

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-293-7-84-89>

УДК 623.438.3: 66.091

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГІЇ ІСКРОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ НА ПРОЦЕС ІНІЦІЮВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ В ДЕТОНАЦІЙНІЙ ТРУБІ

Любарський Б.Г., Кривошеєв С.Ю., Єресько О.В.,
Галиця В.І., Сакун О.В., Любарський Д.Б.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF SPARK IGNITION ENERGY ON THE DETONATION INITIATION PROCESS IN A DETONATION TUBE

Liubarskyi B.G., Kryvosheiev S.Y., Eresko O.V.,
Galitsa V.I., Sakun O.V., Liubarskyi D.B.

В роботі розглядається дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі для безпорохового міномету з керованою енергією пострілу. Показано, що успішні випробування продемонстрували дослідних зразків мінометів які демонструють можливість запуску снарядів без використання традиційних порохових зарядів, що підтверджує ефективність розробленої технології запуску. Система призначена для автоматичного заряджання та забезпечує можливість стрільби прямою наводкою. На відміну від звичайних мінометів, запропонована система використовує газодетонаційний заряд для регулювання дальності стрільби. Отже, дальність польоту снаряда контролюється не зміною кута піднесення міномета, а зміною енергії пострілу при збереженні фіксованого кута піднесення. Заміна порохового заряду горючою газовою сумішшю сприяє інтеграції системи керування пострілом міномета в ширші системи керування вогнем. Це дозволяє створити новий режим напівпрямої наводки, що покращує тактичне розгортання зброї в умовах бою. Для переведення цієї технології у військове виробництво необхідні подальші дослідження та розробка спеціалізованої системи керування мінометом. Ключовими параметрами для контролю енергії пострілу міномета є початковий тиск та об'єм стисненого газового заряду в газодетонаційній камері. За результатами експериментальних досліджень виявлено вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі. Дослідження проведено для 3-х діапазонів значень повної енергії іскрового розряду, що дорівнювали до 50 мДж, 0,84-1,54 Дж, 13-14 Дж. Розкид у значеннях повної енергії розряду пов'язаний

з відхиленням напруги само пробиття іскрового проміжку. На кожному із значень вимірювання здійснювалось не менше, ніж 3 рази. Встановлено, що збільшення енергії розряду призводить до скорочення відстані та часу переходу горіння у детонацію. Зокрема, у детонаційній трубі з внутрішнім діаметром 73 мм, що наповнена стехіометричною сумішшю пропан-бутана технічного з киснем, відбулось скорочення часу переходу горіння у детонацію з понад 1200 мкс до близько 200-300 мкс у разі зростання повної енергії іскрового розряду з 50 мДж до 13-14 Дж. При цьому, відстань переходу горіння у детонацію скоротилась з 299-413 мм до 185 мм.

Ключові слова: іскрового запалювання; ініціювання детонації; детонаційна труба; газодетонаційний заряд

Вступ. Оперативний досвід міських боїв показав, що танки, БМП та бронетранспортери широко використовуються для прориву оборони противника [1–3]. Однак танки за своєю суттю погано пристосовані для міських боїв через обмежений кут піднесення їхньої основної зброї – гармати. Тому військові, які мають попередній досвід міських операцій, провели модернізацію своїх основних броньованих платформ для підвищення ефективності в умовах міст [4–6]. Наприклад, після іракської кампанії Велика Британія модернізувала танк Challenger II, інтегрувавши міномет як допоміжну зброю. Таку модифікацію, було продемонстровано під час армійського бойового експерименту 2018 року. Міномет був встановлений на башті, що

забезпечувало непряму вогневу підтримку. Аналогічно, ізраїльський танк Merkava має стаціонарний 60-мм протипіхотний міномет у своєму броньованому корпусі зі спеціальним вогневим портом у башті. Ці міномети здатні запускати як протипіхотні, так і димові боеприпаси. На відміну від цього, українська бронетехніка оснащена лише димовими гранатометами, ефективна дальність стрільби яких обмежена приблизно 300 метрами – недостатньо для забезпечення повного димового прикриття під час маневреної війни [1].

У Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» розроблено інноваційний безпороховий міномет із регульованою енергією пострілу, а також створено повнофункціональний експериментальний прототип. Польові випробування підтвердили можливість запуску снарядів без традиційних порохових зарядів, тим самим підтвердивши запропоновану технологію руху [7–10]. Система має автоматичне заряджання та підтримує стрільбу прямою наводкою. На відміну від звичайних мінометів, така конструкція використовує газодетонаційний заряд для керування дальністю, що дозволяє регулювати її шляхом зміни енергії пострілу, зберігаючи при цьому постійний кут піднесення. Заміна порохового заряду горючою газовою сумішшю також дозволяє безперешкодно інтегрувати систему керування міномету. Таке нововведення дозволяє використовувати режим напівпрямой наводки, що забезпечує покращену тактичну гнучкість у бою.

Для перенесення цієї концепції у військове виробництво необхідні подальші дослідження щодо розробки спеціалізованої системи керування мінометом. Важливими показниками для регулювання енергії пострілу є початковий тиск та об'єм стисненого газу в детонаційній камері. На ці фактори впливають параметри впорскування газу, що описано в [11], а також метод запалювання [12–20]. Дослідження впливу енергії запалювання на скорочення відстані та часу, необхідних для переходу від горіння до детонації, що залишається ключовим науковим завданням [12–14].

Метою роботи є визначення впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення досліджень застосовано експериментальне обладнання, що представлено на рис. 1.

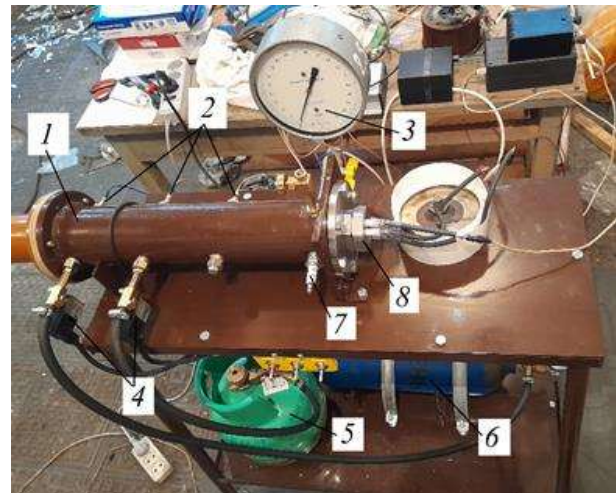


Рис. 1. Експериментальне обладнання для дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі: 1 – детонаційна труба; 2 – п'єзо датчики тиску; 3 – зразковий манометр; 4 – електромагнітні клапани; 5 – пропановий балон; 6 – кисневий балон; 7 – свічка запалювання; 8 – розрядні електроди

Експериментальне обладнання включало детонаційну трубу з системою іскрового запалювання та вимірювальний комплекс. Детонаційна труба являла собою сталеву трубу з товщиною стінки 7 мм та внутрішнім діаметром 73 мм. Довжина труби дорівнювала 430 мм. З одного торця труба герметично закривалась. З закритої сторони труби розміщувалась автомобільна свічка запалювання та два іскрові електроди, що вводились в трубу. До автомобільної свічки запалювання підключалась автомобільна система запалювання. До розрядних електродів підключався високовольтний конденсатор Electronicon E51.R35-30R20 ємністю 0,3 мкФ. Автомобільна свічка запалювання не використовувалась для розряду конденсатора, бо вона має внутрішній опір, який суттєво обмежує введення енергії в іскровий розряд. З протилежної сторони труби до торця труби приєднувався фланець з отвором, до якого прикручувалось притискне кільце. Діаметр отворів в кільці та фланці дорівнювали 73 мм. Між кільцем та фланцем встановлювалась розривна мембрана, що витримувала тиск до $\pm 0,2$ МПа. Розривна мембрана застосовувалась для герметизації детонаційної труби на час формування горючої суміші.

Дослідження проведено для 3-х діапазонів значень повної енергії іскрового розряду, що дорівнювали до 50 мДж, 0,84–1,54 Дж, 13–14 Дж. Розкид у значеннях повної енергії розряду пов'язаний з відхиленням напруги само

пробиття іскрового проміжку. На кожному із значень вимірювання здійснювалось не менше, ніж 3 рази.

За результатами вимірювань отримано суттєвий вплив енергії іскрового розряду на час та відстань переходу горіння у детонацію (ПГД). Результати таких вимірювань відображено на рис. 2-4.

З отриманих результатів дослідження маємо, що за повної енергії іскрового розряду до 50 мДж тільки на 3-му датчику спостерігаємо ударну хвилю (рис. 2). Тобто, перехід горіння у детонацію відбувся між 2-м та 3-м датчиками тиску, що складає 299-413 мм. На наведеній осцилограмі час ПГД складає понад 1200 мкс.

Зростання повної енергії розряду до 0,84-1,54 Дж призвело до появи детонаційної хвилі вже на 2-му датчику (рис. 3). Тобто, перехід горіння у детонацію відбувся між 1-м та 2-м датчиками тиску, що складає 185-299 мм. На наведеній осцилограмі час ПГД складає близько 800 мкс.

Подальше збільшення повної енергії розряду до 2,1-2,3 Дж супроводжувалось появи детонаційної хвилі вже на 1-му датчику (рис. 4). Таким чином, відстань ПГД скоротилась до 185 мм, а час цього процесу склав близько 300 мкс.

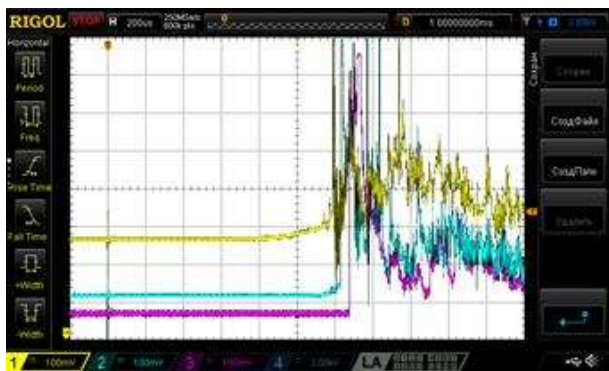


Рис. 2. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду до 50 мДж

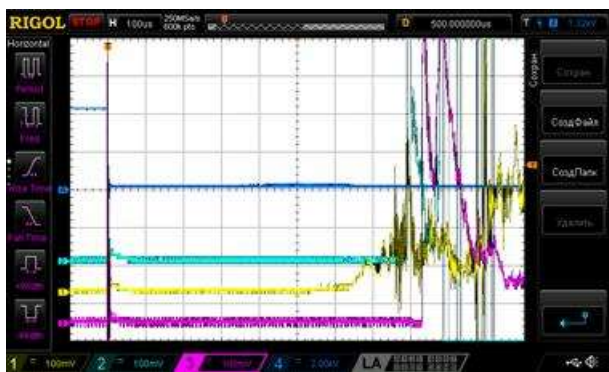


Рис. 3. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду 0,84-1,54 Дж

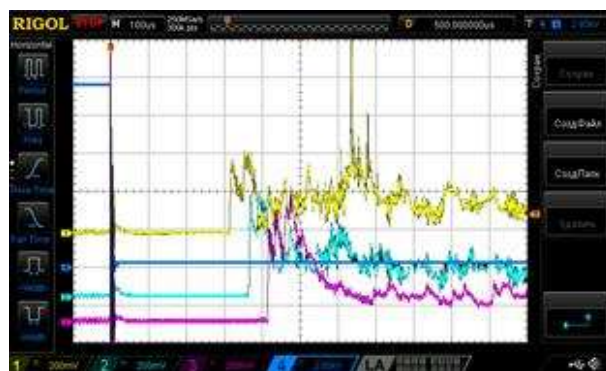


Рис. 4. Типова осцилограма тиску у різних точках вимірювання за повної енергії розряду 13-14 Дж

Повторення вимірювань за однакових умов призводило до не суттєвого розкиду результатів вимірювання, що відображено в таблиці.

Таблиця

Залежність відстані та часу переходу горіння у детонацію від повної енергії іскрового розряду

№ дослідів	Повна енергія, Дж	Час ПГД, мкс	Відстань ПГД, мм
1	до 0,05	1300	299-413
2		1280	
3		1250	
4	1,35	640	185-299
5	1,35	800	
6	1,35	820	
7	0,84	870	
8	1,536	870	
9	1,35	910	
10	13,54	275	до 185
11	13,82	315	
12	14,11	255	
13	12,97	333	
14	13,54	282	
15	13,82	375	
16	13,25	290	
17	13,82	310	185-299
18	13,82	500	
19	13,82	180	до 185

Отримані результати свідчать про доцільність підвищення повної енергії розряду у газодетонаційному мінометі для підвищення стабільності пострілів в умовах розширення стисненого горючого заряду під час його подавання до ствола міномету.

Подяка. Робота виконана за фінансової підтримки Національного Фонду Досліджень України. Реєстраційний номер проєкту: 2023.04/0101, «Автоматизований привід наведення та система управління газодетонаційного міномету для пострілу димовими мінами».

Висновок. За результатами експериментальних досліджень виявлено вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі. Встановлено, що збільшення енергії розряду призводить до скорочення відстані та часу переходу горіння у детонацію. Зокрема, у детонаційній трубі з внутрішнім діаметром 73 мм, що наповнена стехіометричною сумішшю пропан-бутана технічного з киснем, відбулось скорочення часу переходу горіння у детонацію з понад 1200 мкс до близько 200-300 мкс у разі зростання повної енергії іскрового розряду з 50 мДж до 13-14 Дж. При цьому, відстань переходу горіння у детонацію скоротилась з 299-413 мм до 185 мм.

Література

1. Шевенко М. С. Боротьба з російською бронетехнікою за допомогою протитанкових засобів ЗС України: допомога піхотинцю. Київ : Гром. орг. «Товариство правозахисту ветеранів правових структур», 2015. 67 с.
2. Сакун О.В., Історія та перспективи застосування танкових мінометів. *Механіка та машинобудування*, Харків, 2018. № 1. С. 89–96.
3. Merkava 4: веб-сайт. URL: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (дата звернення 05.09.2024).
4. Streetfighter and the future of the Challenger 2: веб-сайт. URL: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (дата звернення 05.09.2024).
5. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept: веб-сайт. URL: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operation/> (дата звернення 05.09.2024).
6. K. Korytchenko, C. Senderowski, D. Samoilenko, et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen-oxygen mixture and in nitrogen // *Shock Waves*, 2022, Vol. 32, pp. 321–335, <https://doi.org/10.1007/s00193-022-01077-3>
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A., Tseabriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied physics*. 2018. 3/5 (93), P. 47–54.
8. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, Vol. 122(4), pp. 116–119, doi: 10.46813/2019-122-116
9. K. Korytchenko, Ye. Poklonskiy. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, Vol. (4), pp. 155–160.
10. Експериментальне дослідження процесу нагнітання стисненого газового заряду у газодетонаційному мінометі./ Б.Г. Любарський, С.Ю. Кривошеєв, О.В. Єресько, В.І. Галиця, І.В. Поляков, Д.Б. Любарський // *Механіка та машинобудування*. – 2024. – № 1. – С. 157–168.
11. Q. Wang, J. Xiang, G. Chen, Y. Cheng, X. Zhao, and S. Zhang, "Propylene Flow, Microstructure and Performance of WC–12Co Coatings Using a Gas–Fuel HVOF Spray Process," *J. Mater. Process. Technol.* 213 (10), 1653–1660 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007>
12. H.D. Ng, J.H.S. Lee. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007; Vol. 32(1), pp. 93–99, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.03.012>
13. R. Zitoun, D. Desbordes, C. Guerraud, B. Deshaies. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures // *Shock Waves*, 1995, Vol. 4(6), pp. 331–337, <https://doi.org/10.1007/BF01413875>
14. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Essmann S., et al. Challenges of energy measurements of low-energy spark discharges / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 5-10 October 2020, pp.421-424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172
15. V. Kamenskihs, H.D. Ng, J.H.S. Lee. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures // *Combustion and Flame*, 2010, Vol. 157, pp. 1795–1799, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.014>
16. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen // *Jpn. J. Appl. Phys*, 2020, Vol. 59, SHHC04, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab72cc>
17. K. Korytchenko, V. Markov, et al. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, Vol. 116(4), pp. 144–149.
18. K. Korytchenko, V. Golota, et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 97(3), pp. 154–158.
19. D. Vinnikov, K. Korytchenko, A. Sakun. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors // *Problems of Atomic*

Science and Technology, 2015, Vol. 98(4), pp. 220–223

20. K.V. Korytchenko, Y.V. Kashanskyi, O.V. Cherkashyn, et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2020, Vol. 130(6), pp. 165–168, <https://doi.org/10.46813/2020-130-165>

References

1. Shevenko M. S. Borotjba z rosijskoju bronetehnikoju za dopomoghoju protytankovykh zasobiv ZS Ukrainy: dopomogha pikhotyncju. Kyjiv : Ghrom. orgh. «Tovarystvo pravozakhystu veteraniv pravovykh struktur», 2015. 67 s.
2. Sakun O.V., Istorija ta perspektyvy zastosuvannja tankovykh minometiv. Mekhanika ta mashynobuduvannja, Kharkiv, 2018. # 1. S. 89–96.
3. Merkava 4: веб-сайт. URL: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (data zvernennja 05.09.2024).
4. Streetfighter and the future of the Challenger 2: веб-сайт. URL: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (data zvernennja 05.09.2024).
5. British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept: веб-сайт. URL: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfare/intl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operation/> (data zvernennja 05.09.2024).
6. K. Korytchenko, C. Senderowski, D. Samoilenko, et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen–oxygen mixture and in nitrogen // *Shock Waves*, 2022, Vol. 32, pp. 321–335, <https://doi.org/10.1007/s00193-022-01077-3>
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A., Tsebruk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied physics*. 2018. 3/5 (93), P. 47–54.
8. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, Vol. 122(4), pp. 116–119, doi: 10.46813/2019-122-116
9. K. Korytchenko, Ye. Poklonskiy. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, Vol. (4), pp. 155–160.
10. Eksperymentaljne doslidzhennja procesu naghnitannja stysnenogho ghazovogho zarjadu u ghazo-detonacijnomu minometri. B.Gh. Ljubarskyj, S.Ju. Kryvoshejev, O.V. Jeresjko, V.I. Ghalycja, I.V. Poljakov, D.B. Ljubarskyj //

Mekhanika ta mashynobuduvannja. – 2024. – # 1. – S. 157–168.

11. Q. Wang, J. Xiang, G. Chen, Y. Cheng, X. Zhao, and S. Zhang, “Propylene Flow, Microstructure and Performance of WC–12Co Coatings Using a Gas–Fuel HVOF Spray Process,” *J. Mater. Process. Technol.* 213 (10), 1653–1660 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007>
12. H.D. Ng, J.H.S. Lee. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007; Vol. 32(1), pp. 93–99, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.03.012>
13. R. Zitoun, D. Desbordes, C. Gueraud, B. Deshaies. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures // *Shock Waves*, 1995, Vol. 4(6). pp. 331–337, <https://doi.org/10.1007/BF01413875>
14. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Essmann S., et al. Challenges of energy measurements of low-energy spark discharges / 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 5-10 October 2020, pp.421–424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172
15. V. Kamenskihs, H.D. Ng, J.H.S. Lee. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures // *Combustion and Flame*, 2010, Vol. 157, pp. 1795–1799, <https://doi.org/10.1016/j.combusflame.2010.02.014>
16. K. Korytchenko, R. Tomashevskiy, I. Varshamova et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2020, Vol. 59, SHHC04, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab72cc>
17. K. Korytchenko, V. Markov, et al. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018, Vol. 116(4), pp. 144–149.
18. K. Korytchenko, V. Golota, et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 97(3), pp. 154–158.
19. D. Vinnikov, K. Korytchenko, A. Sakun. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, Vol. 98(4), pp. 220–223
20. K.V. Korytchenko, Y.V. Kashanskyi, O.V. Cherkashyn, et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen // *Problems of Atomic Science and Technology*, 2020, Vol. 130(6), pp. 165–168, <https://doi.org/10.46813/2020-130-165>

Liubarskyi B.G., Kryvosheiev S.Y., Eresko O.V., Galitsa V.I., Sakun O.V., Liubarskyi D.B. Research on the influence of spark ignition energy on the detonation initiation process in a detonation tube

The paper examines the impact of spark ignition energy on the detonation initiation process in a detonation tube for a powderless mortar with controlled shot energy. It is shown that successful tests have demonstrated the ability of mortar prototypes to launch shells without the use of traditional powder charges, which confirms the effectiveness of the developed launch technology. The system is designed for automatic loading and provides the ability to fire with direct fire. Unlike conventional mortars, the proposed system uses a gas detonation charge to regulate the firing range. Therefore, the range of the shell is controlled not by changing the mortar elevation angle, but by changing the shot energy while maintaining a fixed elevation angle. Replacing the powder charge with a combustible gas mixture contributes to the integration of the mortar shot control system into broader fire control systems. This allows you to create a new semi-direct fire mode, which improves the tactical deployment of weapons in combat conditions. To transfer this technology to military production, further research and development of a specialized mortar control system are necessary. The key parameters for controlling the energy of a mortar shot are the initial pressure and volume of the compressed gas charge in the gas detonation chamber. The results of experimental studies revealed the influence of the spark ignition energy on the process of initiating detonation in the detonation tube. The study was conducted for 3 ranges of values of the total energy of the spark discharge, which were equal to 50 mJ, 0.84-1.54 J, 13-14 J. The spread in the values of the total energy of the discharge is associated with the deviation of the voltage of the spark gap breakdown. At each of the values, measurements were carried out no less than 3 times. It was established that an increase in the discharge energy leads to a reduction in the distance and time of the transition of combustion to detonation. In particular, in a detonation tube with an internal diameter of 73 mm, filled with a stoichiometric mixture of technical propane-butane with oxygen, the time for the transition from

combustion to detonation was reduced from over 1200 μ s to about 200-300 μ s in the event of an increase in the total energy of the spark discharge from 50 mJ to 13-14 J. At the same time, the distance from the transition from combustion to detonation was reduced from 299-413 mm to 185 mm.

Keywords: *spark ignition; detonation initiation; detonation tube; gas detonation charge*

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: lboris1911@ukr.net

Кривошеєв Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: Serhii.Kryvosheiev@khpi.edu.ua

Єреско Олександр В'ячеславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: oleksandr.eresko@khpi.edu.ua

Галиця Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної культури, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: vitaliy.galitsa@gmail.com

Сакун Олександр Валерійович – доктор технічних наук, завідувач кафедри військової підготовки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», E-mail: sakunav71@gmail.com

Любарський Дмитро Борисович – інженер кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: dizas005@ukr.net

Стаття подана 03.08.2025.