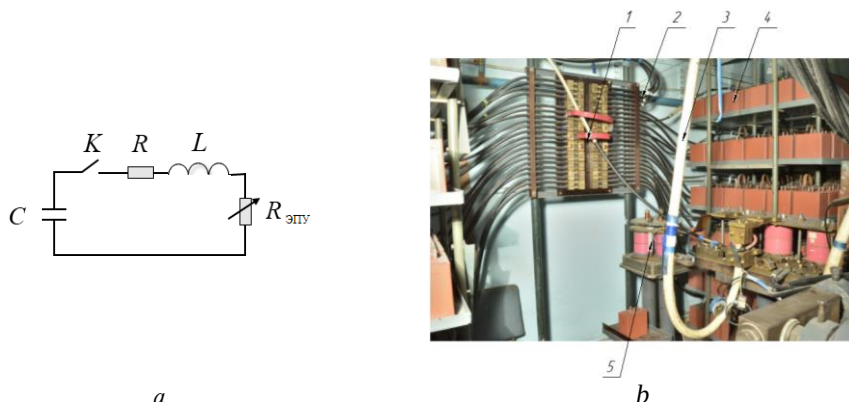


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и общий вид (б) высоковольтной электрической установки: C – ЕНЭ, K – коммутатор, R – омическое сопротивление цепи, L – индуктивность цепи, $R_{\text{ЭПУ}}$ – омическое сопротивление ЭПУ; 1 – силовой коллекторный узел, 2 – коаксиальный кабель, 3 – силовой коаксиальный кабель, соединяющий ЭПУ, 4 – секции ЕНЭ, 5 – вакуумный управляемый разрядник РВУ 47

Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) general view of a high-voltage electrical installation; C is the capacitive energy storage device, K is the commutator, R is the ohmic resistance of the circuit, L is the inductance of the circuit, $R_{\text{ЭПУ}}$ is the ohmic resistance of the electro-plasma device; 1, power collector unit; 2, coaxial cable; 3, coaxial power cable connecting the electro-plasma device; 4, sections of the capacitive energy storage device; and 5, controlled vacuum arrester RVU-47

В электрической установке в качестве накопителя энергии используется емкостной накопитель энергии (ЕНЭ), состоящий из отдельных секций конденсаторов типа К75-40, соединенных параллельно. Емкость каждой секции составляет 0.96 мФ.

Каждая секция может соединяться с остальными секциями с помощью коаксиального кабеля через силовой коллекторный узел. Соединяя нужное количество секций конденсаторов, можно формировать накопитель емкостью до 31.6 мФ с шагом 0.96 мФ. Заряжается сформированный емкостной накопитель с помощью зарядного блока до 5 000 В. Коммутация обеспечивается с использованием вакуумного управляемого разрядника РВУ 47. При проведении экспериментов измерялись следующие электрофизические параметры: ток в цепи и напряжение в разрядном промежутке. Ток в цепи измерялся с поясом Роговского (CWT-600) с относительной погрешностью измерения до 5%. Напряжения измерялись с помощью нескольких резистивно-емкостных делителей напряжения. Погрешность измерения делителей напряжения была определена с использованием импульсного лабораторного генератора напряжения и составляет не более 5%.

Подготовка исследуемых образцов

В качестве образцов, имитирующих ЭПУ, использовались медные проволоочки разной длины, припаянные к медным электродам. Каждый образец представлял собой медную проволоочку диаметром 0.29 мм с припаянными к обоим концам медными электродами диаметром 2.65 мм (рис. 2). Подготовка образцов с применением пайки позволяла лучше контролировать длину проволоочек и, соответственно, начальную длину формирующейся электроразрядной дуги. Электроды в дальнейшем закреплялись в ЭПУ винтовыми зажимами.

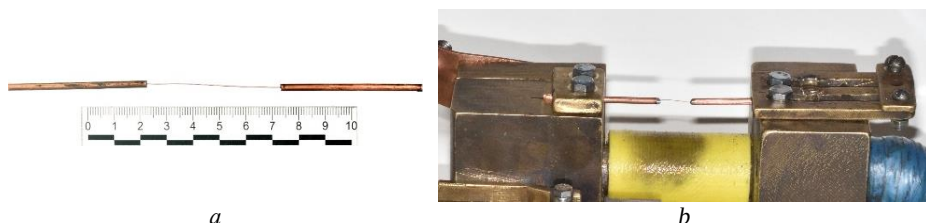


Рис. 2. Экспериментальный образец (а) установленный в ЭПУ (б)
Fig. 2. (a) Experimental sample installed in the (b) electro-plasma device

Методика припайки проволоочек к электродам заключалась в следующем. В медном электроде диаметром 2.65 мм высверливалось отверстие диаметром 1.5 мм. В образующуюся полость вставлялась проволоочка и заливалась припоем. Такой способ позволял сформировать на торце электрода практически плоскую поверхность (рис. 3).

Для анализа повторяемости измеряемых электрофизических параметров в экспериментах по описанной выше технологии было изготовлено 2 партии образцов по 10 штук образцов в каждой: 10 образцов с длиной проволоочек 10 мм и 10 образцов с длиной проволоочек 50 мм. Выбор таких длин обусловлен предварительными экспериментами и геометрическими размерами камеры баллистического стенда НИИ ПММ ТГУ. Были измерены длины всех образцов и установлена средняя длина образцов, которая составила $L_{cp} = 9.98$ мм и $L_{cp} = 49.88$ мм для партий 10 мм и 50 мм длины проволоочек соответственно. Эксперименты прово-

дильсь при следующих параметрах электрической установки: емкость накопителя $C = 17.28$ мФ, зарядное напряжение емкостного накопителя $U_3 = 428$ В.

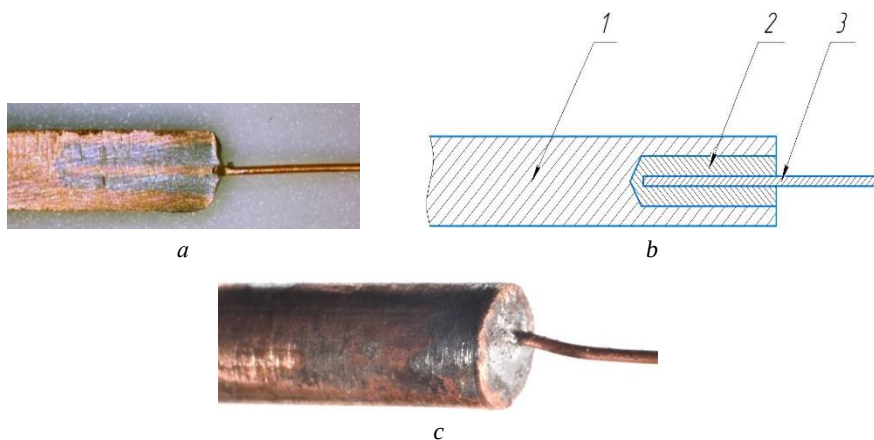


Рис. 3. Фотография центрального продольного разреза электрода с припаянной проволочкой (а). Схема припаянной проволочки (b). Фотография торца электрода в изометрии (с)

Fig. 3. (a) Photograph of the central longitudinal section of the electrode with a soldered wire, (b) design of the soldered wire, and (c) photograph of the end face of the electrode in isometric view

Экспериментальные результаты измеренных напряжений на разрядном промежутке для серии с проволочками длиной 50 мм представлены на рис. 4.

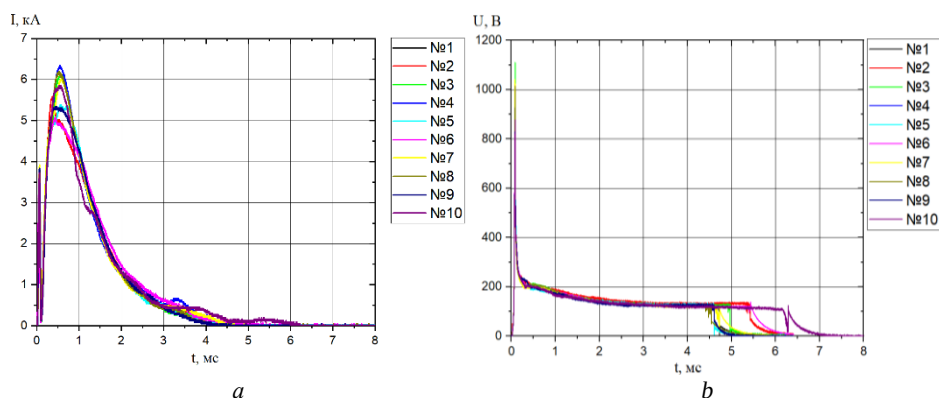


Рис. 4. Электрофизические характеристики функционирования 10 образцов с проволочками длиной 50 мм: а – токи в цепи, б – напряжения на разрядных промежутках

Fig. 4. Electrophysical characteristics of the application of 10 samples with 50 mm long wires: (a) currents in the circuit and (b) voltages in the discharge gaps

Как видно из графиков, напряжения на разрядном промежутке и величина токов в цепи практически на протяжении всего процесса разряда достаточно близки. Разброс по амплитуде перенапряжения составляет до 300 В. Разброс по амплитуде силы тока в цепи составляет до 1.2 кА.

Экспериментальные исследования

Электровзрыв проводника или системы проводников состоит из двух этапов, следующих друг за другом. На первом этапе при пропускании через проволоочку импульсного тока большой плотности происходит фазовый переход от твердого состояния проволоочки в жидкое и газообразное, при этом резко изменяется сопротивление разрядного промежутка. Реакция электрической цепи на резкое увеличение сопротивления взрываемой проволоочки выражается в формировании на разрядном промежутке импульса перенапряжения, который выше зарядного напряжения конденсаторной батареи в несколько раз, и уменьшается ток, протекающий в цепи. В течении второго этапа по образовавшимся продуктам электровзрыва происходит вторичный пробой разрядного промежутка с образованием дугового разряда. При этом основная часть энергии, накопленной в емкостном накопителе, вводится в разрядный промежуток на втором этапе. Однако переход процесса из первого этапа во второй не всегда выполняется. Для определения минимального уровня зарядного напряжения емкостного накопителя, необходимого для формирования вторичного пробоя разрядного промежутка с образованием дугового разряда, выполнена серия экспериментов с различной длиной: 10, 20, 30, 40, 50 мм. Для каждой длины были проведены эксперименты по определению величины зарядного напряжения, при котором произойдет вторичный пробой.

На рис. 5 приведены экспериментальные результаты по электровзрыву образцов с длиной проволоочки 10 мм. Эксперименты проводились при следующих параметрах электрического устройства: емкостной накопитель суммарной емкостью 17.28 мФ заряжался до напряжения 64, 85, 97, 112, 115, 167, 220 В.

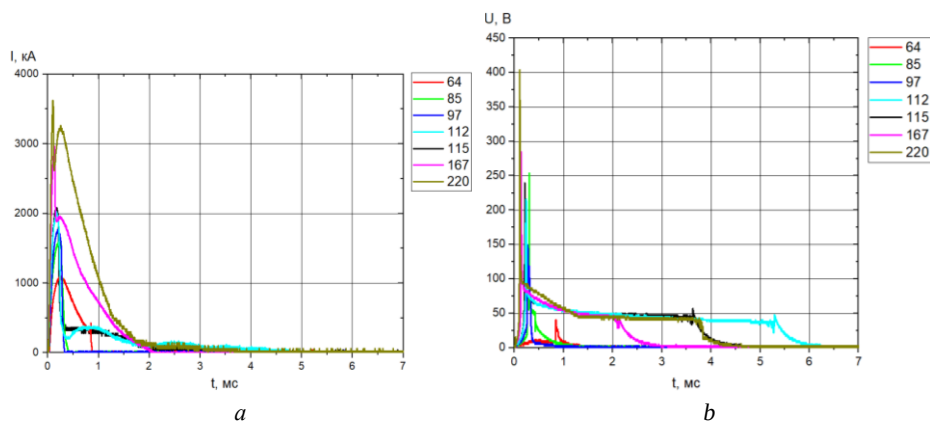


Рис. 5. Электрофизические характеристики функционирования ЭПУ с проволочками 10 мм:

a – токи в цепи, *b* – напряжения на разрядных промежутках

Fig. 5. Electrophysical characteristics of the operation of electro-plasma device with 10 mm wires:
(*a*) currents in the circuit and (*b*) voltages in the discharge gaps

Как видно по графикам тока и напряжения на разрядных промежутках, после резкого роста тока и напряжения происходит их снижение. И в случаях, когда

зарядные напряжения емкостного накопителя составляли 64, 85 и 97 В, токи и напряжения прекращаются практически сразу после первого этапа. В таких случаях не происходит вторичного пробоя по продуктам электровзрыва проволоочки. Начиная с зарядного напряжения 112 В и выше происходит вторичный пробой, и остатки накопленной энергии накопителя вводятся в образовавшуюся плазменную среду. Зарядное напряжение 112 В является нижним порогом, при котором при текущих параметрах системы электропитания реализуется режим ЭВП со вторичным пробоем.

Таким же образом были проведены серии испытаний образцов с длинами проволоочки 20, 30, 40 и 50 мм. Результаты представлены на рис. 6.

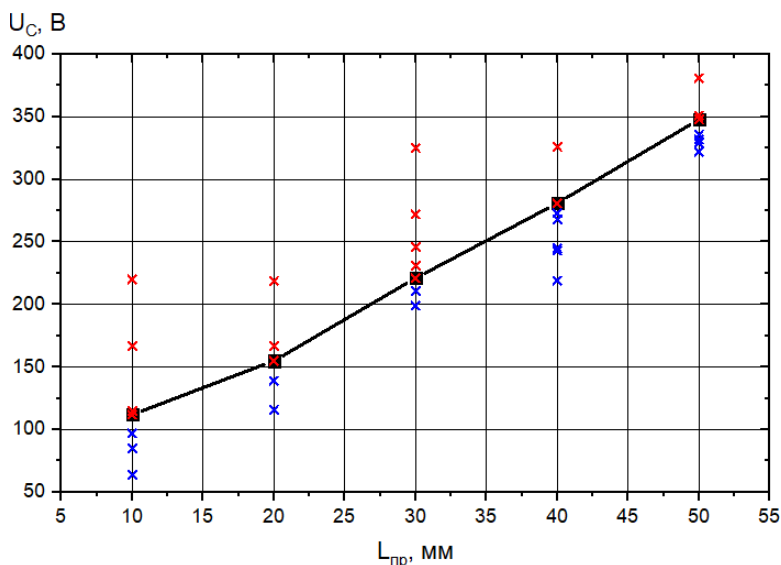


Рис. 6. Зависимость минимального зарядного напряжения емкостного накопителя от длины проволоочки: $\times$ – электрический взрыв проволоочки с образованием вторичным пробоя, $\times$ – электрический взрыв проволоочки без формирования вторичного пробоя, —■— – минимальное зарядное напряжение емкостного накопителя

Fig. 6. Minimum charging voltage of the capacitive energy storage device as a function of the wire length: $\times$ – electrical explosion of the wire with the formation of secondary breakdown, $\times$ – electrical explosion of the wire without the formation of secondary breakdown, —■— – minimum charging voltage of the capacitive energy storage device

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость минимального зарядного напряжения емкостного накопителя от длины проволоочки. Как видно из графика, зависимость является практически линейной. Область графика под линией – это область, в которой реализуется одноэтапный режим ЭВП без вторичного пробоя. В области графика над линией реализуется режим ЭВП со вторичным пробоем.

Полученные зависимости относительно слабо зависят от величины емкости ЕНЭ. Для подтверждения этого рассматривались варианты, в которых суммарная емкость ЕНЭ составляла 7.68, 17.28 и 31.6 мФ (рис. 7).

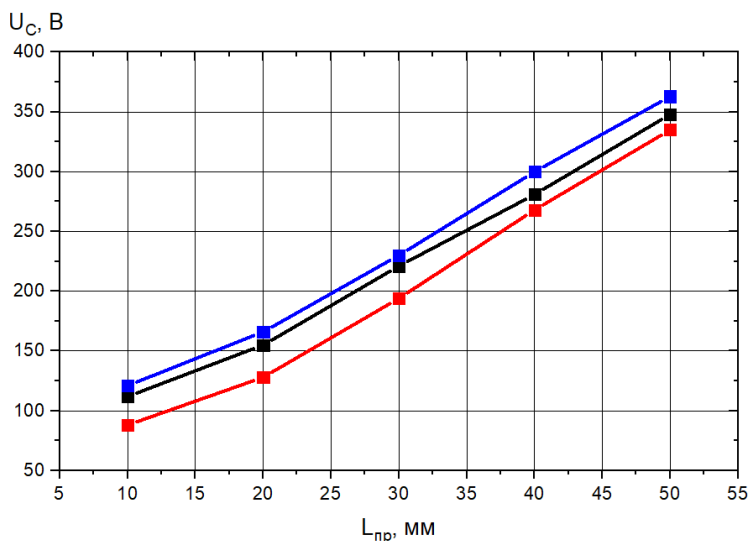


Рис. 7. Зависимости минимального зарядного напряжения емкостного накопителя от длины проволоочки: —■— 7.68 мФ, —■— 17.28 мФ, —■— 31.6 мФ

Fig. 7. Minimum charging voltage of the capacitive energy storage device as a function of the wire length: —■— 7.68 mF —■— 17.28 mF —■— 31.6 mF

Зависимость минимального зарядного напряжения для исследованных вариантов емкостного накопителя практически линейна. Смещение происходит за счет увеличения емкости накопителя. Чем выше емкость, тем меньше минимальное зарядное напряжение, необходимое для реализации вторичного пробоя при ЭВП с образованием дугового разряда.

Заключение

В результате выполненного исследования определены минимальные значения зарядного напряжения емкостного накопителя, необходимые для формирования вторичного пробоя с образованием дуги в разрядных промежутках различной длины. Полученные зависимости могут использоваться при разработке ЭПУ, ориентированных на применение в стесненных условиях зарядных камер баллистических установок.

Список источников

1. Muller G.M., Moore D.B., Bernstein D. Growth of explosion in electrically initiated. RDX // J. Applied Physics. 1961. V. 32 (6). P. 1065–1075.
2. Trebinski R., Leciejewski Z., Surma Z., Michalski J. Comparative analysis of the effects of gunpowder and plasma ignition in closed vessel tests // Defence Technology. 2019. V. 15 (5). P. 668–673.
3. Michalski J., Leciejewski Z. Closed Vessel Investigation of Propellant Ignition Process with Using Capillary Plasma Generator // Problems of mechatronics armament, aviation, safety engineering. 2015. V. 6, № 1 (19). P. 19–26.
4. Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Сидоров А.Д., Степанов Е.Ю. Исследование возможностей повышения скорости поршня

- в условиях электротермохимической технологии воспламенения применительно к установке среднего калибра // Вестник Южно-Уральского университета. Сер. Математика. Механика. Физика. 2021. Т. 13, вып. 4. С. 37–43.
5. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., Широков В.М. Разработка импульсных плазмотронов и опыт их применения для инициирования насыпных зарядов в баллистических экспериментах // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11, № 2. С. 147–152.
6. Ищенко А.Н., Буркин В.В., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Электроплазменное устройство инициирования зарядов баллистических установок с многоканальным режимом дугового разряда // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 3-3, С. 52–55.

References

1. Muller G.M., Moore D.B., Bernstein D. (1961) Growth of explosion in electrically initiated RDX. *Journal of Applied Physics*. 32(6). pp. 1065–1075. doi: 10.1063/1.1736161
2. Trebinski R., Leciejewski Z., Surma Z., Michalski J. (2019) Comparative analysis of the effects of gunpowder and plasma ignition in closed vessel tests. *Defence Technology*. 15(5). pp. 668–673. doi: 10.1016/j.dt.2019.05.007
3. Michalski J., Leciejewski Z. (2015) Closed vessel investigation of propellant ignition process with using capillary plasma generator. *Problems of Mechatronics Armament, Aviation, Safety Engineering*. 6(1). pp. 19–26. doi: 10.5604/20815891.1149753
4. Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Sidorov A.D., Stepanov E.Yu. (2021) Issledovanie vozmozhnostey povysheniya skorosti porshnya v usloviyakh elektrottermokhimicheskoy tekhnologii vosplamneniya primenitel'no k ustanovke srednego kalibra [Investigation of the possibilities of increasing the projectile velocity under the conditions of electrothermal-chemical ignition technology as applied to a medium-caliber installation]. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika» – Bulletin of the South Ural State University Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*. 13(4). pp. 37–43. doi: 10.14529/mmph210405
5. Baryshev M.S., Burakov V.A., Burkin V.V., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z., Samorokova N.M., Khomenko Yu.P., Shirokov V.M. (2009) Razrabotka impul'snykh plazmotronov i opyt ikh primeneniya dlya initsirovaniya nasypnykh zaryadov v ballisticheskikh eksperimentakh [Development of pulse plasma injectors and the experience of their application for initiation of bulk charges in ballistic experiments]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya – Chemical Physics and Mesoscopics*. 11(2). pp. 147–152.
6. Ishchenko A.N., Burkin V.V., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V. (2014) Elektroplazmennoye ustroystvo initsirovaniya zaryadov ballisticheskikh ustanovok s mnogo-kanal'nym rezhimom dugovogo razryada [Electro-plasma device for initiating charges of ballistic installations with a multi-channel arc discharge mode]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 57(3/3). pp. 52–55.

Сведения об авторах:

Степанов Евгений Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Ищенко Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, директор Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Буркин Виктор Владимирович – старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

Метелица Егор Романович – студент бакалавриата физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 44metelitsa@gmail.com

Бирюков Илья Михайлович – техник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ilya.biryukov.2072@mail.ru

Саммель Антон Юрьевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Information about the authors:

Stepanov Evgeniy Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: stepanov_eu@mail.ru

Ishchenko Aleksandr N. (Doctor of Physics and Mathematics, Director, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Burkin Viktor V. (Senior Researcher, Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

Metelitsa Egor Romanovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 44metelitsa@gmail.com

Biryukov Il'ya M. (Laboratory Engineer, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ilya.biryukov.2072@mail.ru

Sammel' Anton Yu. (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: anton_sammel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2024; принята к публикации 09.12.2024

The article was submitted 01.11.2024; accepted for publication 09.12.2024