

# 1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І ВОДИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ ДІЙ

Технології на основі комплексу високовольтних імпульсних дій (КВІД) – це технології, дія яких заснована на використанні ряду синхронно діючих факторів, первинним з яких є імпульсне електричне поле. Окрім сильного електричного поля, до складу цих факторів можуть входити висока напруга та струм, різноманітні форми розряду, гідравлічний удар, утворення аероіонів, швидкозростаюча температура, підвищений тиск тощо. При цьому, в залежності від поставленої мети КВІД обробки, головним може бути той або інший фактор.

## 1.1 Обробка сильним імпульсним електричним полем

Відомо, що жива клітина має власний електричний потенціал та електричну міцність, які регулюють необхідні процеси життєдіяльності. Тож, під час прикладення зовнішнього сильного електричного поля, природній процес життєдіяльності клітини порушується. Наслідком такого впливу є незворотна інактивація мікроорганізмів.

Теорія електричного пробою розглядає мембрану клітини як конденсатор. Цитоплазма клітини, в свою чергу, має більшу діелектричну проникність, ніж мембрана. Різниця між діелектричними постійними з різних боків мембрани призводить до утворення трансмембранного потенціалу, шляхом накопичення заряду на внутрішній і зовнішній поверхнях клітинної мембрани. Під час дії зовнішнього електричного поля, іони протилежних зарядів з обох боків мембрани переміщуються вздовж поля, акумулюються, притягаються один до одного та зменшують товщину мембрани. Коли напруженість електричного поля досягне критичного значення трансмембранного потенціалу, відбувається електричний пробій клітини. Теорія електролітичного дисбалансу описує втрату функціональності

кліткової мембрани за рахунок примусового відкриття білкових каналів. Електричне поле викликає зміну конформації фосфоліпідів, що призводить до перебудови мембрани і утворенню гідрофільних пор, таким чином порушується звичний обмінний процес клітини та настає її загибель [1,2].

Типова установка для обробки продуктів сильним імпульсним полем наведена на рисунку 1.1.

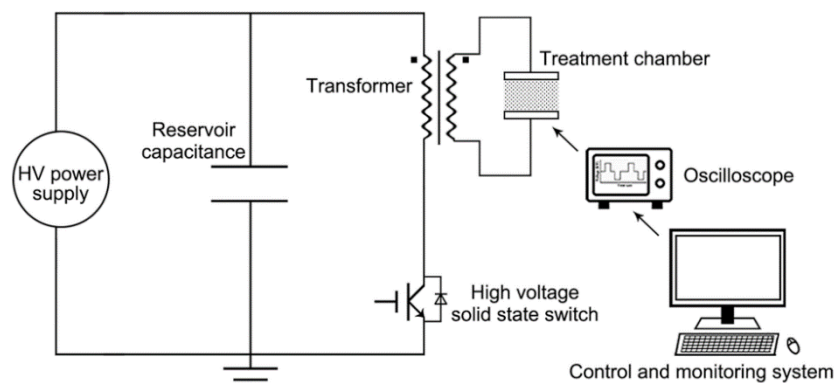


Рис. 1.1 – Приклад типової установки для обробки харчових продуктів сильним електричним полем

Всередині об'єму робочої камери утворюється близьке до однорідного імпульсне електричне поле, напруженість якого може сягати кВ/см. Робоча камера містить електроди, ізольовані між собою. В проміжку між електродів міститься оброблюваний продукт. Обробка може відбуватися як в режимі потоку, так і в стаціонарному режимі. При цьому, під час обробки, електричні розряди всередині об'єму оброблюваного продукту неприпустимі.

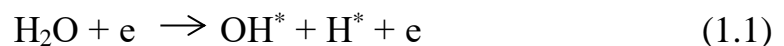
## 1.2 Обробка з використанням електричних розрядів

Даний метод обробки ще має назву передові окислювальні технології і має на меті не тільки вплив зовнішнього електричного поля, а й розряд імпульсу високої напруги безпосередньо всередині об'єму оброблюваної рідини, тому може використовуватися тільки для очищення води.

Електричний імпульсний розряд у воді миттєво утворює хімічно активні частинки – гідроксильні радикали та озон. Відомо, що ці види є потужними окисниками, які відіграють важливу роль в розкладанні стійких органічних хімічних сполук і стерилізації бактерій в стічних водах. Гідроксильні радикали можуть сприяти розкладанню стійких органічних забруднювачів, які неможливо розкласти звичайними методами через їхній високий окисний потенціал [3].

Основною ідеєю технології окиснення є генерація поблизу або всередині оброблювальної рідини сильних окисників (потенціал яких вище, ніж у кисню, більше 1,2 В) на основі кисню: гідроксильного радикалу  $\text{OH}^-$  – 2,7 В, озону  $\text{O}_3$  – 2,1 В, атомарного кисню  $\text{O}$  – 2,4 В та перекису водню  $\text{H}_2\text{O}_2$  – 1,8 В.

Гідроксильні радикали є найсильнішими та основними окисниками в процесі обробки розрядом. Вони утворюються при розряді за присутності води шляхом дисоціації (1.1), іонізації (1.2) та вібраційно-обертового збудження (1.3) молекул води. Обертово або коливально збуджені молекули переходять до більш низького енергетичного стану, та можуть утворюватися деякі активні радикали. Слід відзначити, що збільшення концентрації гідроксильних іонів призводить до рекомбінації радикалів у вигляді перекису водню.



Перекис водню не є первинним окисником і не вступає в реакцію з органікою на достатньому ступені для обробки води. Однак, перекис водню виявляє суттєвий вплив на хімічний склад плазми; його присутність підвищує утворення радикалів  $\text{OH}$  шляхом реакцій фотолізу, дисоціації та каталітичних реакції. Найбільш вагомий вплив  $\text{H}_2\text{O}_2$  виявляється у випадку

підводної плазми. Розкладання забруднюючих речовин також може відбуватися шляхом відновлюваного розкладу за присутності відновлювальних частинок. Іншими важливими частинками є радикали H, які зазвичай мають два механізми реакції з органічними сполуками: відщеплення водню від насичених сполук та приєднання водню до ненасиченого зв'язку. Головним чином вони утворюються під час зіткнення електронів з молекулами води, а також при взаємодії гідратованих електронів і кислот [4].

1.2.1 Коронний розряд це один з видів електричних розрядів, який забезпечує достатню тривалість імпульсу напруги для забезпечення максимальної концентрації радикалів OH. Високі показники очищення води коронним розрядом зумовлені наявністю в розрядному проміжку сильного електричного поля. Напруженість електричного поля в головках виникаючих стримерів значно перевищує порогове значення (30 кВ/см), при якому починає протікати більшість плазмохімічних реакцій, необхідних для очищення води. Однак відомо, що значна частина енергії підводного імпульсного розряду витрачається на тепловиділення, марне для очищення води, отже, енергоефективність такого процесу не є доцільною. Більш доцільним, з точки зору питомих енерговитрат і більшого енергоресурсу електродів є використання коронного розряду на поверхню води [4].

В експериментальній роботі [5] розряд здійснювався між електродами з нержавіючої сталі, де анод складався з 230 коронуючих голок, а катод – пластина, вкрита шаром оброблюваної рідини (Рис. 1.2). Для збільшення площі контакту розрядів з водою та кращого її перемішування, на поверхню рідини подавалося повітря. Електрична схема установки забезпечувала імпульси напруги амплітудою до 30 кВ, з тривалістю фронту 20-30 нс. На прикладі фенолу та гептану було продемонстровано, що електророзрядна обробка може ефективно використовуватися для очищення води від органічних домішок.

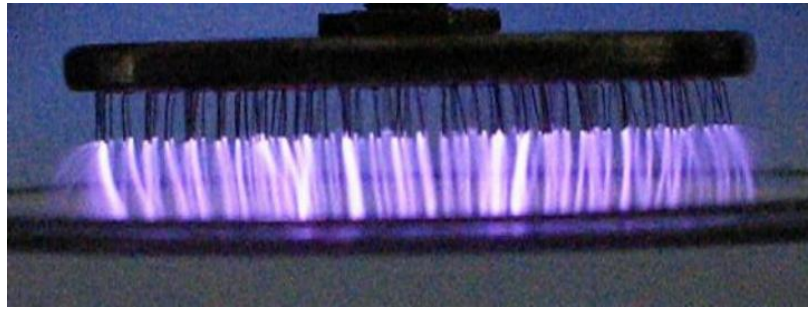


Рис. 1.2 – Зовнішній вигляд імпульсного коронного розряду на поверхню води.

1.2.2 Бар'єрний розряд ініціюється шляхом прикладання високої напруги між двома електродами, при цьому один з них має бути ізольований діелектриком. Використання ізоляції запобігає утворенню дугового розряду. Замість цього між електродами зазвичай виникає безліч тонких плазмових ниток, але вони мають дуже коротку тривалість життя, близько декількох наносекунд. Бар'єрний розряд являє собою «холодну» плазму, це дозволяє обробляти чутливу до температури продукцію.

Розроблено вбудовані поверхневі плазмові реактори, які ініціюють процеси плазмового окиснення. В таких реакторах стічні води діють як заземлений електрод, а газова плазма генерується в трубці, безпосередньо поєднаній з резервуаром для води. Прикладом є система очищення води з чотирма вбудованими трубками, які генерують плазму, як зображено на рисунку 1.3а. На рисунку 1.3б продемонстровано електророзрядний реактор зі стрижневим циліндричним електродом. Ефективність якого зумовлена максимально можливим зануренням електроду в рідке середовище. Перевагою використання реакторів на основі бар'єрних розрядів вважається простота їхнього масштабування до більших розмірів [6].

В дослідженні [7] було експериментально порівняно два типи обробки води за допомогою розрядів: коронний та бар'єрний. Автори роблять висновки, що бар'єрний розряд в дослідженні по прямому очищенню води від органічних барвників має найбільшу ефективність. Питомий вихід імпульсного бар'єрного розряду при 90% очищенні води від домішок

метиленової сині та метилоранжу з початковими концентраціями 200 мг/л склали відповідно 45 та 64 г/кВт\*ч.

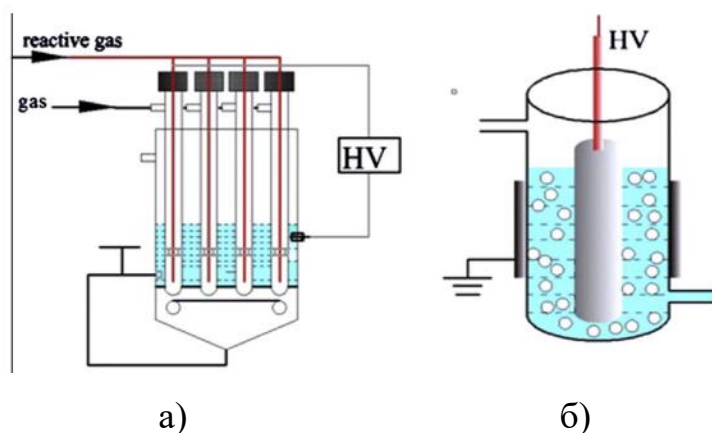


Рис. 1.3 – Приклади реакторів для бар'єрного розряду: а) з чотирма вбудованими трубками-електродами; б) зі стрижневим циліндричним електродом.

1.2.4 Іскровий розряд – нестаціонарна форма електричного розряду, що виникає в газах. Такий розряд відбувається зазвичай при тиску близько атмосферного, температура в головному каналі «іскри» може досягати 10000 К. Іскровий розряд зазвичай відбувається, якщо потужність джерела енергії недостатня для підтримання стаціонарного дугового або тліючого розряду. В цьому випадку одночасно з різким зростанням розрядного струму напруга на розрядному проміжку протягом дуже короткого часу (мікросекунд) падає нижче напруги згасання іскрового розряду, що призводить до його припинення. Потім, різниця потенціалів між електродами знов зростає, досягає напруги запалювання і процес повторюється.

Схематичне зображення експериментальної установки по обробці води за допомогою іскрових розрядів представлено на рисунку 1.5. Вона складається з наступних основних блоків: двох камер реактора, розрядних блоків і двох п'ятиканальних високовольтних імпульсних блоків живлення. Кожна камера реактора виготовлена з нержавіючої сталі у вигляді прямокутної труби. Шість кільцевих електродів, виготовлених з титану або

нержавіючої сталі, розміщені коаксіально навколо тefлонової трубки з проміжками 2 мм. Газ (повітря) подається в цю трубку і виходить через щілини. Джерело живлення формує імпульсну напругу 20 кВ з частотою імпульсів 100 Гц, енергія накопичувального конденсатора 2 дж на канал, тривалість імпульсу струму 4-5 мкс.

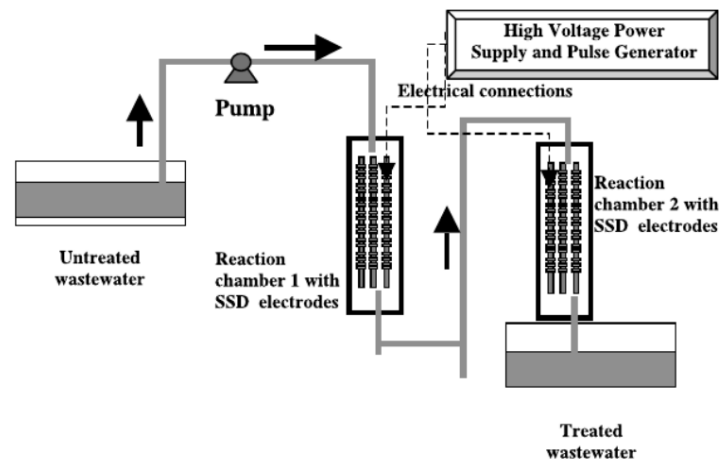


Рис. 1.5 – Експериментальна установка по обробці води з використанням іскрових розрядів

Це дослідження продемонструвало ефективність системи іскрового розряду в мікробній дезінфекції стічних вод. Процес використовує комбінацію факторів мікробного знезараження, включаючи імпульсну ультрафіолетову плазму, акустичні ударні хвилі, озон, вільні радикали, гідратовані електрони та інші хімічно активні речовини. Система може бути спроектована для знищення мікробних популяцій до рівня, регульованого законодавством, але задля цього потребують збільшення час обробки води та витрати енергії [10].

У випадку з обробкою води коронним розрядом, клітини бактерій руйнуються головним чином за рахунок реакцій з радикалами  $\text{OH}$  та  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Тоді як в іскровому розряді вони додатково пошкоджуються ударними хвилями та ультрафіолетовим випромінюванням. В роботі [11] було досліджено вплив іскри на інактивацію мікроорганізмів у воді з кількістю

колоноутворюючих одиниць кишкової палички близько 3000 од. на 100 мл. Імпульсний позитивний іскровий розряд генерувався між високовольтним голчастим електродом та заземленим стрижневим електродом, обидва були занурені у воду. Розряд генерувався на кінчику, тоді як решта голки була вкрита ізоляцією. Результати експерименту показали, що обробка іскровим розрядом ефективна під час знезараження річної води, викликаючи 100% зменшення кількості кишкової палички. Інші ж мікроорганізми більш стійкі до біоцидного впливу іскрового розряду. При цьому, загальна концентрація вуглецю однакова в усіх пробах. Це означає, що іскровий розряд не окислює органічні сполуки [11].

### 1.3 Озонування

Озонування є найпоширенішою технологією серед всіх видів обробки харчових продуктів і води з використанням високовольтного впливу. Озон – один з найсильніших окиснювачів (2.07 eV). Він окислює природні і антропогенні домішки мінерального та органічного походження, перетворюючи їх в легко фільтровані осадки, вуглець і воду. Бактерицидна дія озону пов'язана з активним проникненням цієї хімічно активної форми кисню через клітинні мембрани з подальшим окисненням органічних речовин, що і викликає загибель клітини [12].

Озон ( $O_3$ ) являє собою трьох атомарний кисень, який утворюється під час приєднання вільного радикалу кисню до молекулярного кисню. Озон існує в газоподібному стані та частково розчинен у воді. При кімнатній температурі озон є нестабільним газом, він легко розкладається, але має більш тривалий період розпаду в газоподібному стані, ніж у водному розчині. Він не може бути збереженим, тому повинен генеруватися стаціонарно безперервно. Єдиним результатом розкладу озону є кисень, таким чином, харчові продукти, оброблені озоном не містять залишків дезінфікуючих засобів. Утворюється озон при подачі високої енергії, яка розщеплює молекулу кисню у повітрі на вільно радикальний кисень.



Найбільш комерційно значущим методом є генерація озону за допомогою коронного розряду. В генераторі озону з коронним розрядом вихідний газ (повітря, кисень) проходить між двох близько розташованих електродів (один з яких вкрито діелектриком) при номінальній напрузі близько 10 кВ. Розряд відбувається, коли газ стає частково іонізованим, що призводить до характерного фіолетового світіння. Коли електрони набувають достатньої енергії для дисоціації молекул кисню, відбувається зіткнення вже розщеплених атомів кисню до утворення озону.

Період напіврозпаду озону у водному розчині менший, аніж в газоподібному стані, а за наявності забруднених вод – відбувається дуже швидко. Озон лише частково розчинен у воді, ефективно його використання у воді потребує диспергування газоподібного озону в маленькі бульбашки. Це досягається в різних типах озонаторів з позитивним тиском – барботажні дифузори, сосуди з механічним перемішуванням, турбінні змішувачі, трубчасті реактори, вбудовані змішувачі, інжектори тощо. Більш висока швидкість переносу озону призводить до більш швидкої дезінфекції, однак на повільно окислювальні органічні речовини не впливає підвищена швидкість переносу озону, тому для цих типів речовин слід використовувати передові методи окиснення [13], [14].

Один із способів зберегти або навіть підвищити безпеку сирих продуктів є метод миття овочів та фруктів озонованою водою. Два типи промивки можуть бути використані на етапі збору, сортування, зберігання або продажу – розпилювальна або лоткова, для зменшення кількості мікробів на поверхні продукту. Озон особливо ефективний проти кишкової палички, харчового патогена, який викликає найбільшу занепокоєність у виробничій промисловості [15].

В НДІ електроенергетичних систем Національного університету біоресурсів і природокористування України проводяться дослідження з використання сильних електричних полів, в тому числі озону, як засобів впливу на зернову масу. Одним з пріоритетних напрямків застосування є

передпосівна обробка насіння з метою підвищення його посівних якостей та знезаражуюча обробка зерна при зберіганні та переробці. Запропонований в [16] спосіб базується на утворенні озону безпосередньо в зернові масі, яка відіграє роль біологічної електродної системи. Як результат обробки, відбувається знезараження та підвищується продуктивність вирощуваної сировини (рис. 1.6, 1.7).



Рис. 1.6 – Пророщування ячменя: зліва – контрольний зразок, справа – оброблений в електричному полі.

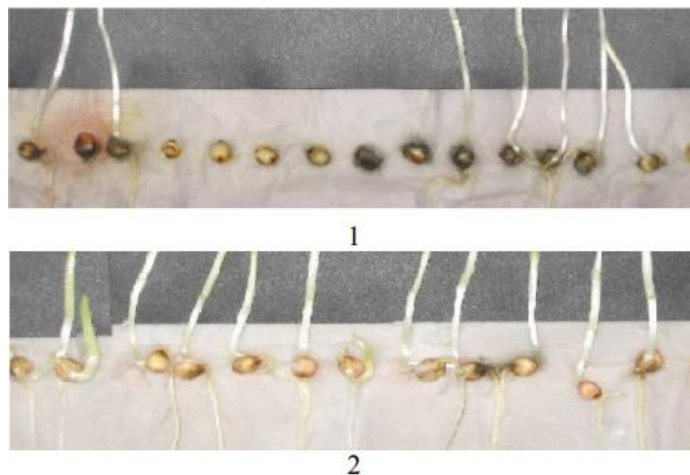


Рис. 1.7 – Зерна сорго:

1 – контрольного зразка, 2 – оброблюваного зразка.

Переваги озонування:

- висока протимікробна активність в порівнянні з хлором за концентрацією та тривалістю дії;
- немає залишків дезинфікуючих речовин;
- низькі експлуатаційні витрати;
- не потребує і не виділяє тепла;

Недоліки озонування:

- озон вкрай нестабільний, має дуже короткий час розкладання;
- токсичність;
- може викликати корозію при певній концентрації;
- потребує стаціонарної генерації, так як не підлягає збереженню;

#### **1.4 Джерела високовольтних імпульсів напруги для технологічних установок**

Джерела імпульсів напруги для очисних установок аналогічні до звичайних генераторів імпульсної потужності. Традиційно вони складаються з джерела напруги, блоку формування імпульсів і навантаження. Параметри для оцінки продуктивності джерела імпульсів напруги зазвичай враховують вихідну напругу, час зростання імпульсу, тривалість імпульсу, час спаду, частоту повторень, максимальну та середню потужність. Для очищення харчової продукції або води, необхідні генератори із тривалим терміном служби, високою надійністю та частотою повторень імпульсів.

Блок накопичення енергії зазвичай поділяється на дві групи: або індуктивний накопичувач, або ємнісний. Щільність накопичення енергії індуктора в рази вища, ніж у конденсатора, проте саме високовольтні конденсатори є основними пристроями для накопичення енергії в більшості систем генерування імпульсів високої напруги. Це пов'язано з тим, що схеми з конденсаторами, у більшості випадків, спроможні видавати більш високу напругу, до того ж, комутатори таких систем відносно більш стабільні, відтворювані та швидкі.

Комутатор є дуже значущою частиною, його робота напряму впливає на надійність та вихідні характеристики імпульсу. Найпоширенішими є газові, напівпровідникові та магнітні комутатори. Газовий комутатор зазвичай являє собою іскровий розрядник, який не тільки підходить для імпульсів високої потужності, але й спрацьовує більш точно. Але у нього є

певні недоліки: складна конструкція, чимала вартість та відносно короткий термін служби. Магнітний комутатор використовується в магніто-імпульсних генераторах, він використовує характеристики насичення індуктивності для досягання зміни стану переключення, тому має певні переваги у високій потужності, частоті повторень та терміні служби. Напівпровідникові перемикачі – це сучасний варіант виконання комутаторів, вони мають високу надійність, довговічність, простоту керування, високий струм відсічення та дуже короткий час зворотнього відновлення [17-19].

1.4.1 Імпульсна формуюча лінія та лінія Блюмляйна. Імпульсна формуюча лінія є важливим методом генерації коротких імпульсів. Вона широко використовується для генерації імпульсів великої потужності з тривалістю 1-100 нс. По-перше, при певних умовах імпульси можуть легко передаватися по лінії передачі. По-друге, імпеданс лінії часто знаходиться на рівні відповідного навантаження або часу передачі, що призводить до менших втрат. На практиці генератори з формуючою лінією часто використовують коаксіальні або стрічкові лінії передачі. Основними параметрами лінії передачі є індуктивність на одиницю довжини  $L_0$  та ємність на одиницю довжини  $C_0$ , хвильовий опір  $Z$  та швидкість хвилі  $v$ . Рисунок 1.8(а) – схематична діаграма імпульсної формуючої лінії з однією лінією передачі.  $S$  – головний перемикач,  $R$  – навантаження. Характеристичний опір та опір навантаження співпадають ідеально, тобто  $R = Z$ , ширина імпульсу  $\tau = 2l/v$  може бути отримана на навантаженні, де  $l$  – довжина лінії передачі, а  $v = 1/\sqrt{L_0C_0}$ . Якщо не враховувати втрати в лінії передачі, амплітуда імпульсу складає лише половину напруги заряду  $U_0/2$ .

Щоб вирішити технічні обмеження формуючої імпульсної лінії, була запропонована лінія Блюмляйна. Це послідовне з'єднання двох однакових поодиноких ліній передачі, які можуть генерувати імпульси з амплітудою рівною значенню вхідної напруги. Схема показана на рис. 1.8(б). Її імпеданс  $R = 2Z$ , а ширина генерованого імпульсу  $\tau = 2l/v$ . Відмінною рисою лінії

Блюмляйна є наявність навантаження, вбудованого в один з провідників лінії на її середині та замикаючого ключа на початку лінії.

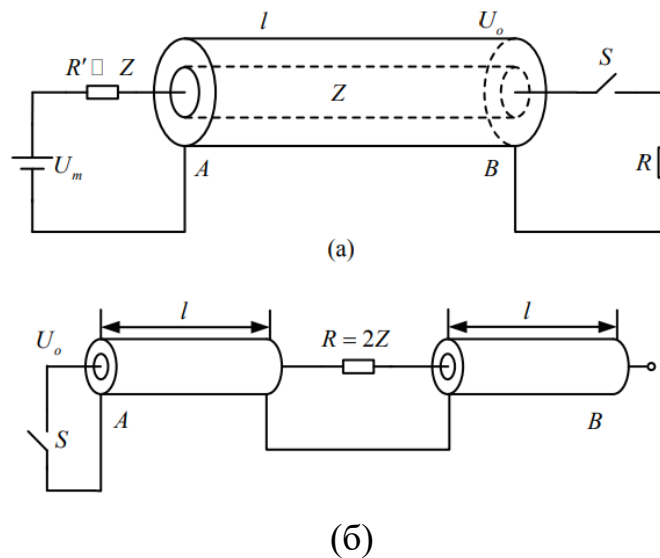


Рис. 1.8 – Схематичне зображення імппульсних формуючих ліній:  
а – поодинокі формуюча лінія, б – лінія Блюмляйна.

1.4.2 Генератор Аркад'єва-Маркса (рис. 1.9) – генератор високої напруги, принцип дії якого заснований на заряді з'єднаних паралельно (через  $R$ ) конденсаторів  $C$ , які поєднуються після заряду послідовно за допомогою комутуючих пристроїв (Trig). Таким чином вихідна напруга збільшується пропорційно кількості з'єднаних конденсаторів. Такі генератори дозволяють отримувати імппульсні напруги від десятків кіловольт до десятків мегавольт. Частота імппульсів, що виробляються, залежить від потужності генератора і складає від одиниць імппульсів на годину до декількох десятків Гц.

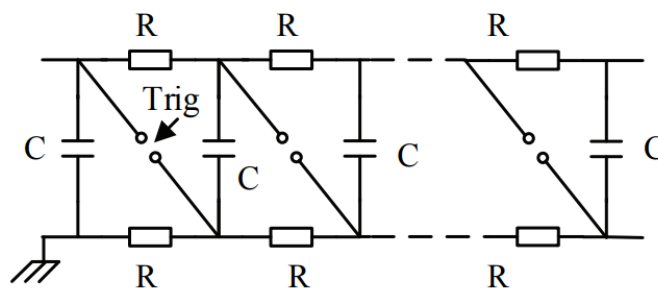


Рис. 1.9 – Схематичне зображення генератора Аркад'єва-Маркса.

Лабораторні малі генератори до 100-200 кВ можуть виконуватися з повітряною ізоляцією, більш потужні генератори виконуються з вакуумною, газовою або масляною ізоляцією, яка перешкоджає пробоям повітря та стіканню зарядів з устаткування. В якості розрядників застосовують повітряні розрядники на напругу до 100 кВ та струмом до 1000 кА, вакуумні розрядники, ігнітрони, тригатрони. Тиристри в якості комутуючих елементів практично не застосовуються у зв'язку з малими значеннями зворотної напруги та труднощами синхронізації їх спрацьовування у випадку послідовного з'єднання. Головним недолік полягає в тому, що при рівні зарядної напруги сотень кВ він повинен містити 5-8 ступенів з такою ж кількістю іскрових комутаторів, що пов'язано з погіршенням питомих енергетичних та масо-габаритних параметрів та зниженням ККД. Для зменшення втрат знижують опір іскрових комутаторів ГІН.

1.4.3 SOS (Semiconducting Opening Switches - напівпровідниковий розімкнутий перемикач) генератори дозволяють досягнути найбільших пікових потужностей на навантаженні (ГВт) з усіх відомих твердотільних. Якісна відмінність SOS ефекту від інших видів комутації струму в напівпровідникових приладах полягає в тому, що розвиток процесу обриву струму відбувається у вузьких високо лігованих областях структури, база якої заповнена щільною надлишковою плазмою. Саме це призводить до поєднання високої щільності струму та наносекундного часу його відключення. Струм можна збільшити або зменшити, щоб охопити широкий діапазон робочих напруг. Він зазвичай використовується в генераторах імпульсів живлення на основі індуктивного накопичення енергії для відсікання великих струмів, що генеруються індукторами накопичення енергії.

Генератор на основі SOS-діодів (рис. 1.10) може багаторазово генерувати імпульси 50 кВ в десятки кА та тривалістю в наносекунди. Він містить первинний ємнісний накопичувач з тиристорним перемикачем, магнітний компресор і SOS-діод. Магнітний компресор потрібен для

стиснення енергії в часі, оскільки характерний час передачі енергії через тиристор становить 10-100 мкс, а час прямого накачування має бути не більше 30-400 нс при одиничній щільності струму кА/см<sup>2</sup>. Але найбільші втрати енергії контуру несе магнітний компресор. З цієї причини загальний ККД генератора SOS зазвичай становить близько 40%. Можна реалізувати мікросекундний режим накачування SOS і зменшити кількість секцій магнітного компресора шляхом зменшення густини струму. А його ефективність може досягати 70%.

Коли початковий перемикач увімкнено, конденсатор  $C_0$ , який спочатку заряджається до  $V_{dc}$  за допомогою джерела постійного струму високої напруги, розряджається через петлю  $C_0$ - $L_0$ -PT- $C_1$ , в результаті чого  $C_1$  заряджається напругою, підвищеною за рахунок PT. Магнітний перемикач MS1 насичується при максимальній напрузі  $C_1$ , потім  $C_1$  розряджається через петлю  $C_1$ -MS1- $L_1$ - $C_2$ -SOS, що призводить до заряджання  $C_2$  і прямого струму SOS.

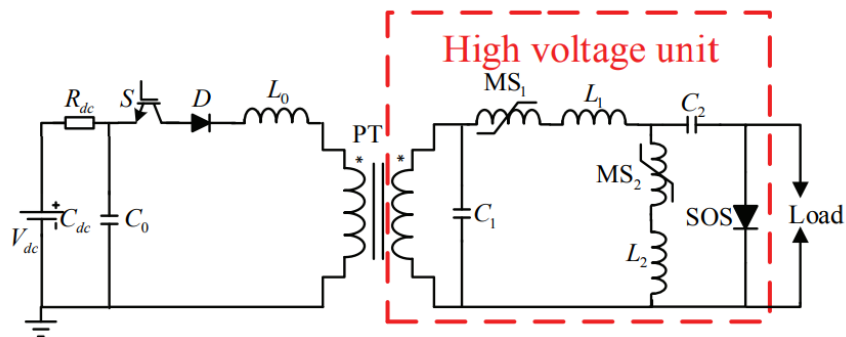


Рис. 1.10 – Схематичне зображення генератора на основі SOS – діодів.

Магнітний перемикач MS2 насичується в момент максимальної напруги  $C_2$ , дозволяючи  $C_2$  розряджатися через петлю  $C_2$ -MS2- $L_2$ -SOS, що призводить до зворотного струму SOS. На піку зворотного струму діод SOS раптово відновлюється, і індуктивна накопичена енергія на  $L_2$  і MS2 виділяється в навантаження [20,21].

Серед недоліків SOS генераторів: складність або неможливість імпульсів з тривалістю в мікросекунди та більш тривалих імпульсів с

наносекундним фронтом; залежність часу обриву струму від часу накачування; вартість в порівнянні з аналогами [22].

### 1.5 Робочі камери

Інженерія в галузі інактивації та консервації з використанням імпульсних електричних технологій досягла значної винахідливості в конструкціях робочих камер (РК). Головна ідея камери обробки полягає в тому, щоб утримувати оброблюваний продукт всередині під час пульсації, хоча рівномірність процесу сильно залежить від характерної конструкції камери. Коли напруженість прикладеного електричного поля перевищує напруженість поля оброблюваного харчового продукту, відбувається його розщеплення у вигляді іскри. Відома, як діелектричний пробій, це одна з головних концепцій, яку необхідно враховувати (унікати) під час проектування об'ємів обробки. Пробій діелектрика зазвичай характеризується пошкодженням поверхні електродів та виникненням газових бульбашок [23].

Робоча камера для обробки продукції методом КВІД технології містить електропровідні електроди, ізольовані між собою та закріплені в ізольованому корпусі. У проміжку, між електродами, розміщується оброблюваний продукт. Обробка може здійснюватися як у потоці (проточні камери) так і без потоку (касетні, стаціонарні, періодичні камери). Якщо продукт обробляється за допомогою електричних розрядів безпосередньо всередині об'єму – РК має назву реактор.

Спрощена електрична схема ланцюгу розряду генератора на РК з оброблюваним водомістким продуктом зображена на рисунку 1.11, де  $C1$  – ємність накопиченої енергії,  $U$  – напруга джерела енергії,  $L$  – індуктивність контуру,  $K$  – комутатор,  $C2$  та  $R1$  – ємність та опір РК відповідно.



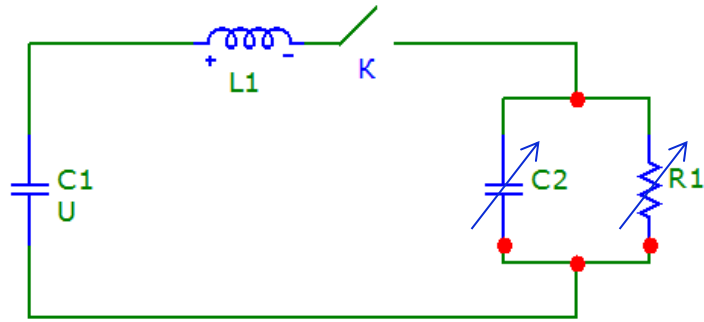


Рис. 1.11 – Спрощена електрична схема ланцюгу розряду генератора на робочу камеру з оброблюваним продуктом.

На схемі елементи C2 та R1 зображені, як нелінійні, оскільки в процесі виділення енергії в РК, в тій чи іншій степені відбувається нагрівання оброблюваного продукту, відповідно такі характеристики продукту, як питомий опір та діелектрична проникність зменшуються. Для найбільш ефективного виділення енергії в РК повинна дотримуватися умова 1.4:

$$Z_{PK} \gg Z_G, \quad (1.4)$$

де  $Z_{PK}$  – повний опір РК, заповненої оброблюваним продуктом;  $Z_G$  – повний опір генератора (джерела енергії).

Характерний час  $\tau$  розряду C1 на РК, що визначає тривалість імпульсу на навантаженні при опорі  $R1 \gg \sqrt{L/C1}$  і виражається через співвідношення 1.5.

$$\tau = C1 * R1, \quad (1.5)$$

Для запобігання падіння амплітуди U та E в РК, повинно виконуватися співвідношення 1.6:

$$\tau_\phi \ll \tau, \quad (1.6)$$

де  $\tau_\phi$  – тривалість фронту імпульсу.

Щоб не допустити істотного зниження електричної міцності рідких та текучих продуктів в РК повинна виконуватися умова 1.7:

$$\tau \leq 1 \text{ мкс}, \quad (1.7)$$

Для забезпечення проникнення поля всередину клітин мікроорганізмів через цитоплазматичну мембрану, повинна виконуватися умова 1.8:

$$\tau_{\phi} \leq 20 \text{ мкс}, \quad (1.8)$$

Оброблювані в робочих камерах продукти можуть містити розчинені гази, що призводить до утворення газових бульбашок, як в об'ємі РК так і в трубопроводах, по яким продукт потрапляє до робочої камери. Ймовірність утворення газових бульбашок зростає зі збільшенням температури та швидкості руху оброблюваного продукту. Оскільки електрична міцність газу в бульбашках істотно нижча електричної міцності рідин і текучих харчових продуктів, можливе виникнення небажаних розрядів в бульбашках. Для запобігання цьому, слід обмежити швидкість руху оброблюваної рідини, не допускаючи переходу від ламінарного руху до турбулентного. Крім того, необхідно перешкоджати збільшенню розмірів вже утворених бульбашок та запобігати утворенню ланцюгів із бульбашок, забезпечуючи при цьому найбільш безпечну відносно утворення пробою, траєкторію їхнього руху.

При створенні технічних робочих камер основною є вимога їхнього максимального ресурсу, при найвищому ступені обробки (ступінь інактивації мікроорганізмів). Ці умови є взаємовиключними, оскільки інтенсивність обробки тим вища, чим більша напруженість електричного поля  $\vec{E}$  в продукті, тоді як ресурс РК при цьому знижується. Ресурс РК можна оцінити за допомогою емпіричного виразу 1.9, який працює за умови, що  $K_d \vec{E} \leq \vec{E}_{\text{доп}}$ .

$$Z \approx (Z_0 * t_{\text{доп}} / t * e)^{-\vec{E} / \vec{E}_{\text{доп}} - K_d \vec{E}}, \quad (1.10)$$

де  $Z$  – число імпульсів, ресурс при  $\vec{E}$  та  $t$ ;  $K_d$  – коефіцієнт допустимого зростання напруженості (0,8 – 1);  $\vec{E}$  – амплітуда напруженості імпульсного електричного поля;  $\vec{E}_{\text{доп}}$  – допустима напруженість, при якій відсутні розрядні процеси в РК при тривалості імпульсів  $t$ ;  $t_{\text{доп}}$  – допустима тривалість імпульсів, при якій в РК відсутні розрядні процеси при напруженості  $\vec{E}$ ;  $Z_0$  – ресурс при низьких  $\vec{E}$ , але достатніх для виникнення розрядних процесів при більших тривалості імпульсів, орієнтовно  $Z_0 \approx 10^{12}$ .

Стационарні або періодичні камери зазвичай використовують для обробки невеликими порціями 10-100 мл в ранніх розробках та підходять для обробки твердих або напівтвердих харчових продуктів. Для періодичних режимів роботи зазвичай використовуються камери з паралельними пластинами, в той час як коаксіальні конструкції використовуються в безперервних режимах, коли продукт прокачується із відомою швидкістю потоку, а імпульси застосовуються із відомою частотою повторень. На рисунку 1.12 наведено приклади РК з різними конфігураціями електродних систем.

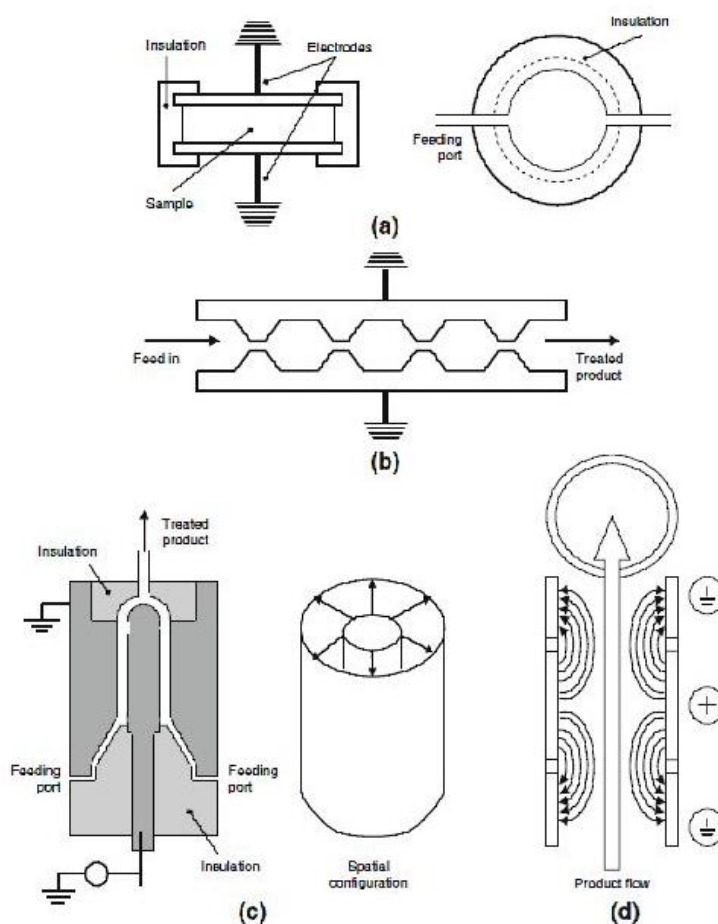
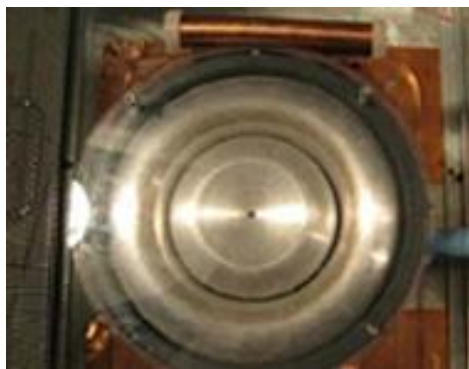


Рис. 1.12 – Схематичне зображення конфігурацій робочих камер: а – стаціонарна камера, б – вид збоку типової проточної камери, с – коаксіальна камера, д – колінеарна камера.

На відміну від стаціонарних камер, до робочого об'єму проточних РК, оброблюваний продукт потрапляє та відводиться в процесі обробки

безперервно через вхідні та вивідні отвори в ізоляційному корпусі або електродах. Ці отвори ззовні камери закінчуються ізоляційними або металевими штуцерами для підключення РК за допомогою трубопроводів до системи перекачки. Проточний режим обробки має ряд переваг: висока швидкість обробки, можливість автоматизації, можливість безперервного контролю якості обробки та значне зниження ймовірнісних вторинних мікробіологічних заражень продукції.

Дослідники з університету Ватерлоо розробили проточну камеру (рис. 1.13) для обробки рідин за допомогою імпульсного електричного поля. На відміну від інших камер, в новій конструкції враховуються як параметри електричного поля, так і гідродинамічні властивості. Електродна система складається з двох електродів (один всередині іншого), де геометрія зовнішнього електрода являє собою тор, а внутрішнього – сфероїд. Міжелектродний зазор - об'єм обробки рідини, являє собою простір на 360 градусів, обмежений двома протилежно опуклими поверхнями. Ця двоопукла зона обробки унікальна і вирішує проблеми створення інтенсивного електричного поля під час обробки, описані в літературі [24].



а)



б)

Рис. 1.13 – Устаткування для обробки імпульсним електричним полем в університеті Ватерлоо: а – проточна робоча камера, б – система обробки.

Безперервна проточна камера обробки (рис. 1.14) була розроблена в Університеті штату Вашингтон (WSU) для перевірки концепції проточного потоку з використанням низьких витрат. Камера складалася з двох електродів, прокладки та двох кришок. Кожен електрод був виготовлений з нержавіючої сталі, тоді як розпірка та кришки були виготовлені з полісульфону. Між двома електродами був передбачений проточний канал для усунення мертвих кутів, а також для забезпечення рівномірної обробки.

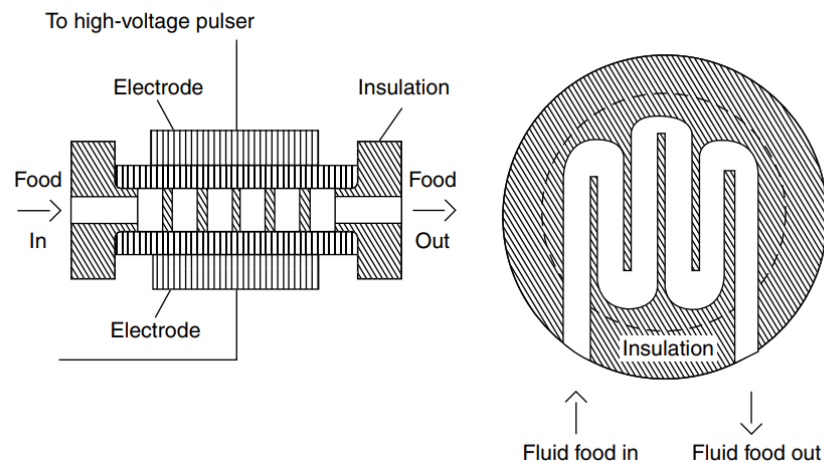


Рис. 1.14 – Схематичне зображення проточної камери обробки.