

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Бойко Микола Іванович

УДК 621.35.035: 621.365

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ ДІЙ

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) “Молнія” і на кафедрі інженерної електрофізики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Михайлов Валерій Михайлович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри інженерної електрофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”, м. Київ,
завідувач кафедри техніки та електрофізики високих напруг;

доктор технічних наук, професор
Намітоков Кемаль Кадирович,
Харківська державна академія міського господарства
м. Харків,
професор кафедри світлотехніки;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Чумаков Володимир Іванович,
Харківський Національний університет радіоелектроніки
м. Харків,
завідувач кафедри радіоелектронних пристроїв.

Провідна установа: Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться “ 9 ” жовтня 2003 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 21 ” серпня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення високовольтних імпульсних установок, що дозволяють одержувати та ефективно використовувати сильні імпульсні електричні поля (СІЕП) з напруженостями близько 100 кВ/см і більше та часом зростання приблизно 1 нс і менше, є актуальною проблемою для багатьох електротехнологій.

Обробка харчових продуктів за допомогою СІЕП дозволяє краще, ніж традиційні теплові технології, зберегти їх біологічну та харчову цінність. Однак технологія обробки продуктів за допомогою СІЕП у світі тільки починає розвиватися (поперед над усе у таких країнах як США, Німеччина, Франція). Обставиною, яка гальмує розвиток цієї перспективної технології, є відсутність ефективних високопродуктивних електротехнологічних установок, що забезпечують одержання в робочих камерах, де ведеться обробка, СІЕП з напруженостями коло 100 кВ/см і більше. Подолання цієї обставини являє собою вельми актуальну задачу.

Розвиток електрофізіотерапії, де використовуються СІЕП, актуальний в усьому світі, оскільки лікування і профілактика широкого кола захворювань за допомогою фізіотерапевтичних апаратів дозволяє запобігти суттєвих регулярних витрат на медикаменти. Однією з найбільш актуальних задач ефективного використання СІЕП стосовно електрофізіотерапії є створення апарату, що дозволяє одержати СІЕП з широким не шумовим спектром частот: від 0 до 10 ГГц та більше у кожному імпульсі. Її розв'язання дозволить об'єднати терапевтичні можливості кількох апаратів в одному і підвищити їх ефективність.

Перспективними є й озонні технології, і технології очистки газів, що відходять, різноманітних виробництв на основі імпульсного коронного розряду. Тут вельми актуальною є задача зменшення енерговитрат на одержання активних часток (наприклад, атомарного кисню, озону). При успішному розв'язанні цієї задачі технології на основі імпульсного коронного розряду можуть стати економічно більш привабливими, ніж технології на основі бар'єрного розряду. Найбільш перспективною тут уявляється обробка води енергетично дешево одержаним озоном, оскільки від якості споживаної людиною води у великій мірі залежить її здоров'я.

Перелічені актуальні проблеми можуть бути успішно вирішені за допомогою нових технологій на основі високовольтних імпульсних дій і відповідних установок як інструмента для одержання СІЕП, які створені при виконанні даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана у НДПКІ "Молнія" згідно з держбюджетною темою під назвою "Дослідження процесів при обробці продуктів і систем за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій (КВІД)" (шифр "ПЗ-9024", номер державної реєстрації № 0198U000383) координаційного плану Міністерства освіти і науки України на протязі 1998 – 2002 років.

Перша повномасштабна експериментальна установка на основі комплексу високовольтних імпульсних дій була розроблена та виготовлена в НДПКІ "Молнія" у 1995 році згідно з договором з Міністерством агропромислового комплексу України (договір № 4.77/251), який склав основу дисертаційної роботи.

В рамках робіт по договору № 92558 (16/1538) “Розробка апарату для широкодіапазової імпульсної електромагнітної терапії” (Замовник - Державне українське об’єднання “Політехмед”, м. Київ), що також склав основу цієї дисертації, підготовлені та затверджені медико-технічні вимоги на оригінальний апарат для широкодіапазової електромагнітної імпульсної терапії (АШЕМІТ).

Крім того, базовим для виконання докторської дисертації послужив міжнародний проект в науково-технологічному центрі в Україні (НТЦУ) № 1120 “Розробка високоефективної технології обробки рідких харчових продуктів, в тому числі молока, соків, вина, а також води, біопрепаратів та інших рідин і збільшення строків їх зберігання на базі комплексу високовольтних імпульсних дій (КВД)”.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертації є створення установок для нових ефективних технологій на основі високовольтних імпульсних дій, в яких первинним фактором є сильне імпульсне електричне поле з напруженістю приблизно 100 кВ/см і більше, тривалістю фронту імпульсів від 20 нс до 0,1 нс.

Для досягнення мети, що поставлена, повинні бути розв’язані наступні задачі.

1. Сформулювати принципи побудови генераторів СІЕП та ефективних електротехнологічних установок для високовольтних імпульсних дій.

Для цього потрібно вивчити фізичні основи технологій, що підлягають розробці, оцінити стан питання та створити експериментальні пристрої, що здійснюють високовольтні імпульсні дії на різні об’єкти, для проведення досліджень.

2. Розробити електричні схеми та конструкції генераторів високовольтних імпульсів (з наносекундним або більш коротким фронтом) технологічного масштабу, оригінальні конструкції основних високовольтних елементів у генераторах: імпульсних трансформаторів, імпульсних ємнісних нагромаджувачів енергії (конденсаторів), іскрових комутуючих розрядників.

3. Створити (з використанням розроблених генераторів) оригінальні технологічні установки:

установку для мікробіологічно знезаражуючої (інактивуєчої) обробки харчових водомістких рідких та текучих продуктів за допомогою комплексу імпульсних дій, для чого має бути розроблена концепція раціональних високовольтних імпульсних дій при обробці водомістких рідин та текучих продуктів з метою інактивації мікроорганізмів, що в них знаходяться;

апарат для широкодіапазової електромагнітної імпульсної терапії, для чого треба обґрунтувати можливість створення переносних (масою не більше 6 кг) апаратів з високовольтними генераторами імпульсів, які містять іскрові розрядники, що забезпечують тривалість фронту імпульсів на виході до 0,1 нс і менше, з безперервним не шумовим спектром частот у кожному імпульсі від 0 до приблизно 10 ГГц, перспективних для електротерапії;

експериментальну повномасштабну (споживана потужність – не менше 1 кВт) установку для одержання імпульсного коронного розряду (ІКР) з розширеною зоною іонізації як діючого фактору у складі комплексу високовольтних імпульсних дій, для чого треба обґрунтувати перспективність комплексу імпульсних дій з використанням імпульсного коронного розряду, зона

іонізації якого (чохол, що світиться) поширюється практично на всю довжину розрядного проміжку, для енергетично вигідної генерації активних часток: атомарного кисню, озону та ін., що використовуються в озонних технологіях і технологіях очистки газів, що відходять, у різноманітних виробництвах.

4. Розробити ефективні технології на основі комплексу високовольтних імпульсних дій з використанням створених установок:

технологію мікробіологічно інактивуєної обробки харчових продуктів з продуктивністю 1000 кг/год (або л/год) та більше при збільшенні термінів їх зберігання (порівняно з термінами зберігання після традиційної теплової пастеризації) без погіршення початкової біологічної та харчової цінності;

варіанти лікувальної та профілактичної дії полем, низько енергетичними розрядами і т.д. від апарату для широкопasmової електромагнітної імпульсної терапії (спільно з фахівцями - медиками), а також показати лікувальні методики, розроблені фахівцями – медиками, і результати клінічної апробації апарату;

технологію енергетично вигідного, за рахунок використання імпульсного коронного розряду з розширеною зоною іонізації, одержання активних часток (озону, атомарного кисню та ін.) для використання в озонних технологіях та технології очистки газів, що відходять, у різноманітних виробництвах.

5. Розробити засоби вимірювання основних характеристик електромагнітних імпульсів у створених генераторах та установках.

Для досягнення поставленої мети та розв'язання задач, що поставлені, необхідно використати нагромаджений у світі досвід у даній галузі науки і техніки, що представлена такими провідними вченими та фахівцями різних країн як: Г.А. Місяць, Б.М. Ковальчук, Ю.О. Котов, Г.С. Кучинський, І.П. Кужекін, І.П. Верещагін, С.М. Фертик, В.В. Конотоп, Л.Т. Хименко, Р.Х. Аміров, А.І. Божков, Л.Д. Тондій, А.Г. Пахомов, Н. Hulsheger, К.Н. Schoenbach, А.К. Angersbach, F.E. Peterkin, J.E. Dunn, D. Knorr, V. Heinz, P.C. Wouters та ін.

Об'єкт дослідження – процес дії на обране навантаження комплексу різних синхронно діючих факторів, первинним з яких є СІЕП, та явища, що виникають в процесі та результаті дії, процес генерування та формування високовольтних імпульсів за допомогою відповідних установок, який забезпечує появу у навантаженні первинного фактора.

Предмет дослідження – варіанти об'єкту, в яких СІЕП має наносекундний, або коротший фронт, навантаженням є рідкі або текучі водомісткі продукти, людський організм або гази, що містять кисень.

Методи дослідження. Для розв'язання задач дисертації та досягнення поставленої мети використано положення теорії електромагнітного поля, методи теорії електричних кіл, у тому числі довгих ліній. Ці методи використовувались як при дослідженні процесу дії на навантаження, так і при генеруванні та формуванні імпульсів в експериментальних і технологічних установках. Для дослідження процесу дії СІЕП на навантаження використовувався математичний апарат інтегро - диференціальних рівнянь, фізичне і математичне моделювання з чисельними розрахунками на ЕОМ. Експериментальні дослідження проводилися на високовольтних зразках

генераторів та установок з використанням експериментальних високовольтних стендів, оригінальних і традиційних методів вимірювання, методів планування експерименту і статистичної обробки результатів.

В дисертації одержані науково обґрунтовані технічні та технологічні рішення в галузі техніки сильних електричних та магнітних полів, які забезпечують розв'язання актуальної наукової та прикладної проблеми створення установок для нових ефективних технологій на основі комплексу високовольтних імпульсних дій.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано скорочення часу відновлення електричної міцності, поліпшення стабільності роботи, зменшення ерозії електродів сильноточових іскрових розрядників при скороченні фронту падаючих на них високовольтних імпульсів, що призводять до пробую розрядників. На основі цього ефекту досягнута частота проходження імпульсів в електротехнологічних установках така, що перевищує 2000 імпульсів за секунду.

- Запропоновано і експериментально підтверджено принцип формування високовольтних імпульсів із крутим фронтом (нано- і субнаносекундного діапазону) на навантаженні за рахунок використання імпульсного трансформатора (за схемою Тесла), що забезпечує максимальний коефіцієнт трансформації при мінімальних габаритах, і повного використання властивостей іскрового розряду щодо загострення фронту імпульсів.

- Теоретично передбачений і експериментально отриманий імпульсний коронний розряд, зона іонізації якого (чохол, що світиться) займає практично весь розрядний проміжок між коронуючим електродом позитивної полярності і низьковольтним електродом.

- На основі теоретичних оцінок експериментально отримано режим покаскадного загострення фронту імпульсів до 1 нс і менше при розряді генераторів за схемою Аркадьєва - Маркса.

- На основі експериментальних досліджень запропонована концепція раціональної дії сильного імпульсного електричного поля (СІЕП) при інактивації мікроорганізмів у рідких і текучих водомістких середовищах, що забезпечує мінімальні питомі енерговитрати на необоротну інактивацію за рахунок дії СІЕП як на внутрішній вміст клітини, внаслідок крутого фронту імпульсів (не більше 20 нс), так і на клітинну мембрану, внаслідок достатньої тривалості імпульсів (не менше 100 нс). Розроблена й обґрунтована нова концепція механізму інактивації мікроорганізмів за рахунок дії сильного імпульсного електричного поля, що діє на рідке середовище, у якому знаходяться мікроорганізми напруженістю до 100 кВ/см і більше при наносекундних тривалостях фронтів імпульсів без розрядів за рахунок дії поля на внутрішній вміст клітин.

- Експериментально доведено можливість одержання робочих напруженостей електричного поля, що перевищують 100 кВ/см в продуктах, які заповнюють робочі камери, в технологічних режимах їх обробки при напругах більше 100 кВ і обмежених лише імпульсною електричною міцністю самих продуктів.

Практичне значення одержаних результатів.

- Створені реально діючі зразки установок для обробки рідин комплексом високовольтних імпульсних дій із середньою потужністю до 50 кВт, у тому числі установка, цілком підготовлена для технологічного використання при робочих напруженостях в оброблюваних рідинах 100 кВ/см і більше. Установки містять ряд елементів оригінальної конструкції: робочі камери, іскрові розрядники, імпульсний трансформатор, ємнісні нагромаджувачі енергії.

- Розроблено технологію обробки рідких та текучих харчових продуктів і води за допомогою високовольтних імпульсних дій, що при більшому ступені інактивації мікроорганізмів і кращому, у порівнянні з традиційною тепловою пастеризацією, збереженні вихідної біологічної і харчової цінності харчових продуктів є енергозберігаючою. Способи і пристрої, що здійснюють дану технологію, захищені сімома двадцятирічними патентами на винаходи.

- Створена конструкція генератора за схемою Аркадьєва-Маркса, що дозволила одержати режим покаскадного загострення фронту імпульсів до 1 нс і менше одночасно з наростанням амплітуди напруги. Спосіб і пристрій – генератор для одержання покаскадного загострення фронту імпульсів захищені двома двадцятирічними патентами на винаходи.

- Практично перевірено і підтверджено теоретично знайдені умови мінімізації тривалості фронту імпульсів у мікрозозорах іскрових комутаторів – розрядників, завдяки чому вдалося досягти тривалості фронту імпульсів $\sim 0,1$ нс у повітряному розрядному проміжку довжиною ≈ 50 мкм при пробивній напрузі ≈ 5 кВ та частоті проходження імпульсів до 300 с^{-1} і більше. Спектр частот одержаних імпульсів є безперервним і містить частоти від 0 до 10 ГГц.

- Розроблено методики і рекомендації щодо створення та використання основних елементів в установках для технологій на основі комплексу високовольтних імпульсних дій: багатозазорних і багатоканальних іскрових розрядників, імпульсних трансформаторів, ємнісних нагромаджувачів енергії, робочих камер, аплікаторів, випромінювачів, систем полестворення.

- Запропоновано емпіричну математичну модель опису результату мікробіологічного знезараження продуктів за допомогою імпульсних дій у залежності від низки факторів, найбільш значущими з яких є: напруженість імпульсного електричного поля, температура середовища з оброблюваними мікроорганізмами, тривалість імпульсів напруженості сильного електричного поля.

- Запропоновано апарат для широкосмугової електромагнітної імпульсної терапії (АШЕМІТ), що успішно пройшов тривалу (більше 7 років) клінічну апробацію, у ході якої показано, що один такий апарат може замінити цілий ряд відомих фізіотерапевтичних апаратів і збільшити ефективність лікувальної і профілактичної дії. Апарат (як пристрій) захищений двома двадцятирічними патентами на винахід. Протягом декількох років апробації АШЕМІТ накопичено фактичний матеріал по лікуванню і профілактиці з його допомогою серцево - судинних захворювань і хвороб опорно-рухової системи на показних вибірках пацієнтів, що свідчить про високу ефективність лікування.

- Створена високовольтна установка для одержання нового виду імпульсного коронного розряду (ІКР), в електродній системі якої загальною довжиною 3 м отриманий однорідний по світінню ІКР. Цей новий варіант коронного розряду, зона іонізації якого займає практично увесь

розрядний проміжок, являє собою інструмент для енергетично вигідного генерування таких активних часток як атомарний кисень і озон і є фундаментом для широкого кола нових високоефективних технологій, у тому числі озонних.

- Протягом декількох років накопичено досвід обробки різних харчових рідин комплексом високовольтних імпульсних дій. Цей досвід підтверджує не тільки інактивуєчу дію на мікроорганізми такої обробки, але й її сприятливий вплив на органолептичні показники, на харчову та біологічну цінність оброблюваних рідин.

Технічна розробка, виготовлення й випробування технологічних установок і генераторів високовольтних імпульсів (тобто реалізація роботи) були здійснені в НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", що, відповідно до постанови Кабінету Міністрів № 257 від 01.04.1999, входить до складу об'єктів, що складають Національне надбання України. Тут же відпрацьовувалися КВІД-технології. Розробки автора знайшли використання й отримали позитивні відгуки (у виді затверджених технічних умов, висновків, протоколів і т.д.) у таких організаціях: НТУ "ХПІ" (Харків), Українська академія аграрних наук (Київ), Харківський завод шампанських вин, Харківський молочний комбінат ("Ромол"), Харківська обласна санітарно-епідеміологічна станція, сертифікований випробувальний центр Харківського державного медичного університету, поліклініка генерального штабу збройних сил СРСР, кафедра фізіотерапії і курортології Харківського інституту удосконалення лікарів (нині Медична академія післядипломної освіти) і її базові санаторій "Гай" (Харківська область) і центральна клінічна лікарня № 5 (Харків), Державне Українське об'єднання "Політехмед" та інших.

Терапевтичний апарат АШЕМІТ пройшов успішну клінічну апробацію, що тривала кілька років, у базових медичних установах кафедри фізіотерапії і курортології Медичної академії післядипломної освіти (Харків). Апарат АШЕМІТ нагороджений дипломом другого ступеня на регіональній виставці – ярмарку наукових ідей і розробок учених Харківської області "Наука Харківщини – 2000".

Результати дисертаційної роботи використані при створенні і налагодженні раціональних режимів роботи повномасштабних установок, призначених для обробки рідин у потоці комплексом високовольтних імпульсних дій і розташованих у великому високовольтному залі лабораторного корпусу НДПКІ "Молнія".

Дисертаційні розробки автора реалізовані також у рамках міжнародного проекту № 1120 НТЦУ.

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі НТУ "ХПІ" по спеціальності "Техніка і електрофізика високих напруг" у лекціях і лабораторних заняттях для студентів у рамках спеціальної навчальної дисципліни "Сильні електричні поля в техніці".

Достовірність результатів. Достовірність одержаних результатів підтверджується задовільною кореляцією теоретичних обґрунтувань та експериментальних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в розробці наукового напрямку, основ створення електротехнологічних установок для високовольтних імпульсних дій, в науковому керівництві і безпосередній особистій участі у всіх дослідженнях, розробках (у тому

числі нових технологій), монтажі, налагодженні, проведенні випробувань всіх установок, генераторів, апаратів, створених підрозділом електрофізичних технологій у НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" з 1990 по 2003 рік. Всі основні результати дисертаційної роботи одержані здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що входять у дисертаційну роботу, обнародовані, повідомлені: на Всесоюзній науково-технічній конференції "Питання забезпечення стійкості радіоелектронних засобів до впливу електромагнітних випромінювань природного і штучного походження", Харків, Україна, 1991; на X Міжнародній конференції по розрядах у газах і їхньому застосуванні, Суонси, Великобританія (at X International Conference on Gas Discharges and Their Applications, Swansea, UK), 1992; на VI Міжнародній науковій школі "Фізика імпульсних дій на конденсовані середовища", Миколаїв, Україна, 1993; на XXII Міжнародній конференції по явищах в іонізованих газах, Хоубокен, Нью Джерсі, США (at XXII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Hoboken, New Jersey, USA), 1995; у сільськогосподарському університеті міста Нансі під час стажування у Франції, 1995; на VI конференції АСІНКОМ, Київ, Україна, 1996; у Берлінському технічному університеті під час роботи там по темі дисертації, Берлін, Німеччина, 1998; на X Міжнародній науково-практичній конференції "Застосування лазерів у медицині і біології", Харків, Україна, 1998; на I міжнародному симпозіумі по нетермальним медико-біологічним діям, що використовують електромагнітні поля і іонізовані гази, Норфолк, Вірджинія, США (at I International Symposium on Nonthermal Medical/Biological Treatments Using Electromagnetic Fields and Ionized Gases, Norfolk, Virginia, USA), 1999; на Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми і шляхи реалізації науково-технічного потенціалу військово-промислового комплексу", Київ, Україна, 2000; на VI Міжнародній конференції "Проблеми сучасної електротехніки – 2000", Київ, Україна, 2000; на Міжнародному симпозіумі "Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA'2000)", Харків, Україна, 2000; у Берлінському технічному університеті під час робочої зустрічі в рамках виконання міжнародного проекту №1120 НТЦУ, Берлін, Німеччина, 2000; на 12 Міжнародному симпозіумі по високовольтній інженерії, Бангалор, Індія (at 12-th International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, India), 2001; на X Міжнародній школі-семінарі "Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах", Миколаїв, Україна, 2001; на Міжнародному симпозіумі "Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA'2001)", Харків, Україна, 2001; на VII Міжнародній конференції "Проблеми сучасної електротехніки – 2002", Київ, Україна, 2002.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 23 статтях у наукових журналах та збірниках наукових праць, у 5 винаходах, захищених чотирма двадцятирічними патентами на винаходи України і п'ятьма двадцятирічними патентами на винаходи Російської федерації з конвенційним пріоритетом України, у 12 матеріалах і тезах доповідей міжнародних і національних науково - технічних конференцій, в 1 науковому проекті, зареєстрованому у Державному агентстві України з авторських і суміжних прав.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків та 8 додатків. Повний обсяг дисертації складає 567 сторінок, з них 81 (52) ілюстрація до тексту, 72 (63) ілюстрації на 47 (41) сторінках, 26 (8) таблиць до тексту, 11 (5) таблиць на 20 (4) сторінках, 1 (1) ілюстрація та 1 (1) таблиця на 1 (1) сторінці, 8 додатків на 181 сторінці, список використаних літературних джерел із 254 найменувань на 30 сторінках. У дужках указані дані щодо основної частини дисертації. Обсяг основного тексту дисертації складає 310 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми створення електротехнологічних установок для високовольтних імпульсних дій, сформульовано мету і задачі роботи, викладено наукову новизну одержаних результатів, основні положення, що виносяться на захист, відзначено практичну цінність результатів, особистий внесок здобувача, вказані відомості щодо апробації результатів дисертації та їх публікації.

У першому розділі наведено огляд високовольтних імпульсних генераторів, установок, процесів у сильних електричних полях і обґрунтовано вибір напрямків досліджень. Огляд показав актуальність та перспективність створення генераторів високовольтних імпульсів і електроімпульсних установок для обраних технологій, об'єднаних спільним первинним діючим фактором – сильним імпульсним електричним полем, тривалість фронту напруженості якого складає наносекунди (не більше 20 нс) і менше. Обрані технології, для яких призначені у першу чергу установки, що створені при виконанні дисертації, - це: ефективна технологія знезаражуючої обробки харчових продуктів на основі сильних імпульсних електричних полів, широкосмугова електромагнітна імпульсна терапія, технології на основі імпульсного коронного розряду. Показано, що розробка нових електротехнологічних установок потребує дослідження процесів в сильних імпульсних електричних полях як при генеруванні, формуванні імпульсів у самих генераторах, так і при дії імпульсів на об'єкти навантаження: водомісткі середовища з мікроорганізмами; біологічну клітину; електродні системи для одержання ІКР.

У другому розділі досліджено фізичні основи високовольтних імпульсних дій. Матеріали розділу направлені на вироблення вимог до генераторів та електротехнологічних установок для здійснення комплексу високовольтних імпульсних дій. Об'єктами, що піддаються комплексу високовольтних імпульсних дій у даній роботі, є водомісткі рідини і текучі продукти, що містять мікроорганізми, людський організм, кисневмісний газ, у якому можлива наявність вологи, мікроорганізмів, пилу та ін. Кожний з цих об'єктів з електричної точки зору характеризується діелектричною проникністю і питомою електропровідністю, що залежать від просторових координат і часу.

При виборі частоти, форми імпульсу й амплітуди електричного поля, що діє на мікроорганізми, з метою їхньої інактивації, слід враховувати, які елементи клітини повинні бути піддані дії поля. Для більшої дії на внутрішній уміст клітини необхідне поле високої частоти. У низькочастотному полі електричний пробій мембрани слід очікувати при істотно меншій амплітуді зовнішнього поля, однак при цьому потрібне джерело значно більшої потужності. Відповідним вибором частотного спектра імпульсу зовнішнього електричного поля можна

забезпечити одночасний ефективний вплив на всі елементи клітини.

Ступінь інактивації мікроорганізмів представляє собою відношення початкової кількості живих мікроорганізмів до їх кількості після обробки, тому в початково слабо засіяних мікроорганізмами продуктах принципово не може бути досягнутий більш великий ступінь інактивації, ніж у початково сильно засіяних таких же продуктах при тому самому комплексі високовольтних імпульсних дій.

На рис. 1. представлені схеми розподілу електричного поля в мікробній клітині при обробці середовищ з мікроорганізмами імпульсами поля, що забезпечують проникнення імпульсного електричного поля усередину клітин.

Характерна постійна часу τ_i зменшення поля в мембрані та цитоплазмі з момен-ту, коли щільністю повного струму че-рез мембрану можна знехтувати завдя-ки тому, що мембрана – добрий діелек-трик, а швидкість зміни зовнішнього поля значно зменшується після корот-кого фронту, визначається виразом:

$$\tau_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{\gamma_i}, i=2, 3. \quad (1)$$

При різкому зменшенні швидкості зміни напруженості зовнішнього поля (наприклад, у момент t_2 у порівнянні з моментом t_1) (див. рис. 1) відповідно зменшується повна щільність струму через мембрану і, отже, усередині клітини. Якщо прийняти за t_0 момент досягнення напруженістю E_1 у точці А максимального значення $E_1(t_0)=E_{1max}$, то протягом відрізка часу

$$\Delta t \geq 3 \times \tau_3, \quad (2)$$

напруженість поля в цитоплазмі клітини стає зневажливо малою.

Рис. 1. Якісна картина дії імпульсу зовнішнього сильного електричного поля близької до двохекспоненціальної форми на мікробну клітину у водомісткому середовищі на фронті (момент t_1) і на спаді (момент t_2) імпульсу: 1 – зовнішнє середовище; 2 – цитоплазматична мембрана клітини; 3 – цитоплазма; 4 – ядро чи прокаріотична хромосома.

На основі одержаних експериментальних результатів запропоновано емпіричну залежність від ряду факторів відносної кількості S неінактивованих мікроорганізмів після обробки комплексом високовольтних імпульсних дій, яка відрізняється від відомої формули Хюльшегера (Н. Hulsheger). Відмінність полягає у тому, що залежність S від напруженості поля менш сильна, а також у тому, що в запропонованій залежності враховано температурний фактор, вплив тривалості фронту імпульсів, частоти проходження імпульсів:

$$S = \alpha \times y^{\frac{1}{k_1}} \times \begin{cases} e^{-\frac{T-T_c}{k_2}} & \text{при } T \geq T_c, \\ 1 & \text{при } T < T_c, \end{cases} \quad (3)$$

$$x = \begin{cases} \frac{W_c}{W} & \text{при } W \geq W_c, \\ 1 & \text{при } W < W_c, \end{cases} \quad y = \begin{cases} \left(\frac{2t_f}{t_f + t_{f,c}} \right)^{1/2} & \text{при } t_f \leq t_{f,c}, W \geq W_c, \\ 1 & \text{при } t_f > t_{f,c}, \end{cases} \quad (4)$$

$$W = \begin{cases} \frac{E^2 \times t_i}{\rho_s} \times \frac{t_\Sigma}{t_p + t_i} & \text{при } t_p \leq t_r, \\ \frac{E^2 \times t_i}{\rho_s} & \text{при } t_p > t_r, \end{cases} \quad W_c = \begin{cases} \frac{1}{\rho_s} \times \left(E^2 \times t_i \times \frac{t_\Sigma}{t_p + t_i} \right)_c & \text{при } t_p \leq t_r, \\ \frac{1}{\rho_s} \times E^2 \times t_i & \text{при } t_p > t_r, \end{cases} \quad (5)$$

де k_1 – безрозмірний коефіцієнт – константа, величина якого залежить від типу і концентрації мікроорганізмів, що інактивуються, від форми, частоти проходження і полярності імпульсів, $k_1=1\div 5$; E – напруженість зовнішнього електричного поля в середовищі, що містить мікроорганізми; t_i – характерна тривалість одного з імпульсів поля, якими здійснена КВІД- обробка; t_Σ – сумарний час обробки з урахуванням пауз між імпульсами; ρ_s – питомий об'ємний опір середовища; W – енергія, виділена в одиниці об'єму оброблюваного середовища з мікроорганізмами; W_c – енергія, виділена в одиниці об'єму, при перевищенні якої починається процес інактивації мікроорганізмів; $(E^2 t_i)_c$ – добуток квадрата напруженості електричного поля на характерну тривалість одного імпульсу, що відповідає енергії W_c ; t_f – тривалість фронту імпульсів поля; $t_{f,c}$ – тривалість фронту імпульсу, при якій напруженість, індуковану зовнішнім електричним полем усередині клітки в її цитоплазмі можна ще вважати несуттєвою для інактивації, а при більш коротких фронтах – уже неможна; T – кінцева температура середовища після КВІД- обробки в градусах Кельвіна; T_c – критична температура середовища після КВІД- обробки, при перевищенні якої інактивація стає необоротної гарантовано; k_2 – коефіцієнт – константа, що має розмірність у градусах Кельвіна, який залежить від типу мікроорганізму, що інактивується, $k_2 \sim (0,05 \div 0,2) \times T_c$; t_p – характерна тривалість паузи між двома сусідніми імпульсами; t_r – час релаксації – характерний мінімальний по тривалості відрізок часу між початками сусідніх імпульсів, починаючи з якого (і при більш тривалих відрізках) інактивиуюча дія всієї сукупності імпульсів приблизно відповідає дії одиночного імпульсу; S – відношення кількості мікроорганізмів у середовищі після обробки до їхньої кількості до КВІД- обробки.

Доведено, що критерієм необоротності мікробіальної інактивації при КВІД- обробці є перевищення миттєвої (без витримки при ній) критичної температури, що при $E \leq 100$ кВ/см для більшості мікроорганізмів складає $t_c^\circ = 50-65^\circ\text{C}$:

$$t^\circ > t_c^\circ \text{ при } S \leq 0,01. \quad (6)$$

Запропонована концепція раціональної дії СІЕП при знезаражуючій обробці.

Якщо під раціональною дією СІЕП розуміти мінімальні питомі енерговитрати при даному ступені інактивації мікроорганізмів, то обробка комплексом високовольтних імпульсних дій повинна вестися імпульсами, що забезпечують найбільше проникнення поля усередину клітини,

тобто імпульсами з коротким фронтом ($t_f \leq 20$ нс, де t_f – тривалість фронту імпульсу для типових діелектричної проникності і питомої електропровідності цитоплазми і зовнішньої мембрани живої клітини) чи з частотним спектром, що містить частоти $f \geq \frac{0,35}{t_f} = \frac{0,35}{20} \times 10^9 = 1,75 \times 10^7$ (Гц). Крім того, ці

імпульси повинні здійснювати інактивуючу дію на цитоплазматичну мембрану клітин. Для цього тривалість імпульсів t_i повинна бути $t_i \geq 10^{-7}$ с. Оптимальна тривалість t_i імпульсів зв'язана з розмірами клітин, що підлягають інактивації. Вона тим більше, чим більше характерний розмір клітин. При цьому амплітуда напруженості зовнішнього імпульсного електричного поля обмежена зверху пробивною напруженістю суспензії, у якій знаходяться мікроорганізми, що підлягають інактивації. Занадто довгі імпульси приводять до збільшення питомих енерговитрат при тому ж інактивуючому ефекті. Імпульси поля з тривалим фронтом ($t_f > 20$ нс) гірше проникають або зовсім не проникають усередину клітини, що приводить до зменшення або відсутності дії СІЕП на внутрішній уміст клітини.

Сформульовано вимоги до установок і генераторів цих установок, що дозволяють одержувати сильні поля і комплекс факторів, породжуваний ними, у рідких і текучих водомістких середовищах з мікроорганізмами. Генератори повинні забезпечувати одержання на низькоомному (10- 100 Ом) навантаженні імпульсів високої (≥ 100 кВ) напруги з крутим (≤ 20 нс) фронтом, частотою проходження імпульсів ≥ 100 Гц, середню потужність, виділювану в навантаженні, до 50 кВт і більш. При цьому генератори повинні бути технологічними: забезпечувати високу продуктивність – 1000 кг/год і більш у проточному чи порціонному режимі; мати низькі питомі енерговитрати ≤ 10 кВт/м³ (≤ 10 кВт/т); мати просту, надійну і ремонтно-придатну конструкцію; мати прийнятну ціну; бути безпечними в роботі; бути електромагнітно стійкими і сумісними з іншими пристроями; мати високий ресурс – 10^{10} - 10^{11} імпульсів; мати можливо менші габарити і масу при даній потужності. Установка для здійснення комплексу високовольтних імпульсних дій крім генератора повинна містити цілий ряд пристроїв і систем, але найбільш критичним з них є робоча камера (система робочих камер, або система полестворення й енерговиділення).

Показані принципи відмінності упорядкованих електромагнітних імпульсів (УЕМІ) від шумових сигналів, які полягають у наступному. УЕМІ передаються за допомогою поперечних електромагнітних хвиль (Т- хвиль, або ТЕМ- хвиль), і тому мають набагато більш широкий безперервний спектр частот убік низьких частот (аж до $\omega=0$) при приблизно однаковій із гіпервисокочастотними (ГВЧ) шумовими сигналами верхній границі $\sim 2,2 \times 10^{12}$ Гц; забезпечують однаковість або упорядкованість дії (дія за алгоритмом, законом, що відомий заздалегідь,) на даній частоті суцільного спектра УЕМІ від імпульсу до імпульсу.

УЕМІ при лікувальній і профілактичній дії можуть бути не тільки імпульсами поля, але також імпульсами струму, напруги, можуть являти собою слабо енергетичні коронний і іскровий розряди з відповідним набором факторів комплексу високовольтних імпульсних дій. Такі імпульси забезпечують можливість різноманітної лікувальної дії від одного апарату АШЕМІТ, а саме: дія може бути точковою, локальною чи глобальною в залежності від того – на точку, ділянку поверхні тіла, чи на весь організм (групу пацієнтів) вона здійснюється. Дія може бути контактною,

безконтактною чи через плазму слабо енергетичного розряду (іскрового або коронного). Вона може здійснюватися на шкірні покриви, чи слизові оболонки. УЕМІ не мають резонансних частот, їхня потужність розподілена по всьому спектру частот $0 \leq \omega \leq 2,2/t_f$, де ω - кругова частота, t_f - тривалість фронту імпульсів, безперервно. Це означає, що щільність електромагнітної потужності на кожній частоті нижче, ніж для відомих факторів і може бути дуже малою ("гомеопатичною"). При цьому миттєва (пікова) потужність в імпульсі може бути дуже великою і досягати $P_i=500$ кВт, тоді як середня потужність при цьому може складати $P_{cp} \leq 1$ Вт.

Головна вимога до АШЕМІТ – забезпечення на виході апарату імпульсів з тривалістю фронту 10^{-10} - 3×10^{-9} с при амплітуді імпульсів ~ 5 кВ і більш і безперервному спектрі імпульсу. Амплітуда потрібна досить висока (≥ 5 кВ) із- за широкого безперервного спектру частот, по якому повинна бути досить рівномірно розподілена потужність імпульсу. АШЕМІТ повинний працювати на навантаження з будь-яким імпедансом (повним опором) $0 \leq |z| < \infty$ Ом.

Крім того, показано, що для одержання ІКР з розширеною зоною іонізації ключовим є правильний вибір системи електродів з різко неоднорідним полем. Ця система електродів не повинна уступати системам типу "голка- площа" і "осьовий дріт у трубі" по досяжним напруженостям біля коронуючого електроду. При цьому вона повинна забезпечувати більш повільний спад напруженості при наближенні до не коронуючого електроду. У такій системі електродів виростає середня (ефективна) напруженість по всьому розрядному проміжку. Саме це збільшує інтенсивність іонізуючих процесів і розміри області, де вони відбуваються.

Запропоновано коронуючу систему електродів у вигляді ряду тонких паралельних електропровідних пластин круглої форми, розташованих друг від друга на деякій відстані усередині провідної труби на металевому стрижні. При цьому осі труби, стрижню, та кожної пластини (що проходять через центр кожної пластини перпендикулярно її площині) співпадають.

Для досягнення можливо більшого наробітку активних часток за одиницю часу в плазмі ІКР з розширеною зоною іонізації генератор установки повинний забезпечувати частоту проходження імпульсів у навантаження до 2000 с⁻¹.

Установка повинна дозволяти передавати енергію в електродну систему – навантаження порціями, що гарантують неможливість переходу ІКР у стійкий іскровий розряд, а потім у дуговий.

У третьому розділі викладені результати розробки високовольтних імпульсних генераторів для електротехнологічних установок.

Розроблено компактний генератор з низькоіндуктивним конденсатором, що вигідно відрізняється від генераторів з коаксіальними кабелями як нагромаджувачами енергії набагато більш низьким внутрішнім опором. Генератор дозволяє на навантаженні $10 - 30$ Ом формувати імпульси напруги з амплітудою, близькою до амплітуди зарядної напруги U . На рис. 2 приведені осцилограми імпульсу напруги на навантаженні 50 Ом при зарядній нарузі 1200 В.

а

б

Рис. 2. Осцилограми: а - фронту імпульсу, б - імпульсу.

У винаході, захищеному патентами, запропонований спосіб обробки продуктів, при якому напруженість у середовищі з мікроорганізмами $E > 10^7 \text{В/м}$, а $t_i < 10^{-7} \text{с}$ (t_i – тривалість імпульсу, при якій $E > 10^7 \text{В/м}$). Для реалізації цього способу створена дослідно-експериментальна установка, генератор якої (на основі ємнісних накопичувачів та іскрових розрядників) із середньою потужністю до 50 кВт має ресурс 10^{10} - 10^{11} імпульсів і дозволяє вести обробку як порціонно, так і в проточних режимах з продуктивностями до 1000 кг/год. На рис. 3 наведено імпульси, що їх формує генератор на навантаженні –робочій камері з оброблюваними продуктами.

Рис. 3. Типові осцилограми імпульсу напруги з генератора на камері з рідким харчовим продуктом (1 - купаж шампанських виноматеріалів, 2 - молоко), обробка якого ведеться в потоці. Відстань між електродами камери з однорідним електричним полем - 1 см.

До технологічних установок пред'являються високі вимоги по частоті проходження імпульсів. Стосовно розрядників це відповідає вимозі високої швидкості відновлення електричної міцності (ВЕМ) розрядного проміжку (РП) після закінчення імпульсу струму, тобто швидкого розпаду плазми газового розряду після припинення дії джерел іонізації в ній. У загальному випадку, чим менше вихідна концентрація $n(0)$ заряджених часток, при якій почався розпад плазми після розряду в проміжку, тим швидше відновиться електрична міцність, тим швидше концентрація $n(t)$ досягне такого малого значення, що забезпечує загасання іскрового розряду. Тому слід досягати необхідної високої щільності струму в плазмі за рахунок збільшення спрямованої швидкості руху заряджених часток (електронів і іонів), а не їхньої концентрації.

Цього можна досягти в сильному електричному полі, напруженість якого можна тим сильніше збільшити, чим коротше тривалість фронту імпульсу (у наносекундному діапазоні). Показано експериментально, що застосування декількох послідовних коротких РП дозволяє досягти частоти проходження понад 100 Гц для імпульсів амплітудою більш 100 кВ із фронтом у десятку наносекунд і тривалістю в сотні наносекунд без продувки повітряних РП. Зібрано і успішно випробувано схему генератора, що у спрощеному виді представлена на рис. 4.

Рис. 4. Спрощена схема високовольтної частини генератора з іскровими розрядниками: P_1 , P_2 , P_3 - іскрові розрядники; L_1 , L_2 , L_3 - паразитні індуктивності; C_1 - стартовий конденсатор; C_2 , C_3 - конденсатори, що загострюють; Z_n - навантаження.

На навантаженні – робочій камері, що має ємність $\sim 10^{-10}$ Ф і активний опір 470 Ом, отриманий фронт імпульсу 10 нс при зазорах повітряних розрядників: P_1 – 8 зазорів по 5 мм, P_2 – 29 мм, P_3 – 17 мм і частоті проходження ~ 400 Гц.

Експериментально визначена резистивна фаза 5 нс часу комутації найбільш швидкодіючого розрядника P_3 в умовах, коли напруга в момент початку комутації P_3 досягала на ньому 120 кВ. Середовищем, що заповнює міжелектродні проміжки цього багатоканального (можливо одержати до 10 каналів) розрядника, є повітря при атмосферному тиску. Частота проходження імпульсів - 400 Гц, а резистивне навантаження - 50 Ом.

У генераторі з імпульсним підвищувальним трансформатором (рис. 5) вдалося знизити габарити, підвищити коефіцієнт корисної дії (к.к.д.), зменшити собівартість.

Рис. 5. Схема електрична принципова генератора з підвищувальним імпульсним трансформатором: ІТ – імпульсний трансформатор; C_1 , P_1 – стартова ємність (конденсатор) і стартовий багатозазорний іскровий розрядник відповідно; C_2 , P_2 – ємність (три конденсатори), що загострює, і багатозазорний іскровий розрядник, що загострює, відповідно; Z_n – імпеданс навантаження - робочої камери.

Виконання високовольтної обмотки ІТ з низьковольтною середньою точкою дозволяє мати на навантаженні напругу 150 кВ при найбільших по модулю потенціалах щодо землі на ній 75 кВ.

Розроблено генератор Аркадьєва – Маркса, що працює в режимі покаскадного загострення фронту імпульсів (ГПЗ) і відрізняється від традиційного своїм розрядним колом. У найбільш простому варіанті ГПЗ розрядне коло представлене широкосмуговою однорідною довгою лінією, у прямому струмопроводі якої виконані розриви, куди по черзі включені ємнісні нагромаджувачі і розрядники каскадів. На початку цієї лінії розташований пристрій запуску ГПЗ через стартовий комутатор, що розміщений перед першим каскадом. На кінці цієї лінії розташоване навантаження генератора. Розрядне коло ГПЗ приведене на рис. 6.

Рис. 6. Розрядне коло ГПЗ.

На рис. 6 заштриховані попередньо заряджені до напруги $U_{очн}$ ділянки енергопроводу і ємнісні нагромаджувачі; N – кількість каскадів; 1 – ємнісний нагромаджувач каскаду з ємністю C_k , що може являти собою довгу лінію з розподіленими параметрами; 2 – енергопровід – широкосмугова однорідна довга лінія з розподіленими параметрами з відстанню h_E між прямим і зворотним струмопроводами з хвильовим опором z_3 ; 3 – розрядник каскаду; 4 – ємність між електродами розрядника 3 ; 5 – стартовий розрядник; 6 – ємність між електродами розрядника 5 ; 7 – пристрій запуску; 8 – довга лінія передачі з хвильовим опором $z_n = z_3$ між пристроєм 7 і стартовим розрядником 5 ; 9 – навантаження з імпедансом z_n ; $t_{проб. n}$ і $t_{проб. k}$ відповідно час пробігу електромагнітної хвилі по лінії 8 і між двома сусідніми розрядниками каскадів; k – номер каскаду ($k=1, 2, \dots, N$); h_c – довжина розриву в прямому струмопроводі, у який (розрив) включений ємнісний нагромаджувач k -го каскаду.

Величина перенапруги при відсутності передімпульсів на кожному наступному розряднику, крім останнього (N -го) каскаду, на $U_{очн}$ більше, ніж на даному. Тому час комутації розрядника першого каскаду менше, ніж стартового. Час комутації $t_{ком (k+1)}$ кожного наступного розрядника менше, ніж попереднього.

$$t_{ком k+1} \leq t_{ком k}. \quad (7)$$

Процес покаскадного загострення імпульсів у генераторі Аркадьєва - Маркса істотно відрізняється від такого в довгих лініях покаскадним збільшенням амплітуди імпульсів, що формуються, за рахунок “напруги, що чергує” на кожному каскаді. Спосіб генерування і ГПЗ з покаскадним загостренням фронту імпульсів запатентований як винахід в Україні і Росії. На навантаженні генератора ≈ 50 Ом отримані наносекундні імпульси з тривалістю фронту не більш 1 нс.

Електрична схема генератора широкосмугових упорядкованих імпульсів з напругою на вході $U_{HV} \ll 1$ кВ, амплітудою напруги на виході до 10 кВ і фронтом імпульсів 0,1 нс приведена на рис. 7. Найбільш швидкодіючий розрядник F_3 розташований на стику лінії W_3 з низьким хвильовим опором Z і коаксіального кабелю W_4 із хвильовим опором Z_{W4} , що задовольняють співвідношенню

$$Z_{F3} = Z_{W4} > 3Z. \quad (8)$$

Це забезпечує додаткове укорочення фронту імпульсів і підвищення напруги

Рис. 7. Електрична схема генератора упорядкованих імпульсів. Тр – автотранс-форматор; W_1, W_2, W_3 – низькоомні коаксіальні лінії; Z - хвильовий опір ліній; F_1, F_2, F_3 - розрядники; W_{F1}, W_{F2}, W_{F3} – коаксіальні вузли розрядників F_1, F_2 і F_3 відповідно; Z_{F1}, Z_{F2}, Z_{F3} – хвильові опори вузлів розрядників; L_1, L_2, L_3 – індуктивності розрядників; C_1, C_2, C_3 – еквівалентні ємності вузлів розрядників; W_4 – коаксіальний кабель; Z_{W4} – хвильовий опір кабелю; ВП – вихідний пристрій.

на вихідному пристрої. Останній розрядник F_3 дозволяє одержати мінімально можливу (0,1- 0,3 нс) тривалість фронту на вихідному пристрої, завдяки високій електричній міцності мікросазорів, високої ($\sim 10^{13}$ В/с) швидкості наростання падаючого імпульсу напруги і багатоканальності розряду.

Електрична схема високовольтного генератора для дослідження можливості одержання ІКР в атмосферному повітрі, представлена на рис. 8, дозволила вперше в електродній системі "набір тонких круглих рівнобіжних провідних пластин усередині провідної труби" одержати ІКР, при якому світіння заповнює собою весь міжелектродний (розрядний) проміжок.

а

б

Рис. 8. Електрична схема генератора експериментальної установки для одержання ІКР: а – найпростіший генератор; б – генератор з загострювачем; U_{HB} – низьковольтний імпульс напруги; ІТ – імпульсний трансформатор; СЕ – електродна система - навантаження генератора; $C_{об}$, БЗР, L – ємність, багатозазорний розрядник та індуктивність загострювача фронту імпульсів відповідно.

Полярність коронуючого високовольтного електроду - позитивна. При його негативній полярності світна область займає лише невелику частину розрядного проміжку. Оригінальність режиму роботи БЗР в описуваному генераторі полягає в тому, що цей розрядник у частотному режимі комутує енергію з ємності $C_{об}$ в електродну систему з коронуючими електродами. У СЕ на стадії комутації (з характерним часом ~ 10 нс) практично безінерційно запалюється ІКР, і активний опір СЕ R_{CE} зменшується на кілька порядків, досягаючи $R_{CE} \sim 10$ кОм. Реактивний опір СЕ при цьому може складати $X_{CE} \sim 100$ Ом і менш, але енергія, що комутується, виділяється саме в R_{CE} .

Принциповою перевагою імпульсних трансформаторів перед ГІН за схемою Аркадьєва - Маркса є можливість підвищення напруги без використання іскрових розрядників від рівнів ~ 1 кВ до 1 МВ і більш. При цьому ІТ на рівні з ГІН вихідні напруги більш компактні. Показана і здійснена можливість одержання на навантаженні напруг $U_n \geq 100$ кВ із крутим фронтом $t_f \approx 10$ нс при частоті проходження імпульсів $f_{сг} \approx 2100$ Гц за рахунок використання зв'язування імпульсного трансформатора з коефіцієнтом трансформації $n = 120 \div 1200$ і багатозазорного загострюючого розрядника.

У четвертому розділі викладені результати по створенню установок для здійснення комплексу високовольтних імпульсних дій. Загальна блок- схема всіх установок для

високовольтних імпульсних дій містить елементи, представлені на рис. 9. Низьковольтне джерело живлення у випадку великої середньої потужності (>1 кВт) виконано на тиристорах (установки для обробки харчових продуктів, для одержання ІКР у технологічних цілях). У випадку менших середніх потужностей

Рис. 9. Блок- схема установок для високовольтних імпульсних дій.

низьковольтне джерело живлення виконано на транзисторах (в апараті АШЕМІТ).

Високовольтний генератор містить підвищувальний трансформатор (що працює на перемінній чи імпульсній напрузі), ємнісні нагромаджувачі енергії й іскрові розрядники. Будова навантаження залежить від конкретної установки. Навантаженням для установки по обробці харчових продуктів є оброблювана рідина (чи інший текучий продукт) у робочій камері - системі полеостворення - енерговиділення. Для АШЕМІТ навантаженням є організм, або повітряний простір (з розрядом (іскровим чи коронним) чи без нього) і організм, розташовані після вихідного пристрою апарата. В установці для одержання ІКР навантаженням є електродна система, у якій запалюється коронний розряд.

Система виміру призначена для виміру основних характеристик кожного з елементів блок- схеми. Система керування містить органи керування і контролю.

Робоча камера (камери) - РК - з оброблюваним продуктом є тим елементом установки, де виділяється електромагнітна енергія, запасена спочатку в генераторі, переходячи в інші види енергії.

На підставі одержаних експериментальних даних запропоновано наступне емпіричне співвідношення для ресурсу z – припустимої кількості імпульсів у РК в залежності від амплітуди E напруженості імпульсного електричного поля і тривалості t імпульсів:

$$z \approx z_0 \frac{t_n}{t} e^{-\frac{E}{E_n - \kappa_0 E}}, \quad (9)$$

де E_n – припустима напруженість імпульсного електричного поля, при якій ще відсутні розрядні процеси в РК; $\kappa_0=0,8-1$ – коефіцієнт припустимого росту напруженості E ; t_n – припустима тривалість імпульсів електричного поля в РК, при якій у ній ще відсутні розрядні процеси при амплітуді імпульсів E ; z_0 – ресурс при низьких напруженостях поля в РК, але достатніх для виникнення розрядних процесів при великих тривалостях імпульсів ($t \gg 1$ мкс), $\kappa_0 E < E_n$.

У формулі (9) прийнято $z_0 \approx 10^{12}$ імпульсів.

Розроблено робочу камеру з електричною міцністю уздовж її внутрішньої поверхні більшою, ніж електрична міцність оброблюваного продукту наскрізь, при необов'язковості вимоги малості поперечного перерізу об'єму обробки в порівнянні з поперечним перерізом металевих електродів у камері. Розроблена й апробована робоча камера з декількома робочими зонами (рис. 10). Її будова захищена двома патентами на винаходи.

5 1	Вивід продукту	8	При напруженостях 10 МВ/м і більше імпульсних електричних полів із фронтами ≤ 20 нс з'являється ряд нових механізмів інактивуючої дії на мікроорганізми і на структуру ОР у цілому. Реально досягнута напруженість в описуваній РК при експериментальних дослідженнях склала 12,5 МВ/м і обмежувалася наскрізною електричною міцністю ОР. Установа з імпульсним трансформатором розроблена і виготовлена в рамках проекту № 1120 у науково-технологічному центрі в Україні (НТЦУ). У ній використаний спосіб обробки харчових продуктів за допомогою КВІД, коли напруженість поля в оброблюваній рідині $E > 100$ кВ/см. Установа містить низьковольтний силовий тиристорний генератор, імпульсний трансформатор, високовольтні стартовий імпульсний конденсатор і іскровий розрядник, ємність, що загострює, яка складається з трьох компактних конденсаторів, розрядника, що загострює, й оригінальну робочу камеру, захищену двадцятирічним патентом на винахід.
10		6 4 7	
2 9	Увід продукту	3	

Рис. 10. Робоча камера з декількома робочими зонами. 1, 2 – дві половини корпусу камери; 3 - 5 – електроди; 6 – наскрізний отвір; 7, 8 – радіальні отвори; 9 – оброблювана рідина (ОР); 10 – ущільнювальні прокладки.

Робоча камера є й елементом гідравлічної системи. При імпульсному введенні енергії в продукт останній нагрівається швидко і рівномірно по всьому об'єму, а охолоджується тільки через поверхню електродів. Експериментальна перевірка підтвердила, що таке охолодження недоцільне, оскільки швидко зростаюча до максимуму температура без витримки на максимумі, поряд із сильним імпульсним електричним полем, здійснює інактивуючу дію на мікроорганізми і дуже слабо впливає на біологічну і харчову цінність продуктів.

Експериментально доведено, що при роботі установки з замкненим металевим кожухом – електромагнітним екраном людина може знаходитися на видаленні не менш 1 м від установки протягом усього робочого дня (8 годин безперервно) безпечно для свого здоров'я.

Відмінністю низьковольтного генератора в апараті АШЕМІТ від інших низьковольтних генераторів, які описані у дисертації, є те, що вихідні імпульси в первинній обмотці Тр

формується шляхом розмикання кола первинної обмотки й обриву струму в ній, а не шляхом замикання цього кола. Оригінальними є вихідні пристрої (ВП) і характеристики АШЕМІТ. Апарат АШЕМІТ може працювати на навантаження з будь-яким імпедансом. Для оцінки напруженості електричного поля від випромінювачів використовувався широкосмуговий датчик електричного поля. Для вірогідності вимірів осцилограф, що реєструє, розташовувався в екранованій кабіні з електроживленням через екранований мережний фільтр.

Випромнені імпульси істотно відрізняються від імпульсів на виході формувача. Схема оцінних вимірів випромнених імпульсів приведена на рис. 11. Осцилограми типового випромненого імпульсу, обмірюваного датчиком на осі випромінювання, приведені на рис. 12.

Рис. 11. Схема з'єднань для вимірів характеристик випромнених імпульсів електромагнітного поля: 1 - апарат АШЕМІТ; 2 - випромінювач (ТЕМ- рупор у вигляді плавного коаксіально- смужкового переходу); P — вектор Умова - Пойнтінга; E - напруженість електричного поля; 3 - датчик поля у виді ТЕМ- рупорної антени; l - відстань між розкривами випромінювача 2 і датчика 3; 4, 5 - атенюатори; 6 - осцилограф С7- 19; 7 - лінія затримки; 8 - вхід С7- 19.

Рис. 12. Осцилограми сигналів U_d уздовж осі випромінювання, отримані з датчика електричного поля E_d : $E_d = [(1 - \cos\theta)/\sin\theta] U_d/d_d$, де θ - характерний кут між пластинами ТЕМ- рупора, $d_d = 10$ см - відстань між пластинами в розкриві датчика; $l = 5$ см; сумарне загасання в атенюаторах складає 20 дБ.

Створена та успішно випробувана установка для одержання імпульсного коронного розряду, яка складається з низьковольтного силового тиристорного генератора однополярних імпульсів, імпульсного трансформатора, електродної системи – навантаження високовольтного генератора і системи продувки кисневмісного газу і відводу газу, що містить озон, напрацьований в електродній системі. При використанні загострювача СЕ являє собою довгу лінію з втратами. Ця

лінія як навантаження приєднана одним кінцем до виходу генератора, а на іншому кінці розімкнена.

У п'ятому розділі наведено результати щодо розробки кількох технологій на основі високовольтних імпульсних дій. Обробку продуктів комплексом високовольтних імпульсних дій можна вести в потоці та порціонно: при гальванічному контакті з електродами та в діелектричній тарі. Показано, що проточна обробка найбільш близька до широкого впровадження у виробництво (рис. 13). Принциповою відмінністю технології обробки продуктів за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій від традиційних теплових технологій є наявність у продукті при його обробці нового діючого фактора - сильного імпульсного електричного поля з напруженістю $E \sim 100$ кВ/см і більше.

Саме СІЕП дозволяє знизити питомі енерговитрати при обробці високовольтними імпульсними діями у порівнянні з традиційними тепловими технологіями. При наявності достатнього по продуктивності теплообмінника питомі енерговитрати на обробку високовольтними імпульсними діями текучого продукту визначаються перепадом його температури t^o від передкритичної до надкритичної при проходженні робочої камери з напруженістю поля в неї $E \sim 100$ кВ/см. Витримка при надкритичній температурі не потрібна. Отримані оцінні результати щодо питомих енерговитрат свідчать про зменшення питомих енерговитрат в 1,5...2 рази при обробці комплексом високовольтних імпульсних дій у порівнянні з традиційною тепловою пастеризацією і стерилізацією та в 3...4 рази - у порівнянні зі НВЧ обробкою. Для водомістких продуктів реальною є величина питомих енерговитрат $W_y = 5$ кВт·ч/м³.

Показано, що технологія обробки в порціонному режимі в даний час розвинута істотно слабкіше, ніж проточна обробка. Основною перевагою порціонної обробки є те, що після неї продукт може бути залишений у робочій камері як в упаковці і витягнутий з неї лише в необхідний момент. Тривалі імпульси електричного поля ($t_i > 50$ нс) практично не проникають усередину замкненої діелектричної оболонки об'єкта, що має електричну провідність, а на надвисоких частотах ($f_{екв} \sim 10^{10}$ Гц, $t_{i,екв} \sim 10^{-10}$ с) стає помітним скін-ефект. При $f_{екв} = 10^{10}$ Гц, $\epsilon' = 81$, $\text{tg} \delta = 0,1$ глибина проникнення поля в продукт складає 0,01 м. Тому раціональною при обробці у діелектричній тарі є тривалість $t_i = (1 - 10)$ нс.

Показано, що варіанти лікувальної та профілактичної дії від апарату АШЕМІТ визначаються діючим фактором - короткими електромагнітними імпульсами, що формуються за допомогою швидкодіючих високовольтних екранованих повітряних іскрових розрядників. Основним типом електромагнітної хвилі, що переносить енергію, як у передавальній лінії, так і у вільному просторі, є поперечна електромагнітна хвиля (Т-хвиля, або ТЕМ-хвиля). Відмінною рисою дії від апарату АШЕМІТ є висока пікова потужність в імпульсі (порядку 100 кВт і

Рис. 13. Блок - схема технологічної лінії для обробки в потоці текучих харчових продуктів за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій: позначені не завжди обов'язкові елементи схеми, без яких технологічна лінія може функціонувати без збитку щодо якості обробки; I - шлях протікання не повністю обробленого продукту (чорновий); II - шлях протікання обробленого продукту (чистовий).

більше) при низькій середній потужності (1 Вт і менше).

Найбільш оригінальним є варіант дії через слабо енергетичні іскровий чи безбар'єрний імпульсний коронний розряди. Оригінальною властивістю іскрової дії, є її стерильність та точна адресність, оскільки характерний поперечний розмір іскрового каналу близький до розмірів точок акупунктури на поверхні тіла і складає від декількох до ста мікрон. Можлива дія багатоканальним слабо енергетичним іскровим розрядом. Методи лікування за допомогою апарату АШЕМИТ забезпечують виражений протибольовий ефект, гіпотензивну дію, поліпшують регіонарну мікроциркуляцію, викликають седатуючу дію, підвищують адаптогенні можливості організму. Технічні характеристики апарату приведені в таблиці.

Таблиця

Технічні характеристики апарату АШЕМІТ

Найменування	Одиниця виміру	Величина
Амплітуда імпульсів	кВ	5
Тривалість імпульсів	с	5×10^{-8}
Тривалість фронту імпульсів	с	$(2,5 \pm 0,5) \times 10^{-9}$ або $(0,2 \pm 0,1) \times 10^{-9}$
Маса	кг	до 5
Живлення від мережі змінного струму 50 Гц	В	220
Частота проходження імпульсів	с^{-1}	від поодиноких до 300

В установці потужністю 1500 Вт експериментально отримано ІКР з розширеною зоною іонізації, у якому напрацьовується істотно більше активних часток, ніж у звичайному ІКР, оскільки основним типом носіїв заряду стають електрони замість іонів. Отримано концентрацію озону 10 г/м^3 в не осушеному повітрі на протоках повітря $\sim 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$ у далеко не оптимальних умовах. Одержані результати і потенційні можливості дозволяють вважати доцільним використання такого ІКР в різних озонних технологіях, у технології підготовки питної води. Коло технологій, що можуть бути удосконалені, модернізовані за допомогою використання цього ІКР містить у собі весь ряд технологій із застосуванням плазмохімічних реакцій.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема створення й ефективного технологічного використання сильних імпульсних електричних полів, що включає в себе: вивчення фізичних основ розглянутих технологій і вироблення концепції впливу поля на навантажувальний об'єкт, розробку принципів побудови ефективних електротехнологічних установок і генераторів СІЕП, що забезпечують виконання основних вимог цієї концепції, знаходження раціональних технологічних режимів впливу СІЕП на об'єкт. На основі запропонованих принципів створені й успішно випробувані генератори і електротехнологічні установки для високовольтних імпульсних дій.

У дисертації з використанням методології наукових досліджень у техніці сильних електричних та магнітних полів одержано такі основні наукові та практичні результати.

1. Сформульовано принципи створення генераторів СІЕП та високовольтних установок технологічного призначення з наносекундною і більш короткою тривалістю фронту одержуваних імпульсів, максимальним ресурсом, в основі яких лежать: принцип формування високовольтних імпульсів із крутим фронтом за рахунок імпульсного трансформатора, що забезпечує максимальний коефіцієнт трансформації при мінімальних габаритах і втратах енергії, і повного використання властивостей іскрового розряду щодо загострення; спосіб генерування

високовольтних імпульсів з по каскадним загостренням їхнього фронту і пристрій для його здійснення; способи впливу на навантаження сильним імпульсним електричним полем і породжуваними ним факторами, а також пристрої полестворення й енерговиділення.

Для цього вивчено фізичні основи технологій, які підлягали розробці, створено експериментальні пристрої, що здійснюють високовольтні імпульсні дії на різні об'єкти, проведено низку досліджень. Доведено, що в останні роки у світі інтенсивно ведуться наукові дослідження в напрямку створення нових ефективних енергозаощаджуючих технологій на основі використання СІЕП та іонізованих газів, розвиток яких стримується відсутністю електротехнологічних установок, що забезпечують високовольтні імпульсні дії на об'єкти навантаження при напруженостях імпульсного електричного поля приблизно 100 кВ/см і більших та тривалостях фронтів імпульсів від 20 нс до 1 нс і менших. До цих технологій належать: обробка харчових продуктів за допомогою високовольтних імпульсних дій, широкосмугова електромагнітна імпульсна терапія, технології на основі імпульсного коронного розряду, які розглянуто в дисертації.

Показано теоретично і підтверджено експериментально, що з укороченням тривалості фронту високовольтних імпульсів зменшується ерозія електродів розрядників, збільшується припустима частота спрацьовування іскрових розрядників, а, отже, і можлива частота проходження імпульсів. Для необоротності інактивуєчої дії комплексу факторів на основі сильного імпульсного електричного поля кінцева миттєва температура повинна перевищити критичне значення, що нижче температури традиційної теплової пастеризації і для більшості мікроорганізмів при $E \approx 100$ кВ/см лежить у діапазоні $t^{\circ} = 50 - 65^{\circ}\text{C}$. Сама по собі критична температура не робить істотної інактивуєчої дії на мікроорганізми. Експериментально показано, що кількість небажаних мікроорганізмів у харчових продуктах при інактивуєчій обробці комплексом високовольтних імпульсних дій у технологічних, тобто з великою продуктивністю, режимах може бути зменшена в 10^6 разів і більше. При цьому вихідна біологічна і харчова цінність продуктів не погіршується, а питомі енерговитрати менші, ніж при традиційних теплових методах обробки.

2. Розроблено оригінальний генератор високовольтних імпульсів з підвищувальним трансформатором на перемінній (50 Гц) живлячій напрузі. Генератор дозволяє одержувати на навантаженні - робочій камері імпульси напруги амплітудою до 120 кВ, частотою проходження до 500 Гц, середньою потужністю до 50 кВт і призначений для використання в установці по обробці харчових продуктів комплексом високовольтних імпульсних дій. Цей спосіб обробки захищений двадцятирічними патентами на винаходи в Україні (№ 19400) і Російської федерації (№ 2085508) і здійснюється за допомогою даного генератора. Експериментально перевірений ресурс генератора в цілому і його елементів склав $\approx 5 \times 10^9$ імпульсів. Генератор з таким напрацьованим ресурсом знаходиться в справному стані й активно використовується в експериментальних дослідженнях і в навчальному процесі НТУ "ХП".

Розроблено компактний генератор високовольтних імпульсів з оригінальним імпульсним підвищувальним трансформатором, призначений для обробки за допомогою сильних імпульсних

електричних полів харчових продуктів. Даний генератор при габаритах, у 6 разів менших у порівнянні з попереднім генератором, дозволяє одержувати на навантаженні - робочій камері імпульси напруги підвищеної стабільності амплітудою до 130 кВ, частотою проходження до 700 с^{-1} , середньою потужністю до 30 кВт.

Розроблено генератор за схемою Аркадьєва - Маркса, що працює в режимі з покаскадним загостренням фронту імпульсів. Експериментально показано, що тривалість фронту імпульсів на навантаженні генератора може бути істотно коротше його електричної довжини і складати не більш 1 нс. Спосіб покаскадного загострення фронту імпульсів і пристрій - генератор, його здійснюючий, дозволяють одержувати напруги більше мегавольта і захищені двадцятирічними патентами на винаходи 27077 України і 2110143 Російської Федерації.

Розроблено генератор апарата для ширококугової електромагнітної імпульсної терапії, що дозволяє одержувати за допомогою формувача імпульси напруги наносекундної тривалості з фронтом 0,1 нс на навантаженні 50 Ом і більш при амплітудах до 10 кВ і частоті проходження до 300 с^{-1} .

Розроблено генератор для одержання імпульсного коронного розряду, що дозволяє одержувати на навантаженні - електродній системі імпульси напруги і струми з тривалістю фронту 10 нс і менше при амплітуді напруги до 100 кВ, а загального струму – до 1000 А, частотах проходження імпульсів до 2100 с^{-1} і споживаній потужності від живильної мережі (220 В, 50 Гц) до 1500 Вт. Показано розрахунковим шляхом і підтверджено експериментально, що пристрій, базовий для даного генератора, що складається з імпульсного трансформатора й іскрового розрядника, підключеного послідовно до високовольтної обмотки трансформатора, дозволяє збільшити амплітуду вихідних імпульсів напруги в 120 разів і більше (за рахунок трансформатора) і покоротшати фронт імпульсу на високовольтному навантаженні пристрою до 10 нс і менше (за рахунок іскрового розрядника).

3. Створені й успішно випробувані установки технологічного масштабу для здійснення комплексу високовольтних імпульсних дій при обробці харчових продуктів, у ширококуговій електромагнітній імпульсній терапії, у технологіях на основі імпульсного коронного розряду, область іонізації якого займає практично всю довжину розрядного проміжку.

Розроблено установки по КВІД- обробці харчових продуктів з робочими камерами, будова яких захищена двадцятилітніми патентами на винаходи 32453 України, 2157649 і 2193856 Російської федерації з конвенційним пріоритетом України. В установках реалізована розроблена у дисертації концепція раціональної дії зовнішнього сильного імпульсного електричного поля з напруженістю приблизно 100 кВ/см і більше при мікробіологічно незаражуючій обробці високовольтними імпульсними діями водомістких рідин та текучих продуктів, відповідно до якої імпульси поля повинні мати короткий фронт ($t_f < 20 \text{ нс}$), щоб поле проникло усередину мікробної клітини і досить велику тривалість, щоб здійснити необоротний пробій мембрани клітини. Оптимальна тривалість імпульсів тим більше, чим більше розміри

клітки. Для бактерій з характерним розміром 1 мкм оптимальна тривалість імпульсів $0,1 \text{ мкс} \leq t_i \leq 1,0 \text{ мкс}$.

Створено й успішно експериментально перевірений апарат для широкопasmової електромагнітної імпульсної терапії масою приблизно 5 кг, будова якого захищена двадцятилітніми патентами на винаходи 23040 України і 2086271 Російської Федерації. АШЕМІТ дозволяє одержувати упорядковані електромагнітні імпульси з Т- хвилею. Кожен УЕМІ має широкий безперервний не шумовий спектр частот $0 \leq \omega \leq 2,2/t_f$, де t_f – тривалість фронту імпульсів на виході АШЕМІТ, що може досягати 0,1 нс і менше. Ці імпульси можуть бути імпульсами електричного поля, струму, розрядами (іскровими чи коронними). Вони можуть впливати точково, локально (на ділянку поверхні тіла), глобально (на весь організм чи групу пацієнтів). Дія може бути контактною, безконтактною, через плазму розряду (іскрового чи коронного).

Розроблено оригінальну установку для одержання імпульсного коронного розряду з зоною іонізації, що займає практично весь міжелектродний проміжок. За допомогою цієї установки показана перспективність такого ІКР при здійсненні різних технологій, у тому числі озонних. При цьому об'єкт, що підлягає обробці, може розміщатися безпосередньо усередині електродної системи з ІКР. При розробці установки використане попередньо зроблене теоретичне обґрунтування можливості одержання й експериментальні дані по одержанню ІКР, в якому чохол корони, де відбувається іонізація і має місце світіння, займає практично весь міжелектродний проміжок. Основними носіями заряду, що здійснюють протікання струму в такому ІКР, на відміну від звичайного імпульсного коронного розряду, стають електрони, а не іони. При цьому припустимий струм корони зростає приблизно в 1000 разів і досягає, щонайменше, 1 А. Експериментально обґрунтовано перспективність такого імпульсного коронного розряду для високовольтних електротехнологій завдяки енергетично вигідному одержанню у ньому активних часток: атомарного кисню, озону та ін.

4. Створено кілька технологій на основі комплексу високовольтних імпульсних впливів і показані перспективи їхньої комерціалізації. Розроблено ефективну технологію мікробіологічно інактивуючої обробки харчових продуктів із продуктивністю 1000 кг/год (чи л/год) і більш при збільшенні термінів їхнього збереження (у порівнянні з термінами після традиційної теплової пастеризації) без погіршення вихідної біологічної і харчової цінності. Показано варіанти лікувальної і профілактичної дії від апарату для широкопasmової електромагнітної імпульсної терапії, а також лікувальні методики і результати його клінічної апробації. Запропоновано технології з використанням імпульсного коронного розряду з розширеною зоною іонізації: озонні технології, технологія очищення топкових газів; показані їхні переваги перед існуючими технологіями, у тому числі переваги від зменшення питомих енерговитрат при генеруванні озону.

5. Розроблено оригінальні технологічні засоби виміру, за допомогою яких проведені виміри напруг, струмів і полів у створених експериментальних і дослідних технологічних установках.

Основні результати дисертації знайшли застосування й одержали позитивні відгуки (у виді затверджених технічних умов, висновків, протоколів, актів і т.д.) у таких організаціях: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Українська академія

аграрних наук (Київ), Харківський завод шампанських вин, Харківський молочний комбінат ("Ромол"), Харківська обласна санітарно- епідеміологічна станція, сертифікований випробувальний центр Харківського державного медичного університету, поліклініка генерального штабу збройних сил СРСР, кафедра фізіотерапії і курортології Харківського інституту удосконалення лікарів (нині Медична академія післядипломної освіти) і її базові санаторій "Гай" (Харківська область) і центральна клінічна лікарня № 5 (Харків), Державне Українське об'єднання "Політехмед" і ін. Матеріали даної роботи використані при виконанні міжнародного проекту № 1120 у Науково- технологічному центрі в Україні (НТЦУ) у період з 1999 по 2002 рік.

Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" при підготовці інженерів за фахом "Техніка і електрофізика високих напруг" у рамках дисципліни "Сильні електричні поля в техніці".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бойко Н.И., Сафронов И.А. Высоковольтный генератор импульсов с субнаносекундным фронтом // Приборы и техника эксперимента. - М. – 1991. - № 3. – С. 93-95. *Здобувач запропонував ідею створення малогабаритного генератора імпульсів з крутим фронтом з низькоіндуктивним конденсатором, стартовим розрядником із електродом, що обертається, та вузлом загострення фронту імпульсів і експериментально одержав високовольтні імпульси з часом наростання 0,5 нс, тривалістю до напівспаду 350 нс при частоті проходження більше 50 імп/с.*
2. Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л. С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтный генератор импульсов со средней мощностью до 50 кВт для обработки пищевых продуктов // Приборы и техника эксперимента. - М. – 1998. - № 2. – С. 120-126. *Здобувач запропонував та обґрунтував схему генератора і ідею використання у ньому повітряних іскрових розрядників при частоті проходження імпульсів до 400 імп/с, прийняв участь у створенні, випробуваннях, експериментальному визначенні характеристик та експлуатації генератора.*
3. Малюк Л.П., Колесник Т.Л., Савгіра Ю.О., Бойко М.І., Давидова О.Ю. Вплив нового способу обробки плодоовочевої сировини на збереження біофлавоноїдів плодів // Удосконалення технології та організації масового харчування, готельного господарства і туризму. – Київ: Київський державний торговельно – економічний університет. - 1998. – С. 54-57. *Здобувач знайшов та здійснив режими обробки продуктів із кісточкових плодів за допомогою комплексу високовольтних імпульсних дій, які дозволили ефективніше зберегти поліфенольні комплекси плодів порівняно з традиційною тепловою обробкою з метою мікробіологічного знезараження при однаковій інактивуєчій дії.*
4. Бойко Н.И., Бойко А.А., Джафаров И.М. Действие наносекундных импульсов электрического поля с напряженностью более 1 кВ/см на микроорганизмы в различных средах // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 21. - С. 134-139. *Здобувач за допомогою розрахункових оцінок*

обґрунтував можливість основної інактивуючої дії зовнішнього сильного імпульсного електричного поля не на клітинну мембрану, а на основні біомакромолекули усередині клітини і можливе зменшення питомих енерговитрат на інактивацію наносекундними імпульсами порівняно з мікросекундними.

5. Бойко Н.И., Тур А.Н., Рудаков В.В., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М. Высоковольтные импульсные конденсаторы с ресурсом 10^{11} импульсов // Приборы и техника эксперимента. - М. – 1999. – № 3. – С. 92-99. *Здобувач запропонував підхід до створення високовольтних імпульсних конденсаторів, що забезпечує їх ресурс до 10^{11} імпульсів у поєднанні з достатньо низькою індуктивністю, експериментально дослідив граничні можливості щодо зниження при цьому індуктивності конденсаторів.*
6. Бойко Н.И. Генератор по схеме Аркадьева – Маркса в режиме с покасадным обострением фронта импульсов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. - 2000. - Частина 6. - С. 94-97.
7. Бойко Н.И. ТЕМ - рупорный датчик с коаксиально-полосковым переходом для измерения электромагнитных импульсов длительностью менее 1 нс // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. - 2000. - Частина 6. - С. 98-101.
8. Бойко Н.И. Широкополосный смешанный демпфированный высокоомный делитель напряжения на 100 кВ // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 84. – С. 14-18.
9. Бойко Н.И., Сафронов И.А., Тондий Л.Д. АШЭМИТ – аппарат для широкополосной электромагнитной импульсной терапии // Приборы и техника эксперимента. - М. - 2000. - № 5. - С. 101-108. *Здобувач запропонував принцип дії та будову апарату, що дозволило скоротити тривалість фронту імпульсів до 0,1 нс при частоті проходження імпульсів до 300 імп/с, а також ряд ширококутових вихідних пристроїв, у тому числі такий, що дозволяє діяти через низькоенергетичний іскровий розряд.*
10. Тондий Л.Д., Бойко Н.И. О возможностях лечебного использования терапевтического аппарата “АШЭМИТ” // Вестник физиотерапии и курортологии. – Симферополь - Евпатория. – 2001. - Т. 7, № 1. - С. 96-99. *Здобувач навів можливі варіанти дії ширококутовими упорядкованими електромагнітними імпульсами за допомогою вихідних пристроїв апарату для ширококутової електромагнітної імпульсної терапії з поперечною електромагнітною хвилею (Т- або ТЕМ-хвилею), у тому числі таких як ТЕМ-чарунки, різноманітні випромінювачі, коаксіально-смушкові переходи, електродні системи для дії через низькоенергетичні розряди.*
11. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Тур А.Н. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок // Приборы и техника эксперимента. - М. - 2001. - № 2. - С. 79-88. *Здобувач обґрунтував схему комутації енергії іскровими розрядниками у технологічних установках за допомогою теоретичних оцінок щодо процесу*

розпаду газорозрядної плазми, обґрунтував теоретично і довів експериментально можливість зменшення ерозії електродів і підвищення частоти проходження імпульсів при скороченні тривалості фронтів імпульсів, що їх комутують розрядники.

12. Бойко Н.И., Тур А.Н., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Зароченцев А.И., Рудаков В.В., Божков А.И. Установка для обработки текучих продуктов при помощи комплекса высоковольтных импульсных воздействий и результаты исследований // *Технічна електродинаміка*. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2001. - № 4. – С. 59-63. *Здобувач запропонував принцип побудови першої в Україні установки технологічного масштабу з ресурсом до 10^{11} імпульсів для знезаражуючої обробки продуктів комплексом високовольтних імпульсних дій, прийняв активну участь при створенні і випробуваннях установки.*
13. Бойко Н.И. Высоковольтные аппараты и технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. - № 16. – С. 11-16.
14. Бойко Н.И. Высоковольтные импульсные трансформаторы для технологических установок // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. - № 17. - С. 14-17.
15. Бойко Н.И., Бондина Н.Н., Левченко Е.В., Михайлов В.М. Использование потока для анализа воздействия полей на поляризующиеся тела // *Технічна електродинаміка*. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2001. - № 6. – С. 6-10. *Здобувач запропонував ідею використання методів теорії поля для аналізу розподілу зовнішнього електричного поля у біологічних клітинах з урахуванням електричних характеристик не тільки цитоплазми та мембрани, але й ядра або прокаріотичної хромосоми, прийняв участь у загальній постановці задачі, аналізі результатів і зробив висновки щодо їх практичного використання при дії на біологічні клітини.*
16. Бойко Н.И., Бондина Н.Н., Е.В., Михайлов В.М. Моделирование воздействия электрического поля на объекты, имеющие многослойную структуру // *Електронне моделювання*. – Киев. – 2002. – Т. 24, № 1. – С. 70-82. *Здобувач запропонував моделювати біологічну клітину з урахуванням ядра або прокаріотичної хромосоми у вигляді багатошарової оболонки з різними електричними характеристиками шарів, прийняв участь в аналізі результатів, одержаних в процесі та після розв’язання задачі.*
17. Рудаков В.В., Бойко Н.И., Беспалов В.Д., Кравченко В.П., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю. Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - № 7. – С. 47-58. *Здобувач проаналізував технічні характеристики та відмінності розроблених з його участю конденсаторів.*
18. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Тур А.Н. Генераторы импульсов для технологий на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - № 7. - С. 71-80. *Здобувач запропонував принципи будови низькоіндуктивного*

генератора за схемою Аркадьєва – Маркса з оригінальними робочими камерами на його виході, призначеними для знезаражуючої обробки продуктів імпульсами мегавольтного діапазону у режимах з великою продуктивністю.

19. Бойко Н.И., Бондина Н.Н., Донец С.Е., Левченко Е.В., Михайлов В.М. Поляризация сферических оболочек и распределение электрического поля в биологической клетке // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2002. – Частина 6. – С. 13-18. *Здобувач висунув ідею поглибленого розгляду розподілу зовнішнього електричного поля в багатошаровій моделі біологічної клітини і прийняв участь в аналізі результатів, одержаних в процесі і після завершення розв’язання задачі, та виробленні практичних рекомендацій.*
20. Бойко Н.И. Технологии, основанные на воздействии сильных импульсных электрических полей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2002. – Частина 6. – С. 94-99.
21. Бойко Н.И., Божков А.И. Влияние комплекса высоковольтных импульсов и других физических факторов на интенсивность размножения *Anabaena flos aquae* // Биофизика. - М. – 2002. – Т. 47, Вып. 3. – С. 531-538. *Здобувач розробив і здійснив фізичну та технічну частину проведеного дослідження, здійснив аналіз результатів, зробив висновки і дав рекомендації щодо їх практичного використання.*
22. Бойко Н.И., Евдошенко Л. С., Тур А.Н., Иванов В.М., Зароченцев А.И. Защита от электромагнитных полей в технологических импульсных высоковольтных установках // Приборы и техника эксперимента. - М. – 2002. - № 4. – С. 135-139. *Здобувач запропонував принципи екранування електромагнітного поля, що їх використовують у вимірювальних кабінах з чутливою до дії електромагнітного поля апаратурою, здійснити при створенні електророздукової ізоляційних кожухів для електротехнологічних установок, прийняв участь у створенні та експериментальних дослідженнях ефективного кожуху-екрану, який дозволяє людині знаходитися тривалий час біля таких працюючих установок безпечно для свого здоров’я.*
23. Бойко Н.И., Евдошенко Л. С., Тур А.Н., Иванов В.М., Зароченцев А.И. Рабочие камеры для обработки продуктов комплексным воздействием сильных импульсных электрических полей // Приборы и техника эксперимента. - М. – 2002. - № 6. – С. 102-112. *Здобувач сформулював та обґрунтував вимоги до робочих камер, що використовуються для обробки високовольтними імпульсами продуктів для їх мікробіологічного знезараження, прийняв участь в експериментальних дослідженнях і створенні камер з найбільш раціональною будовою, що дозволяє одержати ресурс камер 10^{11} імпульсів і більше при робочих напруженостях 100 кВ/см і більше.*
24. Пат. 19400 Україна, МКВ⁵ В 01 J 19/00. Спосіб обробки рідин та рідкотекучих продуктів / М.І. Бойко, А.М. Тур, В.В. Бикасов, Л.С. Євдошенко, О.І. Зароченцев, В.М. Иванов, Г. Ф. Нескородов (Україна). – Заявл. 09.08.94; Опубл. 25.12.97, Бюл. № 6. – 8 с. *Здобувач*

запропонував спосіб обробки рідин та рідкотекучих продуктів за рахунок дії напруженості імпульсного електричного поля, що складає більше 100 кВ/см.

25. Пат. 2085508 РФ, МКИ^б С 02 F 1/48. Способ обработки жидкостей и жидкотекучих продуктов / Н.И. Бойко, А.Н. Тур, В.В. Быкасов, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов, Г.Ф. Нескородов (Украина). – Заявл. 13.07.95; Опубл. 27.07.97, Бюл. № 21. - 9 с. *Здобувач запропонував спосіб обробки рідин та рідкотекучих продуктів за рахунок дії напруженості імпульсного електричного поля, що складає більше 100 кВ/см.*
26. Пат. 2086271 РФ, МКИ^б А 61 N 5/02. Устройство для импульсной электромагнитной терапии / Н.И. Бойко, И.А. Сафронов, Л.Д. Тондий (Украина). – Заявл. 13.07.95; Опубл. 10.08.97, Бюл. № 22. - 12 с. *Здобувач запропонував генератор у вигляді джерела упорядкованих електромагнітних імпульсів, що містить розрядник з регульованим кільцевим зазором, який виконано між торцями електродів, що розташовані один напроти одного, на стику двох ліній із суттєво різними хвильовими опорами.*
27. Пат. 23040 Україна, МКВ^б А 61 N 5/02. Пристрій для імпульсної електромагнітної терапії / М.І. Бойко, І.А. Сафронов, Л.Д. Тондій (Україна). – Заявл. 29.03.94; Опубл. 30.06.98, Бюл. № 3. – 10 с. *Здобувач запропонував генератор у вигляді джерела упорядкованих електромагнітних імпульсів, що містить розрядник з регульованим кільцевим зазором, який виконано між торцями електродів, що розташовані один напроти одного, на стику двох ліній із суттєво різними хвильовими опорами.*
28. Пат. 2110143 РФ, МКИ^б Н 03 К 3/53. Способ генерирования высоковольтных импульсов и устройство для его осуществления / Н.И. Бойко, И.А. Сафронов (Украина). – Заявл. 26.07.96; Опубл. 27.04.98, Бюл. № 12. – 16 с. *Здобувач запропонував спосіб покаскадного загострення фронту імпульсів при розряді генераторів за схемою Аркадьєва – Маркса і навіть математичні співвідношення між амплітудно-часовими характеристиками, які повинні виконуватися для здійснення цього способу, а також деякі співвідношення, що їх треба виконувати у такому генераторі як пристрої, що дозволяє здійснити цей спосіб.*
29. Пат. 27077 Україна, МКВ^б Н 03 К 3/53. Спосіб генерування високовольтних імпульсів та генератор імпульсних напруг для його здійснення / М.І. Бойко, І.А. Сафронов (Україна). – Заявл. 22.07.96; Опубл. 28.02.00, Бюл. № 1. – 15 с. *Здобувач запропонував спосіб покаскадного загострення фронту імпульсів при розряді генераторів за схемою Аркадьєва – Маркса і навіть математичні співвідношення між амплітудно-часовими характеристиками, які повинні виконуватися для здійснення цього способу, а також деякі співвідношення, що їх треба виконувати у генераторі, що дозволяє здійснити цей спосіб.*
30. Пат. 32453 Україна, МКВ^б А 23 L 3/32. Пристрій для електрообробки рідких та текучих продуктів / М.І. Бойко, А. М. Тур, Л.С. Євдошенко, О.І. Зароченцев, В.М. Иванов (Україна). – Заявл. 05.02.98; Опубл. 15.12.00, Бюл. № 7. – 5 с. *Здобувач запропонував у пристрої для електрообробки рідких та текучих продуктів внутрішню поверхню корпусу виконати з забезпеченням зіткнення електрооброблюваного продукту не тільки з частинами поверхонь нижнього і верхнього електродів, що протистоять (частинами поверхонь) частинам*

поверхні проміжного електроду, але й з іншими частинами їх поверхонь.

31. Пат. 2157649 РФ, МКИ⁷ А 23 L 3/32. Устройство для электрообработки жидких и текучих продуктов / Н.И. Бойко, А.Н. Тур, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов (Украина). – Заявл. 18.01.99; Опубл. 20.10.00, Бюл. № 29. – 8 с. *Здобувач запропонував у пристрої для електрообробки рідких та текучих продуктів внутрішню поверхню корпусу виконати з забезпеченням зіткнення електрооброблюваного продукту не тільки з частинами поверхонь нижнього і верхнього електродів, що протистоять (частинами поверхонь) частинам поверхні проміжного електроду, але й з іншими частинами їх поверхонь.*
32. Пат. 2193856 РФ, МКИ⁷ А 23 L 3/32, С 02 F 1/48. Способ и устройство для обработки жидкостей и текучих продуктов / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов, А.Н. Тур (Украина). – Заявл. 10.11.00; Опубл. 10.12.02, Бюл. № 34. – 6 с. *Здобувач запропонував спосіб обробки рідин імпульсами сильного електричного поля, в якому (способі) уведена, принаймні, одна обробка випромінюванням іскрового розряду, та пристрій з кюветою, виконаною з матеріалу, прозорого для випромінювання іскрового розряду.*
33. Бойко Н.И., Верховенко А.А., Кириенко А.И., Сафронов И.А. Малогабаритная моделирующая установка // Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции (г. Харьков). – Часть 2. – М.: НТЦ “Информтехника”, 1991. – С. 46-48. *Здобувач запропонував принцип побудови моделюючої установки з використанням у генераторі установки двоступеневої схеми загострення фронтів імпульсів до 0,5 нс і виконав аналіз експериментальних результатів.*
34. Бойко Н.И., Зароченцев А.И., Быкасов В.В., Верховенко А.А., Конотоп В.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Кириенко А.И., Парц В.Н., Сафронов И.А. Высоковольтный твердотельный генератор на полосковых линиях // Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции (г. Харьков). – Часть 2. – М.: НТЦ “Информтехника”, 1991. – С. 60-62. *Здобувач запропонував принцип створення високовольтного твердотільного генератора на смужкових лініях, прийняв участь в його створенні, провів аналіз його роботи, обґрунтував можливість одержання на цьому генераторі імпульсів з тривалістю фронту 1 нс і амплітудою до 100 кВ з високою стабільністю.*
35. Бойко Н.И., Быкасов В.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Кириенко А.И., Сафронов И.А. Экспериментальное исследование переходных характеристик систем полеобразования // Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции (г. Харьков). – Часть 2. – М.: НТЦ “Информтехника”, 1991. – С. 83-85. *Здобувач експериментально дослідив перехідні характеристики систем полестворення на основі різних смужкових ліній, провів аналіз одержаних результатів.*

36. Boyko N.I., Kiriienko A.I. Multistage High-Voltage Generator with Subnanosecond Pulses Front // Proceedings of the X International Conference on Gas Discharges and Their Applications. - Swansea, U.K., 1992. *Здобувач експериментально показав, що існує режим розряду генератора за схемою Аркадьєва – Маркса, в якому (режимі) тривалість фронту імпульсів на виході генератора практично не залежить від його електричної довжини і може складати 1 нс і менше.*
37. Бойко Н.И. Электрический пробой диэлектриков при коммутации разрядников мощных короткоимпульсных систем // Тезисы докладов VI научной школы “Физика импульсных воздействий на конденсированные среды”. – Николаев: Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины, 1993. – С. 20.
38. Бойко Н.И., Сафронов И.А. Малогабаритный частотный генератор высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом // Тезисы докладов VI научной школы "Физика импульсных воздействий на конденсированные среды". – Николаев: Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины, 1993. – С. 198. *Здобувач наводить технічні характеристики та особливості функціонування малогабаритного генератора, створеного за його ідеєю при його активній участі, з тривалістю фронту такою, що регулюється і може бути суттєво меншою за 1 нс.*
39. Бойко Н.И., Рудаков В.В. Проблема чистых помещений в силовом конденсаторостроении // Сборник докладов VI конференции АСИНКОМ (ассоциации инженеров по контролю микрозагрязнений). Киев, 4-6 июня 1996. – М.: Полиграфучасток ГП “ВНИИФТТРИ”. – С. 74-79. *Здобувач на основі даних власних експериментів і даних інших авторів зробив висновок, що використання виробничих приміщень з очищеним повітрям дозволить виробляти конденсатори з суттєво підвищеним ресурсом і забезпечить можливість підвищення у 2-3 рази питомої енергії у конденсаторах.*
40. Божков А.І., Бойко М.І., Голтвянський А.В. Науковий проект “Використання комплексу високовольтних імпульсних дій у регулюванні проліферації клітинних культур” Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір ПА №807. – Зареєстровано в Державному агентстві України з авторських і суміжних прав, 1997. – 8 с. *Здобувач запропонував і експериментально здійснив режими дії імпульсного електричного поля на біологічні клітини мікроорганізмів як такі, що затримують (при більшій напруженості поля ≈ 35 кВ/см) швидкість росту кількості клітин, так і такі, що значно прискорюють (при меншій напруженості поля ≈ 9 кВ/см) процес, без температурного ефекту.*
41. Тондий Л.Д., Беланович Е.В., Бойко Н.И., Базарный Н.Ф. Лечение рефлекторных синдромов у больных вертебральным остеохондрозом устройством для импульсной электромагнитной терапии. // Материалы X Международной научно-практической конференции "Применение лазеров в медицине и биологии". – Харьков, 1998. - С. 85-86. *Здобувач сформулював принципи створення генератора упорядкованих електромагнітних імпульсів з безперервним спектром частот від 0 до 10 ГГц у кожному імпульсі, який (генератор) успішно пройшов клінічну апробацію у Харківському центрі удосконалення та впровадження медичних технологій.*

42. Boyko N.I., Tondiy L.D. and Kapustjanenko G.G. Investigation of action produced by pulsed electromagnetic fields on biological systems // Symposium Record Abstracts. First International Symposium on Nonthermal Medical/Biological Treatments Using Electromagnetic Fields and Ionized Gases. ElectroMed 99. Norfolk, Virginia, USA. – Norfolk, USA, 1999. – P. 74. *Здобувач експериментально показав, що при напруженостях поля до 5 кВ/см його (поля) вплив був не явно виражений, при напруженостях (5-10) кВ/см в наносекундному діапазоні можлива активація принаймні деяких мікроорганізмів, а при напруженостях, більших за 35 кВ/см і фінальних температурах рідин, що перевищують 45 °С, спостерігався ефект інактивації.*
43. Бойко Н.И. Технологии на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий (КВИВ) // Материалы Международной научно-технической конференции "Проблемы и пути реализации научно-технического потенциала военно-промышленного комплекса". – Киев, 2000. - С. 14-15.
44. Boyko N.I., Tur A.N., Evdoshenko L.S., Ivanov V.M., Zarochentsev A.I., Rudakov V.V., Wojkov A.I. Unit for disinfecting treatment of fluids and liquid food with the help of combination of high voltage electromagnetic pulsed effects (CHVPE) with the output of up to 1000L/hour and higher, lifetime of up to 10^{11} pulses and results of research on food treatment carried out by means of it // Materials of 12-th International Symposium on High Voltage Engineering. - Bangalore, India, 2001. - Paper № 9-1. *Здобувач теоретично і експериментально обґрунтував переваги незаражуючої обробки продуктів за допомогою сильних імпульсних електричних полів з напруженістю до 120 кВ/см і більше перед традиційними тепловими способами обробки, а також зробив висновок, що імпульси з великими напруженостями поля приблизно 50 кВ/см можуть приводити не тільки до інактивації, але й до активації мікроорганізмів при малій кількості імпульсів на одиничний об'єм суспензії з мікроорганізмами.*
45. Бойко Н.И. Разработка технологий на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий // Материалы X Международной научной школы-семинара "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах". - Николаев: Атолл, 2001. - С. 62-63.

АНОТАЦІЇ

Бойко М.І. “Наукові основи створення електротехнологічних установок для високовольтних імпульсних дій”. – Рукопис.

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”, Харків, 2003.

Розв’язано проблему створення електротехнологічних установок для високовольтних імпульсних дій. Сформульовано принципи створення установок з наносекундною і коротшою тривалістю фронту імпульсів, ресурсом 10^{11} імпульсів, в основі яких лежать: принцип формування високовольтних імпульсів з крутим фронтом за рахунок імпульсного трансформатора, який

забезпечує максимальний коефіцієнт трансформації при мінімальних габаритах і витратах енергії, та повного використання загострюючих властивостей іскрового розряду; спосіб генерування імпульсів з покаскадним загостренням їх фронту і пристрій для його здійснення; способи дії на навантаження сильним імпульсним електричним полем та факторами, що воно породжує, а також пристрої полестворення та енерговиділення. Висунуто концепцію раціональної дії сильного імпульсного електричного поля при інактивації мікроорганізмів у текучих середовищах. Створено установки для знезаражуючої обробки рідин комплексом високовольтних імпульсних дій із середньою потужністю до 50 кВт при робочих напруженостях в рідинах 100 кВ/см і більше.

Ключові слова: сильне імпульсне електричне поле, комплекс високовольтних імпульсних дій, електротехнологічна установка, генератор, розряд, робоча камера, електродна система.

Бойко Н.И. Научные основы создания электротехнологических установок для высоковольтных импульсных воздействий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 “Техника сильных электрических и магнитных полей”. - Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Сформулированы принципы создания высоковольтных установок (и их элементов) технологического назначения с наносекундной и более короткой длительностью фронта получаемых импульсов, максимальным ресурсом, в основе которых лежат: принцип формирования высоковольтных импульсов с крутым фронтом за счёт импульсного трансформатора, обеспечивающего максимальный коэффициент трансформации при минимальных габаритах и потерях энергии, и полного использования обостряющих свойств искрового разряда; способ генерирования высоковольтных импульсов с покаскадным обострением их фронта и устройство для его осуществления; способы воздействия на нагрузку сильным импульсным электрическим полем и порождаемыми им факторами, а также устройства полеобразования и энерговыведения. При разработке принципов построения установок основные экспериментальные результаты исследований обоснованы при помощи теоретических оценок, а теоретические предпосылки нашли экспериментальное подтверждение. Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что с укорочением длительности фронта высоковольтных импульсов уменьшается эрозия электродов разрядников, увеличивается допустимая частота срабатывания искровых разрядников, а, следовательно, и возможная частота прохождения импульсов. Впервые теоретически предсказан и экспериментально получен импульсный коронный разряд, область ионизации (светящийся чехол) которого занимает практически весь разрядный промежуток между коронирующим электродом положительной полярности и низковольтным электродом. Предложена эмпирическая математическая модель описания результата микробиологического обеззараживания продуктов при помощи высоковольтных импульсных воздействий в зависимости от ряда факторов, наиболее значимыми из которых

являются: напряженность импульсного электрического поля, температура среды с обрабатываемыми микроорганизмами, длительность импульсов поля. Разработаны методики и рекомендации по созданию и использованию основных элементов в установках для технологий на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий: многоазорных и многоканальных искровых разрядников, импульсных трансформаторов, емкостных накопителей энергии, рабочих камер, аппликаторов, излучателей, систем полеобразования.

Впервые в Украине созданы и успешно испытаны установки технологического масштаба для осуществления комплекса высоковольтных импульсных воздействий при обработке пищевых продуктов, в широкополосной электромагнитной импульсной терапии, в технологиях на основе импульсного коронного разряда, область ионизации которого занимает практически всю длину разрядного промежутка.

Разработаны установки по обработке пищевых продуктов с рабочими камерами, устройство которых защищено двадцатилетними патентами на изобретения 32453 Украины, 2157649 и 2193856 Российской Федерации с конвенционным приоритетом Украины. В установках реализована концепция рационального действия импульсного электрического поля при микробиологически обеззараживающей обработке продуктов, согласно которой импульсы поля должны иметь короткий фронт ($t_f < 20$ нс), чтобы поле проникло внутрь микробной клетки и достаточно большую длительность, чтобы осуществить необратимый пробой мембраны клетки. Оптимальная длительность импульсов тем больше, чем больше размеры клетки. Для бактерий с характерным размером 1 мкм оптимальная длительность импульсов $0,1 \text{ мкс} \leq t_i \leq 1,0 \text{ мкс}$. В установках достигнута средняя мощность 50 кВт и рабочие напряженности в обрабатываемых жидкостях 100 кВ/см и более.

Создан и успешно экспериментально проверен аппарат для широкополосной электромагнитной импульсной терапии массой примерно 5 кг, устройство которого защищено двадцатилетними патентами на изобретения 23040 Украины и 2086271 Российской Федерации. Аппарат позволяет получать упорядоченные электромагнитные импульсы. Каждый импульс обладает широким спектром частот $0 \leq \omega \leq 2,2/t_f$, где t_f – длительность фронта импульсов на выходе аппарата, которая может достигать 0,1 нс и менее. Эти импульсы могут быть импульсами электрического поля, тока, разрядами (искровыми или коронными). Они могут воздействовать точно, локально (на участок поверхности тела), глобально (на весь организм или группу пациентов). Воздействие может быть контактным, бесконтактным, через плазму разряда (искрового или коронного).

Создана установка для получения импульсного коронного разряда с зоной ионизации, занимающей практически весь межэлектродный промежуток. С её помощью показана перспективность такого разряда при осуществлении различных технологий, в том числе озонных. Объект, подлежащий обработке, может размещаться непосредственно внутри электродной системы с разрядом. Основными носителями заряда, осуществляющими протекание тока в таком

разряде, в отличие от обычного, становятся электроны, а не ионы. При этом допустимый ток короны возрастает примерно в 1000 раз и достигает, по меньшей мере, 1 А.

Создано несколько технологий на основе комплекса высоковольтных импульсных воздействий и показаны перспективы их коммерциализации.

Ключевые слова: сильное импульсное электрическое поле, комплекс высоковольтных импульсных воздействий, электротехнологическая установка, генератор, разряд, рабочая камера, электродная система.

Boyko N.I. Scientific principles of creation of electro-technological plants for high voltage pulse effects. - Manuscript.

The thesis for scientific degree of doctor on technical sciences, speciality 05.09.13 "High Electric and Magnetic Field Engineering". - National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, 2003.

The problem of creation of electrotechnological plants for high voltage pulse effects has been solved. Principles of creation of plants with nanosecond and shorter pulse front duration, resource 10^{11} pulses have been formulated the basis for those is the following: principle of forming of high voltage pulses with steep front with help of pulse transformer, which ensures maximal transformation coefficient under minimal overall dimensions and energy loss, and full use of sharpening features of spark discharge; method of generation of pulses with sharpening of pulses front in sequential cascades and device for its realization; methods of action on the load by high pulse electric field and by factors which it creates, and also devices of field forming and energy releasing. Conception of rational action of high pulse electric field in inactivation of microorganisms in fluid substances was suggested. Plants for disinfecting treatment of liquids by combination of high voltage pulse effects with average power to 50 kW under working field intensities in liquids 100 kV/cm and more were created.

Key words: high pulse electric field, combination of high voltage pulsed effects, electric technological plant, generator, discharge, working chamber, electrode system.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСІНКОМ – асоціація інженерів по контролю за мікрозабрудненнями,
АШЕМІТ – апарат для широкосмугової електромагнітної імпульсної терапії,
БЗР – багатозазорний розрядник,
ВЕМ – відновлення електричної міцності,
ВП – вихідний пристрій,
ГВЧ – гіпервисока частота,
ГІН – генератор імпульсних напруг,
ГПЗ – генератор з покаскадним загостренням фронту імпульсів,
ІКР – імпульсний коронний розряд,
ІТ – імпульсний трансформатор,
КВІД – комплекс високовольтних імпульсних дій,
МОНУ – Міністерство освіти і науки України,
НАНУ – Національна Академія наук України,
НВЧ – надзвичайно висока частота,
НДПКІ – науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут,
НТУ – Національний технічний університет,
НТЦУ – науково-технологічний центр в Україні,
ОР – оброблювана рідина,
РП – розрядний проміжок,
СЕ – електродна система,
СІЕП – сильне імпульсне електричне поле,
Т -, ТЕМ – transverse electromagnetic wave – поперечна електромагнітна хвиля,
УЕМІ – упорядковані електромагнітні імпульси,
ХПІ – Харківський політехнічний інститут.

Підписано до друку 18.08.2003. Формат 60 ×90/16.
Папір офсетний. Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 1,9.
Наклад 100 прим. Замовлення № 150468.

Надруковано в типографії ПП Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.