



<https://doi.org/10.15407/scin16.06.105>

Ю.О. ХАРЛАМОВ¹, Л.Г. ПОЛОНСЬКИЙ²,
Н.О. БАЛИЦЬКА², С.А. КЛИМЕНКО³

¹ Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,
просп. Центральний, 59-а, Сєвєродонецьк, 93400, Україна,
+380 6452 403 42, uni@snu.edu.ua, uni.snu.edu@gmail.com

² Державний університет «Житомирська політехніка»,
вул. Чуднівська, 103, Житомир, 10005, Україна,
+380 412 24 1422, officerector@ztu.edu.ua

³ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська, 2, Київ, 04074, Україна,
+380 44 430 8500, +380 44 468 8632, atm@ism.kiev.ua

ІННОВАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ГАЗОВОЇ ДЕТОНАЦІЇ

Вступ. Вибухові технології знаходять широке застосування у видобувних галузях промисловості, в машинобудуванні для зварювання, зміцнення та ін. Однак використання твердих вибухових речовин обмежено, перш за все, вимогами безпеки. Тому все більшу увагу викликає використання більш безпечного й зручного джерела енергії — газової детонації. Рівень тисків, температур і швидкостей, що розвиваються за детонаційними або близькими до них за інтенсивністю ударними хвилями в газах, а також імпульсний характер впливу зазначених факторів, визначають високі потенційні можливості їх технічного та технологічного використання.

Проблематика. У багатьох технічних системах переважають дефлаграційні режими горіння. Однак термодинамічно вигіднішим способом спалювання і перетворення хімічної енергії палива в корисну роботу є детонаційний режим горіння. Це обумовлює доцільність розробки, дослідження і більш широкого впровадження різноманітних технологій і пристроїв з використанням керованої газової детонації.

Мета. Систематизація та аналіз основних тенденцій розвитку та розробки детонаційно-газових технологій і пристроїв в Україні та світі.

Матеріали та методи. Систематизація та аналіз наукових публікацій і патентів щодо практичного застосування газової детонації в різних сферах економіки.

Результати. Виявлено та проаналізовано тенденції практичного використання газової детонації в різних галузях промисловості. Пріоритетні розробки з технологічного застосування методу в машинобудуванні виконано в Україні. Проте за низкою технічних напрямків спостерігається відставання науково-дослідних робіт зі створення детонаційно-газових технологій і пристроїв.

Висновки. Для практичного використання можливостей газової детонації необхідною є розробка принципово нових пристроїв, що забезпечують надійне, безпечне й кероване виникнення і поширення детонаційних хвиль в газах і розпорощених паливах. Газова детонація є перспективною для створення більш досконалих технологій та обладнання.

Ключові слова: газова детонація, горіння, детонаційно-газові технології, обробка матеріалів, галузі техніки.

Цитування: Харламов Ю.О., Полонський Л.Г., Балицька Н.О., Клименко С.А. Інноваційні можливості газової детонації. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 6. С. 105–112. <https://doi.org/10.15407/scin16.06.105>

ISSN 1815-2066. *Nauka innov.* 2020. 16(6)

105

Принципові структури технічних систем (ТС) для реалізації необхідних функцій базуються на використанні різних фізико-технічних ефектів, часто використовуваними з яких є процеси горіння палива. На сьогодні в ТС переважно застосовують дефлаграційний режим горіння, при якому полум'я поширюється з дозвуковою швидкістю. Однак відомі й за більше ніж сто років фундаментальною наукою достатньо добре вивчено умови виникнення детонаційних режимів горіння, при яких полум'я поширюється з надзвуковою швидкістю. Особливий інтерес становить газова детонація (ГД) в сумішах горючих газів з окиснювачами або розпиленого рідкого палива. ГД — це режим поширення горіння, який самопідтримується та характеризується комплексом із ударної хвилі та подальшої зони екзотермічних хімічних реакцій, ініційованих ударним стисненням [1]. Цей комплекс називається детонаційною хвилею, яка поширюється з надзвуковою швидкістю.

Фронт детонаційної хвилі — це поверхня гідродинамічного нормального розриву. Газова суміш при проходженні фронту ударної хвилі нагрівається. Якщо ударна хвиля досить сильна, то температура за її фронтом може перевищити температуру самозаймання і в газовій суміші відбуваються екзотермічні хімічні реакції, в ході яких виділяється енергія, що підживлює ударну хвилю. При дефлаграційному горінні, що поширюється з дозвуковою швидкістю, передача енергії у вихідну суміш здійснюється переважно теплопровідністю. Для виникнення ГД необхідні певні умови — її необхідно ініціювати зовнішнім впливом (механічним або тепловим). Лише у виключних випадках повільне горіння може мимовільно переходити в детонацію.

Швидкість поширення фронту детонаційної хвилі відносно вихідної газової суміші (швидкість детонації) залежить тільки від складу й стану детонуючої суміші і може досягати декількох кілометрів за секунду.

Термодинамічно детонація є найефективнішим способом прямого спалювання палива й при її використанні двигуни та інші пристрої повинні мати максимально можливу термодинамічну ефективність [1]. Параметри газу при детонаційному спалюванні є набагато вищими, ніж при звичайному спалюванні. При детонації в камері згоряння різко зростає тиск продуктів згоряння, які розширюються, охолоджуються і викидаються в навколишній простір, звільняючи обсяг для нової порції газів. В пульсуючих детонаційно-газових пристроях цикл повторюється з певною частотою. В стадії дослідження і розробки знаходяться принципи та пристрої, що реалізують безперервну ГД.

Високі температури, тиски та швидкості, що розвиваються при ГД, роблять перспективним використання зазначеного явища в техніці.

Вибухові технології знаходять все більш широке застосування в різних галузях господарювання — видобувна промисловість, машинобудування тощо. Однак використання твердих вибухових речовин (ВР) обмежене, перш за все, вимогами безпеки. Газова детонація є більш безпечним і зручним джерелом енергії. Рівень тисків, температур і швидкостей, що розвиваються за детонаційними або близькими до них за інтенсивністю ударними хвилями в газах, а також імпульсний характер впливу зазначених факторів, визначають значні потенційні можливості їх технічного та технологічного використання. Керована газова детонація останнім часом широко застосовується в енергетиці, створенні нових ефективних двигунів і технологій отримання та обробки матеріалів з унікальними властивостями тощо. Детонаційно-газові технології та пристрої мають перспективи подальшого розвитку, а відповідні розробки можуть бути використані в інноваційних проєктах.

Метою викладеного дослідження було визначення, систематизація та аналіз основних тенденцій розвитку та розробки детонаційно-газових технологій і пристроїв в світі та в Ук-

раїні. Було проведено систематизацію та огляд наукових публікацій і патентів вітчизняних та зарубіжних вчених щодо практичного застосування газової детонації в різних галузях науки й техніки.

В результаті глибокого аналізу наукових джерел було виявлено та проаналізовано тенденції практичного використання газової детонації як джерела енергії за галузями промисловості. Так, пріоритетні розробки щодо технологічного застосування ГД в машинобудуванні виконано в Україні. Проте в низці науково-технічних напрямів спостерігається відставання в проведенні науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) зі створення і більш широкого застосування детонаційно-газових технологій і пристроїв. Це стосується галузей енергетики, створення нових двигунів та ін. Нижче більш детально розкрито перспективні інноваційні напрямки використання ГД в галузях господарювання.

Енергетика і двигуни

Нагрівальні пристрої. При успішному вирішенні проблеми циклічної детонації повітряних сумішей звичайних палив (природний або попутний газ, вугільні частинки, мазут та ін.) очікується значна економія пального, а також зниження виходу шкідливих речовин внаслідок дуже малої тривалості детонаційного циклу [2]. Традиційні пальники використовують принцип звичайного повільного спалювання природного газу (дефлаграції), максимальна температура полум'я яких не перевищує 1900 °С, а швидкість — 200–220 м/с. Використання імпульсно-детонаційного горіння газо-повітряної суміші забезпечує значно вищий технологічний рівень перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію і механічну роботу. Семикратне збільшення швидкості витікання продуктів горіння підвищує теплопередачу від продуктів детонації до теплоносія через різке збільшення конвективної складової. Використання пальників імпульсного детонаційного горіння (ПІДГ) дозволить

істотно підвищити технологічну, екологічну та економічну ефективність процесів нагріву в промисловості.

Імпульсне очищення конвективних поверхонь нагріву від зольних відкладень викидами продуктів газової детонації забезпечує підвищення ефективності теплообміну та роботи парових і водонагрівальних котлів, технологічних агрегатів, що спалюють різні види рідкого та твердого палива, а також економію палива [3]. Очищення відбувається в результаті впливу ударної хвилі та продуктів згоряння, що витікають з камери згоряння, на відкладення на поверхнях нагріву. Зольні відкладення з димових газів на поверхнях нагріву знижують економічність роботи агрегатів (зменшують ККД на 2–3 %). Газоімпульсне очищення дозволяє підтримувати чистоту поверхонь нагріву та значення ККД агрегатів, близьке до розрахункового. Зазначену технологію вже досить широко застосовують в промислових котлоагрегатах, котлах-утилізаторах металургійних, хімічних і нафтохімічних виробництв, нагрівальних печах нафтопереробних заводів тощо.

Імпульсні детонаційні двигуни (ІДД). Ще в 1940 р. Я.Б. Зельдович довів, що прямоточні повітряно-реактивні двигуни, що використовують детонаційне згоряння палива, повинні мати максимально можливу термодинамічну ефективність. Науково-дослідні роботи зі створення імпульсних детонаційних двигунів особливо активно ведуться в США і Російській Федерації, де вони перейшли на стадію НДДКР. Масштабні роботи виконуються в компаніях *Pratt & Whitney* (США) і *General Electric* (США). Силкові установки літальних апаратів, робота яких базується на принципі газової детонації, забезпечать економію палива до 30 % при числі Маха польоту 2,5 і до 20 % при числі Маха 3, а також збільшення дальності польоту апаратів з такими двигунами або заміну значної частини палива на корисне навантаження [4, 5]. Основні напрямки застосування таких двигунів — економічно вигідні доставки боєприпа-

сів, силові установки для літаків-мішеней і безпілотних літальних апаратів, а також крилатих ракет. У перспективі вони можуть бути використані і для форсування тяги пілотованих літальних апаратів. Розробкою детонаційної газотурбінної установки займаються ВМС США для встановлення на надводних кораблях замість традиційних газотурбінних двигунів. Ведуться розробки також енергетичних установок детонації природного газу, зокрема й силові установки газоперекачувальних агрегатів для магістральних газопроводів з метою зниження власного споживання природного газу газотранспортними компаніями [4].

Нафтогазова промисловість

На сьогодні опрацьовуються технічні рішення з використання газовой детонації для впливу на тріщинуватий пласт-колектор вуглеводнів (нафтові свердловини) для збільшення кінцевої нафтовіддачі пластів і дебіту свердловин [6]. Детонаційне горіння застосовують для підвищення надійності розпалювання газових пальників факельних установок висотного й наземного типу для спалювання скидних газів і багатofазних систем промислових стоків на газових і нафтових родовищах, на підприємствах нафтової, хімічної та нафтохімічної галузей [7].

Детонаційно-газове напилення (ДГН) зміцнюючих покриттів застосовують для підвищення абразивної стійкості бурового інструменту (шарошки тришарошкові та алмазні бурові долота), для відновлення і зміцнення деталей обладнання [8]. Виготовлені за допомогою ДГН багатшарові кумулятивні облицювання для перфорації нафто- і газодобувних свердловин мають на 25–35 % підвищену пробивну здатність.

Гірська промисловість

Термодинамічні бури для руйнування міцних гірських порід, що використовують режим детонаційного горіння, забезпечують збільшення в 2–2,5 рази виходу блочного каменю (гранітів) підвищеної якості [9]. У Росії та США проведено роботи зі створення бульдозерів із газоімпульсним робочим вузлом [10].

Ведуться розробки газодетонаційних млинів для подрібнення матеріалів, зокрема для тонкого й надтонкого помелу, наприклад, пігментів, що забезпечує зниження енергоємності процесів подрібнення [11].

Металургійна промисловість

Імпульсно-детонаційні газові пальники для промислових печей і теплоенергетичних установок забезпечують зниження питомої витрати природного газу не менш ніж на 8–10 %; збільшення швидкості і, відповідно, зниження часу процесу нагріву; зменшення втрат на окислювання. Крім того, зазначені технології оптимізують використання виробничих площ, збільшують термін служби пальників, зменшують витрати на екологічні заходи та ін. [10].

В роботі низки підприємств застосовують імпульсне очищення поверхонь нагріву котлів-утилізаторів [12]. Для поділу на частини сортових гарячих сталевих заготовок на машинах безперервного лиття заготовок, в прокатному виробництві впроваджено машини імпульсного різання, що використовують приводи з імпульсним вигоранням горючої суміші [13].

Хімічна та нафтохімічна промисловість

Газофазний детонаційний синтез застосовують для отримання полікристалічного і нанорозмірного діоксиду титану, отримання наноглобулярного вуглецю, зокрема й прекурсорів для виробництва фулеренів, вуглецевих нанотрубок, графену, карбінів та ін. [14, 15].

Обробку дисперсних частинок газовой детонацією застосовують для отримання оксидів металів з їхніх солей, перебудови кристалічної структури металів або випаровування рідини з розчинів для отримання твердих речовин або твердих розчинів, отримання аморфних і швидкозагартованих порошків, сфероїдизації та відновлення порошків оксидів, отримання ацетиленової сажі, високодисперсного порошку цирконат-титанату свинцю, широко використовуваного для виробництва радіокомпонентів на основі електронної кераміки та ін. [16].

Машинобудування є провідною галуззю з розробки й використання детонаційно-газових

технологій та пристроїв, багато з яких сконструйовано саме в Україні. При обробці металів тиском пристрої з використанням ГД застосовують для імпульсного різання холоднопрокату ударом коротких ножів з великим кутом клиноподібності для отримання заготовок з пластичних сталей, а також з відносно крихких сталей із підвищеним вмістом вуглецю, марганцю і т.п. Також ГД використовують для отримання заготовок для подальшої прокатки, облойного штампування довгомірних виробів, а також штампування в торець [17], для виготовлення високошвидкісних енергоприводів для виконання операцій вільного кування або гарячого штампування деталей за один або кілька переходів, виготовлення заготовок і деталей з важкодеформованих матеріалів [13]. Зазначена технологія є ефективною для листового штампування й формування тонколистових матеріалів [17], в машинах для імпульсного брикетування сипучих матеріалів, отримання брикетів досить високої міцності і щільності для переплавки, формування різних виробів зі стружки чорних металів, наприклад, вкладишів-пробок для захисту дна глухдонних виливниць при заливці в них сталі, витратних електродів з титанової губки, а також брикетів зі стружки титанових сплавів та для ущільнення пористої маси в газових балонах [17].

Найбільш відомими є виконані в Україні розробки щодо детонаційно-газового напилення, щоб забезпечити отримання покриттів з підвищеною міцністю та щільністю [17–20]. ГД використовують також в обладнанні для поверхневої термічної обробки (імпульсні плазмово-детонаційні генератори) при зміцненні деталей та інструментів; в термохімічних і термоімпульсних установках для видалення задирок, притуплення кромки довільного радіусу, очищення від технологічних забруднень зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей [21], струменево-абразивної обробки тощо.

Будівництво і виробництво будівельних матеріалів

Технології, засновані на використанні ГД, застосовують для обвалення споруд (знесення старих будівель, споруд, розчищення завалів), для усунення крижаних заторів на річках, розкорчування пеньків. Ця технологія доцільна для підвищення ефективності руйнування великих фрагментів об'єктів та підвищення безпеки робіт за рахунок зниження дальності розкидання уламків [22], для руйнування і розробки ґрунтів, їх переміщення, укладання та ущільнення [10]. Ущільнення ґрунту присвердловинного простору підвищує опорну здатність буронабивних паль більш ніж вдвічі [22]. Ущільнені за допомогою ГД бетони мають поліпшені характеристики, приріст їхньої міцності досягає 20–40%.

Сільське і лісове господарство

Обробка ґрунту методом ГД забезпечує можливість виконання робіт на засіяних полях, оскільки при цьому не ушкоджуються молоді рослини, а схожість насіння бавовнику та кукурудзи збільшується до 15 %, терміни повної схожості зменшуються на 2–3 дні, терміни дозрівання бавовнику скорочуються на 10–14 днів внаслідок прискорення розвитку рослини на всіх фазах. Крім того, підвищується накопичення поживних речовин в різних частинах рослини (коріння, листя, стебла, волокна) і за рахунок цього збільшується врожайність бавовнику в середньому на 10 %, а також відбувається зростання загального рівня біологічної активності ґрунту [23, 24]. ГД використовується також для боротьби з шкідниками та бур'янами, передпосівної обробки насіння і знищення лялечок шовковичного шовкопряда, збору врожаю бавовни [24]. Ефективним є також застосування ГД з метою відлякування птахів і диких тварин для захисту виноградників, садів, рисових і зернових культур, а також в аеропортах (для запобігання потрапляння птахів в двигуни літаків) і рибних розплідниках (для відлякування птахів від води) та ін.

Геологія і розвідка надр

Джерела сейсмічних коливань на основі ГД застосовують для пошуку й розвідки родовищ

корисних копалин, інженерно-геологічних і гідроакустичних досліджень.

Житлово-комунальне господарство

Технології, що базуються на ГД, застосовують для відновлення продуктивності водозабірних свердловин, оскільки вони є достатньо простими, доступними, низьковартісними. ГД застосовують також для подрібнення і плавлення сніжно-крижаної маси, утилізації (спалювання) відходів, дроблення автопокришок для подальшої переробки.

Ліквідація надзвичайних ситуацій

Розроблено технології на основі ГД для мятання вогнегасних речовин, дистанційного гасіння великих пожеж, локалізації лісових пожеж (отримання протипожежних розривів). Для ліквідації пожеж в будівлях створено ранцеві установки періодично-імпульсної дії газозводного гасіння. Ефективним також є застосування систем на основі ГД для примусового спуску лавин.

Охорона здоров'я

Розроблено системи на основі ГД для безголкових ін'єкцій, зменшення болю і зниження ушкодження тканин.

Військова справа

ГД використовується в боєприпасах об'ємного вибуху, для розмінування (порівняно з ручним способом досягається зниження економічних витрат в 5 разів та зростання продуктивності більш ніж у 100 разів), в газодетонаційних вогнеметах, при утилізації боєприпасів (дроблення зарядів твердих вибухових речовин).

Інші застосування газової детонації

Практика використання явища газової детонації безперервно розширюється, збільшується число відповідних винаходів і технічних рішень в різних сферах господарювання. Як приклад можна зазначити ініціювання горіння і вибуху твердих та рідких вибухових речовин, зокрема надійне ініціювання одночасного підриву великої кількості рознесених зарядів; прискорення компактних тіл при балістичних та інших експериментах. Дієвим є викорис-

тання імпульсного ударного і конвективно-теплого впливу детонаційно-газового струменя для газифікації важких фракцій нафти і вугілля, побутових і промислових відходів, дроблення гірських порід, льоду і т. д.

Існує безліч фундаментальних і технічних проблем, що перешкоджають використанню газової детонації в технічних пристроях. Одна з ключових проблем — ініціювання детонації у відносно коротких трубах (довжиною до 1 м) при низькій енергії запалювання суміші (до декількох джоулів). Забезпечення швидкого переходу горіння в детонацію у вуглеводнеповітряних сумішах при мінімальній енергії запалювання — найважливіша фундаментальна проблема, вирішення якої відкриває шляхи практичного використання газової детонації. Огляд матеріалів за цією проблематикою виконано в роботі [25].

Таким чином, для практичного використання можливостей газової детонації необхідною є розробка принципово нових спеціальних пристроїв, що забезпечують надійне, безпечне й кероване виникнення та поширення детонаційних хвиль в газах і розпоршених паливах. Так, в Україні розроблено та впроваджено ефективні технології й обладнання, що використовують газову детонацію для напилення покриттів, видалення задирок і очищення поверхонь деталей. Особливий інтерес для застосування ГД становлять енергетика, створення нових двигунів і пристроїв нагрівання.

Газова детонація як фізико-технічний ефект спричиняє суттєвий міжгалузевий інтерес для пошуку оптимальних технічних рішень і є перспективною для використання при концептуальному проектуванні нових технологій і обладнання.

Доцільним також є узагальнення теорії та практики газової детонації з описом на рівні, прийнятому для фізико-технічних ефектів [26], а також створення відповідних навчально-методичних та інженерно-довідкових посібників з детонаційно-газових технологій та обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Roya G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. No. 30. P. 545–672.
2. Frolov S.M., Aksenov V.S., Avdeev K.A., Borisov A.A., Gusev P.A., Ivanov V.S., Koval' A.S., Medvedev S.N., Smetanyuk V.A., Frolov F.S., and Shamshin I.O. Thermal tests of a pulse-detonation high-speed burner. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2013. V. 7, no. 6. P. 748–752.
3. Погребняк А.П., Кокорев В.Л., Кокорев А.Л., Моисеенко И.О., Гульгьяев А.В., Ефимова Н.Н. О внедрении систем импульсной очистки поверхностей нагрева. Опыт сотрудничества с предприятиями котлостроения. *Новости теплоснабжения*. 2014. № 1. С. 22-24.
4. Фролов С.М. Импульсное детонационное горение: новое поколение энергетических установок. *Интеграл*. 2008. № 3 (41). С. 44–45.
5. *Импульсные детонационные двигатели* / под ред. С.М. Фролова. Москва: Торус пресс, 2006. 592 с.
6. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Будков А.М., Свинцов И.С. Новый сейсмический источник и некоторые перспективы его применения. *Геофизика*. 2003. № 6. С. 17–24.
7. *Патент № 2294485, Российская Федерация*. Болотов А.А., Крылов Г.В. Способ газодинамического розжига газовых горелок факельных устройств.
8. Калашников В.В., Деморецкий Д.А., Ненашев Д.А., Трохин О.В. Разработка перспективных детонационных технологий для нефтегазовой промышленности. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2012. № 4. С. 335–347.
9. Поветкин В.В., Керимжанова М.Ф., Букаева А.З. Разработка термодинамического бура для разрушения крепких горных пород. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. 2017. № 4 (59). С. 56–63.
10. *Взрывоимпульсное разрушение горных пород*. Москва: Наука, 1979. 230 с.
11. Войтенко А.Е., Мелихов В.П. Газодетонационные мельницы. *Наука та інновації*. 2006. Т. 2, № 3. С. 111–113.
12. Щелоков Я.М., Аввакумов А.М., Сазыкин Ю.К. *Очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов*. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
13. Кривцов В.С., Мазниченко С.А., Застела А.Н., Обрываева Т.Е. Импульсная резка горячего металла. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 26–34.
14. Ли С.-Цз., Оуян С., Янь Х.-Х., Цюй Я.-Д., Мо Ф. Синтез наночастиц TiO₂ из тетрахлорида титана в процессе газовой детонации. *Физика горения и взрыва*. 2008. Т. 44, № 5. С. 112–116.
15. Янь Х.-Х., Хуан С.-Ч., Си Ш.-С. Использование этанола для получения наноразмерного диоксида титана в процессе газовой детонации. *Физика горения и взрыва*. 2014. Т. 50, № 2. С. 77–80.
16. Сычевский В.А. Обработка частиц газовой детонацией. *Теплофизика высоких температур*. 2008. Т. 46, № 5. С. 751–759.
17. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. *Детонационно-газовые процессы в промышленности*. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. 223 с.
18. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. *Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий*. Москва: Наука, 1978. 224 с.
19. Зверев А.И., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. *Детонационное напыление покрытий*. Ленинград: Судостроение, 1979. 232 с.
20. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардаговская Е.Н. *Газотермические покрытия из порошковых материалов*: Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
21. Трифонов О. В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2013. Вып. 1. С. 115–121.
22. Какенов К.С. *Современные методы уплотнения грунтов взрывными воздействиями. Анализ последствий аварийных взрывов*. Караганда: КЭУ, 2012. 361 с.
23. Панов И.М., Ветехин В.И. *Физические основы механики почв*. Киев: Феникс, 2008. 266 с.
24. Тожиев Р.Ж. Механико-технологические решения бесконтактного воздействия на почву и растения с разработкой газодетонационных агрегатов для высокоэффективного возделывания хлопчатника: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Москва, 1993. 38 с.
25. Харламов Ю.А. Управляемое инициирование газовой детонации. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2017. № 7 (237). С. 101–113.
26. Половинкин А.И. *Основы инженерного творчества*. Москва: Машиностроение, 1988. 368 с.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.10.19

Статтю прорецензовано / Revised 09.12.19

Статтю підписано до друку / Accepted 17.02.20

Kharlamov, Yu.A.¹, Polonsky, L.G.², Balytska, N.O.², and Klymenko, S.A.³

¹ Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,
59-a, Central Ave., Severodonetsk, 93400, Ukraine,
+380 6452 403 42, uni@snu.edu.ua, uni.snu.edu@gmail.com

² Zhytomyr Polytechnic State University,
103, Chudnivska St., Zhytomyr, 10005, Ukraine,
+380 412 24 1422, officerector@ztu.edu.ua

³ Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine,
2, Avtozavodska St., Kyiv, 04074, Ukraine,
+380 44 430 8500, atmu@ism.kiev.ua

INNOVATIVE POTENTIAL OF GAS DETONATION

Introduction. Explosive technologies are widely used in the extraction industries, in mechanical engineering for welding, hardening, etc. However, the use of solid explosives is limited, above all, by safety requirements. Therefore, the use of a safer and more convenient source of energy, gas detonation, is attracting much attention. Pressures, temperatures, and velocities in detonation waves or shock waves in gases close to them in terms of intensity, as well as the pulse nature of the influence of these factors determine a high potential of their technical and technological use.

Problem Statement. In many technical systems, deflagration modes of burning prevail. However, a more thermodynamically advantageous method of combustion and conversion of chemical energy of fuel into useful work is the detonation mode of combustion. This ensures the feasibility of development, research and wider implementation of various technologies and devices using controlled gas detonation.

Purpose. Systematization and analysis of the main trends in the development and design of detonation gas technologies and devices in Ukraine and throughout the world.

Materials and Methods. Systematization and analysis of scholarly research publications and patents on the practical application of gas detonation in various sectors of the economy.

Results. The tendencies of practical use of gas detonation in different branches of industry have been revealed and analyzed. Priority developments in the technological application of the method in mechanical engineering have been performed in Ukraine. However, in many technical areas Ukraine has fallen behind the world leaders in terms of the creation of detonation gas technologies and devices.

Conclusions. For the practical use of the potential of gas detonation, it is necessary to develop fundamentally new devices that ensure reliable, safe, and controllable generation and propagation of detonation waves in gases and sprayed fuels. Gas detonation is promising for the creation of more advanced technologies and equipment.

Keywords: gas detonation, combustion, detonation-gas technologies, material processing, and branches of engineering.