

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”

УДК 621.3



КОРИТЧЕНКО КОСТЯНТИН ВОЛОДИМИРОВИЧ

ВИСОКОВОЛЬТНА ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНА ТЕХНІКА ГЕНЕРУВАННЯ
УДАРНИХ ХВИЛЬ ТА НАГРІВАННЯ РЕАГУЮЧИХ ГАЗОВИХ
СЕРЕДОВИЩ

Спеціальність – 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий

консультант:

доктор технічних наук, професор

Болюх Володимир Федорович,

Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, м. Харків,

професор кафедри загальної електротехніки

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор

Щерба Анатолій Андрійович,

Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ,

завідувач відділу

доктор технічних наук, доцент

Дубовенко Костянтин Вікторович,

Миколаївський національний аграрний університет,

завідувач кафедри електротехнологій та електропостачання

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Панкратов Ігор Михайлович,

Інститут фізики плазми Національного наукового центру „Харківський фізико-технічний інститут”,

провідний науковий співробітник

Захист відбудеться 29 травня 2014 р. о 12 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий „25” квітня 2014 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сильнотривого іскрового розряду в реагуючих газах на стадії формування і розширення електроплазмового каналу визначається взаємним зв'язком первинних електрофізичних і вторинних фізико-хімічних процесів (нерівноважних коливальних і електронних збуджень молекул, іонізації, нагрівання, випромінювання, генерування ударної хвилі, дисоціації і хімічних реакцій). В більшості електророзрядних технологій використовуються тільки окремі складові електроіскрових процесів. Так, енергоефективність електроіскрових розрядів в джерелах світла характеризується параметрами електромагнітного випромінювання, в електросистемах ініціювання детонації – характеристиками ударної хвилі, а в устаткуванні електроіскрового запалювання – параметрами газової області, що нагрівається.

Виявлення нових взаємних зв'язків між параметрами високовольтного електричного розрядного кола і електроімпульсними процесами в іскрових газових каналах дозволяє використовувати їх для вибіркового регулювання фізико-хімічних процесів, необхідних для реалізації тих або інших електророзрядних технологій. Такі зв'язки розширюють також науково-технічну основу для удосконалення високовольтного електророзрядного устаткування генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ, зокрема для їх запалювання і ініціювання детонації.

Доцільним є також вирішення наукової проблеми підвищення ефективності високовольтного електророзрядного обладнання, що застосовується для запалювання горючої суміші. Це пов'язано з удосконаленням поршневого двигунів внутрішнього згорання, яке здійснюється не тільки у напрямках збільшення їх питомої потужності і переходу на багатопаливність, але і підвищення їх економічності і надійності, у тому числі при збідненні горючої газової суміші. Тому виникає необхідність одночасного збільшення кількості і густини енергії, що виділяється в іскровому проміжку, частоти запалювання, а також коефіцієнта перетворення хімічної енергії горючої суміші в інші види.

Значні результати в дослідженні електророзрядних процесів одержали Я.Б. Зельдовіч, Ю.П. Райзер, Г.А. Місяць, С.І. Дабкіна, С.І. Брагінський, Н.М. Гегечкорі, І.С. Абрамсон, Г.А. Гулий, А.А. Щерба, А.І. Вовченко, К.В. Дубовенко, В.О. Бржезицький, В.І. Кравченко, М.І. Бойко, М.І. Баранов, А.А. Борисов, С.М. Фролов, В.А. Левін, В.В. Марков, М.А. Nettleton, J.H. Lee, R. Knystautas, T. Yasunogi та інші вчені. Розроблені математичні моделі нелінійного електричного опору і газодинамічного розширення електроіскрового каналу. Виявлено особливості зниження енергоефективності генерування ударної хвилі в іскровому розряді при збільшенні енергії розряду і підвищення енергоефективності випромінювання в іскрі при збільшенні питомої потужності електричного розряду.

Таким чином, розроблення теорії електророзрядних процесів у реагуючих газових середовищах для забезпечення створення високовольтного обладнання генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газів іскровим розрядом є актуальною науково-практичною проблемою, вирішення якої обумовлює напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" у рамках держбюджетної науково-дослідної тематики МО України та МОН України: "Поліпшення пускових характеристик двигуна 5 ТДФ за рахунок використання іско-плазмового запалювання в системі автономного факельного підігрівача" (шифр "Іскра") , відповідальний виконавець; "Дослідження засобів підвищення ефективності електромеханічних прискорювачів і силових ударних пристроїв індукційно-динамічного типу" (№ держ. реєстр. 0109U002377) і "Розробка комплексу науково-технічних рішень по підвищенню ефективності лінійних електромеханічних пристроїв ударної дії" (№ держ. реєстр. 0111U002261), в цих науково-дослідних роботах здобувач був виконавцем по проведенню наукових досліджень у напрямі удосконалення електророзрядних кіл.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка високовольтних енергоефективних електророзрядних систем генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ на основі інтенсифікації електрофізичних та фізико-хімічних процесів в іскровому каналі. Для досягнення даної мети поставлені задачі:

1. Систематизувати підходи і методи, які враховують особливості розширення іскрового каналу в реагуючих газових середовищах.

2. Розробити математичну модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах, що враховує процеси в електричному розрядному колі, струмопровідному каналі і особливості розвитку газодинамічних збурень в реагуючих газових середовищах.

3. Виявити взаємні зв'язки між параметрами електричних розрядних кіл і електророзрядними процесами в іскрових каналах, що розвиваються в реагуючих газових сумішах.

4. Розробити методи підвищення енергоефективності високовольтної електророзрядної техніки генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ.

5. Створити перспективне енергетично і технологічно більш ефективне високовольтне електророзрядне обладнання генерування ударних хвиль і нагрівання хімічно реагуючих газових сумішей.

Об'єкт дослідження – електророзрядні процеси у високовольтному обладнанні генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газів іскровим розрядом.

Предмет дослідження – закономірності та механізми впливу електрофізичних процесів на генерування ударних хвиль і нагрівання хімічно реагуючих газових середовищ в іскрових каналах.

Методи дослідження: метод розщеплювання по фізичних процесах при чисельному моделюванні процесу розширення іскрового каналу в реагуючих газах; принцип заморожених коефіцієнтів при чисельному розрахунку перехідних процесів в електричному колі, розрахунку рівнянь нестационарної газодинаміки; інтегро-інтерполяційний метод Годунова С.К. першого і другого порядку точності для вирішення системи рівнянь нестационарної газодинаміки; метод Зейцеля при чисельному розрахунку розподілу електростатичного поля; метод швидкісної фотографії для експериментального дослідження швидкості розширення іскрового каналу; осцилографічні дослідження іскрового розряду; експериментальний метод вимірювання швидкості ударної хвилі за часом проходження базисних відстаней.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах, що відрізняється від відомих комплексним розглядом процесів в електричному розрядному колі і струмопровідному каналі іскри з урахуванням особливостей протікання нерівноважних хімічних реакцій в багатокомпонентній суміші при сповільненому коливальному збудженні молекул за ударною хвилею.

2. Вперше виявлено і обґрунтовано, що показник енергоефективності високовольтного устаткування ініціювання детонації в газових сумішах, що визначається як коефіцієнт використання повної енергії розряду ($CU_c^2/2$) на ініціювання, залежить від співвідношення періоду затухаючого коливального електророзряду конденсатора до критичного часу ініціювання, який визначається за часом відриву фронту ударної хвилі від струмопровідного каналу іскри.

3. Вперше теоретично виявлено залежності між параметрами високовольтних RLC-кіл (ємністю конденсатора, напругою його заряджання, індуктивністю, опором кола) і електророзрядними процесами в іскрових каналах, що розвиваються в хімічно реагуючих газових сумішах, та які розкривають процес перетворення електричної енергії у інші види енергії в іскровому розряді.

Зокрема, в RLC-колі з іскровим проміжком в дисоціюючих газових середовищах виявлено нову закономірність, що відображає зростання співвідношення миттєвої кількості енергії K_Q , що вводиться в іскру, до величини коефіцієнта зміни індуктивності K_L (тобто співвідношення $K_Q/K_L \geq 1$) в часовому проміжку 0,1–0,5 мкс від початку іскрового розряду і подальше зниження вказаного співвідношення ($K_Q/K_L < 1$) в процесі розвитку розряду.

4. Вперше теоретично виявлено закономірність перетворення енергії розряду, введеної в іскру, в кінетичну енергію газового потоку у вибраному діапазоні параметрів RLC-кола, що полягає в тому, що коефіцієнт перетворення прагне до лінійної залежності від введеної енергії з коефіцієнтом про-

порційності, що дорівнює 0,06–0,1. Це полегшує дослідження ефективності виділення енергії розряду в газорозрядному проміжку шляхом аналізу імпульсу тиску, що створюється потоком газу в процесі розвитку розряду.

5. Вперше виявлено і обґрунтовано, що реалізація струму у високовольтному електророзрядному колі залежно від часу у вигляді $i(t) \sim t^{\frac{3}{2}}$ в діапазоні $0-I_{max}$, забезпечує генерування в іскрі ударної хвилі, інтенсивність якої наближається до квазістаціонарної.

6. Вперше розроблена концепція створення високовольтного електророзрядного устаткування ініціювання детонації в газах ударними хвилями, що сходяться, на основі генерування синхронних і паралельно розташованих іскрових каналів з урахуванням взаємозв'язку параметрів електричного кола з просторовим розташуванням електродів.

7. Дістало подальший розвиток теоретичних основ створення високовольтного електророзрядного обладнання для високоенергетичного об'ємного електроіскрового запалювання горючої суміші на основі обмеження густини енергії, що виділяється в іскровому проміжку, при збільшенні кількості енергії, що вводиться в іскровий канал.

Практичне значення отриманих результатів для електротехнічної галузі полягає в розробці методів дослідження показників високовольтного електророзрядного устаткування для ініціювання детонації іскровим розрядом. Обґрунтовано напрямки поліпшення енергоефективності такого устаткування. Розроблена електророзрядна техніка ініціювання детонації іскровим розрядом вирішує проблему енергоефективного періодичного ініціювання детонації в газових сумішах вуглеводневих палив з киснем, що дозволяє перейти до стадії створення пульсуючих детонаційних двигунів, пристроїв вібраційно-термічного очищення злітних смуг від льоду, пристроїв вібраційного очищення колекторів, пристроїв вібраційного і ударного занурення паль в ґрунти, поліпшити характеристики установок для нанесення порошкових покриттів на метал за допомогою детонаційних труб і термоімпульсних установок зняття задилок, а також реалізувати гуманітарний спосіб розмінування мінних полів об'ємним вибухом без використання ініціюючих конденсованих вибухових речовин (патенти України № 78083, 91230, 94063).

Розроблена електророзрядна техніка запалювання високоенергетичним іскровим розрядом вирішує задачі надійності запалення в газових двигунах, швидкого і надійного пуску газотурбінних двигунів і швидкого холодного пуску поршневіх двигунів. Запропоновані системи запалювання з регульованою енергією іскрового розряду забезпечують надійне запалення горючої суміші в поршневіх бензинових двигунах на перехідних режимах і тривалий ресурс роботи свічок запалення за рахунок зменшення енергії розряду на номінальних режимах роботи двигуна.

Результати дисертаційної роботи, що дозволяють вирішити задачу забезпечення прискореного холодного пуску силових установок бронеоб'єктів

за рахунок високоенергетичного іскрового запалювання, впроваджені на ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова» (м. Харків). Результати дисертаційної роботи, що вирішують проблему енергоефективного ініціювання детонації іскровим розрядом, впроваджені в Інституті тепло- і масообміну імені А.В. Ликова НАН Білорусі (м. Мінськ). Розроблено демонстраційний стенд системи іскро-плазмового запалювання.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: розроблена математична модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах; обґрунтовані методи, необхідні для проведення чисельних розрахунків; обґрунтовані області використання моделі; складено чисельний алгоритм і проведено його програмування; проведено тестування моделей; здійснено аналіз результатів моделювання; вироблені вимоги до електророзрядного устаткування для ініціювання детонації іскровим розрядом; вироблені і експериментально досліджені схемні рішення, що задовольняють розробленим вимогам; розроблено стенд для експериментального дослідження систем ініціювання детонації; проведена обробка результатів експериментальних досліджень систем ініціювання детонації; здійснено аналіз областей застосування розробленої техніки ініціювання; сформульовано теоретичні основи енергоефективного отримання об'ємного запалювання за допомогою сильнотимових іскрових розрядів; розроблено електророзрядне обладнання для запалювання горючих сумішей, що важко запалюються, при високому тиску; проведено експериментальне дослідження розробленого устаткування для вирішення задач холодного пуску дизельного двигуна і регульованого запалювання бензинового двигуна.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на: Міжнародному симпозіумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів», (м. Харків, 2008–2012 р.р.); 21st International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, (Poitiers, France, 2007); 18th International symposium on plasma chemistry, (Kyoto, Japan, 2007); 23rd Symposium on plasma physics and technology, 2008 (Prague, Czech Republic); IV Міжнародній конференції "Електроніка та прикладна фізика", Київський національний університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет, (м. Київ, 2008 р.); Шостому міжнародному колоквиумі по імпульсній та безперервній детонації 6th ICPCD, (м. Москва, Росія, 2008 р.); 22nd International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, (Minsk, Belarus, 2009); International symposium on plasma chemistry 19, (Bochum, Germany, 2009); XI Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми сучасної електротехніки", (м. Київ, 2010 р.); Науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, (м. Київ, 2010 р.); Третій всеукраїнській науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ», Академія сухопутних військ, (м. Львів, 2010 р.); 23rd

International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, (California, USA, 2011); 20th International symposium on plasma chemistry, (Philadelphia, USA, 2011); Четвертій всеукраїнській науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ», (м. Львів, 2011 р.); Другому Мінському міжнародному колоквиумі по фізиці ударних хвиль, горіння та детонації, (м. Мінськ, Білорусія, 2011 р.); 17-й міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка та енергоефективність», (м. Алушта, 2011 р.); Восьмій науковій конференції Харківського університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба «Нові технології для захисту повітряного простору», (м. Харків, 2012 р.); Конференції Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України "Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України", (м. Київ, 2012 р.); XIIth International workshop «Plasma electronics and new acceleration methods» Національний науковий центр «ХФТІ», (м. Харків, 2013 р.); 24th International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems, (Taipei, Taiwan, 2013).

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладені в 50 публікаціях, з них: 27 статей у фахових наукових виданнях (3 у закордонних, 1 у виданні, що входить у реферативну базу Thomson Scientific (США), 1 у виданні, що реферується у реферативних журналах «Джерело» (Україна) та ВІНІТІ РАН (Росія)), 3 патенти на винахід України, 19 праць у матеріалах конференції.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 339 сторінок, з них: 174 рисунка за текстом, 6 таблиць за текстом, список використаних джерел зі 254 найменувань на 27 сторінках та 3-х додатків на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, показано її наукову новизну та практичну цінність.

У першому розділі проведено аналіз областей застосування відомих математичних моделей розвитку іскри на предмет їх використання для дослідження впливу параметрів електричного розрядного кола на розширення іскрового каналу в реагуючих газах. В результаті аналізу встановлено, що частина з відомих математичних моделей дозволяє адекватно описати процес розширення іскрового каналу в nereагуючих газах (за винятком врахування процесу дисоціації). Таке обмеження математичних моделей розвитку іскрового розряду в газі, що розроблені Драбкіною С.І. і Брагінським С.І., викликані використанням в задачі газодинамічного розширення іскрового каналу залежностей швидкості фронту ударної хвилі або струмопровідного каналу від кількості енергії, що вводиться в розряд від електричного кола, як

краєві умови. Хімічні процеси за фронтом ударної хвилі призводять до зміни балансу енергії в іскровому розряді, що робить такі допущення некоректними стосовно реагуючого газу. Моделі розширення іскрового каналу, в яких використовуються широкодіапазонні рівняння стану газового середовища, дозволяють дослідити вплив параметрів електричного розрядного кола на розширення іскрового каналу в газах, що дисоціюють. Область використання цих моделей обмежується хімічно нереагуючими газами. Це викликано тим, що час протікання хімічних реакцій може бути сумірним або перевищувати час протікання іскрового розряду.

Визначено, що для опису процесів в іскровому каналі та розповсюдження ударної хвилі, що генерується, в реагуючому газі доцільним є врахування кінетики хімічних реакцій, коливальної нерівноважності за фронтом ударної хвилі, відриву температури електронів від температури важкої компоненти плазми, електронної теплопровідності.

Електророзрядна техніка генерування ударних хвиль та нагрівання реагуючих газових середовищ повинна забезпечувати достатньо високу енергоефективність щодо вибіркового посилення зазначених фізико-хімічних процесів. Зокрема, мінімальна енергія, яку необхідно витратити на ініціювання детонації в стехіометричній суміші водню з киснем в нормальних умовах, складає 1–10 Дж, а повні витрати енергії розряду на ініціювання детонації дорівнюють 95–225 Дж.

На підставі здійсненого аналізу встановлено, що існуючі теорії розвитку іскри не повною мірою розкривають взаємозв'язок між перехідними електричними процесами у високовольтному розрядному колі і процесом розширення іскрового каналу в реагуючих газах. Це обмежує можливості аналізу процесу перетворення енергії електричної поля, що накопичується в конденсаторних системах, в енергію ударної хвилі і теплової енергію, що виділяються в реагуючих газах.

У другому розділі представлена розроблена узагальнена математична модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах, що дозволяє дослідити вплив параметрів електричних розрядних кіл, через введення енергії в електроіскровий розряд, на процеси, що відбуваються як в струмопровідному каналі, так і в області дії ударної хвилі на хімічно реагуюче газове середовище. Як реагуюча суміш розглянуто суміш водню з киснем, що розбавлена азотом.

Процес розширення іскрового каналу в одновірній радіальній постановці задачі в діапазоні $0 < r < L^*$, де L^* – розмір розрахункової області, описується системою газодинамічних рівнянь (законів збереження маси, імпульсу, енергії) для багатоконпонентної хімічно реагуючої газової суміші у вигляді:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho u)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial [r(p + \rho u^2)]}{\partial r} = \frac{p}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \left[\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right]}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \left[r \left(u \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} + p \right) + k_T \frac{dT}{dt} \right) \right]}{\partial r} = \sigma E^2 - \sum_x \dot{e}_x - W_{em}; (2)$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r u y_i)}{\partial r} = \omega_i, \quad i = 1-8 \quad (10); \quad \frac{\partial y_x e_x}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r u y_x e_x)}{\partial r} = y_x \dot{e}_x + e_x \omega_x, \quad x = 1, 2, (3)$$

де ρ – густина газу; u – швидкість; p – тиск; r – радіальна координата; t – час; ε – внутрішня енергія газу на одиницю маси (без урахування коливальної енергії компонентів H_2 , O_2 , N_2); k_T – коефіцієнт теплопровідності; T – температура газу (що відповідає кінетичній енергії газу); E – напруженість електричного поля в стовпі розрядного каналу; σ – провідність плазми в каналі; W_{em} – питома потужність випромінювання; y_i – молярна концентрація i -ї компоненти (H_2 , O_2 , H_2O , H , O , OH , H_2O_2 , HO_2 , N , N_2); ω_i – швидкість зміни концентрації i -ї компоненти суміші за рахунок хімічних реакцій; ω_x – швидкість зміни концентрації x -ї моди за рахунок хімічних реакцій; e_x – питома коливальна енергія x -ї моди (H_2 , O_2 , N_2); \dot{e}_x – швидкість зміни питомої коливальної енергії x -ї моди (H_2 , O_2 , N_2) у результаті коливально-поступальної релаксації.

В області струмопровідного каналу, де температура газу досягає $T \approx 10000$ К і більше, стан газорозрядного середовища розраховується по моделі локальної термодинамічної рівноваги. В цій області розглядаються компоненти: e , O , O_+ , O_{++} , H , H_+ , N , N_+ , N_{++} . Внутрішня енергія, віднесена до одиниці об'єму газу, в цьому випадку дорівнює

$$\rho \varepsilon = \frac{3}{2} (N_H + n_{H_+} + N_O + n_{O_+} + n_{O_{++}} + N_N + n_{N_+} + n_{N_{++}} + n_e) kT + (4)$$

$$+ n_{H_+} e I_{H_+} + n_{O_+} e I_{O_+} + n_{O_{++}} e I_{O_{++}} + n_{N_+} e I_{N_+} + n_{N_{++}} e I_{N_{++}},$$

де N_i – густина нейтральних компонентів (O , H , N); e – заряд електрона; k – постійна Больцмана; n_e – густина електронів; n_+ – густина однократно іонізованих атомів; n_{++} – густина двократно іонізованих атомів; I_{i+} , I_{i++} – енергія однократної і двократної іонізації відповідних компонентів.

В області струмопровідного каналу рівняння стану має вигляд

$$p = \left(\sum_i N + n_e + \sum_i n_+ + \sum_i n_{++} \right) kT. \quad (5)$$

В області зовні струмопровідного каналу склад середовища визначається в результаті рішення рівнянь багатотемпературної нерівноважної хімічної кінетики для суміші водню з киснем, розбавленої азотом. Енергія одиниці об'єму суміші в цій області розраховується за виразами:

$$\rho \varepsilon = \sum_{i=1}^G y_i U_i^0; \quad U_i^0 = \Delta H_{298,15i}^0 + \int C_{Vi} dT, \quad (6)$$

де U_i^0 – внутрішня (хімічна і теплова) енергія одного моля i -ї компоненти суміші; $\Delta H_{298,15i}^0$ – стандартна молярна ентальпія утворення i -ї компоненти суміші; C_{Vi} – молярна теплоємність i -ї компоненти при постійному об'ємі.

Для x -ї моди внутрішня енергія розраховується за виразом

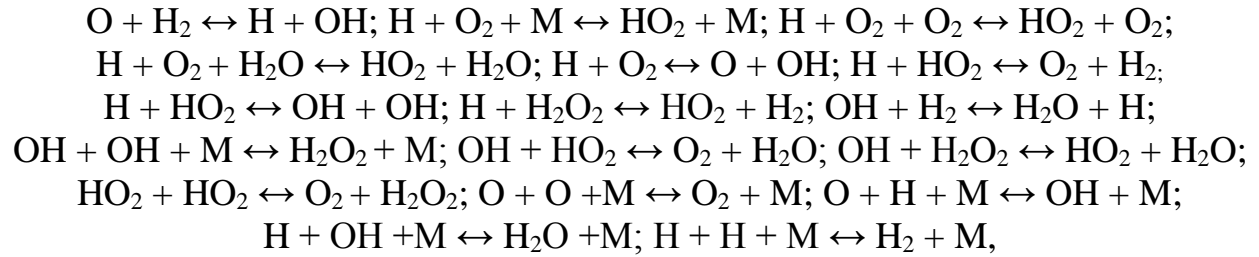
$$U_x^0 = \Delta H_{298,15,x}^0 + \frac{5}{2} R_* (T - T_0) + e_x(T_{v,x}), \quad (7)$$

де $T_0 = 298,15$ К; $T_{v,x}$ – коливальна температура x -ї моди; R_* – універсальна газова стала.

Тиск в суміші в області зовні струмопровідного каналу визначається сумою парціального тиску компонентів суміші у вигляді

$$p = R_* T \sum_i y_i. \quad (8)$$

Моделювання здійснювалося стосовно до стехіометричної суміші водню з киснем по спрощеній схемі [Petersen E. L., 1999]:



де M позначає третю частинку.

Розрахунок хімічних реакцій з участю коливально-збуджених молекул здійснюється по інтуїтивній моделі Парка. В хімічних реакціях за участю x -ї моди швидкість реакції залежить від ефективної температури у вигляді:

$$k_k(T_{ef,x}) = A_k \cdot T_{ef}^{n_k} \exp\left[-\frac{E_{ak}}{kT_{ef,x}}\right]; \quad T_{ef,x} = T^s T_{v,x}^{1-s}, \quad (9)$$

де $T_{ef,x}$ – ефективна температура x -ї моди; $k_k(T_{ef,x})$ – константа швидкості k -ї реакції з участю x -ї моди; s – параметр моделі.

У хімічних реакціях, в яких не беруть участь x -ві моди, константи швидкості реакцій залежать від температури T .

Швидкість коливально-поступальної релаксації задається рівнянням

$$\dot{e}_x = -\frac{e_x - e_x^0(T)}{\tau_{VT}(T)}, \quad (10)$$

де $\tau_{VT}(T)$ – час коливально-поступальної релаксації; e_{x0} – рівноважне значення середньої коливальної енергії одного моля x -ї моди.

Густина n_e електронів і температура плазми T у розрахункових осередках визначається в результаті рішення наступної системи рівнянь, доповненої рівнянням (4):

$$\frac{n_e n_{H^+}}{N_H} = \frac{g_{H^+}}{g_H} A \cdot T^{1.5} \exp\left(-\frac{eI_{H^+}}{kT}\right); \quad \frac{n_e n_{O^+}}{N_O} = \frac{g_{O^+}}{g_O} A \cdot T^{1.5} \exp\left(-\frac{eI_{O^+}}{kT}\right); \quad (11)$$

$$\frac{n_e n_{O^{++}}}{n_{O^+}} = \frac{g_{O^{++}}}{g_{O^+}} A \cdot T^{1.5} \exp\left(-\frac{eI_{O^{++}}}{kT}\right); \quad \frac{n_e n_{N^+}}{N_N} = \frac{g_{N^+}}{g_N} A \cdot T^{1.5} \exp\left(-\frac{eI_{N^+}}{kT}\right); \quad (12)$$

$$\frac{n_e n_{N^{++}}}{n_{N^+}} = \frac{g_{N^{++}}}{g_{N^+}} A \cdot T^{1.5} \exp\left(-\frac{eI_{N^{++}}}{kT}\right); \quad n_e = n_{H^+} + n_{O^+} + 2n_{O^{++}} + n_{N^+} + 2n_{N^{++}}; \quad (13)$$

$$\rho_H = (N_H + n_{H+})Z_H m_{a.m.u.}; \quad \rho_O = (N_O + n_{O+} + n_{O++})Z_O m_{a.m.u.}; \quad (14)$$

$$\rho_N = (N_N + n_{N+} + n_{N++})Z_N m_{a.m.u.}; \quad (15)$$

де $A = 6,06 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-3} \text{ eB}^{-3/2}$; g_i – статистична вага відповідних компонентів; Z_H, Z_O, Z_N – атомні номери водню, кисню і азоту відповідно; $m_{a.m.u.}$ – атомна одиниця маси; ρ_n – густина відповідних елементів.

Введення енергії в іскровий розряд від електричного кола здійснюється в область струмопровідного каналу. Поточний опір R_{sp} іскрового каналу визначається за виразом:

$$R_{sp} = \frac{l_{sp}}{\int_0^{r_{sp}} 2\pi r \sigma dr}; \quad \sigma = \frac{96,994 \cdot K_\sigma(Z_+) \cdot T_e^{1,5}}{\ln \Lambda}, \quad (16)$$

де l_{sp} – довжина розрядного проміжку (каналу); r_{sp} – радіус струмопровідного каналу; $K_\sigma(Z_+)$ – безрозмірний коефіцієнт; Z_+ – середній заряд іона; $\ln \Lambda$ – кулонівський логарифм.

Провідність σ розраховується стосовно розрахункових осередків, де виконується умова перевищення на порядок величини частоти кулонівських зіткнень над частотою пружних зіткнень електронів з нейтральною компонентою плазми.

У моделі розглядалися різні електричні кола. Дослідження розширення іскрового каналу в реагуючому газі при електричному розряді в RLC-колі проводиться з застосуванням рівняння

$$L \frac{di}{dt} + [R_c + R_{sp}(t)] \cdot i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0, \quad (17)$$

де C – електрична ємність конденсатора; R_c – еквівалентний активний опір електричного кола; L – еквівалентна індуктивність розрядного кола.

При дослідженні ініціювання детонації від розряду конденсатора з дроселем, що насичується, в розрахунках використано рівняння

$$[L + L(i)] \frac{di}{dt} + [R_c + R_{sp}(t)] \cdot i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = 0, \quad (18)$$

де $L(i)$ – нелінійна індуктивність дроселя, що представлялась виразами

$$L(i) = L_0 [1 + \mu \cdot h(i)]; \quad h(i) = \frac{3}{2\beta \cdot i} \cdot \frac{\sinh(2\beta \cdot i) - \sin(2\beta \cdot i)}{\cosh(2\beta \cdot i) - \cos(2\beta \cdot i)}, \quad (19)$$

де μ, β – коефіцієнти; L_0 – індуктивність розсіяння.

Реактивним опором іскрового каналу нехтувалось враховуючи його мале значення в порівнянні з його активним опором (рис. 1).

По розрахованому значенню розрядного струму визначається напруженість E електричного поля в струмопровідному каналі за виразом

$$E_{sp} = \frac{R_{sp} i}{l_{sp}}. \quad (20)$$

Коефіцієнт теплопровідності розраховується за виразами:

$$k_T = k_{el} + k_{rad}; \quad k_{rad} = 5.33\sigma_{SB}T^3l_R; \quad k_{el} = 2.65 \frac{T^{2.5}}{\ln \Lambda}, \quad (21)$$

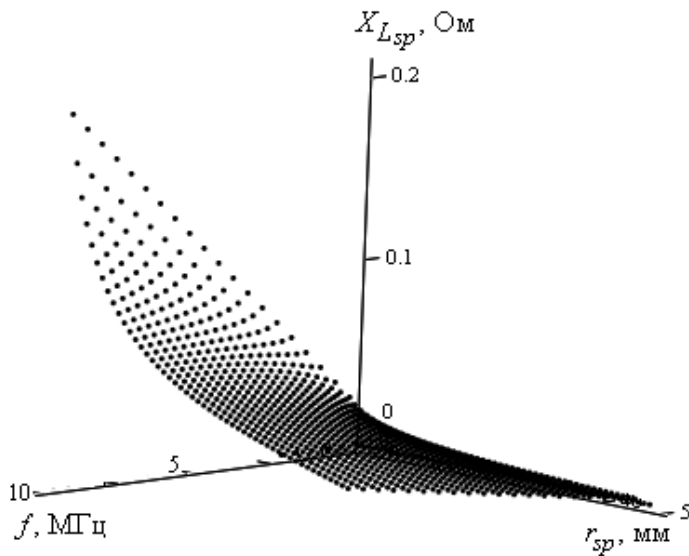


Рисунок 1 – Реактивний опір іскрового каналу залежно від радіусу струмопровідного каналу і частоти коливань у розрядному контурі розраховується за виразами:

$$C_{pi}^0(T) = C_{pi}^0(5000); \quad H_i^0(T) = H_i^0(5000) + (T - 5000) \cdot C_{pi}(5000); \quad (23)$$

$$S_i^0(T) = S_i^0(5000) + C_{pi}^0(5000) \cdot \ln\left(\frac{T}{5000}\right). \quad (24)$$

Область застосування розробленої моделі обмежується умовою істотної переваги газодинамічного тиску над магнітним, що має вигляд

$$\frac{10^{-7} \mu i^2}{16\pi^2 r_{sp}^2 \cdot p} \ll 1, \quad (25)$$

де μ – відносна магнітна проникність середовища.

Рішення системи рівнянь (1–24) здійснюється чисельно з використанням методу розщеплювання по фізичних процесах: газодинамічний, хімічний, термічної іонізації, електричний, коливальної релаксації, при початкових умовах:

$$p(r)|_{t=0} = p_0; \quad T(r)|_{t=0} = T_0; \quad T_{v,x}(r)|_{t=0} = T_0; \quad u(r)|_{t=0} = 0, \quad i(0) = 0; \quad u_c(0) = U_0, \quad (26)$$

де p_0 , T_0 – тиск і температура горючої газової суміші в початковий момент часу, відповідно; u_c , U_0 – поточна та початкова напруги заряду ємності C , відповідно.

За фронтом ударної хвилі приймається відсутність зміни коливальної енергії x -ї моди у вигляді

$$e_x|_{r=r_{fr}} = e_{x0}(T_0), \quad (27)$$

де r_{fr} – радіус фронту ударної хвилі.

де k_{el} – коефіцієнт електронної теплопровідності; k_{rad} – коефіцієнт променистої теплопровідності, σ_{SB} – стала Стефана-Больцмана; l_R – середня довжина пробігу по Росселанду; $\ln \Lambda$ – кулонівський логарифм.

Втрати енергії розряду на випромінювання розраховуються за виразом

$$W_{em} = \frac{2\sigma_{SB}T^4}{l_R}. \quad (22)$$

При температурі $T > 5000$ К питома теплоємність C_p , ентальпія H і ентропія S

На осі розрядного каналу приймається відсутність градієнтів термодинамічних параметрів газу. Розмір розрахункової області задається таким чином, щоб газодинамічні збурення не досягали границі.

Розроблено два частинні варіанти розрахункової моделі для дослідження впливу окремих параметрів джерела енергії. Перший частинний варіант моделі розширення області, що нагрівається, в реагуючому газі описує процес прямого ініціювання детонації від ідеального джерела. Даний варіант призначений для дослідження впливу питомої потужності, радіусу області та часу введення енергії на параметри ударної хвилі, що генерується. Другий частинний варіант моделі розвитку іскри в реагуючому газі є моделлю прямого ініціювання детонації іскровим розрядом в наближеному описі виділення енергії розряду в іскрі. В цьому варіанті функція густини теплових джерел задається на підставі обробки даних експериментальних (фотографічного і осцилографічного) досліджень іскрового розряду.

Тестування моделі здійснювалося шляхом порівняння розрахункових параметрів детонаційної хвилі з параметрами детонаційної хвилі Чепмена-Жуге. Коректність опису функції, що відображає введення енергії в іскровий канал від електричного кола, перевірялася шляхом розрахунку наявності енергетичного балансу. Достовірність математичної моделі підтверджена задовільним збігом розрахункових і експериментальних результатів. Так, розрахункові значення напруженості електричного поля для розряду конденсатора ємністю $C = 0,25$ мкФ, початковою напругою його заряджання $U_{C0} = 15$ кВ, індуктивністю розрядного кола $L = 2$ мкГн в повітрі атмосферного тиску знаходяться в межах між експериментальними значеннями напруги на розрядному проміжку, приведеної до довжини проміжку, і значеннями напруженості E електричного поля в стовпі іскрового каналу для розряду в повітрі (рис. 2).

Відхилення розрахункового радіусу струмопровідного каналу від експериментально виміряного склало до 25 %, а швидкості фронту ударної хвилі – до 20 % (рис. 3). Одержано задовільний збіг в частці від повної енергії іскрового розряду, що перетворюється в ударну хвилю, яка в тестовому варіанті до першого напівперіоду розряду склала 0,5 %.

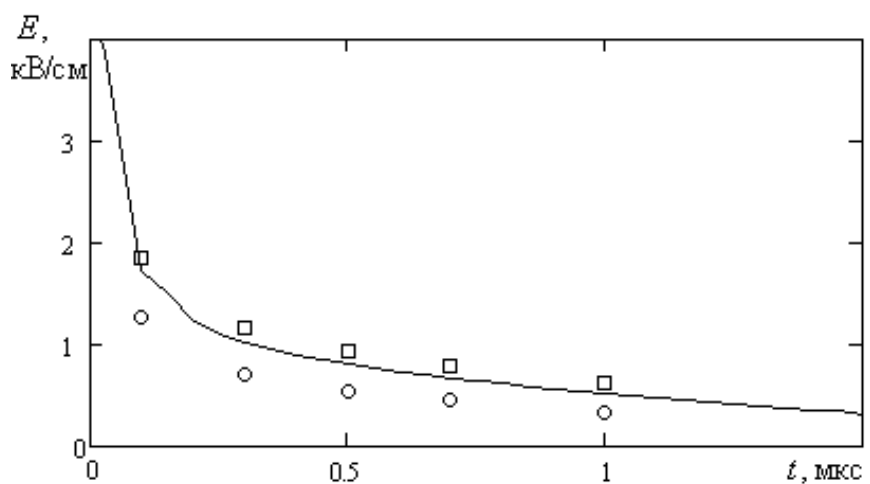


Рисунок 2 – Залежність напруженості E електричного поля в стовпі іскрового каналу від часу t : суцільна лінія – розрахункова крива; \square – експериментальні значення напруги на розрядному проміжку; \circ – експериментальні значення напруженості E електричного поля

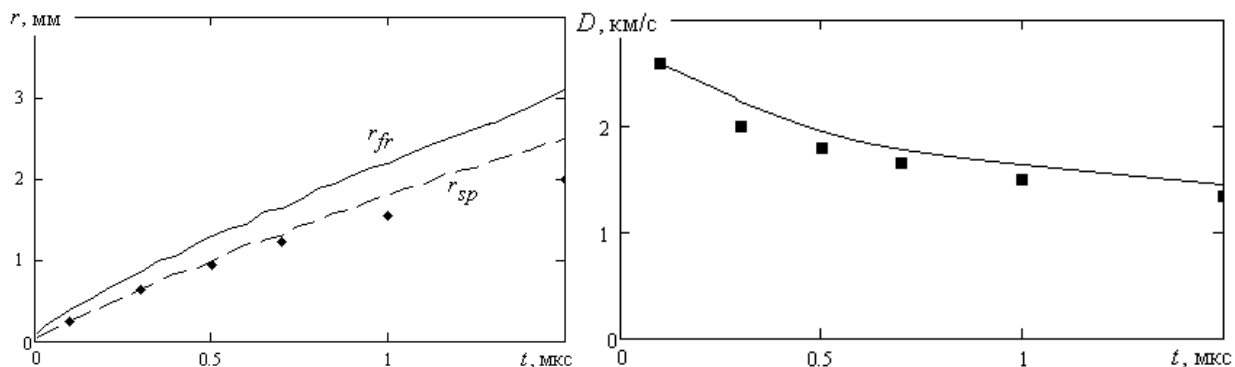


Рисунок 3 – Розрахункові значення радіусу фронту r_{fr} ударної хвилі і радіусу r_{sp} струмопровідного каналу (ліворуч) і швидкості D фронту ударної хвилі (праворуч) на момент часу t . Ромби показують експериментальні відповідні значення

У третьому розділі наведені результати чисельних досліджень розширення іскрового каналу в реагуючих газах.

Дослідження впливу окремого параметра RLC-кола (індуктивності, активного опору, ємності конденсатора і напруги його заряджання) на процес розширення іскрового каналу в дисоціюючому газі проведено при незмінних інших параметрах розрядного кола стосовно середовища кисню при початковій температурі газу $T = 300$ К і тиску $p = 111,4$ кПа. Вплив досліджувався з використанням розробленої моделі в розрядних колах з параметрами: $C = 0,01; 0,05; 0,25$ мкФ; $U_C = 10; 15; 20$ кВ; $R_C = 0,01; 0,1; 1$ Ом; $L = 0,5; 1; 2; 10$ мкГн. Довжина іскрового проміжку дорівнювала $l_{sp} = 5$ мм. Для кількісної оцінки впливу індуктивності розрядного кола на енергію

$$Q_{sp}(t) = \int_0^t E l_{sp} i dt, \text{ що вводиться в}$$

іскру на поточний час, використано співвідношення відповідних величин. Тобто, співвідношення миттєвої кількості енергії Q_{sp} при різних індуктивностях кола представлено у вигляді коефіцієнта $K_Q(t) = Q_{sp1}(t)/Q_{sp2}(t)$. Коефіцієнт зміни індуктивності визначений у вигляді $K_L = L_1/L_2$. У результаті аналізу зміни коефіцієнта K_Q від часу (рис. 4) при

різних значеннях K_L спостерігається наступна закономірність. В інтервалі часу $0,1-0,5$ мкс (перша чверть періоду розряду), співвідношення миттєвої кілько-

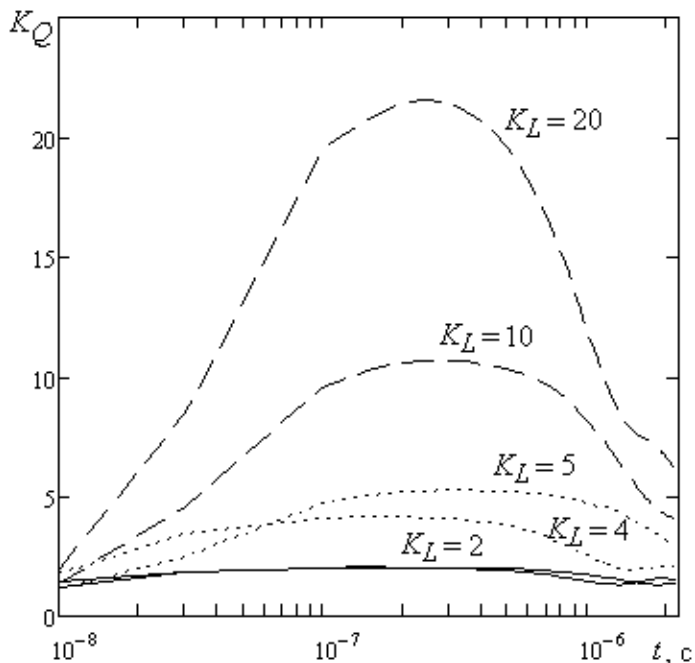


Рисунок 4 – Зміна в часі співвідношення кількості енергії Q_{sp} , що вводиться в іскровий канал, при різних значеннях коефіцієнта K_L зміни індуктивності

сті енергії K_Q , що вводиться в іскру, при різних індуктивностях кола зростає до величини коефіцієнта зміни індуктивності K_L . При подальшому розвитку іскрового розряду маємо $K_Q < K_L$. Виявлення даної закономірності дозволяє, стосовно розрядів тривалістю в сотні наносекунд, кількісно регулювати енергію, що вводиться в іскру, за рахунок зміни коефіцієнта K_L . Виявлено залежність

(рис. 5), що кінетична енергія $Q_{kin}(t) = l_{sp} \int_0^{L^*} 2\pi r \frac{\rho(r,t)u^2(r,t)}{2} dr$ газового

потоків, що формується іскровим розрядом, в розглянутому діапазоні параметрів RLC-кола прагне до прямо пропорційної залежності від енергії розряду Q_{sp} , введеної в іскру. Коефіцієнт пропорційності між даними величинами для кисню складає $k_{mf} = Q_{kin}/Q_{sp} = 0,06-0,1$. Зміна індуктивності RLC-кола впливає на залежність опору іскрового каналу як від часу, так і від кількості енергії розряду Q_{sp} (рис. 6).

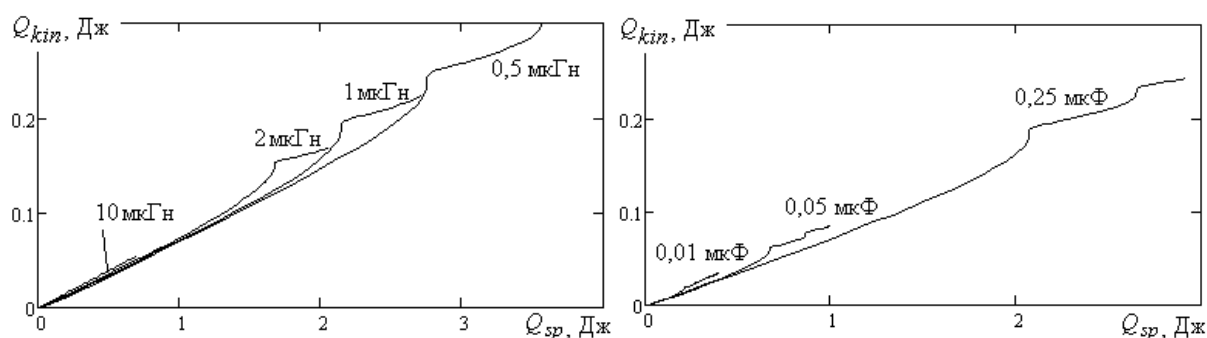


Рисунок 5 – Залежність кінетичної енергії Q_{kin} від енергії розряду Q_{sp} при різних індуктивностях і ємностях RLC-кола

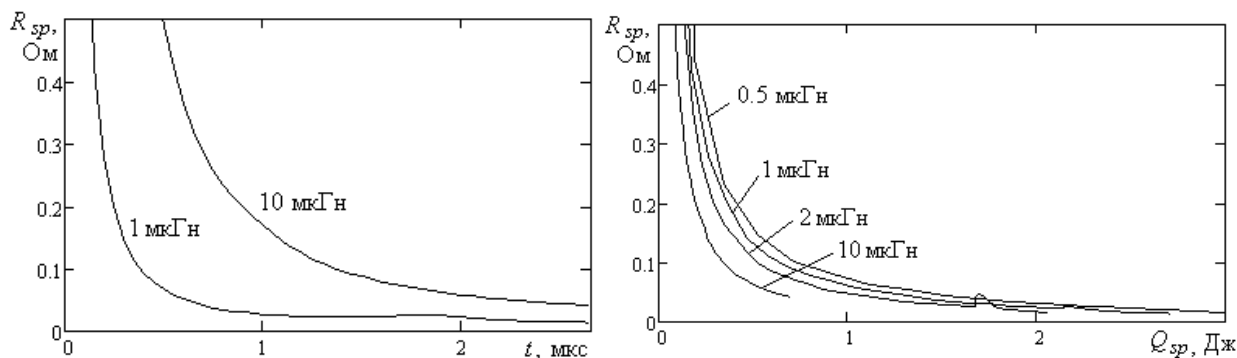


Рисунок 6 – Залежність опору іскрового каналу від часу (зліва) і від кількості енергії, введеної в іскру, (праворуч) при різних індуктивностях RLC-кола

У розрахункових варіантах миттєва напруженість електричного поля в іскровому каналі в однакові моменти часу в інтервалі 0,2–0,7 мкс при різних індуктивностях кола відрізняється в межах одного порядку (рис. 7). У подальшому динаміка зміни напруженості електричного поля пов'язана зі зміною напрямку розрядного струму.

Із зменшенням опору RLC-кола збільшується ділянка збігу кривих енергії, що вводиться в іскровий канал (рис. 8).

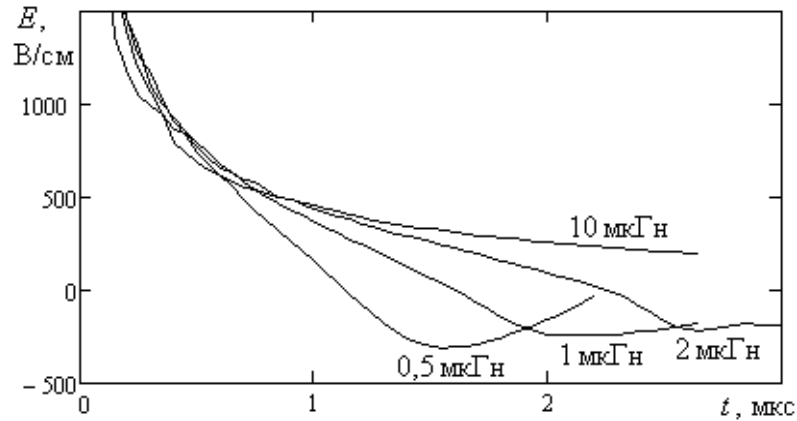


Рисунок 7 – Зміна напруженості E при різних індуктивностях RLC-кола

Із зростанням напруги заряджання ємності кількість енергії, що вводитьься в іскру до однакових моментів часу, зростає не прямо пропорціонально кількості енергії, що запасється в конденсаторі (рис. 9). У розрахунковому варіанті при напрузі 10 кВ за перший напівперіод в іскру вводиться 1,5 Дж, а при напрузі 20 кВ – 3,5 Дж. При цьому, повна енергія розряду зростає з 12,5 Дж до 50 Дж. Це відображається в зниженні частки

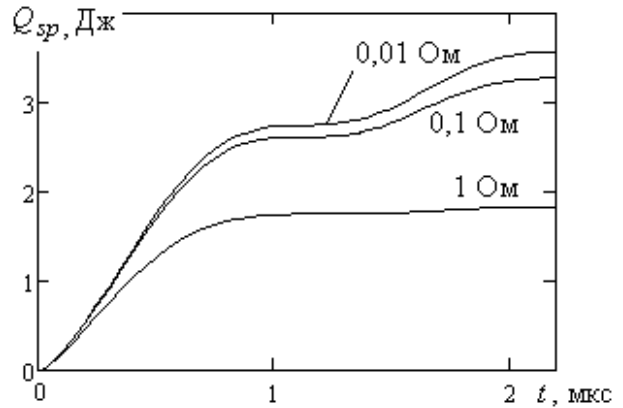


Рисунок 8 – Динаміка введення енергії в іскру при різних опорах RLC-кола

$\eta_{sp}(t) = [2Q_{sp}(t) \cdot 100\%] / CU_c^2$ енергії, що вводиться в іскру за однаковий час, при збільшенні напруги заряджання ємності.

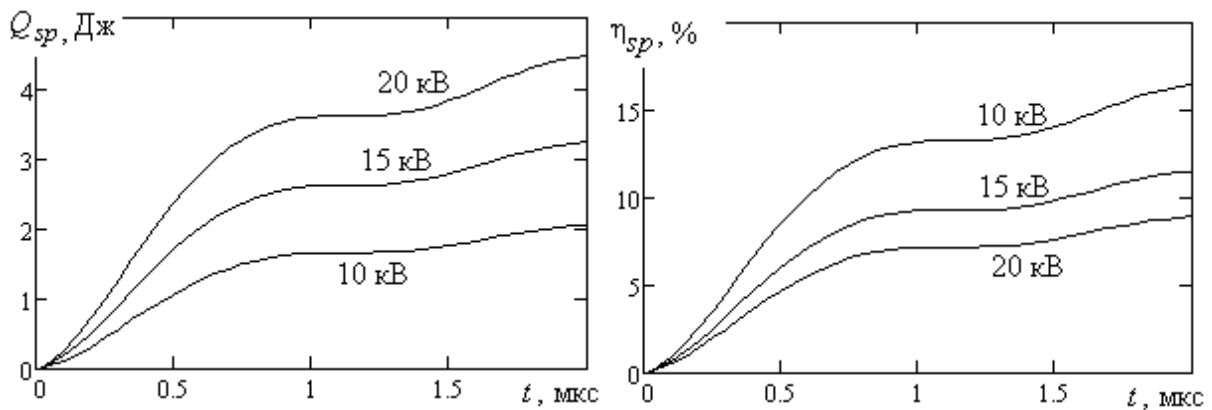


Рисунок 9 – Залежності енергії Q_{sp} і частки η_{sp} енергії, введеної в іскру, від часу при різних значеннях напруги заряджання ємності RLC-кола

Встановлено, що електрична схема розряду (рис. 10) з коротким замиканням іскрового проміжку в RLC-колі після $1/4$ періоду T_{RLC} розряду забез-

печує збільшення швидкості введення енергії в іскровий канал, що підвищує інтенсивність ударної хвилі, що генерується.

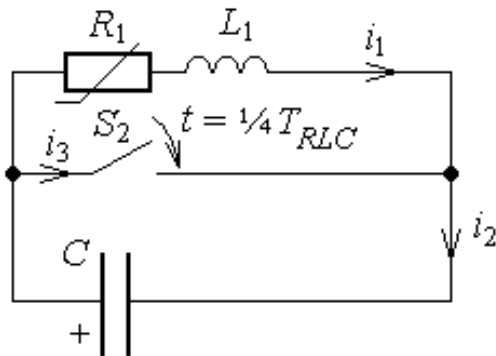


Рисунок 10 – Електрична схема розряду з коротким замиканням іскрового проміжку в RLC-колі після $1/4$ періоду T_{RLC} розряду

За результатами розрахунку (рис. 11) розподілу тиску уздовж радіусу іскрового каналу на однаковий час $t = T_{RLC}/2 = 1,6$ мкс тиск на фронті ударної хвилі по розрахунковому варіанту 1 складає $p_{fr1} \approx 2,1$ МПа (переривання струму після $t = 1/4 T_{RLC}$), 2 – $p_{fr2} \approx 2,6$ МПа (коливально-затухаючий розряд), 3 – $p_{fr3} \approx 2,8$ МПа (коротке замикання іскрового проміжку в RLC-колі після $t = 1/4 T_{RLC}$). При цьому, температура на фронті ударної хвилі у варіанті 1 досягає біля $T_{fr1} \approx 1300$ К, а 3 – $T_{fr3} \approx 1600$ К.

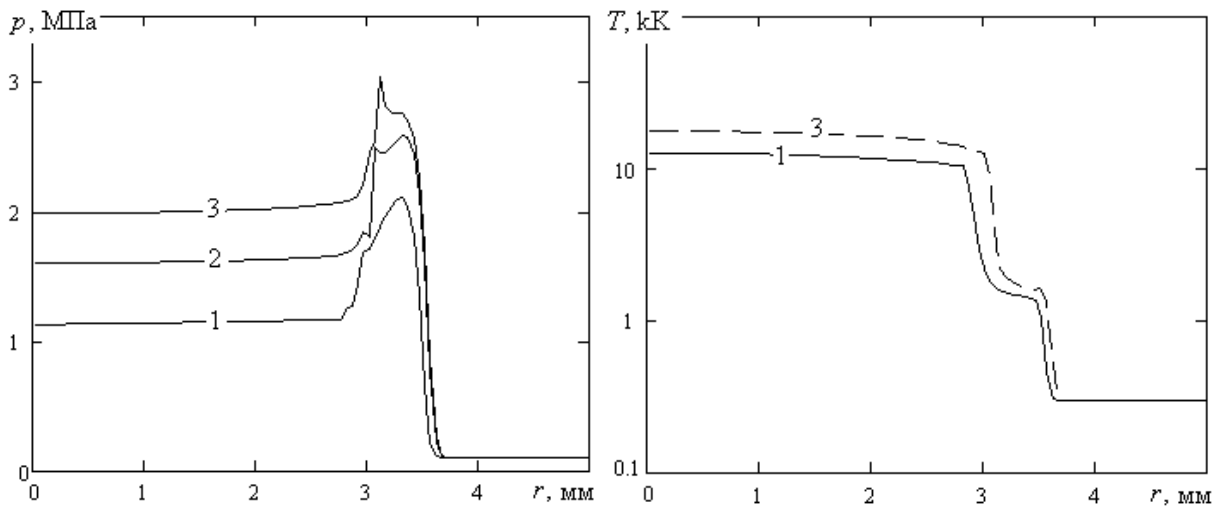


Рисунок 11 – Розподіл тиску (зліва) і температури (праворуч) в розрахункових варіантах № 1, 2, 3 на час $t = 1,6$ мкс

По моделі ініціювання детонації від ідеального джерела досліджено вплив параметрів джерела (питомої потужності, радіусу $r_{ввод}$ і часу введення) енергії на мінімальну енергію ініціювання детонації. Для стехіометричної воднево-кисневої суміші в нормальних умовах при $r_{ввод} \leq 1$ мм критичний час, при якому витрати енергії на ініціювання детонації мінімальні, склав $\tau_{кр} = 0,5-0,7$ мкс (рис. 12).

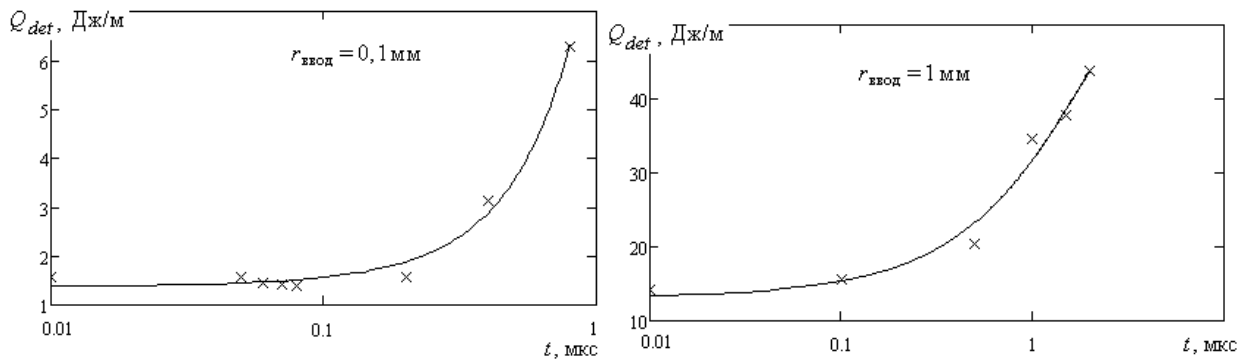


Рисунок 12 – Залежність енергії ініціювання від часу введення при різних радіусах $r_{\text{ввод}}$: суцільна крива – апроксимація; \times – розраховані значення

За результатами чисельного моделювання ініціювання детонації з наближеним описом виділення енергії розряду в іскрі підтверджено, що умови для виділення хімічної енергії виникають після відділення фронту ударної хвилі від струмопровідного каналу іскри і в області між фронтом ударної хвилі і струмопровідним каналом (рис. 13).

На основі аналізу розподілу енергії іскрового розряду, що розвивається в детонуючому газі, встановлено, що низька енергоефективність ініціювання детонації високовольтним розрядом імпульсного конденсатора переважно викликана малою часткою енергії розряду, що виділяється за період формування ударної хвилі, що ініціює детонацію, і великою часткою витрат енергії на процес дисоціації. Зокрема, у розрахунковому варіанті, проведеному за розробленою математичною моделлю розширення іскрового каналу, встановлено, що при ініціюванні детонації від розряду конденсатора ємністю 0,25 мкФ, зарядженого до напруги 10 кВ, при індуктивності розрядного кола 2 мкГн, активному опорі 10 мОм і довжині розрядного проміжку 5 мм, в стехіометричній суміші водню з киснем атмосферного тиску за $\frac{1}{4}$ періоду розряду в іскрі виділяється 5,5 % від повної енергії, а в кінетичну енергію на цей момент часу перетворюється 85 мДж енергії, що складає 9,4 % від введеної в іскру або 0,68 % від повної енергії розряду (рис. 14). За цей час процесом дисоціації поглинулося 486 мДж, що складає 60 % від введеної в іскру або 3,9 % від повної енергії розряду.

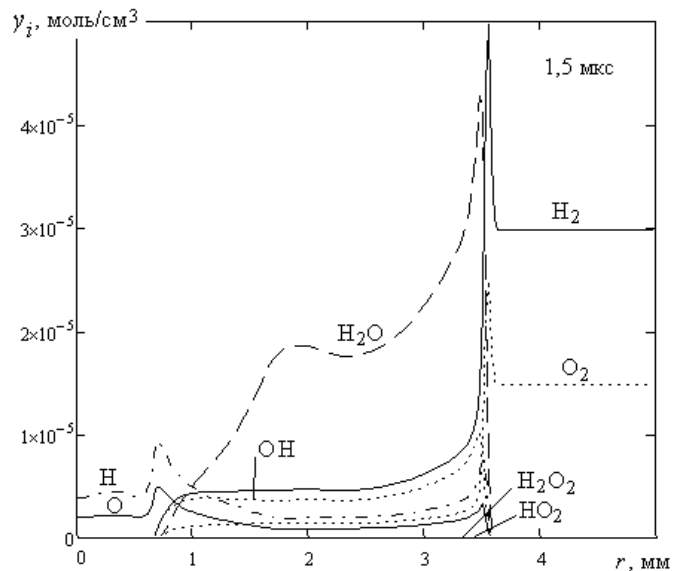


Рисунок 13 – Розподіл молярної концентрації компонентів уздовж радіальної координати в іскрі в розрахунковому варіанті ($C = 0,25$ мкФ, $L = 2$ мкГн, $U_C = 15$ кВ) к часу $t_6 = 1,5$ мкс

Виявлено, що показник енергоефективності електророзрядної техніки ініціювання детонації, що є коефіцієнтом використання повної енергії розряду ($CU_c^2/2$) на ініціювання детонації, залежить від співвідношення періоду коливального затухаючого розряду до критичного часу ініціювання детонації. При цьому критичний час ініціювання детонації зв'язаний з часом відриву фронту ударної хвилі від струмопровідного каналу іскри. Втрати енергії розряду, що пов'язані з продовженням введення енергії в іскру після моменту ініціювання детонації, будуть зневажливо малі у разі виконання умови

$$T_{RLC} \ll \tau_{кр}. \quad (28)$$

Зокрема, показано збільшення показника енергоефективності електророзрядної техніки ініціювання детонації з 2,4 % до 50 % за рахунок скорочення періоду розряду з $T_{RLC} = 4,5$ мкс до $T_{RLC} = 0,6$ мкс. Це забезпечило зниження повної енергії розряду, при якій досягається ініціювання детонації, з 12,5 Дж до 2,45 Дж.

Обґрунтовано, що реалізація струму у високовольтному електророзрядному колі залежно від часу у вигляді $i(t) \sim t^{1,5}$ в діапазоні $0-i_{max}$, забезпечує генерування в іскрі ударної хвилі, інтенсивність якої наближається до квазістаціонарної. В розрахунковому варіанті при ініціюванні детонації від розряду конденсатора ємністю 1 мкФ, зарядженого до напруги 5 кВ, при активному опорі 10 мОм і послідовно включеною нелінійною індуктивністю визначених параметрів, в стехіометричній суміші водню з киснем атмосферного тиску показано формування квазістаціонарної ударної хвилі в інтервалі часу 0–1 мкс із стрибком тиску у фронті хвилі 3,5...4,5 МПа (рис. 15).

Розроблено концепцію створення електророзрядного обладнання ініціювання детонації в газах ударними хвилями, що стикаються, на основі генерування синхронних і паралельно розташованих іскрових каналів (рис. 16). Область I позначає струмопровідні канали, а область II показує області стислого газу, виникаючі між струмопровідними каналами і фронтами ударних хвиль, що генеруються іскрами. В струмопровідних каналах (область I) температура газу досягає 10000 К і більше.

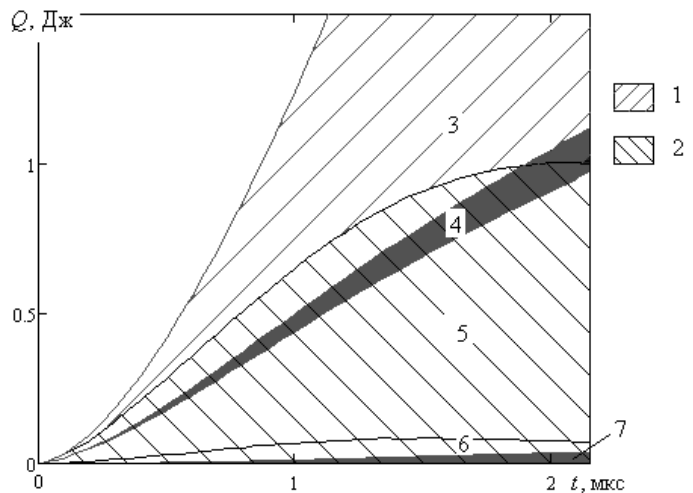


Рисунок 14 – Розподіл в часі енергії розряду: 1 – енергія, що виділяється в результаті згорання водню; 2 – енергія, введена в іскру; 3 – теплова енергія, 4 – кінетична енергія газового потоку; 5 – енергія, що витрачається на дисоціацію; 6 – енергія, що витрачається на іонізацію; 7 – втрати енергії розряду на випромінювання

Умови для процесу згорання виникають тільки в області II. Відстань між осями іскрових каналів вибирається шляхом аналізу розподілу термодинамічних параметрів в іскровому розряді, що виникає на момент зіткнення ударних хвиль.

Шляхом розрахунку розподілу потенціалу електростатичного поля, обґрунтовано конструкцію двоелектродної системи з поперечною рамкою і поглибленими в ізолятор електродами, що забезпечує

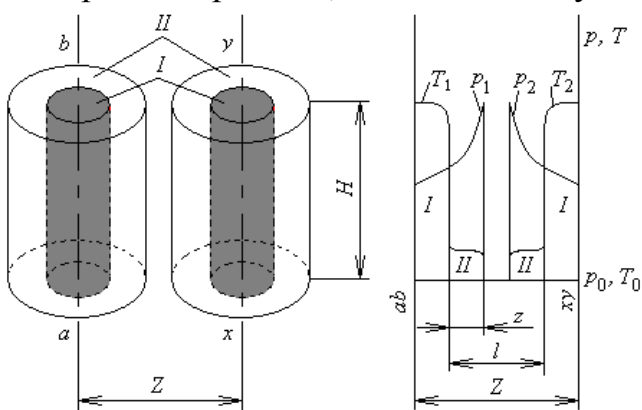


Рисунок 16 – Схема і характерний розподіл уздовж радіальних координат термодинамічних параметрів (тиску p і температури T) двох синхронних іскрових каналів

дається наступна схема (рис. 18).

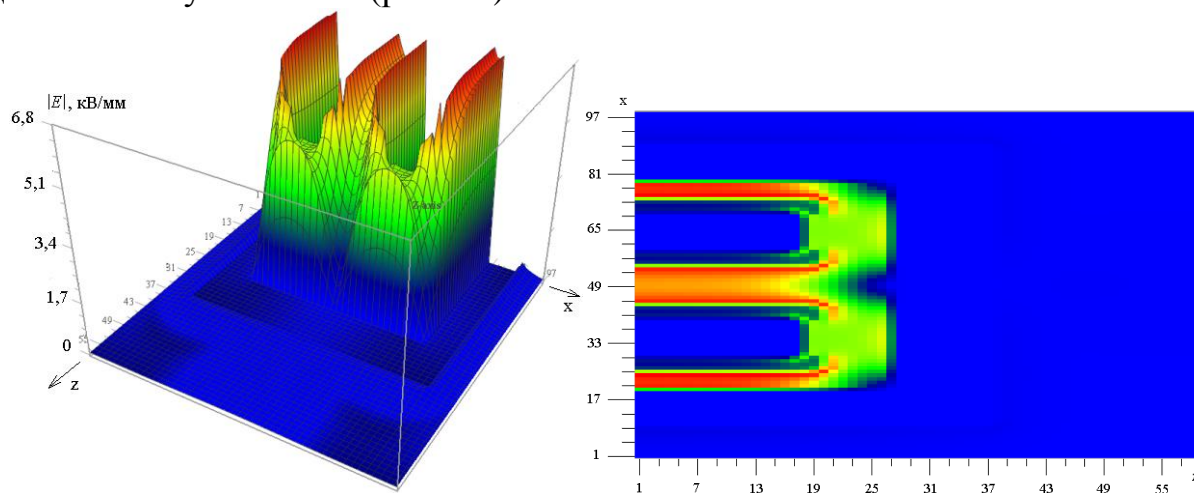


Рисунок 17 – Розподіл модуля напруженості E електричного поля в центральній площині двоелектродної системи з електродами, що поглиблені в ізолятори на 0,5 мм (праворуч – в ізоляціях)

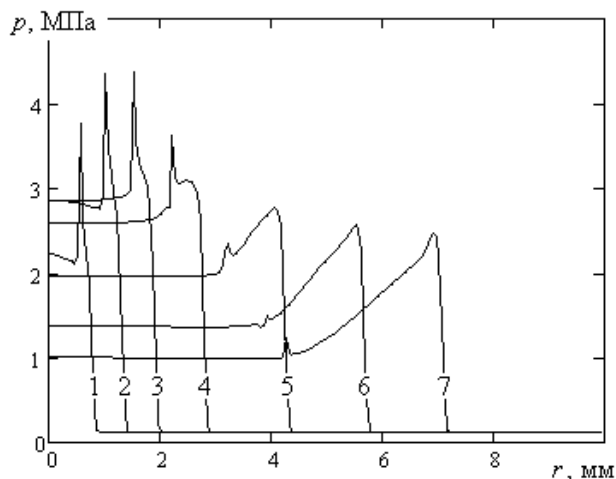


Рисунок 15 – Розподіл тиску p уздовж радіальної координати r в

розрахунковому варіанті: 1 – $t_1 = 0,3$ мкс; 2 – $t_2 = 0,5$ мкс; 3 – $t_3 = 0,7$ мкс; 4 – $t_4 = 1$ мкс; 5 – $t_5 = 1,5$ мкс; 6 – $t_6 = 2$ мкс; 7 – $t_7 = 2,5$ мкс

створення двох іскрових каналів, розташованих паралельно один одному (рис. 17). Визначено, що в електророзрядній техніці ініціювання детонації є достатнім поглибленням електродів в ізолятори на 0,5 мм.

При дослідженні ініціювання детонації послідовними ударними хвилями, що генеруються, від послідовних імпульсів струму розглядається наступна схема (рис. 18).

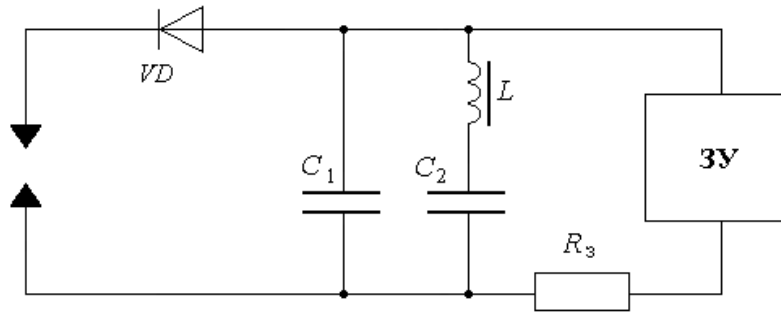


Рисунок 18 – Електрична схема кола для отримання двох послідовних імпульсів струму

Електророзрядне коло включає дві імпульсні ємності C_1 і C_2 , дросель L , що насичається, діод VD , зарядний резистор R_3 і зарядний пристрій $ЗУ$. Послідовність з двох імпульсів струму в такому колі одержується при визначених параметрах елементів кола. Еквівалентна схема такого електричного кола отримана у вигляді (рис. 19), та застосована лише для дослідження перших двох імпульсів струму.

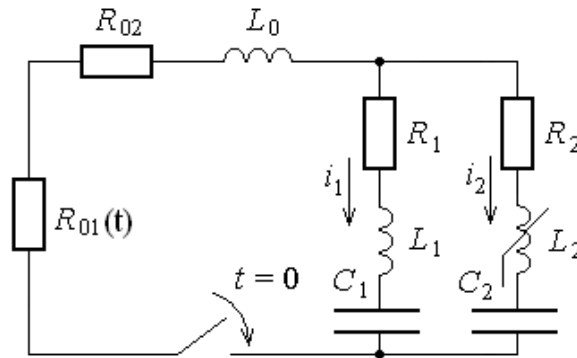


Рисунок 19 – Еквівалентна схема кола для отримання двох послідовних імпульсів струму

Перехідний процес в даному колі досліджується за допомогою наступної системи рівнянь:

$$(R_{01} + R_{02})(i_1 + i_2) + L_0 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt = 0; \quad (20)$$

$$(R_{01} + R_{02})(i_1 + i_2) + L_0 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + R_2 i_2 + L_2 (i_2) \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = 0, \quad (21)$$

при початкових умовах: $i_1(0) = i_2(0) = 0$; $u_{c1}(0) = u_{c2}(0) = U_C$.

Обґрунтована перевага високовольтної електророзрядної техніки генерування ударної хвилі з одно імпульсним розрядом у порівнянні з двома імпульсним. Причина зниження інтенсивності ударної хвилі в двоімпульсному розряді викликана зменшенням кількості енергії, що вводиться в іскровий канал, із-за зниження опору іскрового каналу, викликаного падінням густини газу у іскровому каналі після першого імпульсу струму.

Розраховано, що із збільшенням початкового тиску в газорозрядному середовищі відбувається зростання кількості енергії, що вводиться в іскровий канал за однаковий час. В розрахункових варіантах кількість енергії, що вводиться в іскру, зросла на 20–30 % при збільшенні початкового тиску

середовища з 0,11 МПа до 0,55 МПа (рис. 20). Моделювався іскровий розряд в кисні електричного кола з параметрами: $C = 0,25$ мкФ, $U_C = 15$ кВ, $L = 2$ мкГн, $R_C = 10$ мОм, $l_{sp} = 5$ мм.

Визначено, що урахування нерівноважного коливального збудження молекул за фронтом ударної хвилі в розробленій моделі розширення іскрового каналу в реагуючих газах дозволяє коректно описати процес ініціювання детонації іскровим розрядом. За фронтом ударної хвилі спочатку відбувається нагрівання газової суміші. При цьому суміш починає реагувати із затримкою, що залежить від швидкості протікання процесу коливальної релаксації. Тривалість періоду затримки залежить від інтенсивності ударної хвилі (рис. 21).

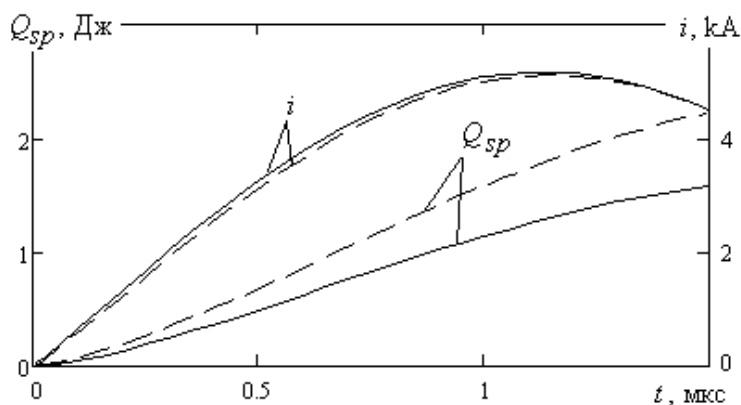


Рисунок 20 – Порівняння струмів i і кількості енергії Q_{sp} в розрахункових варіантах: суцільні криві – $p_{01} = 0,11$ МПа; пунктирні – $p_{02} = 0,55$ МПа

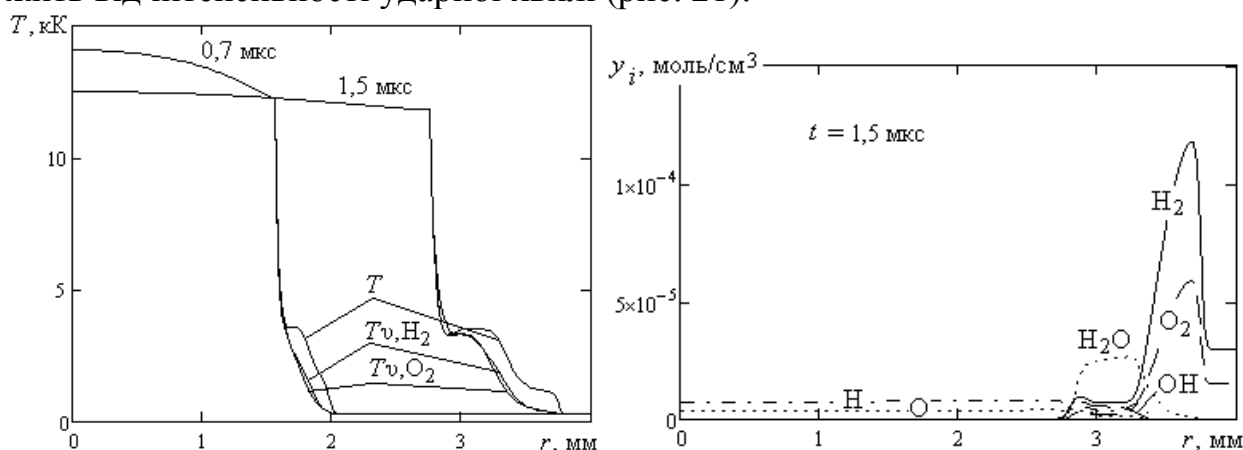


Рисунок 21 – Розподіл температури (зліва) та молярної густини компонентів вздовж радіальної координати r в розрахунковому варіанті: $C = 0,25$ мкФ, $U_C = 15$ кВ, $L = 2$ мкГн, $R_C = 10$ мОм, $l_{sp} = 5$ мм

У **четвертому розділі** представлені результати експериментального дослідження електророзрядного ініціювання детонації.

Для генерування синхронних іскрових розрядів розглядалися наступні електророзрядні схеми (рис. 22). Встановлено, що для ініціювання детонації кращою є схема (в), з керованим послідовним багатоелектродним розрядником із спеціально розташованими в просторі електродами. В даній схемі синхронізація генерування ударних хвиль, що визначаються струмами іскрових розрядів, забезпечується за рахунок послідовного включення іскрових проміжків в електричному колі. В схемах (а, б) виявлена неприпустима для ініціювання детонації затримка у часі між максимумами імпульсів струму, що досягає декількох мікросекунд.

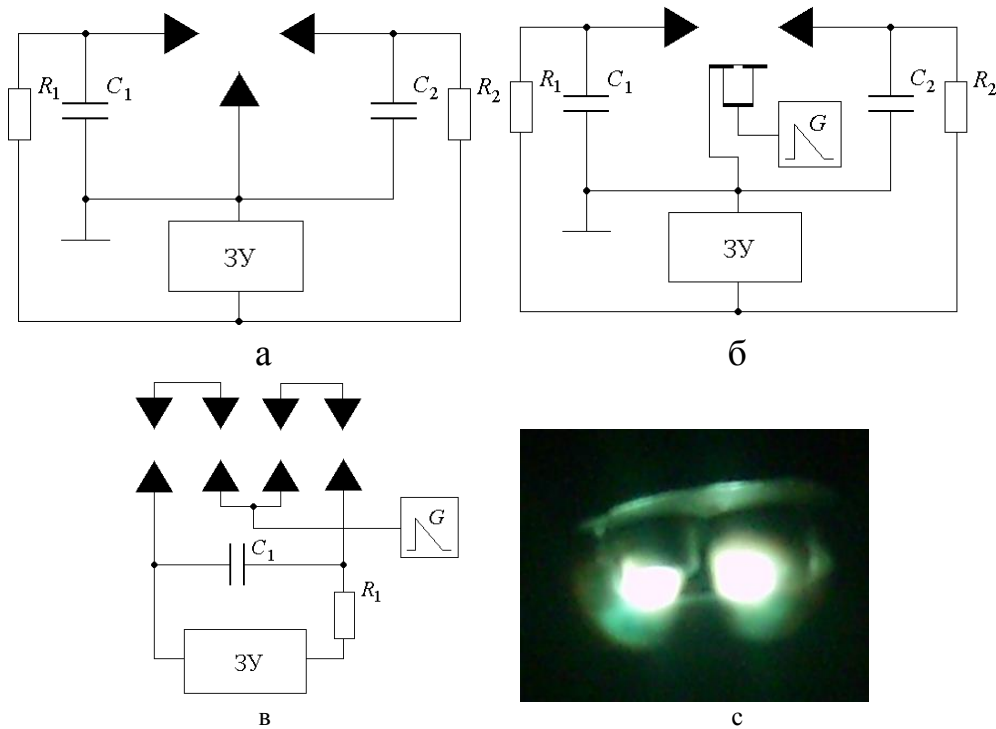


Рисунок 22 – Електричні схеми для генерування синхронних іскрових розрядів і приклад реалізації

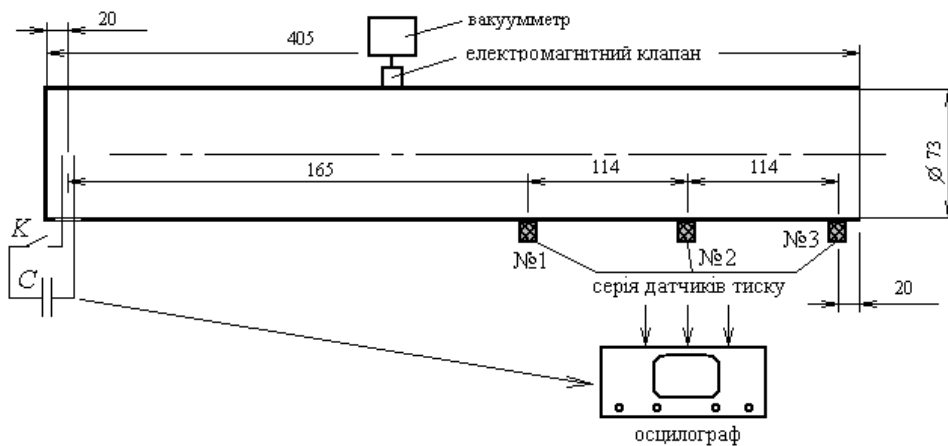


Рисунок 23 – Схема експериментального стенду. Розміри в [мм]

Порівняльні експериментальні дослідження енергоефективності систем ініціювання детонації проводилися на спеціально розробленому стенді. Стенд складався з детонаційної труби, системи ініціювання детонації (запалення) іскровим розрядом, системи формування детонуючої газової суміші і вимірювального комплексу. Детонаційна труба виготовлена зі сталеві труби завдовжки 405 мм з внутрішнім діаметром 73 мм.

Вимірювання швидкості розповсюдження ударної або детонаційної хвилі в трубі здійснювалося непрямим методом, заснованим на вимірюванні часу проходження хвилею відстані між п'єзодатчиками тиску (рис. 23). Відстань між датчиками дорівнювала 114 мм. Сигнали реєструвалися на 4-х каналному осцилографі ТЕКТРОНІХ 2024В.

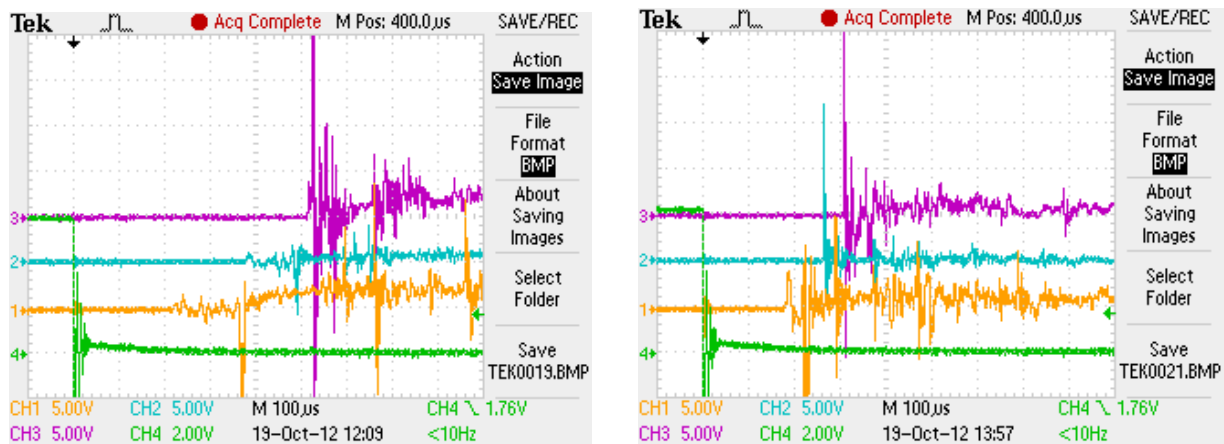


Рисунок 24 – Сигнали з датчиків тиску (№ 1, 2, 3) і напруги на ємності (№ 4), що одержані при одноіскровому (а) і двоіскровому (б) розрядах у воднево-кисневій суміші

За рахунок зміни одноіскрової (довжина розрядного проміжку дорівнювала $H = 7 \pm 0,1$ мм) на двоіскрову розрядну систему (відстань між осями іскрових розрядів дорівнювала $Z = 7 \pm 0,1$ мм, довжина розрядних проміжків складала по $H = 3 \pm 0,1$ мм) досягнуто підвищення енергоефективності ініціювання детонації. З'єднання ємності з розрядними електродами виконувалося у вигляді близько розташованих паралельних шин, що дозволило зменшити еквівалентну індуктивність розрядного кола. При однаковій накопиченій енергії в конденсаторі ($52 \pm 0,5$ Дж) при ініціюванні детонації у воднево-кисневій суміші в умовах проведених досліджень відбулося скорочення часу переходу горіння в детонацію (ПГД) в 2 рази і довжини ділянки ПГД в 1,5 рази (рис. 24). У дослідженнях використано конденсатор ИК50-3У4 ємністю $C = 2,75 \pm 0,05$ мкФ. Індуктивність розрядного кола складала $L_{\text{ц}} = 270 \pm 10$ нГн, активний опір дорівнював $R = 80 \pm 5$ мОм. Підвищення енергоефективності ініціювання детонації досягнуте включенням насичуючого дроселя з малою залишковою індуктивністю в розрядне коло з двоіскровими синхронними і паралельно-генеруємими розрядами. В розрядне коло включався дросель насичення з підмагнічуванням. Як осердя дроселя використовувався магнітопровід ГМ440 типорозміру ОЛ60/100. Обмотка намагнічування складалася з 6 витків. Початкова індуктивність дроселя складала 21,5 мкГн, залишкова індуктивність не перевищувала 400 нГн. Осцилографування перехідних процесів в такому колі відобразило вплив включення нелінійної індуктивності (рис. 25).

Відбулося зростання періоду розряду, зменшення амплітуди струму. В області перемагнічування дроселя у розрядному струмі відбувається відхилення кривої струму від кривої, характерної для коливального затухаючого розряду. У представлених результатах досліджувалося ініціювання детонації в стехіометричній суміші пропана-бутану технічного з киснем. Відстань між осями іскрових розрядів дорівнювала $Z = 5 \pm 0,1$ мм, довжина розрядних проміжків складала по $H = 1,5 \pm 0,1$ мм.

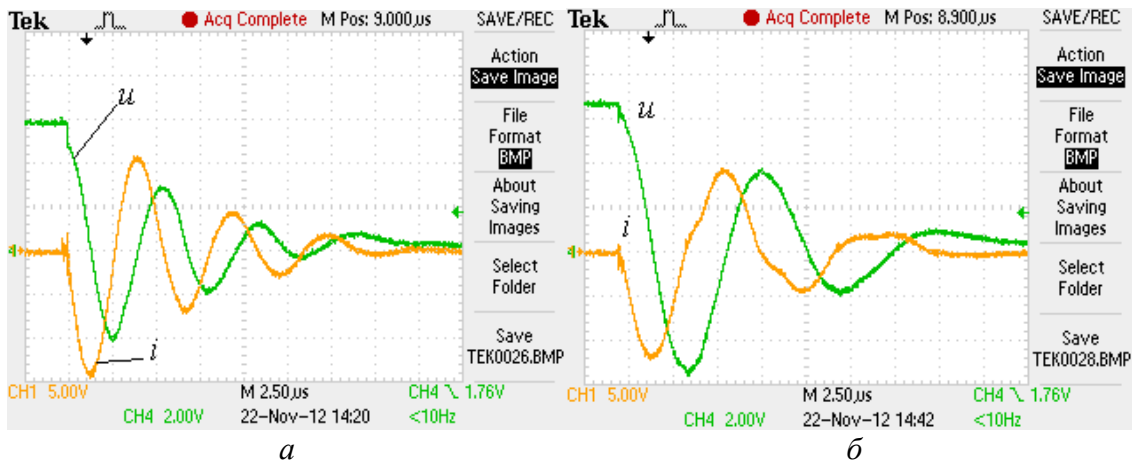


Рисунок 25 – Розрядний струм i в електричному колі і напруга u на ємності в RLC-колі (а) і при включенні нелінійної індуктивності в RLC-коло (б)

Як джерело енергії використано конденсаторну збірку ємністю $C = 1,65$ мкФ. Повна енергія розряду склала 15 ± 1 Дж. У разі замагнічування дроселя від зовнішнього джерела виникало скорочення часу і ділянки ПГД у 1,5...2 рази у порівнянні з ініціюванням при попередньому насиченні дроселя (рис. 26). Такий вплив включення дроселя, що насичується, в розрядне коло при двохіскровому запалюванні пояснюється тим, що не дивлячись на зниження амплітуди ударних хвиль, що генеруються, відбувається більш повільне загасання хвиль, чим досягається збільшення ефективності запалювання в області їх зіткнення.

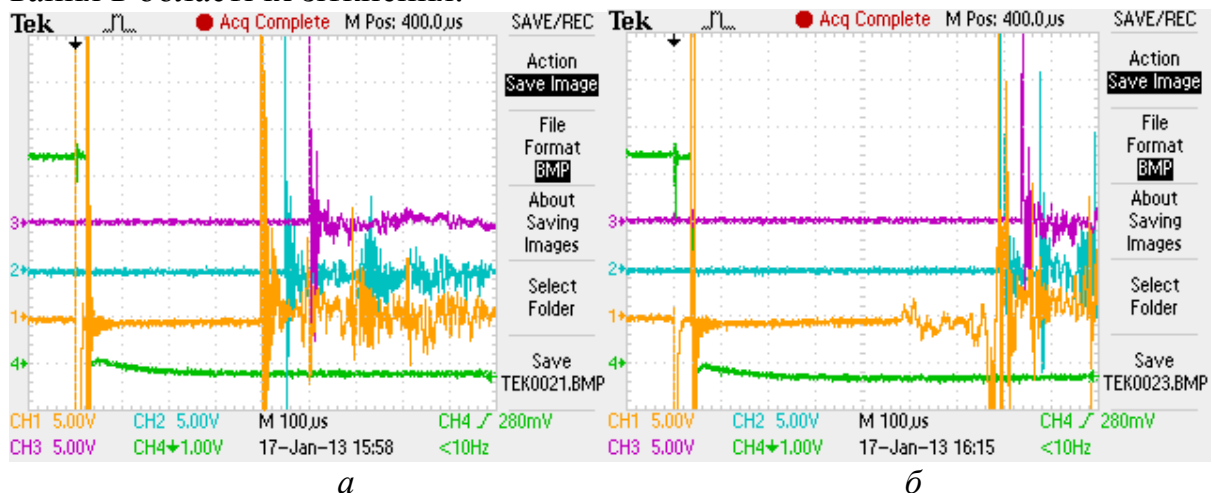


Рисунок 26 – Сигнали з датчиків тиску (№ 1, 2, 3) і напруги на ємності (№ 4), що одержані при двохіскровому розряді: а) замагнічений дросель; б) дросель в насиченні

У п'ятому розділі досліджені напрямки удосконалення електророзрядної техніки запалювання горючої газової суміші іскровим розрядом.

Досліджувалися умови створення стану плазми в іскровому каналі за допомогою електророзрядного кола, коли в іскрі досягнута температура, що перевищує температуру запалювання горючої суміші, але не перевищує температуру, при якій досягається повна дисоціація молекул. Використана модель плазми у стані часткової локальної термодинамічної рівноваги (ЧЛТР), що враховує відрив температури електронів від температури важкої компо-

ненти плазми. Досліджено розширення струмопровідного каналу іскри за рахунок електронної теплопровідності в умовах передачі енергії електронів із струмопровідного каналу в оточуючу слабо іонізовану область з нерівноважним поглинанням енергії, що передається. Розглядалося поглинання енергії, що передається, на зростання температури електронів і ступеню іонізації газу. Під час оцінки розширення газодинамічний стан середовища заморожувався, оскільки рухливість електронів на порядок величини перевершує рухливість іонів. Розв'язувалося рівняння теплопровідності в одновимірній постановці задачі для електронного газу у вигляді

$$\left[C_{Ve} - eI \frac{dn_e}{dT_e} \right] \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{el} \frac{\partial T_e}{\partial r} \right), \quad (48)$$

де C_{Ve} – питома електронна теплоємність ($C_{Ve} = 1,5R^*$); r – координата за відстанню.

У початкових умовах, зовні струмопровідного каналу задавалася функція розподілу температури електронів і відповідний їй розподіл густини електронів по моделі повної локальної термодинамічної рівноваги

$$T_e(r)|_{t=0, r>0} = T(r). \quad (49)$$

На лівій границі, що моделює струмопровідний канал з сильноіонізованою плазмою, приймалася фіксована температура електронів до моменту зміни радіусу r_0 струмопровідного каналу, що розраховується за двохтемпературною моделлю

$$T_e|_{r=0} = T_e(r_0) = const. \quad (50)$$

Ліва границя каналу задавалася рухомою. Розширення струмопровідного каналу призводило до зміни r_0 і, відповідно, до встановлення нового значення температури електронів, яка визначається по двохтемпературній моделі плазми. Умовою зсуву границі у напрямку слабо іонізованої плазми був перехід шару плазми, що оточує струмопровідний канал, в сильно іонізований стан. На підставі аналізу переміщення (рис. 27а) границі модельованого струмопровідного каналу у кисні, зроблена оцінка швидкості розширення струмопровідного каналу по механізму електронної теплопровідності (рис. 27б).

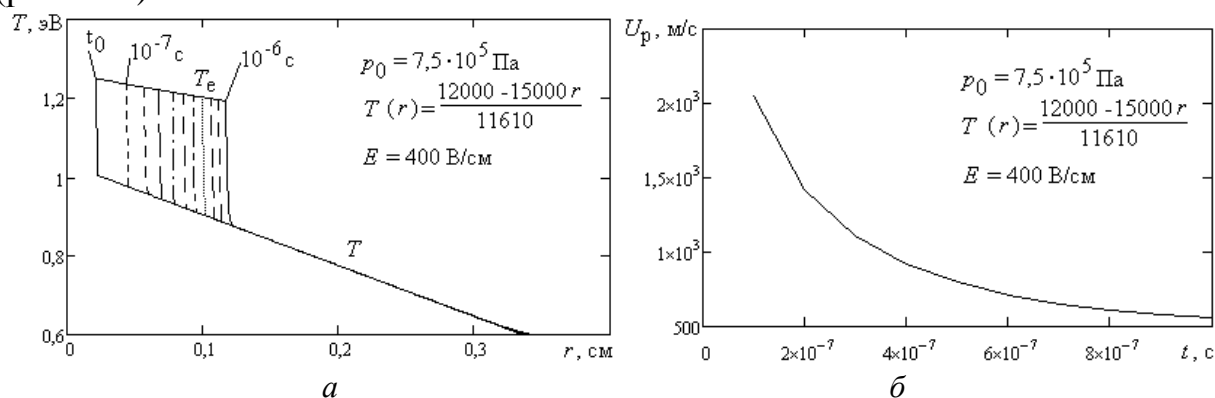


Рисунок 27 – Розрахункова зміна розподілу температури електронів в розрахунковій області (зліва) і швидкість розширення струмопровідної області (праворуч)

Сумірність газодинамічної швидкості розширення струмопровідного каналу іскри із швидкістю розширення за рахунок електронної теплопровідності в умовах ЧЛТР дало підстави для дослідження залежності радіусу струмопровідного каналу від стану розрядного середовища по моделі ЧЛТР (рис. 28).

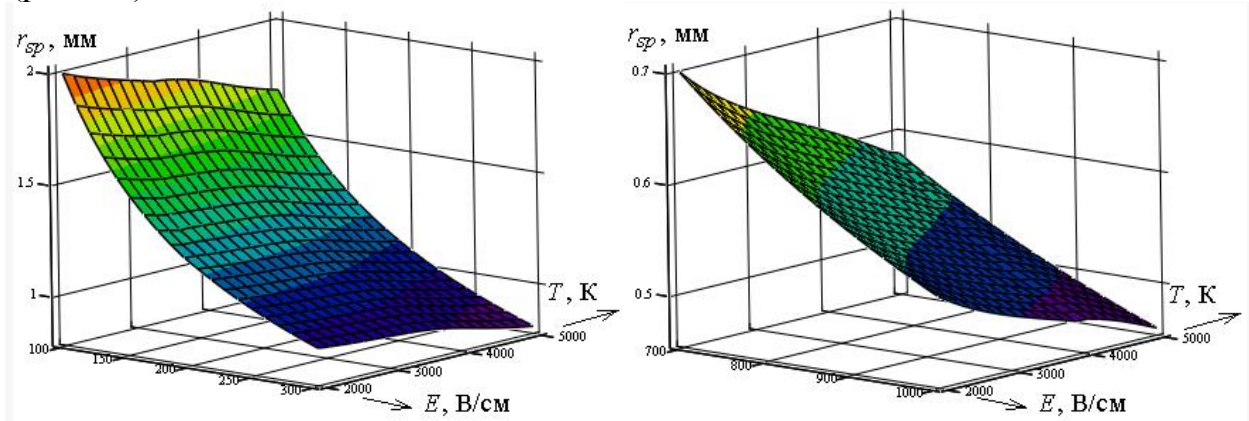


Рисунок 28 – Залежність радіусу струмопровідного каналу від напруженості електричного поля і температури газу при $p = 0,1$ МПа (зліва) та $p = 1$ МПа (праворуч) і розрядному струмі $i = 300$ А

На підставі аналізу залежностей радіусу струмопровідного каналу одержано висновок про доцільність обмеження швидкості введення енергії в іскровий розряд для збільшення об'єму запалювання таким чином, щоб тиск в струмопровідному каналі іскри вирівнювався з тиском навколишнього середовища. Приблизний розрахунок часу Δt , за яким в електророзрядному обладнанні для запалювання повинне досягатись амплітудне значення струму i_{\max} , визначається за виразом

$$i_{\max} = \pi E \cdot \sigma \cdot u_{sp}^2 \cdot \Delta t^2, \quad (51)$$

де u_{sp} – середня швидкість розширення струмопровідного каналу, яка задається у декілька разів меншою, ніж швидкість звуку у розрядному середовищі.

Приймемо, що на даному інтервалі часу середня швидкість дорівнює $u_{sp} = 50$ м/с, середня провідність плазми в струмопровідному каналі іскри дорівнює $\sigma = 30$ Ом⁻¹см⁻¹ і середня напруженість поля складає $E = 100$ В/см. Одержимо, що для отримання об'ємного запалювання в газовому середовищі атмосферного тиску на розрядний струм $i = 100$ А вимагається вийти за час $t \approx 10$ мкс.

Наступна вимога до електророзрядного обладнання для запалювання полягає в забезпеченні умов для переважного виділення енергії розряду в газорозрядному проміжку. Дана умова досягається у випадку, якщо активний опір розрядного кола не перевищує опір іскрового каналу. Із збільшенням радіусу розрядного каналу (об'єму запалювання) необхідно обмежувати опір розрядного кола (рис. 29).

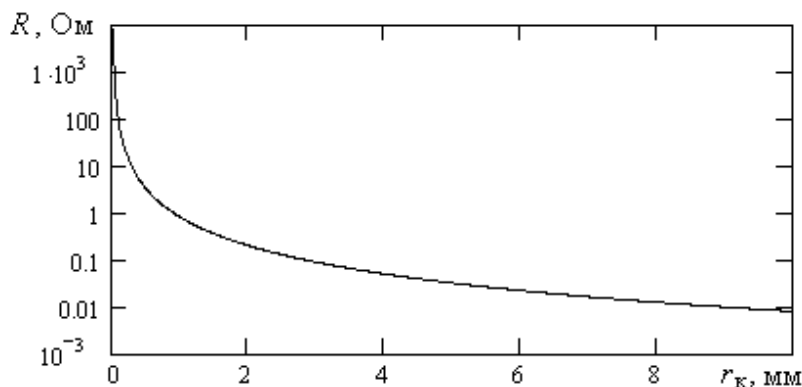


Рисунок 29 – Оцінка залежності опору розрядного каналу від його радіусу при довжині проміжку 0,5 см

Для отримання високовольтного розряду і подальшого введення енергії в іскровий канал при обмеженій швидкості введення використана наступна електрична схема (рис. 30).

Розроблений високовольтний імпульсний трансформатор задовольняє наступним параметрам: вихідна амплітуда імпульсу напруги – більше 45 кВ; активний опір вторинної обмотки – 95,8 мОм; індуктивність розсіювання вторинної обмотки – 2,23 мГн. Після пробією розрядного проміжку відбувається насичення осердя трансформатора. Як комутатор використано IGBT-транзистор.

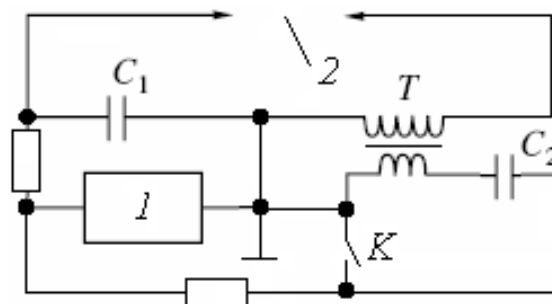


Рисунок 30 – Принципова електрична схема системи високоенергетичного іскрового запалювання: C – електричні ємності; T – імпульсний трансформатор; K – комутатор; I – джерело живлення; 2 – розрядний проміжок

Система високоенергетичного іскрового запалення працює на частоті до 200 Гц. Досягнуте збільшення об'єму запалювання (рис. 31).

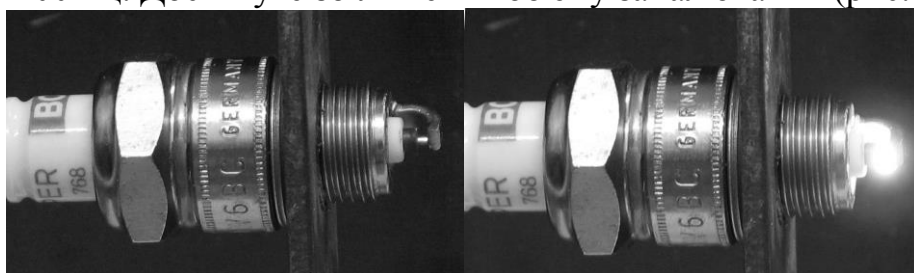


Рисунок 31 – Вид іскрового каналу, що створюється від імпульсу високовольтного трансформатора (зліва) і від розряду ємності через вторинну обмотку трансформатора (праворуч)

Досліджувалася швидкість розширення струмопровідного каналу іскри методом швидкісного фотографування за допомогою швидкісного фотореєстратора СФР в режимі лупи часу. Швидкісна фотографія розвитку розряду, одержана по даній схемі, показала, що в сильнострумовій стадії розряду діаметр видимої області каналу досягає 3 мм в повітрі атмосферного тиску при енергії, що вкладається в розряд, близько 0,5 Дж (рис. 32). Швидкість розширення струмопровідного каналу іскри на період вимірювань досягла бли-

зько 100 м/с. Таким чином, в розробленій високоенергетичній системі запалювання досягнуте дозвукове розширення струмопровідного каналу, чим забезпечено умову для енергоефективного об'ємного запалювання горючих газових сумішей.

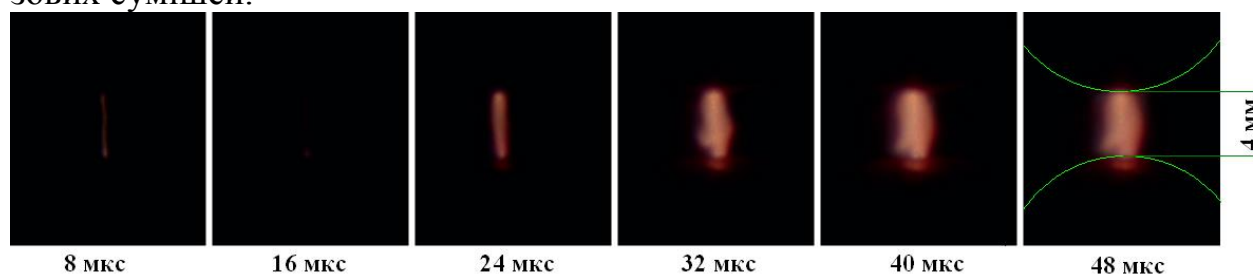


Рисунок 32 – Швидкісна фотографія розширення іскрового каналу в повітрі

Досліджено розрядний струм в іскрі, що виникає в розробленій системі високоенергетичного іскрового запалювання (рис. 33). Вимірювання проведено безіндукційним датчиком струму CSNE-151 фірми Honeywell. У розряді спостерігається затримка за часом між пробоем іскрового проміжку від високовольного імпульсу і початком наростання розрядного струму на іскровому проміжку в результаті розряду ємності C_2 , яка склала близько 40 мкс. Амплітуда розрядного струму склала не більше 95 А при часі наростання близько 15 мкс. Одержаний час наростання струму задовольняє визначеним вимогам.

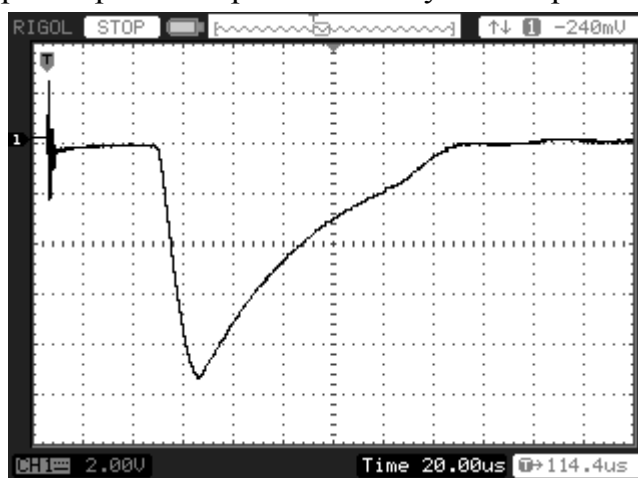


Рисунок 33 – Розрядний струм в іскрі, що створюється розробленою системою високоенергетичного запалювання. Чутливість датчика – 10 А/В.

У шостому розділі досліджено області застосування розроблених систем запалювання і ініціювання детонації іскровим розрядом.

Системи запалювання на основі високоенергетичного іскрового розряду доцільно використовувати в газових двигунах як основну систему запалювання, в системах пуску газотурбінних двигунів, для швидкого холодного пуску поршневих двигунів, а також в теплових установках, що працюють на сумішах, що важко спалахують. Системи запалювання з регульованою енергією розряду доцільно встановлювати на поршневих бензинових двигунах.

Експериментально підтверджено, що розроблена система суттєво покращує пускові якості двигуна. Випробування проводилися на двотактному форсованому турбопоршневому 5-ти циліндровому двигуні типу 5ТДФ. Досягнуто пуску двигуна на протязі 5 секунд при температурі 4...7 °С. При відключеній системі пуску іскровим розрядом двигун не запускався. Розряд запалювався при тиску в циліндрах двигуна 4...8 МПа. Енергія, що вкладалась в кожний іскровий розряд, складала біля 1 Дж. Супровід пуску двигуна здій-

снювався до частоти обертання колінчастого валу 1000 хв^{-1} . Частота іскроутворення склала до 85 Гц .

Застосування розробленої системи ініціювання детонації в технології термо-імпульсного зняття задирок забезпечує підвищення максимальної температури в робочій камері на $300 \dots 1000 \text{ К}$ при менших витратах робочих газів, що призводить до більш швидкого нагрівання тонкостінних елементів і ефективного використання енергії вибуху для видалення задирок.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи розроблені високовольтні енергоефективні електророзрядні системи генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ на основі інтенсифікації електрофізичних та фізико-хімічних процесів в іскровому каналі, і одержані наступні науково-технічні результати:

1. Визначено, що для опису процесу розширення іскрового каналу в реагуючому газі доцільно враховувати перехідні процеси в електророзрядному колі, процеси іонізації, дисоціації і випромінювання в струмопровідному каналі іскри, нерівноважну кінетику хімічних реакцій, коливальну нерівноважність за фронтом ініціюючої ударної хвилі, відрив температури електронів від температури важкої компоненти плазми, електронну теплопровідність.

2. Розроблена узагальнена математична модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах, що дозволяє досліджувати вплив параметрів електричних розрядних кіл, що задають введення енергії в іскровий канал, на процеси, що відбуваються як в іскровому каналі, так і в області дії ударної хвилі, що генерується в іскрі, на хімічно реагуюче газове середовище. Особливості моделі полягають у визначенні області струмопровідного каналу на підставі аналізу термодинамічного стану газу, і в урахуванні нерівноважної кінетики хімічних реакцій в умовах відриву коливальної температури від кінетичної температури газу. При дослідженні розширення іскрового каналу в суміші водню з повітрям в області струмопровідного каналу розглянуто компоненти e , O , O_+ , O_{++} , H , H_+ , N , N_+ , N_{++} по моделі локальної термодинамічно-рівноважної плазми. Зовні струмопровідного каналу розглянуто компоненти H_2 , O_2 , H_2O , H , O , OH , H_2O_2 , HO_2 , N_2 , N . Достовірність розробленої моделі підтверджена задовільним сходженням розрахункових і експериментальних результатів. Так, розрахункові значення напруженості електричного поля знаходяться в межах між експериментальними значеннями напруги на розрядному проміжку, приведеної до довжини проміжку, і значеннями напруженості електричного поля в стовпі іскрового каналу для розряду в повітрі. Розрахункова динаміка розширення іскри сходиться з експериментом з похибкою до 20% .

3. Виявлена лінійна залежність кінетичної енергії газового потоку, що формується іскровим розрядом, від енергії розряду, що вводиться в іскру. Коефіцієнт пропорційності між даними величинами не залежить від параметрів RLC-кола і в середовищі кисню складає $0,06-0,1$.

4. Встановлено, що зі зниженням індуктивності розрядного кола зростає швидкість виділення енергії в іскровому розряді, підвищуються тиск і температура, що досягаються в іскровому каналі. Миттєва напруженість електричного поля в однакові моменти часу в інтервалі 0,7–1 мкс при різних індуктивностях кола відрізняється в межах одного порядку. Зі зменшенням опору розрядного кола збільшується тривалість збігу початкових ділянок на кривих енергії, що вводиться в іскровий канал. Зі скороченням періоду розряду частка енергії, що вводиться в іскру за перший напівперіод розряду, зростає. Із зростанням напруги заряджання ємності кількість енергії, що вводиться в іскру за однаковий час, зростає не прямо пропорційно кількості енергії, що запасується в конденсаторі.

5. Визначено, що електрична схема розряду з коротким замиканням іскрового проміжку в RLC-колі після $\frac{1}{4}$ періоду розряду забезпечує збільшення швидкості введення енергії в іскровий канал, що підвищує інтенсивність ударної хвилі, що генерується. Дану схему доцільно використовувати в системах прямого ініціювання детонації іскровим розрядом.

6. Встановлено, що низька енергоефективність ініціювання детонації високовольтним розрядом імпульсного конденсатора переважно викликана малою часткою енергії розряду, що виділяється за період формування ударної хвилі, що ініціює детонацію, і великою часткою витрат енергії на процес дисоціації. Зокрема, в розрахунковому варіанті при ініціюванні детонації від розряду конденсатора ємністю 0,25 мкФ, зарядженого до напруги 10 кВ, при індуктивності розрядного кола 2 мкГн, активному опорі 10 мОм і довжині розрядного проміжку 5 мм, в стехіометричеській суміші водню з киснем атмосферного тиску за $\frac{1}{4}$ періоду розряду в іскрі виділяється 5,5 % від повної енергії, а в кінетичну енергію на цей момент часу перетвориться 85 мДж енергії, що складає 9,4 % від введеної в іскру або 0,68 % від повної енергії розряду. За цей час процесом дисоціації поглинулося 486 мДж, що складає 60 % від введеної в іскру або 3,9 % від повної енергії.

7. Визначено, що підвищення енергоефективності техніки ініціювання детонації іскровим розрядом досягається скороченням періоду розряду в умовах введення в іскровий канал мінімальної енергії, достатньої для ініціювання детонації. Отримано збільшення показника енергоефективності електророзрядної техніки ініціювання детонації з 2,4 % до 50 % за рахунок зниження періоду розряду з 4,5 мкс до 0,6 мкс. Це забезпечило зниження повної енергії розряду, при якій досягається ініціювання детонації, з 12,5 Дж до 2,45 Дж.

8. Визначено, що RLC-коло з нелінійною індуктивністю заданих параметрів і послідовно включеним іскровим проміжком дозволяє генерувати в іскрі ударну хвилю, параметри якої наближаються до квазістаціонарної. В розрахунковому варіанті при ініціюванні детонації від розряду конденсатора ємністю 1 мкФ, зарядженого до напруги 5 кВ, при активному опорі 10 мОм і послідовно включеною нелінійною індуктивністю, в стехіометричній суміші водню з киснем атмосферного тиску підтверджено формування квазістаціо-

нарної ударної хвилі на інтервалі часу до 1 мкс із стрибком тиску у фронті хвилі 3,5–4,5 МПа.

9. Обґрунтовано конструкцію електродної системи з поперечною рамкою і поглибленими в ізолятор електродами, що забезпечує створення двох іскрових каналів, розташованих паралельно один до одного. В електророзрядній техніці ініціації детонації є достатнім поглиблення електродів в ізолятори на 0,5 мм.

10. Визначено, що із збільшенням початкового тиску в газорозрядному середовищі відбувається зростання кількості енергії, що вводиться в струмопровідний канал до однакових моментів часу. В розрахункових варіантах кількість енергії, що вводиться в іскру, зростає на 20–30 % при збільшенні початкового тиску середовища з 0,11 МПа до 0,55 МПа;

11. Експериментально встановлено, що скорочення відстані і часу переходу горіння в детонацію в детонаційних трубах досягається за рахунок застосування запалення на основі двохіскрових розрядів, що генеруються синхронно і паралельно один одному, і включення в розрядне коло малоіндуктивного дроселя, що насичується. В умовах проведених досліджень при однаковій енергії розряду досягнуто скорочення часу переходу горіння в детонацію в 2–3 рази і довжини ділянки переходу горіння в детонацію в 1,5–2 рази;

12. Вироблені вимоги до електророзрядної техніки запалювання високоенергетичним іскровим розрядом, що забезпечує енергоефективне об'ємне запалювання горючих газових сумішей. Вимоги полягають в обмеженні часу наростання розрядного струму залежно від характерного часу вирівнювання тиску в газорозрядному середовищі. Експериментальне дослідження холодного пуску дизельного двигуна з розробленою системою запалювання високоенергетичним іскровим розрядом підтвердило надійність запалювання горючої газової суміші даною системою. Досягнуто пуск 5-ти циліндрового форсованого двигуна в умовах низьких температур за час 5–10 с.

13. Результати роботи впроваджені на ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова» (м. Харків) та в Інституті тепло- і масообміну імені А.В. Ликова НАН Білорусі (м. Мінськ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коритченко К. В. Застосування бронетанкової техніки для розмінування мінних полів об'ємним вибухом / А. М. Сиротенко, А. М. Довбня, К. В. Коритченко, О. В. Стаховський // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 1. – С. 178–188. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування газової детонації та можливість практичної реалізації для розмінування мінних полів.*

2. Коритченко К. В. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с приложением для разминирования минных полей / А. Н. Сиротенко, А. Н. Довбня, К. В. Коритченко, О. В. Стаховський // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 1. – С. 166–177. *Здобувач обґру-*

нтував доцільність застосування газової детонації та можливість практичної реалізації для розмінування мінних полів.

3. Коротченко К. В. Оценка эффективности выделения энергии в искре при ёмкостном разряде / К. В. Коротченко // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – Т. 6, № 4. – С. 586–589.

4. Коротченко К. В. Применение управляемой импульсной дуги для плазменного воспламенения / К. В. Коротченко // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – № 1. – С. 34–39.

5. Коротченко К. В. Влияние газодинамических процессов на развитие ионизационно-перегревной неустойчивости в головке лидера / К. В. Коротченко, И. А. Чертищев // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2007. – Т. 6, № 4. – С. 549–554. *Здобувач розробив математичну модель, здійснив чисельний розрахунок та аналіз результатів.*

6. Коротченко К. В. Технические средства разминирования минных полей взрывным способом / А. В. Серпухов, А. Н. Сиротенко, К. В. Коротченко О.В. Стаховский // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – № 1. – С. 48–55. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування газової детонації та можливість практичної реалізації для розмінування мінних полів.*

7. Коротченко К. В. Управление импульсной дугой с целью эффективного разогрева газа / К. В. Коротченко, А. Н. Довбня, Ю. Я. Волколупов, А. И. Косой, С. М. Шкирида, И. А. Чертищев // Журнал технической физики. – С.Петербург: РАН, 2008. – Т. 78, № 4. – С. 26–34. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував можливість застосування двотемпературної моделі плазми.*

8. Коротченко К. В. Высокоэффективная разрядная система зажигания с регулируемым выделением энергии в импульсной дуге / К. В. Коротченко, В. Ф. Болух, С. М. Шкирида, А. И. Косой // Техническая электродинамика. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2008. – Тем. выпуск, Ч.3. – С. 109–114. (реферується у реферативних журналах «Джерело» (Україна) та ВІНТІ РАН (Росія)) *Здобувач розробив високоефективну розрядну систему запалювання, здійснив експериментальне дослідження параметрів системи та її випробування.*

9. Коротченко К. В. Моделирование розвитку іскрового каналу у класичній системі запалювання ДВЗ / К. В. Коротченко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів: НУ «ЛП», 2008. – № 613. – С. 15–19.

10. Коротченко К. В. Расчет электрической цепи для решения задач воспламенения и инициирования детонации импульсной дугой / К. В. Коротченко // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2008. – Т. 7, № 2. – С. 165–170.

11. Коротченко К. В. Основні напрямки розвитку електромеханічних імпульсних прискорювачів / В. Ф. Болух, К. В. Коротченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХП», 2009. – № 4. – С. 7–13. *Здобувач*

проаналізував електророзрядне обладнання, що застосовують у імпульсних прискорювачах.

12. Корытченко К. В. Способы облегчения пуска танкового двухтактного дизельного двигателя / К. В. Корытченко, В. М. Замана, Ю. Ю. Кошкарров // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 2. – С. 174–183. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування електричного розряду для забезпечення холодного пуску дизельного двигуна.*

13. Корытченко К. В. Индукционное-динамическое ускорение массивных объектов, обладающих начальной скоростью // В. Ф. Болух, К. В. Корытченко, А. Г. Кочерга // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 6. – С. 8–12. *Здобувач розробив математичну модель розрахунку перехідних електричних процесів, визначив вплив початкової швидкості.*

14. Корытченко К. В. Тенденции развития автомобильных систем зажигания / К. В. Корытченко, Д. О. Волонцевич, Ю. В. Ковцур // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 39. – С. 44–55. *Здобувач обґрунтував необхідність збільшення енергії іскрового розряду в системах запалювання.*

15. Корытченко К. В. Полегшення пуску двигуна за рахунок релаксації енергії коливального збудження в повітряному заряді / К. В. Корытченко, В. М. Замана // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2010. – № 27. – С. 52–55. *Здобувач розрахував зміну кривої стиснення в умовах коливальної релаксації повітряного заряду.*

16. Корытченко К. В. Моделирование инициирования детонации в водородно-кислородной смеси по экспериментальной динамике ввода энергии в искровой канал / К. В. Корытченко, В. Ф. Болух, А. В. Галак // Техническая электродинамика. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. – Тем. выпуск. – С. 281–286. *Здобувач розробив математичну модель, здійснив розрахунок енергії, що вводиться в іскровий канал, здійснив обробку результатів моделювання.*

17. Корытченко К. В. Обоснование динамики ввода энергии в газоразрядный канал при моделировании инициирования детонации искровым разрядом / К. В. Корытченко, В. Ф. Болух, А. В. Галак // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 3. – С. 70–73. *Здобувач зробив критичний аналіз відомих моделей ініціювання детонації іскровим розрядом, обґрунтував методіку розрахунку енергії, що вводиться в іскровий канал.*

18. Корытченко К. В. Математичне моделювання холодного пуску дизельних двигунів зі збудженим повітряним зарядом / А. П. Марченко, К. В. Корытченко, В. М. Замана, І. І. Сукачов, Ю. І. Кістерний // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 18. – С. 112–119. *Здобувач розрахував зміну кривої стиснення в умовах коливальної релаксації повітряного заряду.*

19. Корытченко К. В. Усовершенствованный метод расчета динамики ввода энергии в искровой канал по кривой разрядного тока / К. В. Корытченко,

А. В. Галак // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 10, № 1. – С. 51–59. *Здобувач обґрунтував метод розрахунку енергії, що вводиться в іскровий канал.*

20. Корытченко К. В. Экспериментальное исследование эффективности ввода энергии в газовом разряде с предиионизацией / К. В. Корытченко, В. Ф. Болюх, А. В. Галак // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 10, № 3. – С. 361–367. *Здобувач розробив методику проведення досліджень, здійснив обробку експериментальних результатів.*

21. Корытченко К. В. Моделювання стиснення повітряного заряду у дизельних двигунах в умовах релаксації енергії коливального збудження / К. В. Корытченко, В. М. Замана // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ ЗСУ, 2011. – № 1 (4). – С. 130–134. *Здобувач обґрунтував методику розрахунку коливальної релаксації у повітрі в умовах адіабатичного стиснення.*

22. Korytchenko K. V. Sources of energy absorption of spark discharge in direct detonation initiation / K. V. Korytchenko // Heat Transfer Research, Begell House Production. – 2012. – V. 43 (4). – P.311–326. DOI: 10.1615/HeatTransRes.v43.i4.30

23. Корытченко К. В. Механизм поперечного расширения токопроводящего канала искры на стадии перехода в дугу / К. В. Корытченко, Е. В. Поклонский, В. Ф. Болюх // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 5. – С. 63–70. *Здобувач обґрунтував необхідність урахування електронної теплопровідності при двотемпературному стані плазми в іскровому каналі для розрахунку його розширення, розробив математичну модель, та обробив результати.*

24. Корытченко К. В. Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления / К. В. Корытченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 49 (955). – С. 85–98.

25. Корытченко К. В. Теоретичне обґрунтування вимог до іскрового розряду в системі холодного пуску дизельного двигуна / В. М. Замана, К. В. Корытченко, С. А. Соколовський, Ю. В. Ковцур // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків: АВВ МВСУ, 2012. – Вип. 1 (19). – С. 14–18. *Здобувач удосконалив математичну модель двотемпературного стану плазми в іскровому каналі, обґрунтував умови зростання об'єму запалювання в іскровому розряді.*

26. Корытченко К. В. Математическое моделирование газодинамической стадии развития искрового разряда в кислороде / К. В. Корытченко, Е. В. Поклонский, Д. В. Винников, Д. В. Кудин // Вопросы атомной науки и техники. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2013. – № 4. – С.155–160. (реферується в виданнях Thomson Scientific (США)) *Здобувач розробив математичну модель розвитку іскрового розряду, зробив верифікацію розробленої моделі.*

27. Корытченко К. В. Экспериментальное исследование инициирования детонации искровым разрядом / К. В. Корытченко, В. И. Голота, Д. В. Кудин, С. В. Родионов // Инженерно-физический журнал. – Минск: ИТМО НАН Бе-

ларуси, 2013. – Т. 86, № 3. – С. 542–551. *Здобувач розробив дослідний стенд, обґрунтував методику проведення досліджень, обробив результати досліджень.*

28. Korytchenko Increasing of volume of thermal ignition source in spark ignition systems / K. Korytchenko, V. Bolukh, Yu. Kisterniy // Deflagrative and detonative combustion. Под ред. Габриеля Роя и С. М. Фролова. – 2010. – С. 91–104. *Здобувач обґрунтував умови зростання об'єму запалювання в іскровому розряді.*

29. Пат. 78083 Україна, МПК(2007) F41H11/00 Спосіб розмінування мінно-вибухових загороджень / Сиротенко А. М., Янчик О. Г., Стаховський О. В., Коритченко К. В., Ларин О. Ю.; Заявник та патентовласник Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут". – № а200501563; заявл. 21.02.2005; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2, 2007. – 2 с.: іл. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування газової детонації та можливість практичної реалізації для розмінування мінних полів.*

30. Пат. 94063 Україна, МПК(2006) F41H11/14, F41H11/18 Спосіб розмінування мінно-вибухових загороджень / Серпухов А. В., Стаховський О. В., Кістерний Ю. І., Коритченко К. В.; Заявник та патентовласник Факультет військової підготовки НТУ "ХПІ". – № а200805685; заявл. 30.04.2008; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7, 2011 – 4 с.: іл. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування газової детонації та можливість практичної реалізації для розмінування мінних полів.*

31. Пат. 91230 Україна, МПК (2009) H05H 1/02, F02K 99/00, H05H 11/00 Спосіб електродинамічного прискорення газоплазмового середовища і пристрій для його здійснення / Болух В. Ф., Довбня А. М., Стаховський О. В., Косой О. І., Коритченко К. В.; Заявник та патентовласник Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут". – № а200801334; заявл. 04.02.2008; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13, 2010. – 7 с.: іл. *Здобувач розробив математичну модель для розрахунку перехідних електричних процесів у індукційному прискорювачі з плазмовим кільцем.*

32. Korytchenko K. Impulse source of thermal plasma sprays / N. Mungkung, T. Thepluen, K. Korytchenko, A. Dovbnya, A. Pleshkov, Yu. Volkolupov, Yu. Tur // Proc. of 18th International symposium on plasma chemistry. – Kyoto, Japan, 2007. – P. 313. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував можливість застосування двотемпературної моделі плазми.*

33. Korytchenko K. Gas heating by controlled impulse arc / K. Korytchenko, V. Zakutin, N. Reshetnyak, I. Chertischev, A. Smorodskiy // Proc. of 28th International conference on phenomena in ionized gas. – Prague, Czech Republic, 2007. – Report 81. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував можливість застосування двотемпературної моделі плазми.*

34. Korytchenko K. Simulation of conditions for detonation initiation in unconfined space with use of accelerated jet stream / K. Korytchenko, Yu. Skob, M.

Ugryumov, A. Basteev, A. Kosoy // Proc. of 21st International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems. – Poitiers, France, 2007. – Report 33. *Здобувач обґрунтував режим прискорення плазмового кільця.*

35. Korytchenko K. Violent deflagration by impulse thermal plasma jet / K. Korytchenko, A. Kosoj, O. Stahovskiy, A. Pleshkov, A. Smorodskiy, S. Shkirida, V. Dyomin // Proc. of 21st International colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems. – Poitiers, France, 2007. – Report 256. *Здобувач розробив електророзрядне обладнання для генерування плазмового струменя.*

36. Korytchenko K. Effective gas heating by driving of pulsed arc / K. Korytchenko, V. Bolyukh, S. Shkirida // 23rd Symposium on plasma physics and technology. – Prague, Czech Republic, 2008. – P.188. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував можливість застосування двотемпературної моделі плазми.*

37. Korytchenko K. Influence on the electric field into positive column of pulsed arc / K. Korytchenko, V. Bolukh, E. Poklonskiy // Праці IV міжнародної конференції “Електроніка та прикладна фізика”. – К.: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Радіофізичний факультет, 2008. – С. 102–103. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував можливість застосування двотемпературної моделі плазми.*

38. Korytchenko K. High-voltage pulsed driving arc applied to ignition and detonation / K. Korytchenko // 22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems. – Minsk, Belarus, 2009. – Report120. *Здобувач обґрунтував механізми впливу на стан плазми в іскровому каналі, обґрунтував умови застосування двотемпературної моделі плазми.*

39. Korytchenko K. Application of arc-driving discharge to igniting / K. Korytchenko, V. Lisovskiy // 19 International symposium on plasma chemistry. – Bochum, Germany, 2009. – Report P2.14.11. *Здобувач здійснив експериментальне дослідження впливу параметрів електророзрядного обладнання на запалювання горючої газової суміші.*

40. Korytchenko K. Application of high-voltage pulsed-driving discharge to ignition and detonation initiation / K. Korytchenko, V. Bolyukh, O. Stahovskiy // 63rd Gaseous electronics conference and 7th International conference on reactive plasmas. – Maison de la Chimie, Paris, France, 2010 – Report DTP 00205. *Здобувач здійснив експериментальне дослідження впливу параметрів електророзрядного обладнання на запалювання горючої газової суміші.*

41. Коритченко К. В. Ініціювання детонації з перерозподілом енергії імпульсного розряду / К. В. Коритченко // Тези науково-технічної конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки». К.: Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, 2010. – С.75–76. *Здобувач визначив напрямки удосконалення електророзрядного обладнання для ініціювання детонації.*

42. Коритченко К. В. Можливість застосування плазмових технологій у засобах пуску танкових дизельних двигунів / В. М. Замана, К. В. Коритченко

// Збірка тез доповідей Третьої Всеукраїнської науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ". – Львів: ЛАСВ, 2010. – С. 73. *Здобувач обґрунтував доцільність застосування іскрового розряду для забезпечення холодного пуску дизельних двигунів.*

43. Коритченко К. В. Система електродинамічного прискорення бронебійних снарядів до танкової гармати / К. В. Коритченко, А. Г. Кочерга, В. Ф. Болух // Збірка тез доповідей Третьої Всеукраїнської науково-технічної конференції "Перспективи розвитку озброєння та техніки Сухопутних військ". – Львів: ЛАСВ, 2010. – С. 86. *Здобувач розробив математичну модель для розрахунку перехідних електричних процесів у індукційному прискорювачі.*

44. Korytchenko K. V. Comparison of conditions of direct detonation initiation by spark with one by pulsed arc according to the gradient mechanism of Ya.B. Zeldovich / K. V. Korytchenko, E. V. Poklonskiy, A. V. Galak // 23rd International colloquium the dynamics of explosions and reactive systems. – Irvine, USA, 2011. – Paper 217. – P. 108. *Здобувач визначив напрямки удосконалення електророзрядного обладнання для ініціювання детонації.*

45. Korytchenko K. V. Direct detonation initiation by pulsed arc according to the gradient mechanism of Ya. B. Zeldovich / K. V. Korytchenko, E. V. Poklonskiy, A. V. Galak // 20th International Symposium on Plasma Chemistry. – Philadelphia, USA, 2011. – PAC 01. – P. 46. *Здобувач визначив напрямки удосконалення електророзрядного обладнання для ініціювання детонації.*

46. Корытченко К. В. Математическое моделирование прямого инициирования детонации искрой / К. В. Корытченко, А. В. Галак, О. В. Стаховский // Тезисы докладов Второго минского международного коллоквиума по физике ударных волн, горения и детонации. – Минск, Беларусь, 2011. – С. 21. *Здобувач розробив математичну модель, здійснив розрахунок енергії, що вводиться в іскровий канал, здійснив обробку результатів моделювання.*

47. Коритченко К. В. Математичне моделювання ініціювання детонації іскровим розрядом у воднево-кисневій суміші / К. В. Коритченко, А. В. Галак // Збірник тез Четвертої всеукраїнської науково-технічної конференції. – Львів: Академія сухопутних військ, 2011. – С. 101–102. *Здобувач розробив математичну модель, здійснив розрахунок енергії, що вводиться в іскровий канал, здійснив обробку результатів моделювання.*

48. Коритченко К. В. Система іскро-плазмового запалювання газотурбінних двигунів / К. В. Коритченко, О. В. Галак, Ю. В. Ковцур // Тези доповіді восьмої наукової конференції Харківського університету Повітряних сил імені Івана Кожедуба "Новые технологии для защиты воздушного пространства". – Харків: ХУПС, 2012. – С. 85. *Здобувач обґрунтував електророзрядне обладнання для системи запалювання газотурбінних двигунів.*

49. Коритченко К. В. Детонаційні системи. Область застосування та проблеми реалізації / К. В. Коритченко, О. В. Серпухов, О. В. Галак, Ю. В. Хілько // Збірник матеріалів науково-технічної конференції ЦНДІ ОВТ ЗСУ "Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Зброй-

них Сил України”. – К.: ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2012. – С.67. *Здобувач обґрунтував область застосування розробленого електророзрядного обладнання у детонаційних системах.*

50. Korytchenko K. Spark discharge detonation initiation / K. V. Korytchenko, V. I. Golota, D. V. Kudin, S. V. Rodionov // 24th International colloquium the dynamics of explosions and reactive systems. – Taipei, Taiwan, 2013. – Report 26. *Здобувач розробив математичну модель, здійснив розрахунок енергії, що вводить в іскровий канал, здійснив обробку результатів моделювання.*

АНОТАЦІЇ

Коритченко К.В. Високовольтна електророзрядна техніка генерування ударних хвиль та нагрівання реагуючих газових середовищ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України, Харків, 2014.

Дисертація присвячена розвитку теорії електророзрядних процесів в електроіскрових каналах, що розвиваються в реагуючих газових середовищах з метою забезпечення розроблення високовольтних енергоефективних електророзрядних систем генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ.

Розроблено математичну модель розширення іскрового каналу в реагуючих газах, що враховує процеси в електричному розрядному колі, струмопровідному каналі іскри і особливості розвитку газодинамічних збурень в реагуючих газових середовищах. Виявлено взаємні зв'язки між параметрами електричних розрядних кіл і електророзрядними процесами в іскрових каналах, що розвиваються в реагуючих газових сумішах. Розроблено методи підвищення енергоефективності високовольтної електророзрядної техніки генерування ударних хвиль і нагрівання реагуючих газових середовищ. Зокрема, розроблено нову концепцію створення електророзрядного устаткування ініціювання детонації в газах ударними хвилями, що сходяться, на основі генерування синхронних і паралельно розташованих іскрових каналів з урахуванням взаємозв'язку параметрів електричного кола з просторовим розташуванням електродів. Створено нове енергетично і технологічно більш ефективно високовольтне електророзрядне обладнання генерування ударних хвиль і нагрівання хімічно реагуючих газових сумішей.

Ключові слова: електророзрядні процеси, електроіскровий канал, реагуюче газове середовище, моделювання, високовольтне електророзрядне обладнання

Korytchenko K. V. High-Voltage Electro-Discharge Technique of Generation of Shock Waves and Heating of Reactive Gases. – Manuscript.

The dissertation for a doctor`s degree on specialty 05.09.13. – technique of strong electrical and magnetic fields. – National technical university “Kharkov polytechnic institute” Ministry of education of Ukraine, Kharkov, 2014.

Dissertation was made to develop a theory of electro-discharge process in electro-spark channels which happens in reactive gases. The aim of the dissertation was a creation of the high-voltage energy-efficient electro-discharge systems of generation of shock waves and heating of reactive gases.

A numerical model of spark channel evolution in reactive gases was developed. Processes into an electrical discharge circuit, conductivity channel of spark and specific features of gas-dynamic process into reactive gases was taken into account in the model. It was found interconnections between the parameters of electrical discharge circuits and electrical discharge processes in channels of sparks expanding in reactive gas mixtures. It was developed methods of increase in energy-efficiency of high-voltage electro-discharge technique of generation of shock waves and heating of reactive gas environments. In particular, it was presented new conception of design of electro-discharge equipment of gas detonation initiation by reflecting shock waves on the basis of generation of synchronous and parallel located spark channels. Correlation between parameters of the electrical circuits and the spatial location of electrodes of the equipment was taking into account. A new power and technologically more effective high-voltage electro-discharge equipment of generation of shock waves and heating of chemically reactive gas mixtures is created.

Key words: electro-discharge processes, electro-spark channel, reactive gases, design, electro-discharge equipment

Коритченко К. В. Высоковольтная электроразрядная техника генерирования ударных волн и нагревания реагирующих газовых сред. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» МОН Украины, Харьков, 2014.

Диссертация посвящена развитию теории электроразрядных процессов в электроискровых каналах, которые развиваются в реагирующих газовых средах с целью обеспечения разработки высоковольтных энергоэффективных электроразрядных систем генерирования ударных волн и нагревания реагирующих газовых сред.

Разработана математическая модель развития искрового разряда в реагирующих газах, позволяющая исследовать влияние параметров электрических разрядных цепей, задающих ввод энергии в искровой канал, на процессы, происходящие как в искровом канале, так и в области воздействия генерируемой в искре ударной волны на химически реагирующую газовую среду. Особенности модели заключаются в определении области токопроводящего канала на основании анализа термодинамического состояния газа, и в

учете неравновесной кинетики химических реакций в условиях отрыва колебательной температуры от кинетической температуры газа. В представленном варианте модели развития искры исследовано расширение искрового канала в смеси водорода с воздухом. В области токопроводящего канала рассмотрены компоненты e , O , O_+ , O_{++} , H , H_+ , N , N_+ , N_{++} по модели локальной термодинамически равновесной плазмы. Вне токопроводящего канала рассмотрены компоненты H_2 , O_2 , H_2O , H , O , OH , H_2O_2 , HO_2 , N_2 , N . Состав среды определялся в результате решения уравнений многотемпературной неравновесной химической кинетики.

Выявлены взаимные связи между параметрами электрических разрядных цепей и электроразрядными процессами в искровых каналах, развивающихся в реагирующих газовых смесях. Показано, что с увеличением начального давления в газоразрядной среде происходит рост количества энергии, вводимой в токопроводящий канал к одинаковым моментам времени. Обосновано преимущество электроразрядной техники генерирования ударных волн в детонирующих газах на основе одинарного импульса тока по сравнению с двухимпульсными системами. Разработаны методы повышения энергоэффективности высоковольтной электроразрядной техники генерирования ударных волн и нагревания реагирующих газовых сред. В частности, разработана новая концепция создания электроразрядного оборудования инициирования детонации в газах сходящимися ударными волнами на основе генерирования синхронных и параллельно расположенных искровых каналов с учетом взаимосвязи между параметрами электрической цепи и пространственным расположением электродов. Создано новое энергетически и технологически более эффективное высоковольтное электроразрядное оборудование генерирования ударных волн и нагревания химически реагирующих газовых смесей. Экспериментально подтверждена энергоэффективность разработанной техники инициирования детонации. В частности, при одинаковой полной энергии разряда с переходом на разработанную электроразрядную систему инициирования достигнуто сокращение времени перехода горения в детонацию в 2–3 раза и длины участка перехода горения в детонацию в 1,5–2 раза. Экспериментальными исследованиями подтверждено надежность зажигания горючей газовой смеси при холодном пуске дизельного двигателя с помощью разработанной системой зажигания высокоэнергетичным искровым разрядом.

Ключевые слова: электроразрядные процессы, электроискровой канал, реагирующая газовая среда, моделирование, высоковольтное электроразрядное оборудование

