

УДК 623.438.3

doi:10.20998/2413-4295.2025.03.02

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГІЇ ІСКРОВОГО ЗАПАЛЮВАННЯ НА ПРОЦЕС ІНІЦІУВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ

**Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ^{1*}, С. Ю. КРИВОШЕЄВ², О. В. ЄРЕСЬКО², В. І. ГАЛИЦЯ²,
О. В. САКУН³, Д. Б. ЛЮБАРСЬКИЙ²**

¹ кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² кафедра промислової і біомедичної електроніки, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

³ кафедра військової підготовки, Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: lboris1911@ukr.net

АНОТАЦІЯ Розглядається обладнання для проведення досліджень впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації для безпорохового міномету з керованою енергією пострілу. Показано, що успішні випробування продемонстрували дослідних зразків мінометів показали можливість запуску снарядів без використання традиційних порохових зарядів, тим самим підтвердивши 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 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. На ці параметри впливають умови впрорскування газу, пов'язані з цим процесом, та метод іскрового запалювання для дослідження яких розроблено обладнання, що розглядається у роботі. Обладнання включає 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. Встановлено, що швидкість ударної хвилі яку можливо визначити за допомогою обладнання складає швидкість ударної хвилі $V = 2375$ м/с, а значення тиску дуже близько до тиску детонаційної хвилі.

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

EQUIPMENT FOR DETERMINING THE INFLUENCE OF SPARK IGNITION ENERGY ON THE DETONATION INITIATION PROCESS

**B. LIUBARSKYI^{1*}, S. KRYVOSHEIEV², O. ERESKO², V. GALITSA², O. SAKUN³,
D. LIUBARSKYI²**

¹ Department of Electric Transport and Diesel Locomotive Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Department of Military Training, Military Institute of Tank Troops, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Equipment for conducting research into the influence of spark ignition energy on the detonation initiation process for a powderless mortar with controlled shot energy is considered. It is shown that successful tests of prototype mortars demonstrated the possibility of launching shells without the use of traditional powder charges, thereby confirming the effectiveness of the developed launch technology. The system is designed for automatic loading and provides the possibility of 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 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. These parameters are influenced by the gas injection conditions, the processes associated with this, and the spark ignition method, for the study of which the equipment considered in the work was

developed. The equipment includes a detonation tube with a spark ignition system and a measuring complex. The detonation tube was a steel tube with a wall thickness of 7 mm and an internal diameter of 73 mm. The length of the tube was 430 mm. The tube was hermetically closed from one end. An automobile spark plug and two spark electrodes were placed on the closed side of the tube, which were inserted into the tube. An automobile ignition system was connected to the automobile spark plug. It has been established that the shock wave velocity that can be determined using the equipment is the shock wave velocity $V = 2375$ m/s, and the pressure value is very close to the detonation wave pressure.

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

Вступ

Досвід бойових дій в містах показав, що танки, БМП та БТР широко використовувалися для прориву оборони противника [1-3]. Однак танки, як правило, не призначені для ефективних дій у міських умовах через обмежений кут піднесення їхньої основної зброї – гармати. Натомість іноземні збройні сили, які мають попередній досвід міських боїв, почали модернізувати свою бронетехніку для покращення характеристик у таких умовах [4-6]. Наприклад, після іракської кампанії Велика Британія модернізувала танк Challenger II, інтегрувавши міномет як допоміжну зброю. Ця модифікація була продемонстрована під час Армійського бойового експерименту 2018 року. Міномет був встановлений на башті танка. Аналогічно, ізраїльський танк «Меркава» має вбудований 60-мм протипіхотний міномет, розміщений всередині броньованої конструкції танка, з отвором у башті для його використання. Ці міномети здатні запускати як протипіхотні, так і димові гранати. Для порівняння, українська бронетехніка оснащена димовими гранатометами, але їхня ефективна дальність не перевищує 300 метрів, що недостатньо для забезпечення належного димового екранування під час маневрових операцій[1].

У Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» було розроблено безпороховий міномет з керованою енергією пострілу, а також створено функціональний експериментальний прототип. Успішні випробування продемонстрували можливість запуску снарядів без використання традиційних порохових зарядів, тим самим підтвердивши ефективність розробленої технології запуску [7–10]. 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 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. На ці параметри впливають умови впорскування газу, пов'язані з цим процеси, описані в [11], та метод іскрового запалювання. Подальше дослідження того, як енергія запалювання впливає на час та відстань, необхідні для переходу від горіння до детонації, залишається критичним науковим завданням.

Мета роботи

Розробити експериментальне обладнання для дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі.

Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень застосовано експериментальне обладнання, що представлено на рис. 1.

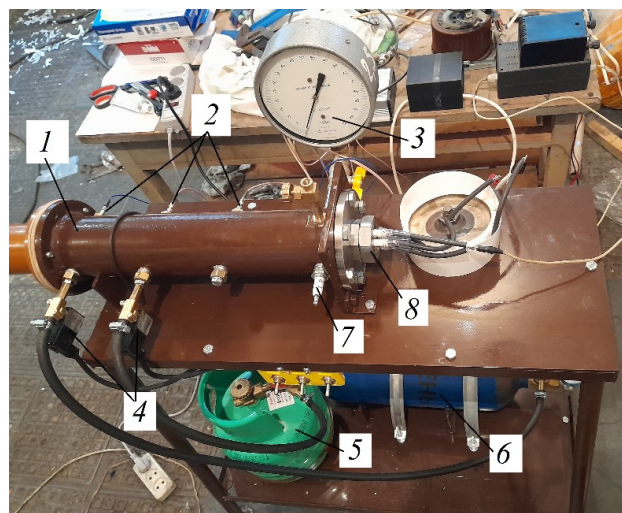


Рис. 1 – Експериментальне обладнання для дослідження впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі: 1 – детонаційна труба; 2 – п'єзо датчики тиску; 3 – зразковий манометр; 4 – електромагнітні клапани; 5 – пропановий балон; 6 – кисневий балон; 7 – свіча запалювання;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

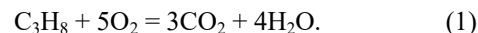
Експериментальне обладнання включало детонаційну трубу з системою іскрового запалювання та вимірвальний комплекс. Детонаційна труба являла собою сталю трубу з товщиною стінки 7 мм та внутрішнім діаметром 73 мм. Довжина труби

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 конденсатору, 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.

Формування суміші здійснювалось методом циклічного розбавлення газів у детонаційній трубці чистим киснем з послідовним її заповненням горючим газом до підвищеного тиску з формуванням частки палива у кисні за законом парціальних тисків газів.

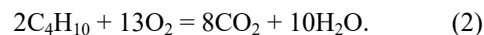
За рахунок циклічного розбавлення досягалось витіснення повітря, або відпрацьованих газів, з труби для наповнення її киснем. Цей метод було реалізовано наступним чином. Труба герметизувалась та з'єднувалась через кран з кисневим балоном високого тиску. Окремо до труби приєднувався кран для випуску стисненого газу у атмосферне середовище. Відносний поточний тиск газу у трубці визначався за допомогою зразкового манометру. Перед першим циклом розбавлення випускний кран перекривався. Далі здійснювалось наповнення труби киснем через кисневий кран. Наповнення кисню здійснювалось до моменту, коли відносний тиск досягав 0,2037 МПа. Таким чином, абсолютний початковий тиск «брудного» газу дорівнював атмосферному, а абсолютний тиск суміші «брудного» газу з киснем зростає після подачі кисню у три рази. За цього значення тиску частка кисню у суміші з «брудним» газом складе $1/3$, або 33,(3) %. Далі випускний кран відкривався, що призводило до зниження тиску газу у детонаційній трубці до атмосферного. Після випуску газів з труби співвідношення «брудний» газ/кисень зберігаються. Після другого циклу розбавлення доля «брудного» газу зменшується до $33,(3)/3 = 11,(1)$ %, після третього - до 3,7 %, після четвертого – до 1,1 % і т.д. В представлених нижче дослідженнях кількість циклів розбавлення дорівнювалась чотирьом.

В даній роботі в якості горючого газу застосовано автомобільну суміш пропан-бутан технічного (СПБТ), до якої входить приблизно 40 % пропану та 60 % бутану. Хімічна реакція згорання суміші пропану з киснем має вигляд



Тобто, об'ємна частка пропану у стехіометричній суміші складає $1/6$.

Хімічна реакція згорання суміші бутану з киснем має вигляд



Тобто, частка бутану у стехіометричній суміші складає $2/15$.

Для горючого газу СПБТ, з урахуванням об'ємної долі пропану та бутану, визначимо стехіометричний коефіцієнт:

$$k = 0,6 \frac{2}{15} + 0,4 \frac{1}{6} = 0,147. \quad (3)$$

Після завершення циклів розбавлення, до кисню зі ступенем чистоти близько 99 % додавався горючий газ для формування стехіометричної суміші. Об'ємна частка доданого газу визначалась за зміною тиску газової суміші. Розглянемо додавання горючого газу СПБТ до кисню у детонаційній трубці на прикладі. В дослідженнях застосовувався манометр, що має 100 поділок для відносного тиску в межах від 0 до 0,25 МПа. Звідси, зміні тиску у 0,1 МПа (близько 1 атм) відповідає 40 поділок манометру. Якщо до наявного кисню у детонаційній трубці, що перебуває під атмосферним тиском, додати кисню на 20 поділок, то для розрахунку необхідної кількості горючого газу вихідна кількість кисню прирівнювалась 60 поділкам. З урахуванням стехіометричного коефіцієнту $k = 0,147$, об'ємна частка горючого газу за поділками визначиться з рівняння

$$0,147 = \frac{x}{60 + x}. \quad (4)$$

Звідси маємо $x = 10,3$ поділ.

Таким чином, після завершення циклів розбавлення, перекривався випускний кран, та відкривався кран подачі горючого газу до моменту, коли тиск на манометрі не зросте на 10,3 поділки. Далі цей кран перекривався і відкривався кран подачі кисню. Подача кисню здійснювалась до моменту, коли тиск на манометрі не зросте на 20 поділок від останнього значення. Далі всі крани перекривались і здійснювалась витримка у 5 хвилин для якісного змішування суміші за рахунок дифузії. Після цього відкривався випускний кран для зменшення тиску горючої суміші до атмосферного. Точність формування об'ємної частки горючого газу у суміші з киснем в даному випадку визначається точністю манометру. Абсолютна похибка визначення об'ємної частки горючого газу складала $(1/10,3) \cdot 100 \% = 9,7 \%$, а кисню - $(1/60) \cdot 100 \% = 1,7 \%$.

Вимірний комплекс включав, окрім зразкового манометру, три п'єзо датчики тиску РСВ

PIEZOTRONICS моделі 113B22, що з'єднувались з 4-х каналним осцилографом RIGOL DS1104, термометр та дільник напруги PINTEK HVP-39pro. Чутливість датчиків тиску дорівнювала 0,145 мВ/кПа за похибки ±10%. Датчики встановлювались вздовж труби на відстані 114 мм один від одного. Відстань між закритим торцем труби та найближчим датчиком дорівнювала 185 мм.

Найбільш достовірним методом виявлення детонаційного згорання є одночасне вимірювання як тиску, так і електропровідності газового середовища. Розглянемо приклад такого аналізу, застосувавши результати вимірювань, що наведено на рис. 2.

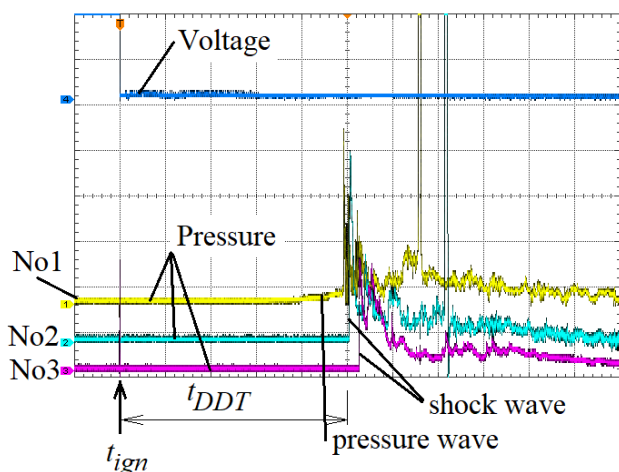


Рис. 2 – Графічні пояснення до аналізу результатів вимірювання тиску та напруги: розгортка у часі 20 мкс/поділ, розгортка за напругою складає 100 В/поділ

Різка зростання тиску у точці вимірювання відображає рух ударної хвилі через точку вимірювання. А одночасне зростання електропровідності під час стрибку тиску в цій точці відображає процес згорання горючої суміші за фронтом ударної хвилі. Це викликано тим, що електропровідність газу пов'язана з його температурою, яка різко змінюється в результаті згорання горючої суміші. Відомо, що детонаційна хвиля відрізняється від ударної хвилі тим, що за фронтом детонаційної хвилі відбувається згорання палива. Таким чином, наявність значного зростання тиску та температури в точці вимірювання свідчить про детонаційне згорання палива. Цей метод дослідження детонації застосовують, як правило, коли параметри детонаційної хвилі є не відомими. Для суміші, що досліджувалась, параметри детонаційної хвилі є відомими. Тому в даній роботі дослідження процесу ініціювання детонації здійснювалось лише за результатами вимірювання датчиків тиску. Наявність, або відсутність ініціювання детонації у точках розміщення датчиків визначалась за формою зміни тиску у точці вимірювання, значенню тиску, що виникає в точці вимірювання та визначенню

швидкості розповсюдження ударної хвилі між датчиками. Якщо за комплексом ознак виміряні параметри відповідали параметрам детонаційної хвилі, то приймався висновок щодо наявності детонаційного згорання палива.

На наведеній осцилограмі спостерігаємо розгортку у часі сигналів з трьох датчиків тиску (сигнали No1, No2, No3) та дільника напруги (сигнал Voltage). При цьому, сигнал No1 отримано з датчику тиску що ближче розташований до точки іскрового запалювання. Дільник напруги підключався до розрядних електродів. Тому коли виникав розряд конденсатора, напруга на розрядному проміжку знижувалась з декількох кіловольт до десятків вольт. Відповідно, час падіння напруги на іскровому проміжку відповідає часу іскрового запалювання горючої суміші t_{ign}. На розгортці сигналу No1 спостерігаємо спочатку повільне зростання тиску (pressure wave). На розгортках сигналів No2 та No3 спостерігаємо стрибки тиску (shock wave), що виникають під час проходження ударної хвилі через датчики тиску. Інтервал часу від початком іскрового запалювання та першим стрибком тиску на датчику тиску приймався за час переходу горіння у детонацію t_{DDT}. Враховуючи, що положення датчиків є відомим, а в даному випадку перехід горіння у детонацію відбувся між 1-м та 2-м датчиком, то маємо відстань переходу горіння у детонацію, що дорівнює від 185 мм до 299 мм. За результатами вимірювань маємо напругу U₀ на конденсаторі до пробую іскрового проміжку. Це дозволяє визначити повну енергію Q_t розряду за виразом

$$Q_t = \frac{CU_0^2}{2} \tag{5}$$

Обговорення результатів

Для підтвердження, що за результатами вимірювань має місце детонація, параметри ударних хвиль аналізувались більш ретельно. Такий аналіз здійснювався шляхом розгляду більш дрібної розгортки сигналів з датчиків тиску. Розглянемо цей аналіз на прикладі (рис. 3).

Для визначення швидкості ударної хвилі скористаємося базисним методом. За результатами вимірювань визначаємо інтервал часу між стрибками тиску Δt. Базова відстань між датчиками тиску за умовами вимірювань складає d = 114 мм.

Звідси, швидкість ударної хвилі визначиться за рівнянням

$$V = \frac{d}{\Delta t} \tag{6}$$

В наведеному прикладі (рис.3) інтервал часу між сигналами приблизно складає 2,4 поділки, що відповідає масу Δt = 48 мкс. З виразу (6) отримуємо швидкість ударної хвилі V = 2375 м/с. За даними роботи [11-20] у стехіометричній пропано-кисневій

суміші атмосферного тиску швидкість детонаційної хвилі дорівнює 2350 ± 50 м/с. Це дає підстави вважати, що виміряна ударна хвиля є детонаційною хвилею.

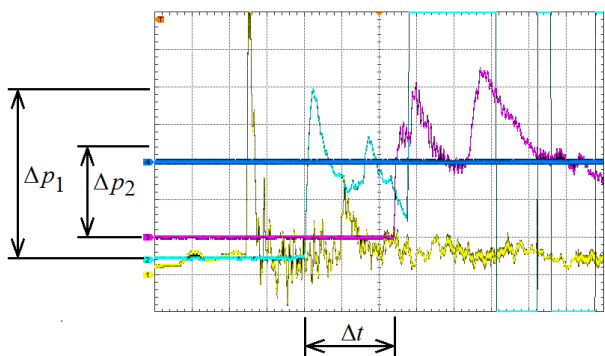


Рис. 3 – Графічні пояснення до аналізу параметрів детонаційної хвилі: розгортка у часі 20 мкс/поділ, розгортка за напругою складає 100 мВ/поділ

Здійснено аналіз стрибків тиску. За стрибком напруги на 2-му датчику спостерігаємо зростання у 4,4 поділки, що відповідає 440 мВ, та на 3-му датчику маємо зростання напруги до 240 мВ. За чутливості датчиків 0,145 мВ/кПа маємо зростання тиску до 3034 кПа на 2-му датчику та до 1655 кПа на 3-му датчику. За даними роботи [12-14], тиск детонаційної хвилі у розглянутих умовах досягає близько 1500 кПа. Маємо, що на 3-му датчику значення за тиском дуже близькі до тиску детонаційної хвилі. Перевищення тиску на 2-му датчику пояснюється наявним процесом переходу горіння в детонацію, що супроводжується виникненням перетисненої детонаційної хвилі. Таким чином, за комплексом ознак можна стверджувати щодо виникнення детонаційного згорання за результатами вимірювань.

Таким чином, розроблене експериментальне обладнання дозволяє визначити вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі.

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

Висновки

Розроблене експериментальне обладнання дозволяє визначити вплив енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації в детонаційній трубі.

Встановлено, що швидкість ударної хвилі яку можливо визначити за допомогою обладнання складає швидкість ударної хвилі $V = 2375$ м/с, а значення тиску дуже близько до тиску детонаційної хвилі.

Список літератури

1. Шевенко М. С. *Борьба с российской бронетехникой с помощью противотанковых средств ВС Украины: пособие пехотинцу*. Київ: Гром. орг. «Товариство правозахисту ветеранів правових структур». 2015.
2. Сакун О. В. Історія та перспективи застосування танкових мінометів. *Механіка та машинобудування*. 2018. 1. С. 89–96.
3. Army Recognition (n.d.) *Merkava 4*. URL: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (accessed: 05.09.2024).
4. Army Technology (n.d.) *Streetfighter and the future of the Challenger 2*. URL: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (accessed: 05.09.2024).
5. Shephard Media (n.d.) *British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept*. URL: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-h-army-demos-new-challenger-2-urban-operatio/> (accessed: 05.09.2024).
6. Korytchenko K., Senderowski C., Samoilenko D., et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen–oxygen mixture and in nitrogen. *Shock Waves*. 2022. 32. pp. 321–335. doi: 10.1007/s00193-022-01077-3.
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A. and Tsebriuk 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. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Varshamova I., et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2019. 122(4). P. 116–119. doi: 10.46813/2019-122-116
9. Korytchenko K. and Poklonskiy Ye. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013. 4. P. 155–160.
10. Любарський Б. Г., Кривошеєв С. Ю., Єресько О. В., Галиця В. І., Поляков І. В. та Любарський Д. Б. Експериментальне дослідження процесу нагнітання стисненого газового заряду у газо-детонаційному мінометі. *Механіка та машинобудування*. 2024. 1. С. 157–168.
11. Wang Q., Xiang J., Chen G., Cheng Y., Zhao X. and Zhang S. Polypropylene flow, microstructure and performance of WC–12Co coatings using a gas–fuel HVOF spray process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013. 213(10). P. 1653–1660. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007.
12. Ng H. D. and Lee J. H. S. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. 32(1). P. 93–99. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.03.012.
13. Zitoun R., Desbordes D., Guerraud C. and Deshaies B. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures. *Shock Waves*. 1995. 4(6). P. 331–337. doi: 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 – Conf. Proc.*, 5-10 October 2020. P. 421–424. doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172.

15. Kamenskihs V., Ng H. D. and Lee J. H. S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures. *Combustion and Flame*. 2010. 157. P. 1795–1799. doi: 10.1016/j.combustflame.2010.02.014.
16. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Varshamova I., et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2020. 59. SHHC04. doi: 10.35848/1347-4065/ab72cc.
17. Korytchenko K., Markov V., 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. 116(4). P. 144–149.
18. Korytchenko K., Golota V., et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015. 97(3). P. 154–158.
19. Vinnikov D., Korytchenko K. and Sakun A. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015. 98(4). P. 220–223.
20. Korytchenko K. V., Kashanskyi Y. V., Cherkashyn O. V., et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2020. 130(6). P. 165–168. doi: 10.46813/2020-130-165.
8. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Varshamova I., et al. Numerical simulation of initial pressure effect on energy input in spark discharge in nitrogen. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2019, 122(4), pp. 116–119, doi: 10.46813/2019-122-116.
9. Korytchenko K. and Poklonskiy Ye. Numerical simulation of gas-dynamic stage of spark discharge in oxygen. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2013, 4, pp. 155–160.
10. Liubarskyi B. G., Kryvosheiev S. Yu., Yeresko O. V., Halytsia V. I., Polyakov I. V. and Liubarskyi D. B. Eksperimental'ne doslidzhennya protsesu nagnitannya stysnenoho hazovoho zaryadu u hazo-detonatsijnomu minometi. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*, 2024, 1, pp. 157–168.
11. Wang Q., Xiang J., Chen G., Cheng Y., Zhao X. and Zhang S. Propylene flow, microstructure and performance of WC–12Co coatings using a gas–fuel HVOF spray process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(10), pp. 1653–1660, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007.
12. Ng H. D. and Lee J. H. S. Assessment of detonation hazards in high-pressure hydrogen storage from chemical sensitivity analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(1), pp. 93–99, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.03.012.
13. Zitoun R., Desbordes D., Guerraud C. and Deshaies B. Direct initiation of detonation in cryogenic gaseous H₂-O₂ mixtures. *Shock Waves*, 1995, 4(6), pp. 331–337, doi: 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 – Conf. Proc.*, 5-10 October 2020, pp. 421–424, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250172.

References (transliterated)

1. Shevenko M. S. *Bor'ba s rossijskoj bronetehnikoj s pomoshch'ju protivotankovykh sredstv VS Ukrainy: posobie pekhotintsu*. Kyiv. Hrom. org. «Tovarystvo pravozakhystu veteraniv pravovykh struktur». 2015.
2. Sakun O. V. Istoriya ta perspektyvy zastosuvannya tankovykh minometiv. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*, 2018, 1, pp. 89–96.
3. Army Recognition (n.d.) *Merkava 4*. Available at: <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/main-battle-tanks/main-battle-tanks/merkava-iv-4-israel-uk> (accessed: 05.09.2024).
4. Army Technology (n.d.) *Streetfighter and the future of the Challenger 2*. Available at: <https://www.army-technology.com/features/streetfighter-challenger-2/?cf-view> (accessed: 05.09.2024).
5. Shephard Media (n.d.) *British Army demos new Challenger 2 urban operation tank concept*. Available at: <https://www.shephardmedia.com/news/landwarfareintl/british-army-demos-new-challenger-2-urban-operatio/> (accessed: 05.09.2024).
6. Korytchenko K., Senderowski C., Samoilenko D., et al. Numerical analysis of the spark channel expansion in a high-pressure hydrogen–oxygen mixture and in nitrogen. *Shock Waves*, 2022, 32, pp. 321–335, doi: 10.1007/s00193-022-01077-3.
7. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Nikorchuk A. and 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]), pp. 47–54.
15. Kamenskihs V., Ng H. D. and Lee J. H. S. Measurement of critical energy for direct initiation of spherical detonations in stoichiometric high-pressure H₂-O₂ mixtures. *Combustion and Flame*, 2010, 157, pp. 1795–1799, doi: 10.1016/j.combustflame.2010.02.014.
16. Korytchenko K., Tomashevskiy R., Varshamova I., et al. Numerical investigation of energy deposition in spark discharge in adiabatically and isothermally compressed nitrogen. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59, SHHC04, doi: 10.35848/1347-4065/ab72cc.
17. Korytchenko K., Markov V., 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, 116(4), pp. 144–149.
18. Korytchenko K., Golota V., et al. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, 97(3), pp. 154–158.
19. Vinnikov D., Korytchenko K. and Sakun A. Numerical investigation of the formation of chemically active components in the spark discharge in water vapors. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2015, 98(4), pp. 220–223.
20. Korytchenko K. V., Kashanskyi Y. V., Cherkashyn O. V., et al. Comparison of spark channel expansion in hydrogen, oxygen and nitrogen. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2020, 130(6), pp. 165–168, doi: 10.46813/2020-130-165.

Відомості про авторів (About authors)

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-2985-7345; e-mail: lboris1911@ukr.net.

Liubarskyi Borys – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of Department of Electrical Transport and Diesel Locomotive, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2985-7345; e-mail: lboris1911@ukr.net.

Кривошеєв Сергій Юрійович – Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-8771-2961; e-mail: Serhii.Kryvosheiev@khpі.edu.ua.

Kryvosheiev Serhii – PhD, Associate Professor, head of Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-8771-2961; e-mail: Serhii.Kryvosheiev@khpі.edu.ua.

Єресько Олександр В'ячеславович – Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-3521-5314; e-mail: oleksandr.eresko@khpі.edu.ua.

Eresko Olexsandr – PhD, Associate Professor, Docent of Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-3521-5314; e-mail: oleksandr.eresko@khpі.edu.ua.

Галиця Віталій Іванович – Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-3521-5314; e-mail: vitaliy.galitsa@gmail.com.

Halysia Vitalii – – PhD, Associate Professor, Docent of Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-3521-5314; e-mail: oleksandr.eresko@khpі.edu.ua.

Сакун Олександр Валерійович – доктор технічних наук, Військового інституту танкових військ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри військової підготовки, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-2964-071X, e-mail: sakunav71@gmail.com.

Sakun Olexsandr – Doctor of Technical Sciences, head of of Military Training, Military Institute of Tank Troops of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2964-071X, e-mail: sakunav71@gmail.com.

Любарський Дмитро Борисович – інженер кафедри «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0003-3535-9809; e-mail: dizas005@ukr.net.

Liubarskyi Dmytro – Engineer Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-3535-9809; e-mail: dizas005@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Любарський Б. Г., Кривошеєв С. Ю., Єресько О. В., Галиця В. І., Сакун О. В., Любарський Д. Б. Обладнання для визначення впливу енергії іскрового запалювання на процес ініціювання детонації. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 3 (25). С. 13-19. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.02.

Please cite this article as:

Liubarskyi B., Kryvosheiev S., Eresko O., Galitsa V., Sakun O., Liubarskyi D. Equipment for determining the influence of spark ignition energy on the detonation initiation process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 3(25), pp. 13–19, doi:10.20998/2413-4295.2025.03.02.

*Надійшла (received) 02.08.2025
Прийнята (accepted) 19.09.2025*