ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Навчальний посібник

За загальною редакцією академіка В. С. Шебаніна

Миколаїв
МНАУ
2022

УДК 621.3:631
Ш36

Автори:
Акад. НААН, д-р техн. наук, професор В'ячеслав Сергійович ШЕБАНІН
д-р пед. наук, доцент Ілона Вікторівна БАЦУРОВСЬКА
д-р екон. наук, професор Валерій Іванович ГАВРИШ
канд. техн. наук, доцент Василь Анатолійович ГРУБАНЬ

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Миколаївського національного аграрного університету,
від 29.11.2022р., протокол № 4

Рецензенти:

Сербін С.І.	д-р техн. наук, професор, директор Машинобудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
Шейченко В. О.	д-р техн. наук, професор, професор кафедри технології та засобів механізації аграрного виробництва, Полтавський державний аграрний університет;
Філімоніхін Г.Б.	д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки, академік Академії наук Вищої школи України, Центральноукраїнського національного технічного університету

Шебанін В.С., Бацуровська І.В., Гавриш В.І., Грубань В.А.
Ш36 Електротехнології в АПК : навч. посіб. / за заг. ред. акад. В.С. Шебаніна – Миколаїв : МНАУ, 2022. – 326 с.

ISBN 978-617-7149-64-3

У посібнику розкрито такі теми, як: основи теорії електронагрівальних пристроїв, прямий і непрямий електронагрів опором, індукційний нагрів, електродуговий та діелектричний нагрів, електропідривна обробка, магнітно-імпульсні технології, електроерозійна обробка матеріалів, обробка сильними електричними полями та ультразвукова і магнітна обробка. Пропонується до вивчення питомий електричний опір провідників, електроконтактний нагрів, розрахунок параметрів джерела живлення установок електроконтактного нагріву, електродний нагрів. матеріали електродів, допустимі щільність струму на електродах і напруженість електричного поля та розрахунок електродних нагрівальних пристроїв. Розглянуто ефективність використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі. Окреслено методику енергетичної, екологічної та економічної оцінки енергетичних ресурсів.

Посібник рекомендовано для здобувачів вищої освіти інженерних спеціальностей електроенергетичної галузі.

УДК 621.3:631
© Миколаївський національний аграрний університет, 2022
© Шебанін В.С., Бацуровська І.В., Гавриш В.І., Грубань В.А., 2022

ISBN 978-617-7149-64-3

Зміст

Вступ 10

Тема 1. Вступ до електротехнологій. Основи теорії електронагрівальних пристроїв 15

1.1. Фізичні основи електротехнології в агропромисловому комплексі 15

1.2. Загальні відомості про електротехнології 17

1.3. Перевага електротехнологій перед іншими методами обробки матеріалів 18

1.4. Загальна класифікація електрофізичних і електрохімічних методів обробки матеріалів в агропромисловому комплексі 20

1.5. Області можливого застосування електрофізичних і електрохімічних методів обробки матеріалів 21

1.6. Основні характеристики електротехнологічних процесів 24

1.7. Електричний нагрів провідників, діелектриків та напівпровідників 25

1.8. Основи динаміки електронагріву 30

1.9. Рівняння теплового балансу 35

1.10. Використання електричних схем-аналогів для дослідження динаміки нагріву 36

1.11. Способи електронагріву і класифікація електронагрівальних пристроїв 38

1.12. Основи теплового розрахунку електротермічних установок 43

1.12.1. Завдання розрахунку 43

1.12.2. Визначення потужності і основних конструктивних розмірів 44

1.12.3. Визначення теплового ККД і питомої витрати електроенергії 50
1.12.4. Температурні режими і енергетичні показники основних теплових процесів сільськогосподарського виробництва 52
Контрольні питання 54
Тема 2. Прямий електронагрів опором 56
2.1. Питомий електричний опір провідників 56
2.2. Електроконтактний нагрів 59
2.3. Розрахунок параметрів джерела живлення установок електроконтактного нагріву в АПК 63
2.4. Електродний нагрів в АПК. Матеріали електродів 64
2.5. Допустимі щільність струму на електродах і напруженість електричного поля 67
2.6. Розрахунок електродних нагрівальних пристроїв 69
Контрольні питання 72
Тема 3. Непрямий електронагрів опором 73
3.1. Вимоги до матеріалів та конструкція нагрівальних елементів 73
3.2. Трубчасті нагрівальні елементи 76
3.3. Електричний і конструктивний розрахунки нагрівальних елементів 79
3.4. Нагрівальні дроти та кабелі 84
3.5. Схеми включення і регулювання потужності 87
Контрольні питання 90
Тема 4. Індукційний нагрів в АПК 93
4.1. Особливості індукційного нагріву в АПК 93
4.2. Індуктори (індукційні нагрівачі) 94
4.3. Енергетичні співвідношення системи індуктор – виробка. 97

4.4. Режими і оптимальна частота високочастотного індукційного нагріву 101
4.5. Розрахунок індукторів 105
4.6. Генератори струмів високої частоти 112
4.7. Застосування індукційного нагріву 116
Контрольні питання 117
Тема 5. Електродуговий нагрів 119
5.1. Характеристика електричної дуги 119
5.2. Запалювання, стійкість горіння і регулювання струму дуги 124
5.3. Режими зварювання і роботи джерел живлення зварювальної дуги 128
5.4. Спеціальні види дугового зварювання 130
5.1.1. Аргонодугове зварювання 130
5.1.2. Дугове зварювання в вуглекислому газі 131
5.1.3. Електрошлакове зварювання 133
5.1.4. Електронно-променеве зварювання 134
5.1.5. Плазмове зварювання 136
5.5. Контактне зварювання 137
5.6. Стикове зварювання 138
Контрольні питання 140
Тема 6. Діелектричний нагрів в АПК 141
6.1. Особливості діелектричного нагріву в АПК 141
6.2. Вибір параметрів установок і розрахунок найпростіших діелектричних нагрівачів 144
6.3. Особливості генераторів ТВЧ для діелектричного нагріву. Магнетрони 148
Контрольні питання 152
Тема 7. Електропідривна обробка 153
7.1. Схеми випрямлячів для електропідривної обробки 153

7.2. Фізичні процеси при електроімпульсної руйнуванні матеріалів 154
7.3. Буріння свердловин 156
7.4. Руйнування бетону та залізобетону 156
7.5. Дроблення руд 156
7.6. Штампування, видавлювання і витяжка деталей 157
7.7. Роздача труб 158
7.8. Електроімпульсне дроблення глибокоохолоджених гум і гумовотехнічних виробів, армованих металом 158
Контрольні питання 160
Тема 8. Магнітно-імпульсні технології 161
8.1. Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій 161
8.2. Технологічні операції, що виконуються магнітно-імпульсним способом 165
8.2.1. Інструмент для магнітно-імпульсної обробки 166
8.2.2. Штампування за допомогою імпульсних магнітних полів. 168
8.2.3. Збиральні операції, що виконуються з використанням імпульсного магнітного поля 170
Контрольні питання 172
Тема 9. Електроерозійна обробка матеріалів 173
9.1. Фізичні основи електроерозійної обробки 173
9.1.1. Історія розвитку електроерозійної обробки 173
9.1.2. Фізичні процеси при електроерозійній обробці 174
9.1.3. Матеріали для електрода-інструменту. 179
9.1.4. Теплові процеси при електроерозійній обробці 180
9.2 Технологічні процеси виготовлення деталей і показники ЕЕО 182
9.2.1. Схеми електроерозійної обробки. 182
9.2.2. Прошивання отворів і порожнин. 183

9.2.3. Електроерозійне шліфування 188
9.2.4. Електроерозійне розрізання заготовок. 189
9.2.5. Електроерозійне зміцнення деталей 190
9.2.6. Продуктивність електроерозійної обробки 190
9.2.7. Точність ЕЕО. 192
9.3. Електроерозійне обладнання 193
9.3.1. Компонування обладнання. 193
8.3.2.Генератори імпульсів 194
9.3.3. Регулятори подачі електрода-інструменту. 197
9.4. Системи очищення і подачі робочої рідини 199
Контрольні питання 201
Тема 10. Обробка сильними електричними полями (електронно-іонна технологія) 202
10.1. Загальні відомості про застосування електричних полів в технологічних процесах 202
10.2. Коронний розряд 204
10.3. Зарядка частинок в електричних полях 207
10.4. Силова дія електричних полів на частинки матеріалів ... 211
10.5. Очищення і сортування насіння в електричних полях 214
10.6. Електроаерозольна обробка 221
10.7. Деякі інші види використання силової дії електричних полів 224
10.7.1. Застосування електрофільтрів для очищення повітря від пилу і мікробів. 224
10.7.2. Використання електричних явищ в сипучих середовищах. 226
10.7.3. Використання електричного поля для підбору бавовни-сирцю 226
10.8. Штучна іонізація повітря в сільськогосподарських приміщеннях 227

10.9. Високовольтні джерела живлення установок ЕІТ 232
Контрольні питання 235
Тема 11. Ультразвукова та магнітна обробка 236
11.1. Характеристика ультразвуку як фізичного фактору 236
11.2. Генерування ультразвуку 238
11.3. Використання силової і фізико-хімічної дії ультразвуку 242
11.4. Використання біологічної дії ультразвуку 247
11.5. Використання ультразвуку для отримання інформації... 247
11.6. Отримання магнітних полів 248
11.7. Використання силового дії магнітного поля 249
11.8. Використання фізико-хімічної дії магнітного поля 252
Контрольні питання 254
Тема 12. Показники ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі 255
12.1. Система показників ефективності використання енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі 255
12.2. Структура використання енергоресурсів в агропромисловому комплексі та класифікації моторних палив 257
12.3. Показники використання в агропромисловому комплексі. Умовне паливо, теплові та технічні паливні еквіваленти..... 261
12.4. Показники забезпеченості енергоресурсів..... 265
12.5. Показники ефективності енергоресурсів 267
Контрольні питання 272
Тема 13. Ефективність використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі 273
13.1. Методика оцінки палив. Експлуатаційно-споживчі показники 273
13.2. Виробничо-технологічні показники 276
13.3. Екологічні показники палива..... 280

13.4. Вартість енергії палива..... 285
13.5. Доцільність виробництва палив рослинного походження для АПК 287
13.6. Оцінка ефективності використання альтернативних моторних палив..... 290
Контрольні питання 294
Тема 14. Визначення основних економічних показників інвестиційного проекту..... 296
14.1. Основні економічні показники інвестиційного проекту. 296
14.2. Грошовий потік..... 296
14.3. Регулярний грошовий потік..... 297
14.4. Ставка дисконтування 299
14.5. Чистий приведений дохід (чиста теперішня вартість (NPV) 301
Роки 304
14.6. Індекс прибутковості..... 304
14.7. Внутрішня норма рентабельності..... 306
14.8. Термін окупності інвестицій..... 315
Контрольні питання 320
Рекомендована література 321
Предметний покажчик 324

Вступ

Електротехнології – це наука, що вивчає теорію і практику перетворення електричної енергії в теплову, хімічну, механічну та інші види енергії, поєднаного з технологічним процесом в єдиному пристрої. В процесі перетворення електрична енергія надає дії: теплове, хімічне, механічне, оптичне і їх поєднання.

Відповідно до дії електричної енергії електротехнологічне обладнання розділене на електротермічне, електрохімічне і електрофізичне. Воно включає в себе наступні процеси і обладнання:

- електротермічні процеси та електротермічне обладнання для здійснення цих процесів;
- електрозварювальні процеси і електрозварювальне обладнання;
- електрофізичні процеси і обладнання;
- електрохімічні процеси і обладнання;
- іонні технології.

Сучасні електротехнології здатні до формування системи науково-технічних основ використання електричної енергії у технологічних процесах, що забезпечує можливість вирішення електроенергетичних питань у сільськогосподарському виробництві.

У результаті вивчення навчальної дисципліни «Електротехнології» здобувачі вищої освіти вивчають:

– фізичні основи перетворення електричної енергії в теплову, закони та закономірності, які описують ці перетворення;

– основні способи електронагрівання і безпосереднього їх використання в технологічних процесах;

– особливості експлуатації електронагрівачів при нагріванні різних середовищ, засоби автоматизації електронагрівальних систем;

– сучасне електротермічне і електротехнологічне обладнання, конструктивні особливості та галузь їх використання.

У посібнику розкрито 14 тем, серед яких основи теорії електронагрівальних пристроїв, прямий і непрямий електронагрів опором, індукційний нагрів, електродуговий та діелектричний нагрів, електропідривна обробка, магнітно-імпульсні технології, електроерозійна обробка матеріалів, обробка сильними електричними полями (електронно-іонна технологія) та ультразвукова і магнітна обробка.

В контексті вступу до електротехнологій відкриваються наступні аспекти, такі, як фізичні основи електротехнології, загальні відомості про електротехнології та переваги електротехнологій перед іншими методами обробки матеріалів. Розглядається загальна класифікація електрофізичних і електрохімічних методів обробки матеріалів, області можливого застосування електрофізичних і електрохімічних методів, основні характеристики електротехнологічних процесів, електричний нагрів провідників, діелектриків та напівпровідників, динамічний електронагрів. Розкривається сутність рівняння теплового балансу, використання електричних схем-аналогів для дослідження динаміки нагріву, способи електронагріву і класифікація електронагрівальних пристроїв, основи теплового розрахунку електротермічних установок, визначення потужності і основних конструктивних розмірів.

У першій темі «Основи теорії електронагрівальних пристроїв» пропонується до вивчення питомий електричний опір провідників, електроконтактний нагрів, розрахунок параметрів джерела живлення установок електроконтактного нагріву, електродний нагрів. матеріали електродів, допустимі щільність струму на електродах і напруженість електричного поля та розрахунок електродних нагрівальних пристроїв.

У темі «Непрямий електронагрів опором» розкрито наступні напрямки: вимоги до матеріалів та конструкція нагрівальних елементів, трубчасті нагрівальні елементи, електричний і

конструктивний розрахунки нагрівальних елементів, нагрівальні дроти та кабелі та схеми включення і регулювання потужності.

В контексти теми «Індукційний нагрів» окреслені такі підтеми, як індуктори (індукційні нагрівачі), енергетичні співвідношення системи індуктор – виріб, режими і оптимальна частота високочастотного індукційного нагріву, розрахунок індукторів, генератори струмів високої частоти, застосування індукційного нагріву.

При вивченні теми «Електродуговий нагрів» приділяється увага характеристиці електричної дуги, процесам запалювання, стійкості горіння і регулювання струму дуги, режимам зварювання і роботи джерел живлення зварювальної дуги, спеціальним видам дугового, контактного та стикового зварювання.

У темі «Діелектричний нагрів», окреслено такі теми: особливості діелектричного нагріву, вибір параметрів установок і розрахунок найпростіших діелектричних нагрівачів а також особливості генераторів ТВЧ для діелектричного нагріву і магнетрони.

При вивченні теми «Електропідривна обробка», пропонуються до вивчення схеми випрямлячів для електропідривної обробки, фізичні процеси при електроімпульсної руйнуванні матеріалів, буріння свердловин, руйнування бетону та залізобетону, дроблення руд, штампування, видавлювання і витяжка деталей, електроімпульсне дроблення глубокоохлажденних гум і гумовотехнічних виробів, армованих металом.

При вивченні теми «Магнітно-імпульсні технології» розглянуто такі теми до вивчення: фізичні основи магнітно-імпульсних технології, технологічні операції, що виконуються магнітно-імпульсним способом.

В умовах вивчення теми «Електроерозійна обробка матеріалів» запропоновані наступні напрямки до вивчення: фізичні основи електроерозійної обробки, технологічні процеси

виготовлення деталей і показники ЕЕО, електроерозійне обладнання та системи очищення і подачі робочої рідини.

В контексті теми «Обробка сильними електричними полями (електронно-іонна технологія)» розкрито загальні відомості про застосування електричних полів в технологічних процесах, коронний розряд, зарядка частинок в електричних полях, силове дія електричних полів на частки матеріалів, очищення і сортування насіння в електричних полях, електроаерозольна обробка та інші види використання силового дії електричних полів, використання електричних явищ в сипучих середовищах, штучна іонізація повітря в сільськогосподарських приміщеннях, високовольтні джерела живлення установок ЕІТ.

В межах вивчення теми «Ультразвукова обробка» окреслено характеристику ультразвуку як фізичного фактора, генерування ультразвуку, використання силової і фізико-хімічної дії ультразвуку, біологічної дії ультразвуку та використання ультразвуку для отримання інформації.

При вивченні теми «Магнітна обробка» приділено увагу таким підтемам, як отримання магнітних полів, використання силового дії магнітного поля, використання фізико-хімічної дії магнітного поля.

В межах вивчення теми «Показники (критерії) ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі» представлено систему показників ефективності використання енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі, структуру використання енергоресурсів в агропромисловому комплексі та класифікації двигунів, показники використання в агропромисловому комплексі, а також умовне паливо, теплові та технічні паливні еквіваленти, показники доступності (забезпеченості) енергоресурсів, показники ефективності енергоресурсів.

В контексті теми «Ефективність використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі» представлено методику оцінки

палив, експлуатаційно-споживчі показники в агропромисловому комплексі, виробничо-технологічні показники, екологічні показники палива, вартість енергії палива для АПК, доцільність виробництва палив рослинного походження для АПК та оцінку ефективності використання альтернативних моторних палив 292

Тема «Визначення основних економічних показників інвестиційного проекту» уміщує основні економічні показники інвестиційного проекту, грошовий потік, регулярний грошовий потік, ставка дисконтування, чистий приведений дохід (чиста теперішня вартість (NPV), індекс прибутковості та внутрішня норма рентабельності.

Тема 1. Вступ до електротехнологій. Основи теорії електронагрівальних пристроїв

1.1. Фізичні основи електротехнології в агропромисловому комплексі

Головний напрямок подальшого розвитку сільського господарства країни - всебічна інтенсифікація на основі концентрації і спеціалізації галузей, створення великих агропромислових комплексів, впровадження індустріальних методів виробництва, більш повного використання досягнень науки, техніки, передового досвіду.

Вирішення цього завдання багато в чому залежить від подальшого розвитку і поглиблення електрифікації сільського господарства. Електрика в даний час - основна енергетична база тваринництва, птахівництва, ремонтного виробництва, стаціонарних процесів рослинництва. Рівень електроозброєність праці визначає зростання продуктивності праці в цих галузях. Електрифікація побуту сільського населення відіграє величезну роль у підвищенні матеріального і культурного рівня трудівників села, в ліквідації відмінності між містом і селом.

Розвиток сільської електрифікації характеризується не тільки кількісними, а й якісними змінами.

У початковий період, коли електропостачання села здійснювалося від нечисленних малопотужних сільських електростанцій, електроенергію використовували в основному для електричного освітлення. "Лампочка Ілліча" висвітлила шлях до корінних соціально-економічних перетворень в селі, колективізації та машинізацію сільськогосподарської праці.

Надалі в міру зміцнення електроенергетичної бази все більше зростала роль електроенергії в заміні ручної праці машинною.

Електричний привід сільськогосподарських машин і агрегатів став основою, на якій стала можлива комплексна механізація стаціонарних процесів всіх галузей сільськогосподарського виробництва. На базі електричної енергії розвивається автоматизація більшості процесів сільського господарства.

Науково-технічний прогрес викликав до життя нові області і види застосування електроенергії в сільському господарстві. Велика потреба сільськогосподарського виробництва, особливо тваринництва, в тепловій енергії, що перевищує потребу в інших разом узятих видах енергії, відкриває широкі можливості використання в теплових процесах електричного нагріву. Електронагрівальні установки в порівнянні з паливними вимагають значно менше витрат на обслуговування, незамінні там, де потрібна висока культура виробництва і точність підтримки температури, швидкодія. В даний час в господарствах близько однієї третини, а іноді 50-60 % електроенергії, споживаної на виробничі потреби, витрачається в теплових процесах. Надалі частка електроенергії, що трансформується в тепло, буде неухильно зростати.

Дедалі більшого розвитку набуває електротехнології - використання електрики безпосередньо в технологічних процесах з метою механічного, термічного, хімічного або власне електричного впливу на предмет праці без попереднього перетворення електроенергії в проміжних пристроях: електродвигунах, нагрівачах, випромінювачі та ін. Електротехнологія робить лише перші кроки в сільському господарстві, але це багатообіцяюча і вельми перспективна область сільськогосподарської електротехніки.

"Електричний нагрів та електротехнології" – новий курс, недавно введений на факультетах електрифікації сільського господарства. Систематизована література та навчальні посібники з цього курсу відсутні. Цей посібник, написаний відповідно до затвердженої програми курсу, покликане певною мірою заповнити цю прогалину і допомогти студентам факультетів електрифікації

сільського господарства в оволодінні основами знань в галузі сільськогосподарського електронагріву та електротехнології. Книга буде корисна також інженерам, які працюють в області проектування і експлуатації сільськогосподарських електроустановок.

1.2. Загальні відомості про електротехнології

Під електротехнології розуміються способи обробки матеріалів, в яких електрична енергія використовується безпосередньо як інструмент для обробки. Ця енергія може виступати у вигляді дугового або тліючого розряду, у вигляді іскри, у вигляді плазми, у вигляді електричного поля, у вигляді високої напруги, у вигляді пучків заряджених частинок (електронів та іонів), у вигляді концентрованих пучків світла, у вигляді струмів високої частоти. Відповідно до цього, до методів електротехнологій відносяться електроблискова, електроерозійна і електроімпульсна обробка; різні види електрозварювання, засновані на дії дугових розрядів і контактному нагріванні; плазмова, електронно-променева і іонна обробка; лазерна обробка, електропідривної і магнітно-імпульсна обробка, обробка струмами високої частоти, електрохімічна і ультразвукова обробка.

Деякі з цих видів обробки застосовуються самостійно, інші – спільно з механічною обробкою. Винятком з перерахованих електротехнологій, які не підкоряються загальним правилом, є ультразвукова, електропідривної і магнітно-імпульсна обробки, в яких не електрична енергія виступає в якості робочого інструменту, а механічна енергія ультразвукових коливань і енергія ударних хвиль.

1.3. Перевага електротехнологій перед іншими методами обробки матеріалів

Електротехнології часто називають новими технологіями. Вони мають ряд істотних переваг перед традиційними (механічними) методами обробки матеріалів.

1. Можливість обробки матеріалів з будь-якими властивостями без застосування значних механічних зусиль

Така можливість відкривається в зв'язку з тим, що знімання матеріалу відбувається не шляхом механічних зусиль, а за допомогою дії електроенергії в різних її видах, тому механічні характеристики матеріалу не грають ролі.

Наприклад, при електроерозійної обробці через високу температуру розряду будь-який матеріал (метал, діелектрик, напівпровідник) плавиться і випаровується. При електрохімічної обробки, незалежно від типу з'єднання, агрегатного стану, відбувається розчинення, осадження або інший процес незалежно від механічних властивостей. Можливість виконання зварювання кераміки і металу стала здійсненною в зв'язку з використанням для цих цілей електронного променя.

Ця перевага електротехнологій набуло значимість в останні десятиліття в зв'язку з розробкою нових матеріалів, що володіють особливими властивостями.

2. Відсутність необхідності в спеціальних інструментах або абразивах більш твердих, ніж оброблюваний матеріал

В процесі обробки із застосуванням електрохімічних та електрофізичних методів інструмент як такої взагалі відсутній (електронно-променева, лазерна обробка) або між інструментом і оброблюваною деталлю спеціально створюється зазор, в який надходить електроліт (електроблискова, електроерозійна обробка), і тільки в деяких випадках (ультразвукова розмірна обробка) застосовується механічне зусилля для обробки.

У нових технологіях питома потужність, що підводиться дуже висока за рахунок малої площі взаємодії і імпульсного характеру обробки. Це призводить до виділення великої теплової потужності і досягненню високих температур в місцях обробки, що дозволяє здійснювати операції, неможливі при звичайних методах.

3. Значне скорочення витрат матеріалу

Ця перевага особливо велике значення має при обробці рідкісних і дорогих матеріалів, таких як рубін, кварц, алмаз, напівпровідникові кристали. Економія виходить при їх різанні, шліфуванні, розпилюванні, фрезеруванні за рахунок оптимального розкрою, менших за товщиною швів.

4. Висока точність виготовлення деталей

У техніці часто потрібні деталі, оброблені з високою точністю. При використанні електротехнологій, точність обробки в межах одиниць мікрометрів є цілком досяжною. У той же час при механічній обробці така точність досягається насилу.

5.Високая продуктивність і економічна ефективність

У деяких технологічних операціях звичайні способи механічної обробки досягають своїх граничних можливостей. У той же час, застосування електротехнологій дозволяє отримати високі показники. Наприклад, при обробці твердих і крихких матеріалів трудомісткість і тривалість значно менше, ніж при механічній обробці. Електротехнології дозволяють значно збільшити щільність енергії, що вводиться в зону обробки. При цьому не потрібно пропорційного збільшення витрат на обладнання, оснащення та інструмент.

6. Можливість часткової або повної механізації і автоматизації процесів обробки

Дозволяє скоротити обслуговуючий персонал, підвищити продуктивність.

7. Поліпшення умов праці

Проведення операцій без застосування значних фізичних зусиль призводить до зниження рівня втоми оператора.

Кваліфікація оператора може бути нижче в порівнянні зі звичайною механічною обробкою. Кваліфікація наладчика обладнання і програміста повинна бути значно вище.

Однак електротехнології, поряд з великим комплексом позитивних технічних, технологічних і економічних показників, мають ряд недоліків і обмежень. Це, перш за все висока енергоємність процесів, яка проявляється при виготовленні деталей простої конфігурації і форми. Необхідність застосування спеціального обладнання.

Методи електротехнології тим вигідніше застосовувати, ніж складніше форма оброблюваної деталі, чим твердіше матеріал і важче дається обробці різанням, чим вище спеціальні вимоги пред'являються до деталі або виробу. Цими положеннями визначається загальна принципова спрямованість методів електротехнологій, переважно використовуваних при створенні зразків нової техніки, при впровадженні нових матеріалів і новітніх досягнень науки і техніки в практику.

1.4. Загальна класифікація електрофізичних і електрохімічних методів обробки матеріалів в агропромисловому комплексі

Електротехнології можна класифікувати за кількома ознаками, таким як види впливу на оброблювану деталь, різновиди виконуваних операцій, галузі промисловості, в яких використовуються технології. По виду впливу на матеріал, електротехнології засновані на хімічному, тепловому, механічному дії електричного струму.

Електротехнології, засновані на хімічній дії електричного струму поділяються на нижче перераховані складові.

1. Електрохім. розмірн. обробка.
2. Електрохімічне очищення.
3. Електрополіровка.

4. Анодно-механічна обробка.
5. Електроабразивна обробка
6. Електроалмазна обробка
7. Гальванопластика і гальваностегія

1.5. Області можливого застосування електрофізичних і електрохімічних методів обробки матеріалів

Кожна з наведених вище електротехнологій знаходить широке застосування в багатьох областях техніки. Одні і ті ж операції можна виконувати різними технологічними прийомами, вибір яких визначається вимогами до якості обробки. Наведемо можливі операції, що виконуються за допомогою цих технологій.

1) Електрохімічна розмірна обробка застосовується в наступних операціях:

- точного профілювання складних за формою виробів з важкооброблюваних матеріалів (лопатки турбін);
- виготовлення фасонних порожнин в важкооброблюваних матеріалах (прес-форм і матриць штампів);
- різання твердих матеріалів;
- виготовлення сіток;
- виготовлення профілю зубців;
- свердління отворів.

2) Електрохімічне травлення застосовується для:

- очищення металевих поверхонь від окалини;
- очищення поверхні від іржі та інших забруднень;
- видалення змінених шарів з поверхні металів і сплавів;
- підвищення якості ріжучого інструменту;
- таврування і маркування.

3) Електрополірування застосовується для:

-Декоративне обробки поверхонь чорних і кольорових металів;

- підвищення корозійної стійкості поверхні;
- поліпшення електричних і магнітних властивостей;
- зниження коефіцієнта тертя;
- підвищення стійкості ріжучого інструменту;
- округлення гострих кромок,

4) Електроабразивна і електроалмазна обробка, чистова Іодна-механічна обробка використовуються як:

- чистове обробне та притирочное шліфування і доведення поверхні металевих і металокерамічних виробів;
- остаточна заточка і доведення твердосплавного інструменту;
- полірування виробів з чорних і кольорових металів і сплавів.

5) Чорнова анодно-механічна обробка застосовується при:

- різанні металевих заготовок і виробів будь-якого профілю з матеріалів будь-якої твердості та в'язкості;
- вирізки фасонних деталей з листового матеріалу;
- обдирання і чорновому шліфуванні;
- попередньої заточування ріжучого інструменту.

6) Нагрівання в електроліті дозволяє здійснювати:

- операції термічної і термохімічної обробки (загартування, отжиг, цементація);
- плавання;
- пайку;
- зміцнення поверхні.

7) Електроерозійная обробка (електроімпульсна, електроблискова) застосовується в наступних операціях:

- отримання порожнин і отворів в металах і сплавах будь-якої твердості;
- отримання отворів криволінійної і спіральної форми;
- різанні металів;
- нанесення зміцнюючих покриттів;
- заточування твердоплавкого інструменту;
- шліфування твердих сплавів;
- нарізання різьби на твердоплавкіх виробах;

- виготовлення металевих порошків;

- маркування, гравіювання, розпису по металу.

8) Ультразвукова обробка застосовується для:

- очищення поверхонь;

- розмірної обробки твердих сплавів і неметалічних матеріалів (прошивка отворів і площин, профілювання вирізка);

- інтенсифікації практично будь-яких технологічних операцій (гальванічних, хімічних, металевих, фізик хімічних, механічного різання і шліфування, полегшення пайки і лудіння активних металів), обробки тиском, металізації неметалічних поверхонь;

- зварювання пластмас і неметалічних матеріалів.

9) Електронно-променева обробка використовується для:

- плавки металів і сплавів;

- зварювання металевих і неметалевих деталей;

- різання матеріалів;

- випаровування;

- прошивки будь-яких матеріалів, в т. Ч. Тугоплавких і надтвердих.

10) Іонна обробка використовується при:

- легировании напівпровідникових матеріалів;

- створення енергетичних бар'єрів;

- легировании поверхневих шарів інструменту;

- нанесенні зміцнюючих шарів;

- створення металокерамічних переходів.

11) світлопроменевих обробка застосовується при:

- зварювання матеріалів;

- різанні матеріалів;

- прошивці отворів;

- проведенні металургійних процесів з металевими і неметалевими матеріалами будь-якої твердості та тугоплавкости.

12) Плазмова обробка застосовується в наступних операціях:

- плавка;

- зварювання;

- різання;
- прошивки отворів і виготовлення фасонних виробів і: матеріалів будь-якої твердості;
- нанесення покриттів;
- металізації поверхні неметалічних матеріалів.

13) Електрогідравлічна обробка використовується для:
- дроблення і подрібнення твердих і крихких матеріалів;
- наклепу металевих поверхонь;
- обробки тиском.

14) електропідривна обробка застосовується в операціях:
- штампування;
- очищення;
- дріблення матеріалів;
- отримання спеціальних порошків;
- отримання нероз'ємних з'єднань.

1.6. Основні характеристики електротехнологічних процесів

До основних характеристик електротехнологічних процесів відносяться: рід струму, його частота, величина напруги, щільність струму, сила струму, тривалість імпульсу, спосіб підведення напруги (прямий чи непрямий).

Струм може бути постійний або змінний, в деяких операціях застосовується той і інший. Частота струму коливається від промислової, яка дорівнює 50 Гц до сотень герц, кілогерц і мегагерц. Напруга змінюється від одиниць вольт до сотень кіловольт. Сила струму змінюється від десятих часток до 10^4 Ампера. Тривалість імпульсу змінюється від 10^{-5} с до безперервного значення. Напруга в більшості технологічних операцій підводиться безпосередньо, але в деяких (електронно-променеві, світлопроменеві процеси, іонна імплантація) воно підводиться побічно.

1.7. Електричний нагрів провідників, діелектриків та напівпровідників

Відомо, що всі речові об'єкти матеріального світу з точки зору їх електрофізичних властивостей прийнято розмежовувати на три великих самостійних класи - провідники, діелектрики і напівпровідники.

Провідники - тіла, в яких можуть бути створені електричні струми провідності. У провідниках існують вільні електричні заряди, що рухаються під дією електричного поля. Впорядкований рух електричних зарядів є електричний струм провідності.

Заряди при своєму русі стикаються з іншими частинками речовини і віддають останнім енергію, отриману від електричного поля. Для підтримки руху зарядів в провідниках повинно існувати електричне поле, яке при русі зарядів виконує роботу. Внаслідок цього всі провідники мають опір електричному струму. Енергія, що віддається рухомим зарядами частинкам тіла, перетворюється в теплоту. При цьому провідник нагрівається протікає по ньому електричним струмом.

Діелектрики - матеріали, що не проводять електричний струм, тобто є ізоляторами. Відсутність електричної провідності у них обумовлено тим, що електричні заряди різних знаків пов'язані між собою і внаслідок цього не можуть рухатися незалежно навіть при впливі зовнішнього електричного поля. В цьому випадку в діелектрику відбувається лише деяка зміна положення або зміщення зарядів пов'язаних між собою, що називається поляризацією діелектрика.

Електричне поле поляризованих зарядів спрямоване назустріч полю, яке викликало поляризацію, і послаблює його. Тому якщо в діелектрик помістити заряд, то його електричне поле зменшується. Чим сильніше поляризується діелектрик, тим більше послаблюються в ньому поле електричного заряду та діелектрична проникність даної речовини. Відносна діелектрична проникність

$$E_r = \frac{E_0}{E} \qquad (1)$$

де E_0, E - напруженість електричного поля у вільному просторі і в діелектрику, В/м.

Поляризація твердих і рідких діелектриків може значно послаблювати поле електричних зарядів, тобто діелектрична проникність діелектриків може бути багато більше 1.

Напівпровідники - речовини, що займають проміжне положення між провідниками з електронною провідністю і діелектриками, як за значенням питомого опору, так і за характером дії їх іонів на електрони, рух яких під дією зовнішнього електричного поля створює електричний струм.

У напівпровідниках електрони пов'язані з іонами речовини досить сильно, але все ж слабкіше, ніж в діелектриках. Тому тепловий рух порушує зв'язок частини електронів з іонами і ці електрони стають вільними, т. е. Під впливом електричного поля вони здатні створювати електричний струм. Чим інтенсивніше тепловий рух (чим вище температура напівпровідника), тим більше число електронів втрачає свій зв'язок з іонами і бере участь в утворенні електричного струму. При цьому опір напівпровідника зменшується.

У напівпровідниках поряд з електронною є і діркова провідність. Переважання провідності того чи іншого типу залежить від наявності в провідниках різних домішок.

Розглянемо особливості перетворення електричної енергії в провідниках, діелектриках і напівпровідниках.

Визначимо енергію, що виділяється в провіднику з питомою електропровідністю γ , по якому протікає струм I (рис. 1, а). Для цього виділимо в провіднику нескінченно малий циліндричний об'єм $dV = dl \cdot dS$ з площинами dS, які є потенційними і знаходяться на відстані dl одне від іншого.

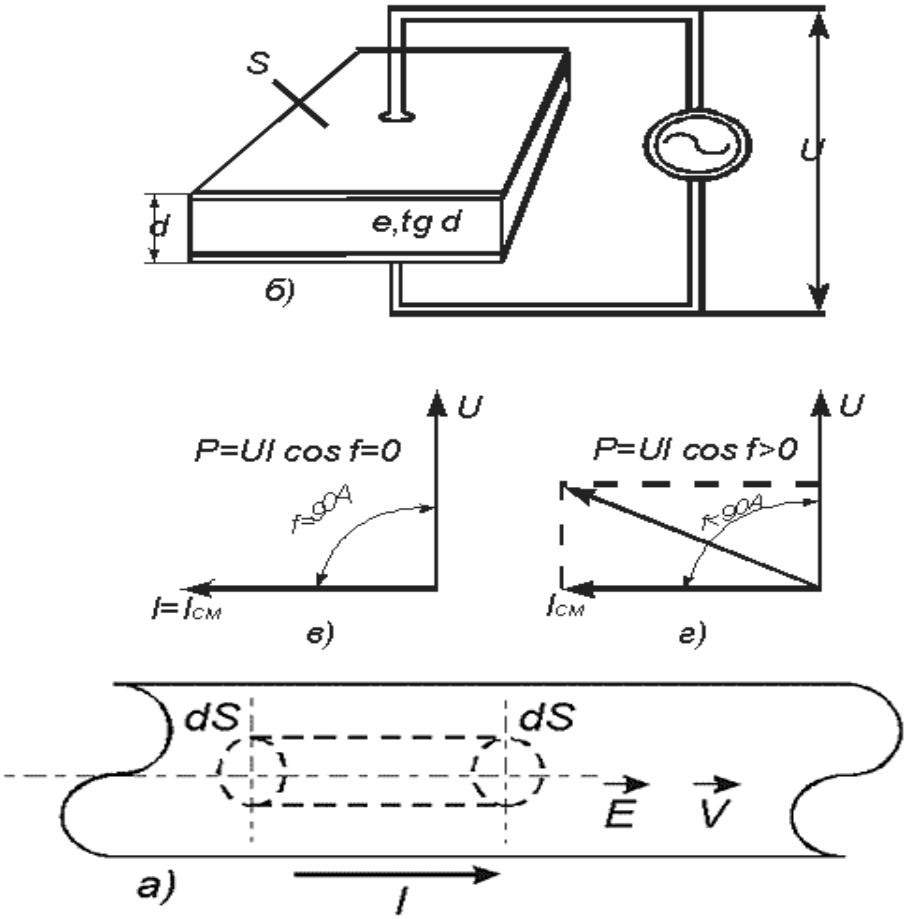

Рисунок.1. Провідники (а) і діелектрики (б) в електричному полі, векторні діаграми для діелектриків з електронної (в) і дипольної (г) поляризацією

Якщо струм через площину елемента обсягу dI = j·dS , а різниця потенціалів між торцями розглянутого обсягу dU = E·dl, то енергія, що поглинається за одиницю часу,

$$dP = dI \cdot dU = j \cdot dS \cdot E \cdot dl = j \cdot E \cdot dV \qquad (2)$$

Енергія, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу,

$$P = \frac{dP}{dV} = jE = \gamma E^2 = \frac{E^2}{\rho} = \frac{j^2}{\gamma} = \rho j^2 \qquad (3)$$

де ρ - питомий електричний опір провідника.

Енергію, виділену в одиниці об'єму за одиницю часу, називають *питомою потужністю*.

Рівність (3) є законом Ленца-Джоуля в найбільш загальній диференціальної формі і може бути застосована для будь-яких провідників незалежно від їх форми.

Користуючись виразом, можна визначити потужність, що поглинається в провідному середовищі об'ємом V,

$$P = \int_{\gamma}^{x} E^2 \, dV = \int_{\gamma}^{x} \rho \, j^2 \, dV \qquad (4)$$

Якщо в розглянутому об'ємі ρ = const і j = const , то

$$P = \rho \, j^2 \int_{\gamma}^{x} dV = \rho \, j^2 V = \rho \, j^2 S l = \rho \frac{l^2}{S} = R l^2 \qquad (5)$$

Отримане рівняння називається законом Ленца-Джоуля в інтегральної формі і визначає кількість теплоти, що виділяється в провіднику при протіканні електричного струму.

У діелектриках електрична енергія в теплову перетворюється інакше. Розглянемо електромагнітні процеси в плоскому конденсаторі, підключеному до затискачів генератора змінного струму. Нехай різниця потенціалів (напруга між обкладками конденсатора) змінюється в часі τ за гармонійним законом з кутовий частотою ω і простір між обкладинками заповнене речовиною з діелектричною проникністю ε (Рисунок.1, б).

Під впливом змінного електричного поля в діелектрику буде відбуватися поляризація то в одному напрямку, то в іншому. Це безперервне зміщення заряджених частинок є електричний струм, званий струмом зміщення, який не збігається за фазою з напругою на обкладинках конденсатора. При поляризації деяких видів (наприклад, електронної) заряджені частинки діелектрика під дією електричного поля зміщуються без всякого запізнювання. Причому найбільше зміщення спостерігається тоді, коли напруга проходить через нульове значення, оскільки в цей момент поляризація відбувається більш інтенсивно. Таким чином, струм зміщення в діелектрику випереджає напругу на чверть

періоду, або на 90 (Рисунок.1, в), і поляризація не супроводжується витратою енергії, тобто

$$P = UI\cos\varphi \qquad (6)$$

При дипольної поляризації інших видів частинки діелектрика зміщуються з запізненням по відношенню до напруги, прикладеного до конденсатора, а струм зміщення випереджає вектор напруги на кут φ = 90 ° (Рисунок.1, г). У повному струмі з'являється складова I_a , що збігається за фазою з напругою. Це явище обумовлене тим, що внутрішні сили, що діють між частинками, перешкоджають їх орієнтації в напрямку електричного поля. На їх подолання потрібно витрачати електричну енергію, яка виділяється у вигляді теплоти в діелектрику, тобто

$$P = UI\cos\varphi \qquad (7)$$

Кут δ , що називається кутом втрат діелектриків, доповнює кут φ до 90° і характеризує поглинену електричну енергію, обертається в теплоту. Тоді вираз (7) можна записати у вигляді

$$P = UI\sin\delta \qquad (8)$$

Струм зміщення $I_{зм}$ і повний струм I пов'язані співвідношенням:

$$I = I_{зм} / \cos\delta \qquad (9)$$

струм зміщення:

$$I_{зм} = U\omega C \qquad 10$$

де ω - кутова частота, с; С -ємність конденсатора, Ф.

Ємність, Ф, робочого конденсатора

$$C = S\varepsilon / d \qquad (11)$$

Тут S - площа пластин, $м^2$; ε - діелектрична проникність матеріалу, Ф / м; d- відстань між пластинами, м.

Діелектрична проникність, Ф/м, матеріалу, розміщеного між пластинами конденсатора,

$$\varepsilon = \varepsilon_o \, \varepsilon_r \qquad (12)$$

де ε_o - електрична постійна, Ф/м ($\varepsilon_o = 8{,}85 \cdot 10^{12}$);
ε_r відносна діелектрична проникність матеріалу.

З урахуванням того, що $\omega = 2\pi f$, а також формул (9) і (10) вираз (8) можна записати як

$$P = \frac{2\pi f U^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 s}{d \operatorname{tg} \delta} \qquad (13)$$

або

$$P = 2\pi f E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 V \operatorname{tg} \delta \qquad (14)$$

де E = U/d - напруженість електричного поля в діелектрику, В/м;

V = S·d обсяг діелектрика, м ^{3} **.**

Якщо потужність віднести до одиниці об'єму матеріалу, то рівність (13) можна переписати так:

$$P_V = 2\pi f E^2 \varepsilon_r \varepsilon_0 V \operatorname{tg} \delta \qquad (15)$$

Вираз (14) пов'язує кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу в одиниці об'єму діелектрика, параметри електричного поля (f і E) і матеріалу (εr і tg δ). Щоб підвищити питому потужність, застосовують високі частоти і великі напруженості електричного поля, граничні значення яких обмежуються пробоєм (руйнуванням) діелектрика.

У напівпровіднику, поміщеному в електричному полі, поряд з струмом зміщення виникає струм провідності, який збігається за фазою з напругою і, отже, викликає додаткові витрати енергії електричного поля, перетворюються в теплоту. Векторна діаграма для напівпровідника подібна діаграмі для діелектрика, але кут δ має більше значення, а, отже, активна складова теж більше.

1.8. Основи динаміки електронагріву

Розглянемо процес нагріву матеріалу об'ємом V з питомою теплоємністю c і щільністю ρ . Нехай всередині матеріалу діє джерело теплоти постійної потужності P , а вся його зовнішня

поверхня P контактує з навколишнім середовищем, віддаючи їй теплоту. Перевищення температури $t_м$ матеріалу над температурою навколишнього середовища $t_{нс}$ позначимо:

$$ύ = т_т - t_{нс} \qquad (16)$$

Приймемо наступні допущення: температура $t_м$ матеріалу в будь-який момент часу однакова в усіх точках обсягу; питома теплоємність c матеріалу і, отже, його повна теплоємність $c_т = V\rho c$, а також коефіцієнт kт тепловіддачі не залежить від перевищення температури.

За час d τ частина енергії Ст d ύ, що підводиться до матеріалу, витрачається на підвищення його температури, а частина kт F ύ буде віддаватися в навколишнє середовище, тобто

$$Pd\tau = Cт\, d ύ + kт\, F ύ\, d\tau \qquad (17)$$

Отже, рівняння процесу електронагріву

$$dύ/d\tau + kт\, F ύ/Cт - P/Cт = 0 \qquad (18)$$

являє собою диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами.

Час τ нагріву - один з параметрів, що визначає режим нагріву матеріалу. Прийнявши, що початкове перевищення температури ύо матеріалу над температурою навколишнього середовища дорівнює нулю, тобто температури матеріалу і навколишнього середовища однакові, рівняння (18) запишемо у вигляді

$$d\tau = C\tau\, dύ / (P\, k\tau\, F ύ) \qquad (19)$$

Проинтегрировав вираз (19) і визначивши постійну інтегрування з прийнятих умов завдання, остаточно отримаємо:

$$m_{R_m} = \frac{m_I}{m_{C_m}}\ \tau = \frac{C_m}{k_m F} lg - \frac{P}{P - k_m F \vartheta} \qquad (20)$$

Таким чином, час нагріву визначається загальною теплоємністю матеріалу, потужністю нагріву і тепловітдачею.

Величина T , що дорівнює відношенню повної теплоємності Ст матеріалу до його тепловіддачі ktF , називається постійна часу нагріву. З урахуванням цього

$$\tau = T\ lg - \frac{P}{P - k_m F\vartheta} \qquad (21)$$

Перевищення температури нагріву визначається з формули:

$$\vartheta = (P\ /\ k_m F)(1 - e^{-x/t}) \qquad (22)$$

На рисунку (Рисунок 2), а показано графічне зображення вираження (22), з якого видно, що при τ = ∞ перевищення температури приймає стале значення

$$\vartheta = \left(\frac{P}{k_m F}\right)(1 - e^{-x/t}) \qquad (23)$$

Неважко показати, що при τ = T

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{уст}}} = 0{,}63 \qquad (24)$$

На підставі цього постійну часу T можна визначити як час, необхідний для досягнення значення 0,63 усталеного перевищення температури. З точністю до 1% вважають, що температура досягає сталого значення через час, рівне 5T .

При відключенні електротермічною установки матеріал охолоджується. Так як енергія, що підводиться до установки, дорівнює нулю, то ліва частина рівняння (17) також дорівнює нулю:

$$C_m d\,\vartheta + k_m F\,\vartheta\, d\,\tau = 0 \qquad (25)$$

Якщо охолодження при τ = 0 починається з сталого значення перевищення температури $\upsilon_{\text{вс}}$, то рівняння (25) приймає наступний вигляд:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{вс}} e^{-x/t} = P/k_m F e^{-x/T} \qquad (26)$$

При τ=T

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_{\text{уст}}} = 0{,}37 \qquad (27)$$

і охолодження практично закінчується через час, рівне 5T .

Експонентний характер зміни перевищення температури при нагріванні і охолодженні свідчить про те, що їх швидкості змінюються в часі.

Щоб визначити швидкість $\upsilon_{\text{нагий}}$ нагріву, диференціюють рівняння (23) за часом:

$$\upsilon_{\text{наг}} = \frac{d\vartheta}{d\tau} = \frac{\vartheta_{\text{уст}}}{T} e^{-x/T} \tag{28}$$

Швидкість $\upsilon_{\text{ох}}$ охолодження знаходять, диференціюючи рівняння:

$$\upsilon_{\text{ох}} = \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_{\text{уст}}}{T} e^{-x/T} \tag{29}$$

З аналізу виразів (28) і (29) видно, що швидкості нагріву і охолодження експоненціально зменшуються до нуля через час $\tau = \infty$, а практично через час.

На рисунку (Рисунок 2), б показані залежності швидкостей нагріву і охолодження від часу. Максимальна швидкість нагріву $v\frac{max}{\text{нач}}$ спостерігається в початковий момент, коли відсутній температурний перепад між матеріалом, що нагрівається і навколишнім середовищем. При охолодженні швидкість зниження температури має максимальне значення в початковий момент часу.

Динаміка перевищення температури та швидкості нагріву впливає і на енергетичні показники процесу, в першу чергу на тепловий ККД. В даному випадку він визначається відношенням корисно витраченої енергії до витраченої, т. е.

$$\eta_m = {C_m d\vartheta}/{P d\tau} \tag{30}$$

З урахуванням рівняння (17)

$$\eta_m = {1 - \vartheta}/{\vartheta_{\text{уст}}} \tag{31}$$

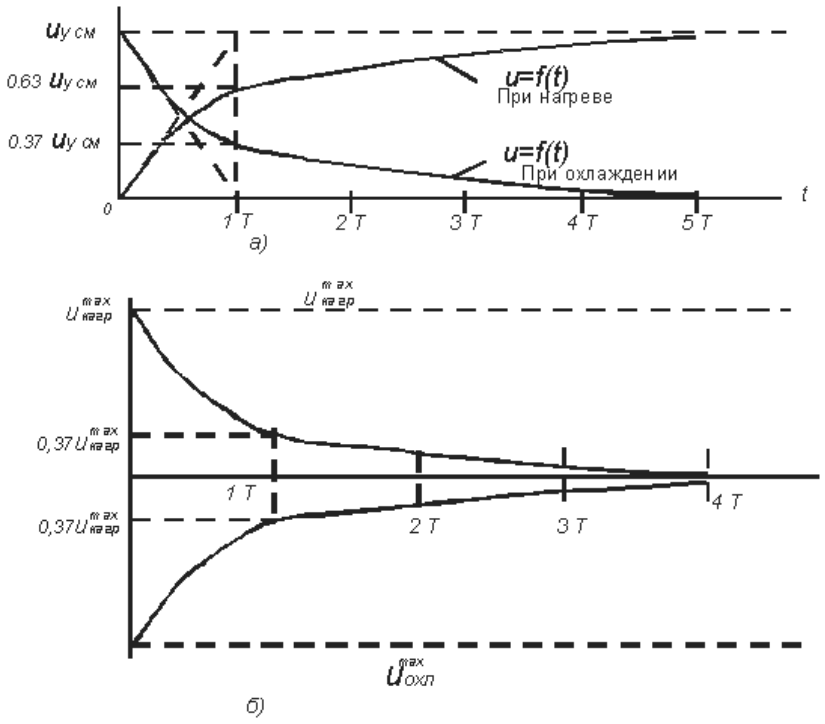

Рисунок 2. Тимчасові характеристики процесів нагрівання та охолодження: а - перевищення температури; б - швидкості нагріву і охолодження

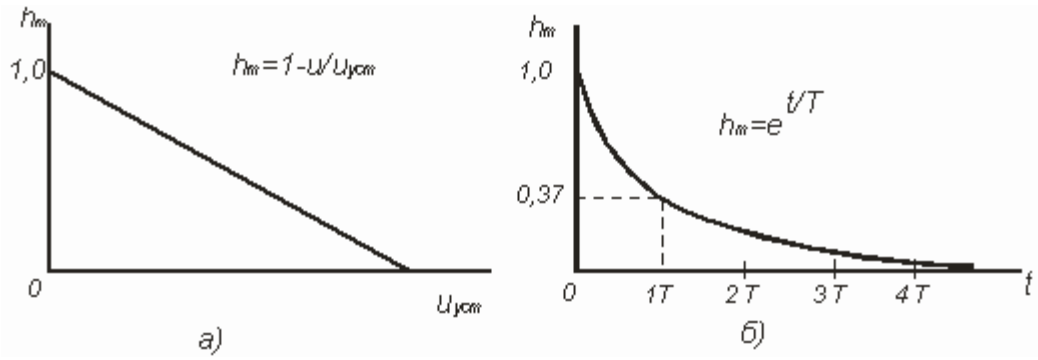

Рисунок.3 Залежно термічного ККД від перевищення температури (а) і часу нагрівання (б)

Для дослідження залежності ηт від часу в рівняння (31) потрібно підставити значення υ, яке визначається за виразом (22),

$$\eta_m = e^{-x/T} \tag{32}$$

З формули (32) випливає, що тепловий ККД в функції часу убуває експоненціально від одиниці на початку нагріву до нуля при досягненні встановленого значення перевищення

температури, коли вся потужність, що підводиться передається в навколишнє середовище.

Залежно $\eta_т$ від температури перегріву і часу нагріву показані на рисунку (Рисунок.3).

Наведений аналіз динаміки нагріву заснований на спрощених припущеннях, які не завжди відповідають дійсності, наприклад однакові умови віддачі теплоти по всій поверхні, що нагрівається, матеріалу, відсутність початкового перевищення температури навколишнього середовища та ін.

1.9. Рівняння теплового балансу

Розглянуті процеси нагрівання та охолодження нестаціонарні, так як пов'язані зі зміною тепловмісту, матеріалу і його температури. Теплова рівновага настає, якщо надходить теплова енергія, що дорівнює її витраті.

У загальному випадку в електротермічних установках теплова енергія корисно витрачається на нагрів і на фазове перетворення (випаровування, плавлення) матеріалу. При роботі електротермічного обладнання деяких видів фазове перетворення може бути відсутнім. Певна частина теплової енергії витрачається на нагрів допоміжних пристроїв (тари, пристосувань для завантаження робочого простору). Теплові втрати обов'язкові для всіх без винятку електротермічних установок.

Теплова енергія в електротермічні установки надходить від електричного нагрівача, в якому електрична енергія перетворюється в теплову. Крім того, теплота може надходити від різного електрообладнання, що входить в комплект об'єкта, що підлягає нагріванню. Джерелами теплоти є електродвигуни та освітлювальне обладнання, що перетворюють в теплоту відповідно не менше 20% і до 90% електроенергії.

Теплова енергія може надходити і від біологічних об'єктів тваринного і рослинного походження.

Тепловий баланс виражається рівнянням

$$\sum Q_{\text{над}} = \sum Q_{\text{вит}} \quad (33)$$

де $Q_{\text{над}}$ - сумарне надходження теплової енергії; $Q_{\text{вит}}$ - сумарний витрата теплової енергії.

З урахуванням зазначеного, рівняння (33) можна переписати так:

$$Q_{\text{ен}} + Q_{\text{б}} + Q_{\text{ео}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{доп}} + Q_{\text{тв}} \quad (34)$$

де $Q_{\text{ен}}$, $Q_{\text{б}}$, $Q_{\text{ео}}$ теплова енергія електронагрівачів, біологічних об'єктів, від електрообладнання; $Q_{\text{кор}}$ – корисна енергія, $Q_{\text{доп}}$ - енергія, що витрачається на нагрів допоміжних пристроїв; $Q_{\text{тв}}$ - енергія теплових втрат.

Одиницями виміру всіх складових приходу і витрати енергії є джоуль і похідні від нього одиниці- кДж, МДж, Вт/год .

1.10. Використання електричних схем-аналогів для дослідження динаміки нагріву

Перепишемо рівняння:

$$P = C_m\left({d\vartheta}/{d\tau}\right) + k_m F\vartheta \quad (35)$$

Прийнявши до уваги вираз (16) і позначивши термічний опір тепловіддачі в навколишнє середовище:

$$R_m = {1}/{k_m F\vartheta} \quad (36)$$

Рівняння (35) можна переписати в наступному вигляді:

$$P = C_m\left({dt}/{d\tau}\right) + {(t - t_0)}/{R_m} \quad (37)$$

З рівняння випливає, що підводиться до нагрівається матеріалу потік Ф = Р теплоти частково витрачається на підвищення внутрішньої енергії $V_{\rho d\upsilon}$ і частково надходить в навколишнє середовище $(\upsilon-\upsilon_o)$ / Rm, тобто

$$P = \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (38)$$

де Ф - загальний тепловий потік, що відводиться на нагрівається матеріалу;

$Ф_1$ - тепловий потік, що корисно витрачається;

$Ф_2$ - тепловий потік втрат.

Звернемося до електричної схемою (рис. 4), що включає в себе два джерела напруги U і Uo , електричний конденсатор Ce і резистор Re- стосовно до цієї схеми можна записати:

$$i = C_e\left(\frac{dU}{d\tau}\right) + \frac{U - U_0}{R_e} \qquad (39)$$

Фізичний зміст цього рівняння полягає в тому, що енергія від джерела напругою U запасається в конденсаторі Ce і поглинається в резисторі Re .

Рівняння (37) і (39), будучи математичними моделями, однакові за формою, хоча і відображають процеси в об'єктах різної фізичної природи.

Електричну схему можна розглядати як модель-аналог процесу електронагріву.

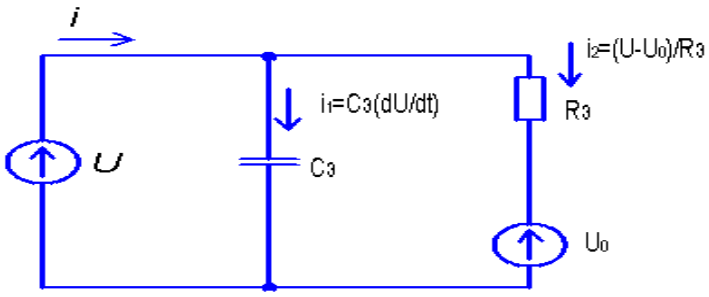

Рисунок . 4. Електрична схема - аналог процесу електронагріву

Теплові потоки і температурні поля можливо і навіть доцільно досліджувати не на реальних електротермічних об'єктах, а на електричних схемах-аналогах. При цьому теплоті буде відповідати кількість електрики, тепловому потоку – електричний струм, щільності теплового потоку – щільність електричного струму, теплопровідності – електропровідність, різниці температур – різниця потенціалів, термічному опору - електричний опір.

У наведеній на русунку електричній схемі напруги U, U_o висловлюють в деякому масштабі відповідно температури t, $t_{окр}$; струми *i*, i_1, i_2; теплові потоки Ф, $Ф_1$, $Ф_2$; резистор R_e відповідає

термічному опору тепловіддачі $R_m = 1 / kmF$, а електричний конденсатор C_e - теплоємність всього матеріалу C_m .

При виборі масштабів моделювання керуються такими міркуваннями. Масштаби часу і теплоємності приймають такими, щоб було зручно спостерігати і реєструвати процес на моделі і можна було, підібрати реальну або наявну в наявності електричну ємність. Потім знаходять масштаб опорів тепловіддачі за формулою:

$$m_{R_m} = m_I / m_{C_m} \quad (40)$$

де m_{R_m}масштаб опору тепловіддачі, С / (Вт · Ом); m_τ , - масштаб часу: m_{C_m} - масштаб теплоємності, Дж / (° С · Ф).

Після цього задаються масштабом температури, виходячи з значень напруг джерельної бази постійного струму. При цьому масштаб, Вт / А, теплового потоку

$$m_ф = m_t / m_{R_m} \quad (41)$$

де m_t- масштаб температури, ° С / В.

При використанні схем - аналогів можна значно спростити розрахунки електротермічного обладнання, звести їх до розрахунку електричних ланцюгів. Крім того, схема - аналог служить електричної моделлю системи електропідігріву і дозволяє провести необхідні експериментальні дослідження з метою знаходження найбільш оптимального рішення при проектуванні електротермічного обладнання.

1.11. Способи електронагріву і класифікація електронагрівальних пристроїв

Відомо кілька способів перетворення електричної енергії в теплову - опором, індукційний, дуговий, діелектричний, термоелектричний, електронний і світловий (лазерний).

У сільськогосподарському виробництві найбільш поширений електричний нагрів методом опору, фізична сутність якого полягає в тому, що при проходженні електричного струму по

провіднику в ньому виділяється теплота, Дж, відповідно до закону Ленца – Джоуля

$$Q = l^2/R\,\tau \qquad (42)$$

де I - діюче значення струму, що протікає по провіднику, А; R - опір провідника, Ом; τ - час, с.

Виділилася теплова енергія витрачається на підвищення внутрішньої енергії (нагрівання) провідника. При цьому матеріал, який підлягає нагріванню, повинен володіти електропровідними властивостями. Провідники електричного струму мають електронну (метали) або іонну (електроліти) провідність.

Метали можна нагрівати за допомогою електричного струму (Рисунок. 5, а). Через контактні пристрої КУ напруга подається до нагрівається деталі Д, яка нагрівається при протіканні струму I . Такий нагрів отримав назву електроконтактного.

Для нагріву електроліту електричним струмом до його об'єму, укладеним між електродами (Рисунок. 5, б), підводять напругу. При протіканні струму I в електроліті виділяється теплота, що викликає його нагрівання.

Розглянуті способи нагріву металевих провідників і електролітів відносяться до прямого нагріву методом опору, так як електрична енергія в теплову перетворюється безпосередньо в цих матеріалах.

Нагрівання методом опору можна реалізувати стосовно матеріалу незалежно від його електрофізичних властивостей (він може бути навіть і неелектропроводящім). Схема, що дозволяє виконати такий нагрів, показана на рисунку (Рисунок. 5, в). Тут електричний струм I проходить по спеціальному пристрою (з металу або сплаву) - нагрівального елементу НЕ, опір якого R . В НЕ енергія перетворюється в теплоту Q , передану нагрівального матеріалу М.Такий вид нагріву називається непрямим або елементним. При нагріванні методом опору електрична енергія передається в пристрій, де вона перетворюється в теплоту, контактним шляхом - за допомогою

спеціальних пристроїв при електроконтактні нагріванні, через електроди - при електродному нагріванні, гальванічним приєднанням нагрівального елементу - при елементному нагріванні.

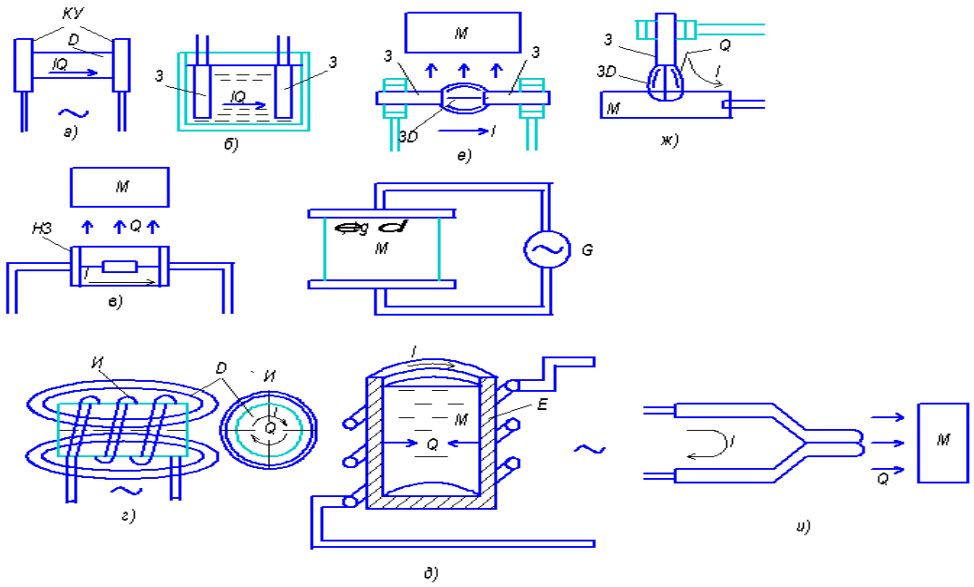

Рисунок. 5. Способи перетворення електричної енергії в теплоту: а - опором електроконтактні; б - опором електродний: в - опором елементний; г і д-індукційний прямого і непрямого нагріву: е і ж - електродугової непрямого і прямого нагріву; з-діелектричний: і - термоелектричний

При індукційному способі металеву деталь Д, що підлягає нагріванню, поміщають всередину котушки I (індуктора), по якій проходить змінний струм. При цьому створюється періодично змінюється магнітне поле (позначено силовими лініями) з частотою струму живлення (Рисунок. 5, г). Під впливом змінного поля котушки, виготовленої з мідного провідникового матеріалу, в деталі опором R наводяться вихрові струми (струми Фуко), при протіканні яких відповідно до закону Ленца-Джоуля виділяється теплота. В даному випадку на відміну від нагрівання методом опору електрична енергія передається в матеріал безконтактно-індукційним методом. По виду нагрівання його можна віднести до

прямого, так як електричний струм в теплоту перетворюється безпосередньо в нагрівається деталі.

Індукційний нагрів може бути також і непрямим, а нагрівається матеріал при цьому може і не мати електропровідними властивостями. Для цього достатньо замість суцільною металевою деталі в індукторі розмістити порожнистий металевий циліндр, заповнений матеріалом М, підлягає нагріванню (Рисунок. 5, д). В даному випадку індуковані вихрові струми нагрівають стінки циліндра, від яких теплота передається нагрівається матеріалу.

При дуговому нагріванні в якості перетворювача електричної енергії в теплову використовують електричну дугу, що представляє собою плазму-повністю або частково іонізований газ, що володіє хорошими електропровідними властивостями. Схема пристрою електродугового нагрівання показу на русунку (Рисунок. 5, е). Тут електрична дуга ЕД горить між двома електродами Е, до яких підведено напругу від джерела живлення. У каналі розряду опором R протікає струм I і відповідно до закону Ленца - Джоуля виділяється теплота Q , передана нагрівається матеріалу. Такий нагрів відноситься до непрямого, так як електрична енергія перетворюється в теплоту поза матеріалу.

Електродуговий нагрів може бути і прямим, якщо в якості одного з електродів застосовують металеву деталь, яку необхідно нагріти (Рисунок. 5, ж).

При діелектричному нагріванні нагрівається матеріал М, що не володіє електропровідними властивостями, поміщають між пластинами робочого конденсатора, підключеного до джерела живлення високої частоти (Рисунок. 5, з). Нагрівання відбувається за рахунок поглинання енергії діелектричним матеріалом і є прямим. Кількість енергії, поглиненої при цьому, виражається рівнянням (13).

Термоелектричний нагрів (Рисунок. 5, і), заснований на *ефекті Пельтьє*, істотно відрізняється від розглянутих раніше

методів і є непрямим. Ефект Пельтьє, що виявляється при проходженні електричного струму через контакт різнорідних електропровідних матеріалів, полягає в тому, що при протіканні постійного електричного струму від зовнішнього джерела на гарячому спаї додатково до теплоти Ленца - Джоуля виділяється пропорційна току деяка кількість теплоти, поглиненої холодним спаєм термоелемента. Ефект Пельтьє сильно виражений у напівпровідникових матеріалів і його застосовують для пристрою нагрівачів і охолоджувачів.

Світловий (лазерний) нагрів, який використовує енергію потужного концентрованого світлового променя, і електронний, заснований на перетворенні кінетичної енергії прискорених в електричному полі електронів в теплову енергію при ударі об об'єкт, що нагрівається, не знайшли широкого застосування в сільському господарстві. Спосіб перетворення електричної енергії в теплоту, вид нагріву, режим роботи, температура, рід використовуваного електричного струму, значення напруги, технологічне призначення - основні ознаки, за якими класифікують окремі групи електротермічного обладнання.

З розглянутих способів перетворення електричної енергії в теплоту найбільш поширений є нагрів методом опору, що відрізняється простотою і надійністю роботи пристроїв.

По виду нагріву електротермічне обладнання можна розділити на дві групи - прямого і непрямого нагріву, що відрізняються тим, що в першому випадку електрична енергія в теплоту перетворюється безпосередньо в нагрівається матеріалі, а в другому - поза ним (теплота передається теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням або комбінацією всіх або окремих видів теплопередачі). Установки, що реалізують непрямий електронагрів, можна застосовувати для нагріву різних матеріалів.

Електро обладнання по режиму роботи ділять на дві групи - *безперервної* (виконує безперервні технологічні процеси, створює температурні умови в виробничих приміщеннях, парниках і ін.) і *періодичної* (нагріває до заданої температури кілька матеріалу,

який витрачається за технологічним призначенням, а потім нагріває нову порцію і т. д.) *дії*.

Робоча температура високотемпературного електротермічного обладнання – понад 1250 °С, среднетемпературного – до 1250 ° С і низькотемпературного – до 500...600 °С. Робоча температура сільськогосподарського технологічного електротермічного обладнання, як правило, не більше 200...300 °С.

Електро обладнання може працювати на постійному і змінному струмі промислової, підвищеної, високої і надвисокої частот. Найбільш поширене обладнання, яке працює на змінному струмі промислової частоти.

Електро обладнання буває напругою до 1 кВ і понад 1 кВ. Велика частина його працює при напрузі 380/220 В, а в деяких випадках і при більш низькій напрузі, головним чином з метою забезпечення безпечної експлуатації.

За технологічним призначенням електротермічне обладнання поділяють на універсальні установки, призначені для декількох технологічних процесів, і спеціальні, що використовуються в конкретних технологічних процесах, наприклад для підігріву питної води тваринам, пастеризації молока, сушіння зерна, обігріву парників та ін.

1.12. Основи теплового розрахунку електротермічних установок

1.12.1. Завдання розрахунку

Розрахунку електротермічних установок передує вибір способу перетворення електричної енергії в теплоту, який визначається головним чином технологічним призначенням обладнання.

Для розрахунку установок періодичної дії необхідні такі вихідні дані: кількість матеріалу, що підлягає нагріванню, його теплофізичні характеристики, початкова і кінцева температури нагріву, час нагрівання, характеристика мережі живлення. Для установок безперервної дії замість кількості матеріалу, що нагрівається, і часу нагріву задають продуктивність установки.

Повний розрахунок електротермічних установок складається з теплового і електричного. При тепловому розрахунку визначають потрібну і встановлену потужності електротермічного обладнання, його теплові параметри, в тому числі ККД, питома витрата електроенергії, а іноді і температурні перепади в нагріваються виробах. При електричному розрахунку знаходять конструктивні параметри нагрівачів (нагрівальних елементів при непрямому нагріванні, індуктора при індукційному нагріванні, робочого конденсатора при діелектричному нагріванні і т. П.). Крім того, часто визначають місце розміщення нагрівачів в робочій зоні або системи обігріву технологічного об'єкта для забезпечення заданих умов.

Якщо ж встановлена потужність електротермічної установки відома, то в результаті теплового розрахунку знаходять можливу її продуктивність і теплові параметри.

Основне завдання теплового розрахунку - визначення всіх елементів теплового балансу стосовно до конкретних умов.

1.12.2. Визначення потужності і основних конструктивних розмірів

Встановлена потужність, Вт, що підводиться до електротермічного обладнання,

$$P_{уст} = K_з P_{потр} / \eta_е \qquad (43)$$

де $K_з$ - коефіцієнт запасу; $P_{потр}$ - потрібна потужність, Вт; $\eta_е$ - електричний ККД установки.

Коефіцієнт запасу враховує зменшення фактичної потужності електротермічною установки внаслідок зниження

напруги живлення, старіння матеріалів нагрівачів, а також можливе відхилення умов експлуатації від розрахункових значень. Зазвичай коефіцієнти приймають значення від 1,1 до 1,3. Причому найменше значення коефіцієнта відповідає більшої потужності.

При остаточному визначенні встановленої потужності електронагрівального обладнання слід пам'ятати, що зайве її завищення ускладнює завдання електропостачання, в деяких випадках може викликати порушення технології нагріву матеріалів і навіть збільшити питому витрату електроенергії.

Потрібну потужність, Вт, електротермічних установок з урахуванням відносини (3) розраховують таким чином:

$$P_{потр} = P_{кор} + P_{доп} + P_{вт} \quad (44)$$

де $P_{кор}$ – корисна теплова потужність, Вт; $P_{доп}$ – потужність, що йде на нагрів допоміжних пристроїв, Вт; $P_{вт}$ – потужність теплових втрат, Вт.

Для електронагрівальних установок періодичної дії:

корисна теплота, Дж,

$$Q_{кор} = V\rho c\ (t_2 - t_1) \quad (45)$$

Тут V- обсяг матеріалу, м ^{3} ; ρ - щільність матеріалу, кг / м; з - питома теплоємність матеріалу, Дж / (кг · ° С); t_2 - кінцева задана температура нагріву, ° С; t_1 - початкова температура матеріалу, ° С;

корисна потужність, Вт,

$$P_{кор} = Q_{кор} / t = V\rho c\ (t_2\ t_1) / \tau \quad (46)$$

де τ – час нагрівання, с.

Для електронагрівальних установок безперервної дії: корисна теплота, Дж / с, в одиницю часу

$$Q_{кор} = L\rho c\ (t_2 - t_1) \quad (47)$$

де L – об'ємна подача нагрівається матеріалу в установку, м ^{3}·с;

корисна потужність, Вт,

$$P_{кор} = Q_{кор} \quad (48)$$

Потужність, що підводиться до електротермічної установки, може бути виражена через тепловий $\eta_т$ і електричний $\eta_е$ ККД:

$$P_{уст} = K_{витр} P_{кор} / \eta т\ \eta э \quad (49)$$

В електротермічних установках, в яких одночасно з нагріванням відбувається, наприклад, плавлення, випаровування, при визначенні корисної потужності необхідно враховувати теплоту, що витрачається на нагрів матеріалу до температури фазового перетворення, і його теплоту.

Потужність, що витрачається на нагрів допоміжних пристроїв, знаходять за формулами розрахунку корисної потужності, причому температуру допоміжного обладнання приймають рівною температурі матеріалу, що нагрівається.

У загальному випадку теплові втрати електротермічного обладнання пов'язані з трьома способами передачі теплоти: теплопровідність, випромінюванням і конвекцією.

Основне рівняння стаціонарної теплопровідності для плоскої стінки має вигляд (закон Фур'є):

$$\Phi = \lambda / l \Delta t\ F \quad (50)$$

де Ф – тепловий потік, Вт; λ – теплопровідність матеріалу стінки, Вт / (м · ° С); l - товщина стінки, через яку проходить теплота, м; Δt – різниця температур на поверхнях стінки, ° С; F - площа поверхні стінки, м ^{2} .

Якщо ввести поняття про тепловий опір стінки

$$Rm = l / \lambda F \quad (51)$$

то закон Фур'є набуде вигляду, аналогічний закону Ома.

Тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні, називається щільністю теплового потоку, питомою тепловим потоком або тепловим навантаженням поверхні. Питомий тепловий потік, Вт / м ^{2} ,

$$\Phi_{уд} = \frac{\Delta t}{l/\lambda} \quad (52)$$

При проектуванні електротермічного обладнання теплові втрати, Вт, за рахунок теплопровідності можна визначити з достатньою для технічних розрахунків точністю за формулою

$$P_т = Ф_{пит}F_{роз} \quad (53)$$

де $F_{роз}$ – розрахункова поверхню стінки, м ^{2} .

Теплопровідність матеріалу стінки характеризується коефіцієнтом теплопровідності (кількістю теплоти, що проходить в одиницю часу через 1 м ^{2} ізотермічної поверхні при температурному градієнті, рівному одиниці).

Вода і особливо повітря мають малу теплопровідність. Так, для води при температурі 20 ° С вона дорівнює 0,597 Вт/(м·°С), а для повітря при тій же температурі-2,59·10 $^{-2}$ Вт/(м °С). Коефіцієнти теплопровідності для різних матеріалів наведені в спеціальних довідниках.

Передача теплоти конвекцією залежить від фізичних властивостей середовища (рідини і газів) – щільності, в'язкості, теплопровідності, теплоємності, характеру її руху, а також форми і стану контактує поверхні.

Тепловий конвективний потік, Вт, що визначає кількість теплоти, переданої конвекцією, зазвичай висловлюють законом Ньютона:

$$Фк = αk\ Δt\ F \quad (54)$$

де αк - коефіцієнт конвективного тепловіддачі, Вт/(м ^{2} ·°С); Δt - різниця температур між твердим тілом і газом або рідиною, °С; F - площа поверхні твердого тіла, м ^{2} .

Щільність теплового потоку, Вт/м ^{2} , що віддається з одиниці поверхні тіла навколишнього газу або рідини,

$$Фк.уд = α_к\ Δt \quad (55)$$

Коефіцієнт $α_к$, що визначає ту кількість теплоти, що передається в одиницю часу з поверхні твердого тіла площею 1 м ^{2} при різниці температур між цією поверхнею і навколишнім середовищем, рівної 1 °С, залежить від багатьох чинників, що характеризують середовище і контактує з нею поверхню. При

розрахунку конвективного тепловіддачі основна складність полягає в правильному знаходженні для розрахунку, якого запропоновано велику кількість формул, що базуються на експериментальних результатах.

При вільній конвекції (природний рух повітряного середовища біля нагрітого твердого тіла) внаслідок відмінності щільності нагрітих і холодних частинок коефіцієнт:

для вертикальних стінок і труб

$$a_{\text{к}} = 3{,}26\sqrt[4]{\Delta t} \tag{56}$$

для горизонтальних, звернених теплоотдающей поверхнею вгору,

$$a_{\text{к}} = 2{,}55\sqrt[4]{\Delta t} \tag{57}$$

для горизонтальних, звернених теплоотдающей поверхнею вниз,

$$a_{\text{к}} = 1{,}63\sqrt[4]{\Delta t} \tag{58}$$

У наведених формулах враховується залежність коефіцієнта теплообміну від різниці температур Δt між стінкою і повітрям. Для примусової конвекції коефіцієнт $\alpha_{\text{до}}$ залежить головним чином від швидкості руху середовища.

При примусовому русі повітря вздовж стінки зі швидкістю більше, ніж 5 м/с,

$$a_{\text{к}} = 7{,}12v^{0{,}78} \tag{59}$$

Тепловий потік, що випромінюється поверхнею абсолютно чорного тіла (тобто, яке поглинає всю падаючу на нього енергію), пропорційний четвертому ступеню його абсолютної температури. Щільність інтегрального (по всіх довжинах хвиль) потоку випромінювання визначається законом Стефана-Больцмана:

$$\Phi_{\text{в.пит}} = c_0\left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{60}$$

де $\Phi_{\text{в.пит.}}$ – питомий потік випромінювання, Вт/м ^{2}; c_o - постійна випромінювання абсолютно чорного тіла (c_o = 5,67 Вт/м ^{2} К ^{4}); Т – абсолютна температура тіла, К.

Реальні тіла не є абсолютно чорними. Вони поглинають лише частину падаючої на них енергії. В системі, що складається з двох реальних тіл, теплообмін між якими здійснюється випромінюванням, щільність потоку енергії, переданої від другого тіла до першого,

$$\Phi_{\text{в.пит.}} = c_0 c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \right] \quad (61)$$

де $c_{\text{пр}}$ - приведена ступінь чорноти для системи з двох тіл; T_1 і T_2 - температури першого і другого тіл, К.

У загальному випадку теплообмін здійснюється одночасно теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням і є складним процесом, що залежать від багатьох факторів і не завжди піддається точному математичному розрахунку.

Проектування технологічних електротермічних установок зазвичай починають з знаходження розміру їх робочого простору (зона або частина електротермічною установки, в якій розміщується нагрівається матеріал). При створенні електротермічних установок теплогенеруючі елементи (нагрівачі) доцільно розташовувати ближче до робочого простору.

Для електротермічних установок періодичної дії робочий простір визначається числом одночасно нагріваються виробів, їх розмірами або об'ємом (масою) матеріалу, що нагрівається за один робочий цикл.

Продуктивність, кг / год, установки

періодичної дії

$$L = V\rho / \tau \quad (62)$$

де V – об'єм матеріалу, що нагрівається, $м^3$; ρ -щільність матеріалу, $кг/м^3$;

τ - повний час роботи установки, включаючи час завантаження і розвантаження, год.

Для установки безперервної дії розміри робочого простору також визначаються її продуктивністю. Беручи до уваги, що нагрівається матеріал надходить безперервно, продуктивність, кг / год, установки

$$L = \upsilon \rho F \quad (63)$$

Тут υ- швидкість надходження матеріалу в робочий простір, м/год;

F -площа перетину робочого простору, м ^{2} .

Довжина робочого простору

$$l = L\,\tau / \rho F \quad (64)$$

де τ – час перебування матеріалу в робочому просторі установки, год.

1.12.3. Визначення теплового ККД і питомої витрати електроенергії

Загальний ККД електротермічних установок

$$\eta_{общ} = \eta_{э}\,\eta_{т} \quad (65)$$

де $\eta_{е}$, $\eta_{т}$ - електричний і термічний коефіцієнти корисної дії.

Електричний ККД залежить головним чином від способу електронагріву. Для установок, що реалізують нагрів методом опору, він близький до одиниці. Те ж саме можна сказати стосовно установкам електродугового нагрівання, якщо не враховувати втрати в джерелах живлення електричної дуги. В установках індукційного нагріву $\eta_{е}$ = 0,5...0,7, що пояснюється електричними втратами в деяких, елементах (джерелі живлення, трансформаторі, індукторі), що входять до складу установки. Ще більш низький ККД ($\eta_{е}$ = 0,4...0,5) мають установки високої частоти (ВЧ) діелектричного нагріву через багаторазове перетворення енергії. При використанні надвисокої частоти (НВЧ) для діелектричного нагріву $\eta_{е}$ = 0,7 за рахунок зниження втрат в джерелі живлення.

Термічний ККД показує, яка частина теплової енергії, виділеної в нагрівальному пристрої установки, йде на підвищення теплосодержания матеріалу, тобто враховує втрати енергії в навколишнє середовище і на нагрів елементів допоміжного обладнання.

З виразу (31) випливає, що при збільшенні перевищення температури зменшується термічний ККД, який при сталому значенні температури стає рівним нулю.

З формули (32) видно, що зменшення часу τ нагріву, тобто підвищення швидкості нагріву, призводить до збільшення $\eta_т$. Підвищити $\eta_т$ можна також, збільшивши постійну часу нагріву Т, тобто знизивши тепловіддаючим здатність установки.

Для цього потрібно застосовувати більш якісну теплоізоляцію або збільшувати її товщину, а також зменшувати площу огороджувальної поверхні, так як

$$T = V\rho c / (kmF) = \rho c / (kmF_{пит}) \quad (66)$$

де V – робочий об'єм електротермічною установки, $м^3$; ρ - щільність нагрівається матеріалу, кг / $м^3$; з -питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг -°C); km – коефіцієнт теплопередача через огороджувальну поверхню, Вт/$м^2$; F – площа поверхні огородження, $м^2$; Fуд = F/V – питома площа огороджувальної поверхні, $м^2$ / $м^3$.

Для підвищення $\eta_т$ електротермічної установки проектують таким чином, щоб $F_{пит}$ була б мінімальною. Цій вимозі в більшій мірі відповідає кульова поверхня, однак через невисоку її технологічность конструкції зазвичай мають форму циліндрів або прямокутних паралелепіпедів.

У практичних розрахунках зі співвідношення

$$\eta_т = Q_{кор} / (Q_{пов} + Q_{доп} + Q_{вт}),$$

або (67)

$$\eta_т = P_{кор} / (P_{пов} + P_{доп.} + P_{вт},)$$

Питома витрата електроенергії визначають на одиницю об'єму або маси, що нагрівається матеріалу, при обігріві поверхні - на одиницю площі і т. п.

Для установок періодичної дії

$$\omega_1 = P_{уст}\,\tau / V,$$

або (68)

$\omega_2 = P_{уст}\,\tau / (V\rho)$,

або

$\omega_3 = P_{уст}\,\tau / F$

де ω_1, ω_2, ω_3 – питома витрата електроенергії, відповідно кВт год/м^3, кВт·год/кг, кВт·год/м^2; Руст – встановлена потужність електронагрівачів, кВт; τ - час нагрівання, год; V – об'єм нагрівається матеріалу; м^3; ρ – щільність нагрівається матеріалу, кг/м^3; F – площа нагрівається поверхні, м^2.

Для установок безперервної дії

$$\omega_1 = P_{уст} / L, \text{ або } \omega_2 = P_{уст} / L\rho, \text{ або } \omega_3 = P_{уст} / F \qquad (69)$$

Тут L або F - продуктивність установки, відповідно

1.12.4. Температурні режими і енергетичні показники основних теплових процесів сільськогосподарського виробництва

Теплові процеси широко використовують у всіх галузях сільськогосподарського виробництва для нагріву різних технологічних матеріалів і середовищ. При цьому їх температура в більшості випадків не перевищує 200...300 °С, а іноді вимірюється десятками градусів. Такий нагрів отримав назву низькотемпературного. Беручи до уваги специфічні умови сільськогосподарського виробництва, для низькотемпературного нагріву в багатьох випадках доцільно застосовувати електротермічні установки.

У тваринництві та птахівництві низькотемпературний нагрів використовують для підігріву вентиляційного повітря, води при напуванні тварин, миття молочного посуду, трубопроводів, пастеризації молока і в інших цілях, в рослинництві захищеного ґрунту для обігріву ґрунту і повітря, стерилізації ґрунту, а в рослинництві відкритого ґрунту – для сушіння насіння, зерна, сіна та іншої сільськогосподарської продукції.

Температурні режими деяких технологічних процесів наведені в таблиці 1.1.

Енергетичні витрати на нагрів матеріалів і сільськогосподарської продукції визначаються їх фізичними характеристиками (питомою теплоємністю, щільністю), а також режимом і умовами нагріву.

Таблиця 1. 1

Таблиця залежності процесу нагрівання від показників температури

Процес	**Температура, -С**
Підігрів води:	
для опалення	70...95
для мийки молочного устаткування	55…65
для підмивання виміні корів	37...38
для приготування кормів	40...65
для напування тварин	12...20
для поливу рослин	20...25
Опалення:	
тваринницьких приміщень	8...20
птахівницьких приміщень	16...35
теплиць і парників	20...30
Підігрів повітря:	
для активного вентилювання сільськогосподарської продукції	10...35
для сушіння сільськогосподарської продукції	30...300
Обігрів:	
підлог тваринницьких і птахівничих приміщень	14...36
ґрунту парників і теплиць	18...25

Фізичні характеристики деякої сільськогосподарської продукції та деяких матеріалів наведені в таблиці 1.2.

Процеси нагрівання, пов'язані з фазовим перетворенням (випаровування, плавлення) речовин, відрізняються підвищеними витратами енергії. Так, для випаровування 1 л води необхідно затратити близько 2500 кДж енергії. У реальних електротермічних установках для сушки матеріалів і сільськогосподарської продукції витрачається 1,5...3 кВт·год електроенергії на 1 кг випареної вологи.

Таблиця 1. 2

Фізичні характеристики деякої сільськогосподарської продукції та деяких матеріалів

Найменування	**Щільність. кг/дм^3**	**Питома тепло-ємність. кДж/(кг°С)**	**Наймену-вання**	**Щільність, кг/дм^3**	**Питома тепло-ємність кДж/(кг°С)**
Картопля	0,71	3,56	Солома	0,15	2,3
Буряк	0,68	3,76	Полова	0,5	2,3
Кормова морква	0,75	3,7	Вода	1,0	4,19
			Повітря	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	1,0
Турнепс	0,72	3,89	Сосна	2,8	0,92
Гарбуз	0,76	3,85	Цегла	1,7	0,88
Зерно	0.5	2,3	Сталь	7,8	0,482

Контрольні питання

1. На які класи за електрофізичними властивостями прийнято розділяти речовини?
2. Чим визначається енергія, що виділяється в провіднику при протіканні по ньому електричного струму?
3. Чим відрізняється електричний нагрів діелектриків від електричного нагріву провідників?
4. Як впливають параметри електричного поля на нагрів діелектриків?
5. Перелічіть особливості електричного нагріву напівпровідників.
6. У чому полягає фізичний зміст загального рівняння електронагріву?
7. Чим визначається час нагрівання?
8. Як змінюється температура в функції часу при нагріванні і охолодженні?
9. Як залежить швидкість зміни температури від часу при нагріванні і охолодженні?
10. Як змінюється тепловий ККД в процесі нагрівання?

11. Як можна підвищити тепловий ККД?

12. Перерахуйте основні складові теплового балансу в електротермічних процесах.

13. У чому полягає електрофізичне моделювання процесів нагрівання?

14. Назвіть основні способи перетворення електричної енергії в теплоту. У чому їх відмінність?

15. Перерахуйте основні ознаки класифікації електротермічного обладнання.

16. У чому полягають електричний і тепловий розрахунки електротермічних установок?

17. Як визначити встановлену потужність електротермічного обладнання?

18. Перерахуйте основні складові теплових втрат електротермічних установок.

19. Які параметри установок і процесу електронагріву впливають на тепловий ККД?

20. Яким чином знаходять розміри робочого простору електротермічних установок?

21. Як визначають витрату електроенергії в електротермічних установках?

22. Як впливає загальний ККД електротермічних установок на питому витрату електроенергії?

23. Перерахуйте основні електротермічні процеси в сільському господарстві і їх температурні режими.

Тема 2. Прямий електронагрів опором

2.1. Питомий електричний опір провідників

Залежно від характеру вільних електричних зарядів прийнято розрізняти провідники першого і другого роду. Під дією електричного поля в провідниках першого роду (метали) вільні заряди (електрони) направлено переміщуються. У провідниках другого роду (електроліти) під дією електричного поля переміщуються іони.

Окремі провідники першого і другого роду характеризуються різною здатністю проводити електричний струм.

Щільність електричного струму, А/м ^{2}, в металевих провідниках

$$j = \gamma E, \tag{70}$$

де γ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від концентрації, заряду і маси електрона, довжини його вільного пробігу в металі і швидкості теплового руху, 1/(Ом·м); E - напруженість електричного поля, В/м.

Для розчинів електролітів щільність електричного струму також визначається виразом (70), але коефіцієнт γ залежить від концентрації іонів, їх заряду і рухливості.

Коефіцієнт γ пропорційності називається питомою електричну провідність, а зворотна їй величина ρ = 1 / γ – питомим електричним опором провідників.

Опір провідника, поперечний переріз якого по всій довжині постійний,

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{71}$$

де ρ - питомий електричний опір провідника, Ом·м; l -його довжина, м; S - площа поперечного перерізу, м ^{2}.

Питомий опір провідникових матеріалів залежить від наявності в них домішок. В електротехніці в якості, провідникових

матеріалів використовують головним чином мідь, алюміній, сталь і сплави високого опору. Питомий опір чистих металів менше, ніж металів, що містять домішки. Якщо в мідь додати 0,1...0,2 % заліза, то її питомий опір підвищиться в 1,5...2 рази.

Зі збільшенням температури провідника зростає його опір. Залежність питомого опору від температури може бути виражена формулою

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\vartheta + \beta\vartheta^2 + \gamma\vartheta^2 + \ldots)\,, \qquad (72)$$

де ρ_{20} – питомий електричний опір при 20 °С, Ом·м; ϑ – перевищення температури на 20 °С; α, β, γ – постійні коефіцієнти.

При невисоких температурах провідникових матеріалів (≤300 °С) можна обмежитися першим членом ряду, приймаючи

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\vartheta), \qquad (73)$$

Питомий опір металевих провідникових матеріалів, найбільш часто використовуваних в електротехнічних пристроях, становить $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ ...$1{,}4 \cdot 10^{-6}$ О м.

Питомий опір електроліту залежить від ступеня дисоціації, яка визначається відношенням числа дисоційованих молекул до загального їх числа, що знаходиться в розчині. Ступінь дисоціації залежить від природи і концентрації електроліту.

Питомий опір водних розчинів електролітів можна легко знайти експериментально, за допомогою коаксіально розташованих порожнистих металевих циліндрів (Рисунок. 6). Дно зовнішнього циліндра виконано з електроізоляційного матеріалу, а внутрішній простір між електродами заповнений досліджуваним розчином. Циліндри, підключені до джерела змінної напруги, є електродами, що підводять електричну напругу до розчину. Контролюють силу струму, напругу і температуру розчину. Опір, Ом, розчину, укладеного між електродами, розраховують при температурі 20 °С:

$$R_{20} = U/I\,, \qquad (74)$$

де U - напруга, В; I - сила струму, А.

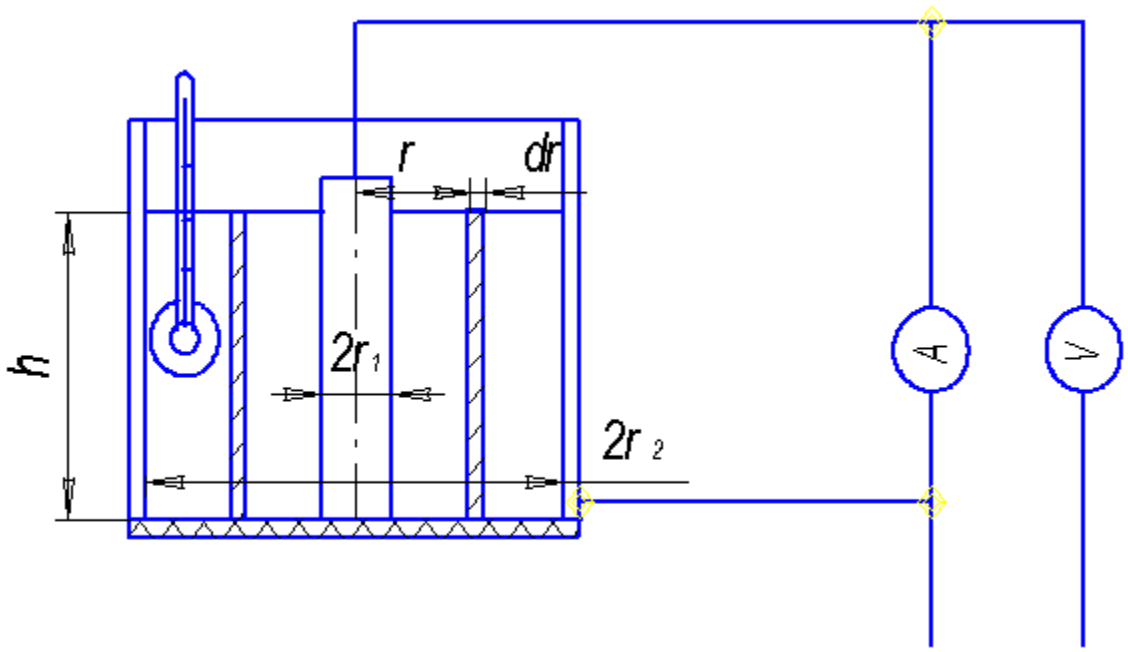

Рисунок. 6.Схема для визначення питомої опору електролітів

Для того щоб цей опір висловити через питомий опір і конструктивні параметри, визначимо опір, Ом, нескінченно тонкого шару розчину, що знаходиться на відстані r від осі циліндрів

$$dR_{20} = \rho \frac{dr}{2\pi r h}, \tag{75}$$

Тут dr - товщина шару, м; r - відстань від осі. м; h - висота циліндрів, м.

Опір всього обсягу розчин

$$R_{20} = \int_{r^1}^{\gamma^2} dR\ , \tag{76}$$

Прирівнюючи вирази (71) і (73), можна визначити питомий електричний опір

$$\rho_{20} = \frac{2\pi h U}{l\, ln\, r_2 / r_1}, \tag{77}$$

Або питому електропровідність

$$\gamma_{20} = \frac{l\, ln\, r_2 / r_1}{U\ 2\pi\ h}, \tag{78}$$

З підвищенням температури збільшується ступінь дисоціації водних розчинів електролітів, і тому зростає їх

електропровідність. Питома електропровідність, Ом / м, при будь-якій температурі:

$$\gamma = \gamma_{20}[1 + \alpha(t - 20)]\,, \qquad (79)$$

де g_{20} -питома електропровідність при температурі 20 °С, Ом/м;

α – коефіцієнт температурного зміни електропровідності (0,025 ... 0,035); t – температура °С.

Прийнявши α = 0,025, формулу (78) можна переписати у вигляді

$$\gamma = \gamma_{20}(t + 20)/40\,, \qquad (80)$$

питомий електричний опір

$$\rho = 40\rho_{20}/(t + 20) \qquad (81)$$

При температурі 20 °С в залежності від концентрації солей питомий опір води коливається від 2 до 100 Ом м. Він зменшується при нагріванні відповідно до формули (81), а при закипанні зростає внаслідок утворення в воді повітряних бульбашок.

2.2. Електроконтактний нагрів

Електроконтактний нагрів, пов'язаний з перетворенням електричної енергії в теплоту безпосередньо в металевому виробі, що нагрівається (деталі), застосовують при нагріванні заготовок або деталей з чорних і кольорових металів для подальшої гарячої обробки тиском (кування, штампування, гнуття і т. і.), Для термічної обробки (загартування, відпустка, відпал), а також з метою контактної електричного зварювання тиском.

Принципова схема найпростішої установки електроконтактного нагріву виробів D показана на рисунку (Рисунок. 7). Основні елементи схеми: струмопровідні контакти К, через які напруга змінного струму вторинної обмотки трансформатора Т підводиться до нагріву виробу, струмопровідних проводах, шини, затискні пристрої і т. і. Для надійного притиснення контактів К. використовують різні

пристосування (гідравлічні, пневматичні, електромагнітні та ін.), що створюють додаткове зусилля F.

Кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу, тобто, потужність, Вт,

$$P = l^2 R = U^2 R \qquad (82)$$

де R – опір деталі змінному струмі. Ом: U – значення напруги прикладеного до провідника, В.

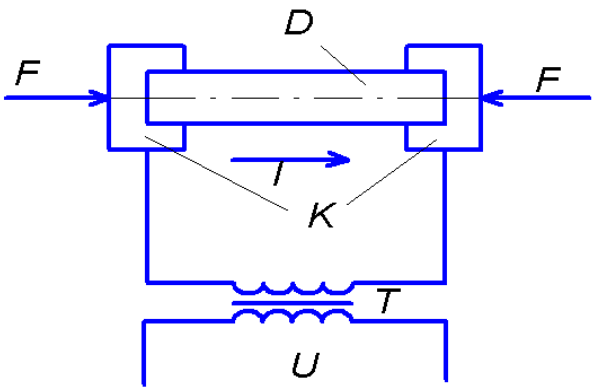

Рисунок. 7. Схема установки електроконтактного нагріву

Так як опір R металевих тіл з високою електропровідністю невеликий, для прямого їх нагрівання потрібні значні струми (сотні і тисячі ампер) при напрузі 5...25 В. Для прямого нагріву застосовують змінний струм завдяки відносній простоті отримання низької напруги від понижувальних трансформаторів.

При протіканні змінного електричного струму по провіднику (металева деталь) проявляється поверхневий ефект, що полягає в нерівномірному розподілі щільності струму по перетину провідника, який експоненціально зменшується у напрямку до його осі, тобто

$$j_x = j_m e^{-xz_0}, \qquad (83)$$

де j_x – щільність струму в шарі провідника на відстані x від його поверхні, А/м ^{2}; j_m - щільність струму на поверхні провідника, А/м ^{2}; z_o - еквівалентна глибина проникнення струму, м.

Максимальне значення щільності струму на поверхні провідника, а в шарі, товщина якого дорівнює еквівалентній

глибиною проникнення, виділяється близько 90% загальної кількості теплоти. Це дозволяє реальний розподіл щільності струму по перетину замінити фіктивним, вважаючи, що електричний струм проникає тільки до глибини z_o, щільність його на всій цій глибині постійна, а виділяється теплова енергія дорівнює кількості теплоти при реальному струморозподілі.

Еквівалентна глибина проникнення струму – відстань від поверхні провідника, на якому щільність струму в e = 2,71 рази менше, ніж на поверхні. Глибина:

$$z_0 = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \qquad (84)$$

Тут ρ – питомий електричний опір провідника, Ом-м; μ_r – відносне значення магнітної проникності провідника; f – частота струму, Гц.

Для f = 50 Гц формула (4.15) набуває вигляду

$$z_0 = 71{,}2\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r}} \qquad (85)$$

Таблиця 2. 1

Еквівалентна глибина проникнення електричного струму на трьох частотах для деяких металів і сплавів

Метал або сплав	**Питомий опір, Ом·м**	**Глибина проникнення струму, 10^{-3} м, при частоті**		
		50 Гц	10 кГц	1 МГц
Мідь	$1{,}7\text{-}10^{-8}$	9.4	0.66	0,066
Алюміній	$2{,}8\text{-}10^{-8}$	12,4	0,84	0,084
Латунь	$(0{,}07...0{,}2)10^{-6}$	19,5	1.37	0,137
Сталь (μ_r =200)	$0{,}5\text{-}10^{-6}$	3,3	0.24	0,024

Еквівалентна глибина проникнення електричного струму на трьох частотах для деяких металів і сплавів наведена в таблиці 2.1.

Розглянемо процес нагрівання провідника довжиною l поперечного перерізу S, виготовленого з немагнітного металу і має форму циліндра діаметром d .

Якщо щільність j струму розподіляється однаково по всьому перетину провідника, як при постійному струмі то потужність, що виділяється в ньому,

$$P = j^2 \rho\, Sl, \tag{86}$$

а при змінному струмі з урахуванням нерівномірного розподілу щільності струму, тобто поверхневого ефекту, потужність

$$P_{\sim} = \int_S j^2 \rho\, l dS, \tag{87}$$

де dS - елемент поперечного перерізу S провідника.

Коефіцієнт поверхневого ефекту

$$K_{\Pi} = P_{\sim}/P_{=} \tag{88}$$

Тут $P_{\sim}$, $P_{=}$ – потужності, що виділяються в провіднику при змінному та постійному струмі.

Взявши до уваги, що

$$P_{\sim} = l^2 P_{\sim} \tag{89}$$

$$P_{=} = l^2 P_{=} \tag{90}$$

вираз (88) можна переписати у вигляді

$$P_{\sim}/P_{=} = R_{\sim}/R_{=} = K_{\Pi} \tag{91}$$

де $R_{\sim}$, $R_{=}$ – опору провідника на змінному і постійному струмі, Ом; I – сила постійного струму або діюче значення змінного струму.

Потужність, що виділяється в провіднику при змінному струмі,

$$P_{\sim} = P_{=} K_{\Pi}\,, \tag{92}$$

З урахуванням еквівалентної глибини проникнення струму коефіцієнт поверхневого ефекту:

$$K_{\Pi} = S_{=}/S_{\sim} = S_{=}/S_{z_0} \tag{93}$$

Тут $S_{=}/S_{z_0}$ – площа поперечного перерізу провідника, в якому змінний струм протікає тільки на глибині z_0 від поверхні при постійній щільності струму.

З деяким наближенням можна вважати, що $S_{z_0} = \pi(d - z_0)z_0$, для провідника круглого перетину одиничної довжини:

$$R = 4\rho/\pi d^2 \quad (94)$$

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d^2}{4}/\pi(d - z_0)z_0 \quad (95)$$

Таким чином,

$$P_{\sim} = l^2\rho/\pi z_0 d \quad (96)$$

Для провідників з феромагнітних матеріалів потужність визначити складно, так, як потрібно врахувати перемагнічування матеріалу, а також залежність магнітної проникності від струму, що протікає по провіднику.

2.3. Розрахунок параметрів джерела живлення установок електроконтактного нагріву в АПК

У пристроях і установках електроконтактного нагріву визначають не параметри нагрівальних пристроїв, оскільки ними служать нагріваються деталі, а параметри джерела живлення. Для вибору трансформатора необхідно знати його потужність $S_{тр}$ і вторинну напругу U_2 .

Якщо відомі маса m, кг, деталі, початкова t_1 і кінцева t_2 температури нагріву, ° С, а також його тривалість τ , с, то корисна потужність, Вт,

$$P_{пов} = mc(t_2 - t_1)/\tau \quad (97)$$

З урахуванням електричних і теплових втрат загальна потужність, Вт, що підводиться до електронагрівальний пристрій,

$$P_{заг} = P_{пов}/\tau \quad (98)$$

де η - коефіцієнт корисної дії пристроїв електроконтактного нагріву (η = 0,55...0,82).

Щоб скоротити електричні втрати в АПК і досягти максимального ККД, сумарний опір вторинної обмотки

понижувального трансформатора, сполучних проводів і контактів повинно бути мінімальним.

Середнє значення вторинної напруги за час нагрівання

$$U_2 = \sqrt{R_{\sim} P_{\text{заг}}} \tag{99}$$

де $R_{\sim}$ - середнє значення опору деталі при змінному струмі за час нагрівання.

Потужність трансформатора, В · А, з урахуванням повторно-короткочасного режиму роботи установки

$$S_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{заг}}}{\eta_{\text{тр}} cos\varphi} \sqrt{\text{ПВ}} \tag{100}$$

де $\eta_{\text{тр}}$ - ККД трансформатора (0,9...0,95); cosφ - середній коефіцієнт потужності (0,6...0,85); ПВ – відносна тривалість включення установки.

Відносна тривалість включення установки

$$\text{ПВ} = \tau_p / \tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{р}} / (\tau_{\text{р}} + \tau_{\text{ц}}) \tag{101}$$

Тут $\tau_{\text{р}}$ – час нагрівання, с; $\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{п}}$ – час циклу нагріву, с;

$\tau_{\text{п}}$ – час паузи між включеннями установки, с.

Електроконтактний нагрів застосовують головним чином для деталей, що мають однаковий перетин по довжині. При цьому тепловий ККД, який визначається як

$$\eta_m = \left(P_{\text{пол}} \rho \frac{l}{S_{\sim}} \right) / U_2^2 \tag{102}$$

залежить від геометричних параметрів деталі. Чим більше відношення довжини *l* деталі до поперечного перерізу, $S_{\sim}$, тим вище ККД. При невеликому значенні цього відношення ККД різко знижується.

2.4. Електродний нагрів в АПК. Матеріали електродів

В електродних нагрівачах матеріал з іонною провідністю, укладений між електродами, утворює провідник, в якому при

протіканні електричного струму за законом Ленца-Джоуля виділяється теплота, яка використовується для нагріву води, молока, ґрунту та ін. В пристроях електродного нагрівання застосовують виключно змінний струм, так як при постійному струмі виникає електроліз. Незважаючи на те, що прийнято вважати, що при змінному струмі електроліз не відбувається, при великій щільності струму це явище все ж спостерігається. Тому нагрівання виконують при невеликих щильностях струму, максимальне значення яких залежить від конфігурації застосовуються електродів.

Як матеріали для електродів можна використовувати будь-які провідники? Однак слід пам'ятати, що вони повинні протистояти корозії в електричному полі, при високій температурі і великої вологості. При нагріванні матеріалів, призначених для технічних потреб, електроди виготовляють з конструкційної сталі або латуні. При нагріванні продуктів, що йдуть на годування або напування тварин, електроди не повинні утворювати токсичні оксиди. Більшою мірою цій вимозі відповідають вугілля і графіт. Однак їх використовують рідко через нетехнологічність. Більш поширені електроди з нержавіючої сталі.

Найпростішу електродну систему, що складається з пари плоских електродів, застосовують в нагрівачах невеликої потужності, які використовуються рідко. У потужних нагрівачах застосовують трифазні системи, що складаються з декількох електродів. Найбільш поширена система з трьох плоских електродів, вигнутих під кутом 120 ° (Рисунок. 8, а), і електродів у вигляді коаксіальних циліндрів (Рисунок. 8, б). Використовують також плоскі електроди (Рисунок. 8, в), число яких для забезпечення симетричного навантаження живильної мережі приймають $3n + 1$, де n - ціле число.

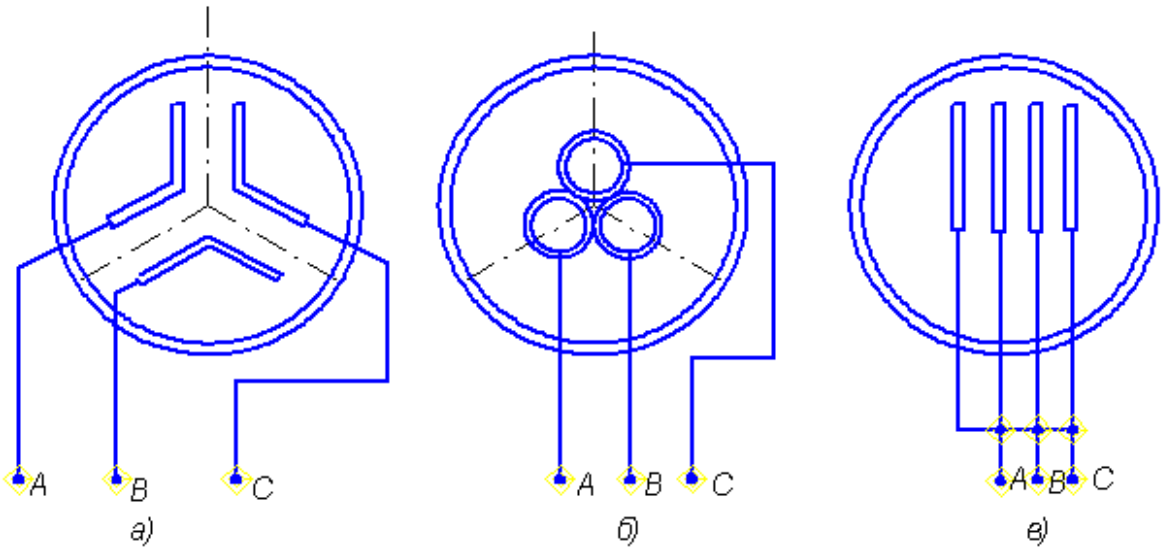

Рисунок. 8. Електродні системи: а) з електродів, вигнутих під кутом 120 ^{про} ; б) з коаксіальних циліндричних електродів: в) з плоских електродів

Схема заміщення пристроїв електродного нагрівання залежить від конструкції систем і здатності матеріалу ємності проводити електричний струм. У разі застосування ємності з електроізоляційного матеріалу і електродних систем (Рисунок. 8 а і Рисунок. 8 в) схеми заміщення являють собою трикутник, а в системі на русунку (Рисунок. 8, б) – зірку незалежно від електропровідних властивостей матеріалу ємності. При використанні електродних систем (Рисунок. 8.а, і Рисунок. 8.в) з електропровідними ємностями в схемах заміщення з'являються додаткові резистори, включені в зірку.

Розглянемо процес нагріву в пристрої з однією парою плоских електродів.

Теплова потужність, Вт, що виділяється в одному міжелектродному проміжку,

$$P = U^2 \gamma \, S/l \qquad (103)$$

де U - міжфазна напруга, В; γ - питома електрична провідність нагрівається матеріалу, Ом м; S - площа електродів, м ^{2} ; l - відстань між електродами, м.

Якщо прийняти, що напруга U в процесі нагрівання постійне і конструктивні параметри S і l не змінюються, то внаслідок залежності питомої електричної провідності нагрівається матеріалу від температури потужність в процесі нагрівання буде змінюватися. Питома електрична провідність збільшується відповідно до вираження (80) і потужність, Вт, при будь-якому значенні температури t.

$$P = P_{20}(t + 20)/40 \qquad (104)$$

де P_{20} - потужність при температурі 20 ° С, Вт.

При закипанні води потужність нагрівача знижується, так як при цьому зменшується питома електропровідність води.

2.5. Допустимі щільність струму на електродах і напруженість електричного поля

Так як електропровідність більшості матеріалів, що підлягають електродному нагріванню, пояснюється присутністю в них води, то максимальна щільність струму на електродах і в дотичних з ними обсягах матеріалу, що нагрівається, обмежується умовами неприпустимість процесу електролізу. Гранична щільність струму $j_{доп}$, А/см ^{2}, що не призводить до електролізу, залежить від конструкції електродних систем. Для плоских електродів вона може бути прийнята рівною 0,5 А/см ^{2} або розрахована за емпіричною формулою,

$$j_{доп} = 16/\sqrt{\rho_2} \qquad (105)$$

де ρ_2 – питомий опір матеріалу, Ом·см, відповідне найбільшим значенням температури і визначається за виразом (81).

Для електродів циліндричної форми максимальне значення допустимої щільності струму становить 1,5...2 А/см ^{2} .

В установках періодичної дії при постійній напрузі на електродах щільність струму не залишається постійною в процесі нагрівання. Вона зростає через зменшення питомого електричного

опору матеріалу при збільшенні температури. При кінцевій температурі нагріву щільність струму не повинна перевищувати допустимого значення. В установках безперервної дії вона змінюється тільки в початковий період, коли установка виходить на збалансований по теплоті режим, тобто температура виходить з нагрівача продукту стабілізується. У всіх зонах міжелектродного проміжку щільність струму визначається питомим опором матеріалу при постійній напрузі і незмінних конструктивних параметрах електродної системи. Напруженість електричного поля в матеріалі, що нагрівається.

Разом з цим у міру просування матеріалу в нагрівачі температура його підвищується, а питомий опір зменшується. При вході в нагрівач холодний матеріал має мінімальний питомий опір, а на виході-максимальний, відповідне кінцевій температурі нагріву.

В електродних системах з плоскопаралельними електродами щільність струму, А/см ^{2}, у всіх перетинах міжелектродного простору

$$j = U/\rho l \qquad (106)$$

де U – напруга на електродах, В; ρ – питомий опір матеріалу, Ом · см; l – відстань між електродами, см.

Для електродної системи, утвореної коаксіальними циліндрами, щільність струму, А / см ^{2}, в поперечному перерізі міжелектродного простору

$$j = U/r\rho\ ln\frac{r_1}{r_2} \qquad (107)$$

Тут r – поточний радіус точки в міжелектродному проміжку, см: r1 і r2 – радіуси зовнішнього і внутрішнього електродів, см.

З формули (107) випливає, що щільність струму на електродах системи неоднакова. Вона мінімальна на зовнішньому електроді і максимальна на внутрішньому.

Напруженість електричного поля E, В/см, і щільність струму j , А/см ^{3}, в міжелектродному просторі пов'язані наступною залежністю:

$$E = j\rho \quad (108)$$

де ρ - питомий електричний опір матеріалу при відповідній температурі, Ом см.

Електричне поле в міжелектродному просторі, утвореному плоскопаралельними електродами, однорідний і його напруженість, В / см,

$$E = U/l \quad (109)$$

де l - відстань між електродами, см.

Напруженість електричного поля, В / см, в міжелектродному просторі, утвореному двома коаксіальними циліндрами,

$$E = U/rln\frac{r_1}{r_2} \quad (110)$$

З відношення (110) випливає, що напруженість електричного поля максимальна на внутрішньому електроді і мінімальна на зовнішньому.

Фактична максимальна напруженість електричного поля в міжелектродному просторі не повинна перевищувати пробивну напруженість матеріалу, що нагрівається. Допустима напруженість

$$E_{\text{доп}} = E_{\text{пр}}/(1{,}5 \dots 2) \geq E_{max} \quad (111)$$

Пробивна напруженість матеріалів при інших рівних умовах залежить від їх питомої опору.

2.6. Розрахунок електродних нагрівальних пристроїв

При розрахунку електродних нагрівальних пристроїв визначають потрібну потужність і конструктивні параметри електродної системи. Потрібну потужність знаходять з урахуванням технологічних умов, які характеризують той чи інший виробничий процес. Для нагрівачів періодичної дії такими параметрами є: об’єм матеріалу V, м ^{3} , що нагрівається; його питома теплоємність С, Дж/(кг °С); щільність δ , кг/м ^{3} ; питомий

електричний опір ρ, Ом м; час нагрівання τ, с; початкова t_1 і кінцева t_2 температура, °С, нагрівання. Необхідно також знати теплової ККД нагрівача $\eta_т$, Який орієнтовно може бути прийнятий за аналогією з іншими електронагрівачами, що працюють в подібних умовах. Для нагрівачів безперервної дії задається продуктивність L, м ^{3} / с пристрою.

Корисну потужність нагрівачів знаходять за формулами (4) і (5), а потрібну за висловом

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{пол}}/\eta_\tau \qquad (112)$$

Обчислена таким чином $P_{\text{потр}}$ передбачає роботу з постійною потужністю, що справедливо лише для нагрівачів безперервної дії.

У нагрівачах періодичної дії потужність зростає від P_1 при початковій температурі t_1 до P_2 при кінцевій температурі t_2. Потужність визначається питомим опором матеріалу при відповідних температурах. З урахуванням формули (81)

$$P_1/P_2 = (t_2 + 20)/(t_1 + 2) \qquad (113)$$

Потрібну потужність I> $P_{\text{потр}}$ можна знайти через I> P_1 I> P_2 як

$$P_{\text{потр}} = (P_2 + P_2)/2 \qquad (114)$$

Потужність I> P_2 знаходять з рівнянь – (113) і (114) за висловом

$$P_2 = 2P_{\text{потр}}/\left(1 + \frac{t_1 + 20}{t_2 + 20}\right) \qquad (115)$$

Розрахункова потужність, Вт, для однофазних нагрівачів

$$P_{\text{розр}} = P_2 \qquad (116)$$

Для трифазних нагрівачів розрахунок виконують для однієї фази, тобто

$$P_{\text{розр}} = \frac{1}{3}P_2 \qquad (117)$$

Розрахунковий струм, А, нагрівача

$$l_{\text{розр}} = P_{max}/U \qquad (118)$$

де U - напруга на електродах, В.

Для системи, що складається з двох плоскопаралельних електродів, розміщених в ємності електроізоляційного матеріалу, приймають дійсну щільність струму j <j $_{доп}$, А/см ^{2} , і знаходять робочу площу, см ^{2} , кожного з електродів

$$S = l_{розр}/j \tag{119}$$

За обчисленому значені I> S з урахуванням конструктивних обмежень визначають висот I> h , см, і ширини I> b, см, електродів так, щоб I> hb = S

Міжелектродна відстань, см,

$$l = U^2 S/\rho_2 P_{розр} \tag{120}$$

де ρ_2 – питомий електричний опір матеріалу при температурі t_2 , Ом см

На заключному етапі розрахунку за формулою (109) визначають дійсну напруженість електричного поля і порівнюють її з допустимою. При цьому повинна виконуватися умова (111),

Для циліндричних коаксіальних електродів за виразом (119) знаходять площа S внутрішнього електрода. Прийнявши один з параметрів h (висота електродів) або d_1 (діаметр внутрішнього електрода), розраховують інший параметр так, щоб $S = \pi d_1 h$.

Потім знаходять діаметр зовнішнього електрода за формулою:

$$d_2 = d_1 e \frac{2\pi h U^2}{P\rho_2} \tag{121}$$

межелектродна відстань

$$l = (d_2 - d_1)/2 \tag{122}$$

Дійсну напруженість електричного поля визначають за формулою (110) і перевіряють за умовою (111).

При розрахунку однофазних нагрівачів безперервної дії приймають

$$P_{расч} = P_{потр} \tag{123}$$

а трифазних

$$P_{\text{расч}} = \frac{1}{3} P_{\text{потр}} \quad (124)$$

Конструктивні їх параметри розраховують за питомою електричному опору $\rho_{\text{кр}}$ матеріалу

$$P_{cm} = 40\rho_{20}/(t_{cp} + 20) \quad (125)$$

відповідному середній температурі

$$t_{cp} = (t_1 + t_2)/2 \quad (126)$$

Розглянуту методику можна використовувати для розрахунку нагрівачів з електродними системами будь-якої конструкції. Однак при цьому еквівалентний опір матеріалу, укладеного в міжелектродному просторі, визначають з урахуванням геометричних коефіцієнтів електродних систем. Їх знаходять за відомими формулами, які наведені в літературі.

Контрольні питання

1. Що таке щільність електричного струму та як її визначити?
2. Від чого залежить питомий опір провідникових матеріалів?
3. Як знайти питомий опір водних розчинів електролітів?
4. Поясніть схему для визначення питомої опору електролітів.
5. Що таке електроконтактний нагрів, від чого він залежить?
6. Поясніть схему установки електроконтактного нагріву.
7. Як визначити відносну тривалість включення установки
8. Як матеріали для електродів можна використовувати будь-які провідники?

Тема 3. Непрямий електронагрів опором

3.1. Вимоги до матеріалів та конструкція нагрівальних елементів

Нагрівальні елементи – основний вузол електротермічного обладнання, що реалізує непрямий нагрів методом опору. Безвідмовна робота елементів багато в чому визначає надійність електротермічних установок і можливість дотримання необхідного технологічного режиму.

Матеріал нагрівачів вибирають в першу чергу в залежності від необхідної робочої температури обладнання та умов роботи нагрівальних елементів. Ці матеріали повинні бути жаростійкі (що не окислюється в умовах високої температури), жароміцні (мають зберігати міцності якості при високих температурах) і технологічні (легко піддаватися обробці при виготовленні установки). Зазначеним вимогам повинні відповідати матеріали всіх конструктивних елементів, що знаходяться в робочому просторі електротермічного обладнання.

До матеріалів нагрівальних елементів також пред'являються специфічні вимоги, обумовлені особливостями їх роботи. Так, питомий електричний опір елементів повинен бути великим, що дозволяє вибрати конструктивні параметри нагрівачів таким чином, щоб їх можна було розмістити в обмеженому обсязі і включати безпосередньо в мережу, не знижуючи напруги. Крім того, їх температурний коефіцієнт опору повинен бути невеликим для того, щоб опір холодного і гарячого нагрівачів і, отже, потужність, споживана установкою з мережі, змінювалася незначно. Фізичні властивості матеріалу нагрівальних елементів повинні бути постійні, тобто протистояти старінню – збільшення опору з плином часу, що викликає зменшення потужності установки.

Сплави хромонікелеві (ніхроми), хромоалюміневі (фехралі) і хромнікельалюміневі (ніхроми з алюмінієм) – основні матеріали для нагрівачів непрямого нагріву опором.

Хромонікелеві сплави в найбільшій мірі відповідають вимогам, що пред'являються до матеріалів нагрівальних елементів. Розрізняють ніхроми подвійні, що містять хром і нікель (Х20Н80), і потрійні, до складу яких, крім нікелю і хрому, входить залізо (Х15Н60). Чим більше нікелю в сплаві, тим вище його якість і робоча температура. Максимальна робоча температура подвійного ніхрома Х20Н80 – 1100°С. У низькотемпературних електротермічних установках досить надійно працюють дешевші подвійні ніхроми, що містять 24...27 % хрому і 17...20 % нікелю (Х25Н20 і Х23Н18).

Вартість хромалюмінієвих сплавів в порівнянні з ніхрому нижча, міцність при високих температурах менша, обробляються вони гірше. Для нагрівачів з робочою температурою до 700 °С застосовують фехраль Х13Ю4 – сплав, який містить крім заліза 13 % хрому і 4 % алюмінію.

Характеристики хромнікельалюмінієвих сплавів (наприклад, Х15Н60ЮЗА) в порівнянні з безнікелеві поліпшені (робоча температура до 1100 °С), і вартість їх нижча за рахунок зменшення вмісту нікелю.

В електротермічних установках з робочою температурою вище 1250 °С, застосовують неметалічні нагрівачі з карборунда, дисилициду молібдену, графіту або з тугоплавких металів (вольфраму, танталу, ніобію і ін.).

Температурний коефіцієнт опору нагрівачів, виготовлених зі звичайної сталі, великий, жаростійкість і жароміцність невисокі, опір залежить від значення струму, що протікає по нагрівнику. Однак внаслідок дешевизни і недефіцитних їх широко застосовують в низькотемпературних електротермічних пристроях з робочою температурою 300...400 °С.

Нагрівальні елементи за конструктивним виконанням прийнято розділяти на відкриті, закриті і герметичні.

Відкриті нагрівачі з металевих сплавів виготовляють з дроту або стрічки, згорнутих в спіраль або вигнутих зигзагоподібно (Рисунок 9, а і б). Відкриті спіральні і звивисті нагрівачі кріплять на керамічних жароміцних ізоляторах в робочому просторі електротермічних установок. Теплота від таких нагрівачів передається конвекцією і випромінюванням. Чим вище температура нагрівача, тим більша частина енергії інфрачервоним випромінюванням передається нагрівається матеріалу.

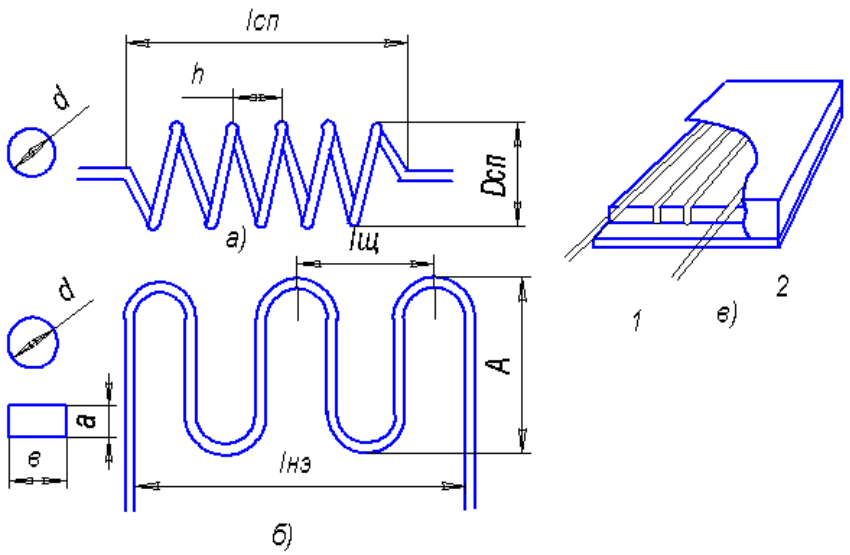

Рисунок 9. Нагрівальні елементи; а і б - відкриті відповідно у вигляді спіралі і звивисті; в - закриті; 1 - нагрівач; 2 - захисний кожух

Крім дротяних нагрівачів в якості джерел інфрачервоного випромінювання в електротермічних установках використовують спеціальні лампи.

У нагрівальних елементах закритого виконання (Рисунок 9, в) нагрівач знаходиться в захисному кожусі, що оберігає його від механічного впливу навколишнього середовища. Захищені нагрівальні елементи передають теплоту в основному конвекцією.

В електротермічних пристроях відкриті і закриті елементи використовують через їх простоти і невисокої вартості. Однак найбільш поширені в електротермічному обладнанні

сільськогосподарського призначення герметичні нагрівальні елементи або ТЕНи.

3.2. Трубчасті нагрівальні елементи

Трубчасті нагрівальні елементи (ТЕНи) застосовують для нагріву води, повітря, розчинів електролітів та інших середовищ. Тени можна розміщувати в середовищі, що здатне нагріватися. Вони надійно працюють при вібраціях і ударних навантаженнях, відрізняються електро- і пожежонебезпекою, підвищеним терміном служби.

ТЕН (Рисунок . 10, а) являє собою тонкостінну металеву трубку (оболонку) 1 з наповнювачем, в яку запресована нагрівальна спіраль 2 з дроту з великим питомим електричним опором. В якості наповнювача 4 використовують периклаз-кристалічний оксид магнію або кварцовий пісок з хорошими електроізоляційними і теплопровідними властивостями. Кінці спіралі з'єднані з контактними стрижнями 3, які через ізолятори 5 виходять назовні нагрівача і служать для приєднання до них проводів живильної мережі. Контактні стрижні і прохідні ізолятори надійно герметизують термовологостійким лаком.

Матеріал оболонки (мідь, латунь, вуглецева і нержавіюча сталь) визначає механічну міцність ТЕНа, його хімічну стійкість і залежить від призначення електрообігрівача. Тени з оболонкою з нержавіючої сталі, що має підвищену жароміцність і корозійну стійкість, застосовують для нагріву агресивних середовищ, а також при роботі з температурою на оболонці ТЕНа понад 450°С. Тени з мідною оболонкою використовують при невеликих температурах в середовищах, що викликають корозію інших металів. Наприклад, для підігріву води призначені трубчасті нагрівальні елементи з мідної трубки, покритої оловом, нікелем або хромом. Сталеві труби використовують для виготовлення ТЕНів, що нагрівають сухе повітря, масло і т. і. при температурі оболонки, що не перевищує 400 ... 450 ° С. Для ТЕНів, які

працюють при підвищеній вологості повітря, використовують герметичні нагрівальні елементи.

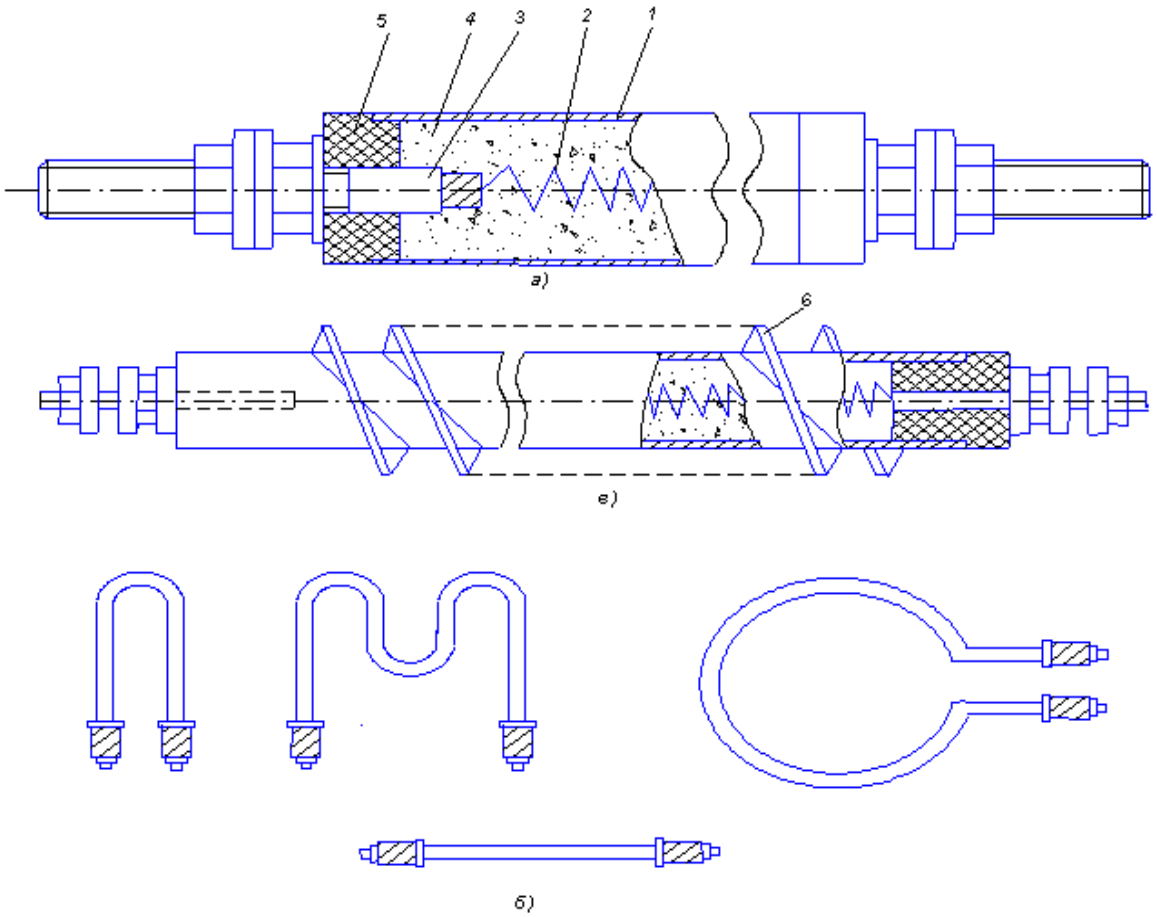

Рисунок . 10. – Герметичні нагрівальні елементи: а - розріз ТЕНа; б - різновиди ТЕНів; в - ТЕН з ребрами; 1 оболонка (трубка); 2 - нагрівальна спіраль; 3 - контактний стрижень; 4 - наповнювач (периклаз); 5 - ізолятор; 6 - ребра

У сільськогосподарському виробництві використовують трубчасті електронагрівачи серій НВ, НВЖ, ТЕН, ЕТ для води, слабких розчинів солей, лугів і кислот; НВС, ТЕН, ЕТ для нагріву повітря до 350 ° С в установках і приміщеннях; НВСЖ для нагріву повітря до 600 ° С; НММ, НММЖ, ТЕН, ЕТ для мінеральних масел і харчових жирів. Позначення Н [1] Ж [2] [3] нагрівачів серії НВ, НВЖ, НВС, НВСЖ, НММ, НММЖ розшифровують наступним чином: Н – нагрівач; [1] – В – води, ВС – повітря, ММ – масла, Ж – з жароміцної оболонкою; [2] – розвернута довжина, м; [3] –

номінальна потужність, кВт. Позначення ТЕН – [1] [2] [3] / [4] [5] [6] розшифровується так: Т – трубчастий; Е – електричний; Н – нагрівач; [1] – розгорнута довжина, см; [2] – умовне позначення довжини контактного виведення; [3] – зовнішній діаметр оболонки (трубки), мм; [4] – номінальна потужність, кВт; [5] – умовне позначення нагрівається середовища; [6] – номінальна напруга, В. Позначення ЕТ – [1] нагрівачів серії ЕТ вказує: Е – електронагрівач; Т – трубчастий; [1] – розгорнута довжина, см.

Для раціонального розміщення ТЕНів в робочій зоні електротермічного обладнання їм надають різну форму (Рисунок . 10, б) і встановлюють за допомогою кріпильних пристроїв (штуцерів, планок та т. П.), з'єднаних з оболонкою зварюванням, пайкою, або обпресуванням.

При нагріванні газоподібних середовищ для збільшення тепловідведення від ТЕНів застосовують ребра 6 (Рисунок . 10, б), що виконується з металу з хорошою теплопровідністю. Це сприяє скороченню габаритних розмірів електротермічних установок і, отже, їх металоємності.

Основний параметр, що характеризує тени, – питома поверхнева потужність P_F, Вт см ^{2},

$$P_F = P/\pi D l_a \qquad (127)$$

де P потужність ТЕНа, Вт; D – діаметр, см, l_a – активна довжина, см, ТЕНа.

Граничне значення PF ТЕНа визначається умовами роботи, допустимими температурами спіралі, наповнювача і оболонки. Для ТЕНів, що мають сталеву оболонку, ніхромову нагрівальну спіраль і периклаз в якості наповнювача, допустима питома потужність складає від 2 Вт см ^{2} при нагріванні повітря в умовах вільної конвекції до 11 Вт/см ^{2} при нагріванні води в умовах змушеної конвекції. Щоб визначити число нагрівачів для конкретних установок, підраховують потрібну потужність, знаходять за формулою (43) загальну потужність $P_{вуст}$ електротермічною установки і по каталогу для відповідних умов

роботи визначають тип ТЕНа та його номінальну потужність P_1. Число ТЕНів для даної установки

$$n = P_{уст}/P_1 \quad (128)$$

Для рівномірного завантаження трифазної мережі число ТЕНів повинно бути кратним трьом.

3.3. Електричний і конструктивний розрахунки нагрівальних елементів

Мета електричного розрахунку нагрівачів – визначення їх розмірів (перерізу і довжини). Вихідні дані: потужність $P_н$, Вт, одного нагрівача; напруга U мережі живлення, В; умови роботи нагрівальних елементів.

Розрахунок ґрунтується на тому, що нагрівач можна розглядати як елемент електричного кола, для якого справедливі закони електротехніки.

Так, потужність, Вт, нагрівача відповідно до закону Ленца-Джоуля

$$P_н = U^2н/R_н \quad (129)$$

де $U_Н$ - напруга живлення нагрівача, В; $R_Н$ - опір нагрівача, Ом.

Одночасно нагрівач можна розглядати як нагріте тіло, яке бере участь в теплообміні з навколишнім середовищем. У стаціонарному режимі потужність Рн повністю передається навколишньому середовищу. Рівняння теплообміну нагрівача з навколишнім середовищем при теплопередачі:

теплопровідністю

$$P_н = \lambda/l(t_2 - t_1)F_\tau = \omega_\tau F_\tau \quad (130)$$

конвекцією

$$P_н = \alpha_K(t_2 - t_1)F_K = \omega_K F_K \quad (131)$$

випромінюванням

$$P_н = \alpha_K c_{пр}\lfloor(T_2/100)^4 - (T_1/100)^4\rfloor F_u \alpha_1 F_u \quad (132)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м °С); t_1, T_1 і t_2, T_2 – температури середовища (матеріалу), що нагрівається, і нагрівачів, °С і К; F_T, F_K, F_i – площі поверхонь, що беруть участь в теплообміні теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням, м^2; $\alpha_{до}$ – коефіцієнт конвективного тепловіддачі; 5,7 – постійна Стефана-Больцмана; $З_{пр}$ – приведена ступінь чорноти тіл, що беруть участь в теплообміні; α_1коефіцієнт ефективності випромінювання нагрівачів (α_1 = 0,3...0,7); $\omega_т$, $\omega_{до}$, ω_i питомі поверхневі потужності нагрівачів при теплообміні теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням, Вт/м^2.

Питома поверхнева потужність нагрівачів при теплопередачі:

теплопровідністю

$$\omega_\tau = \frac{\lambda}{l}\,(t_2 - t_1) \tag{133}$$

конвекцією

$$\omega_K = \alpha_K(t_2 - t_1) \tag{134}$$

випромінюванням

$$\omega_u = \omega_{ид}\alpha_K \tag{135}$$

Знаючи конкретні умови роботи нагрівачів, можна визначити відповідні питомі поверхневі потужності. Однак їх розрахунок за формулами (133), (134) і (135) носить наближений характер, так як вхідні в них коефіцієнти є складними функціями багатьох змінних.

Позначивши в загальному випадку питому поверхневу потужність нагрівача основні розміри нагрівачів знаходять з наступних рівнянь:

$$R_H = \frac{U^2}{P_H} = \rho\frac{l}{S} \tag{136}$$

$$\omega_H = P_H/P = P_H/\Pi l \tag{137}$$

де $R_н$ – опір нагрівача, Ом; U – напруга, підведене до нагрівача. В; $P_н$ - потужність нагрівача, Вт; ρ – питомий опір матеріалу нагрівача, Ом·м; l – довжина нагрівача, м; S – площа поперечного перерізу нагрівача, м^2; $П_l$ = F – площа бічної поверхні нагрівача, м^2; П – поперечний периметр нагрівача, м.

З рівнянь (136) і (137)

$$l = U^2 S / P_H \rho = P_H / \Pi \omega_H \quad (138)$$

або

$$\Pi S = P^2 \text{н} \rho / U^2 \omega_H \quad (139)$$

Для нагрівача круглого перетину

$$\Pi = \pi d$$
$$S = \pi \mathrm{d}^2 / 4 \quad (140)$$

де d – діаметр дроту нагрівача, м.

Підставивши ці значення в формулу (82), отримаємо розрахунковий діаметр нагрівача

$$d = \sqrt{\frac{4 P_H^2 \rho}{\pi^2 U^2 \omega_H^2}} \quad (141)$$

За значенням d підбирають найближчий більший стандартний діаметр дроту нагрівача. Довжина дротяного нагрівача

$$l = RS/\rho = \sqrt{\frac{P_H U^2}{4 \pi \rho \omega_H^2}} \quad (142)$$

Для стрічкового нагрівача

$$S = ad$$
$$\text{и} \quad (143)$$
$$\Pi = 2(a + b) = 2(m + 1)a,$$

де a, b - товщина і ширина стрічки, м, m = b/a - відношення ширини до товщині стрічкового нагрівача.

Розрахункова товщина нагрівача прямокутного перетину

$$a = \sqrt{\frac{R_H^2 \rho}{2 U_m^2 (1 + m) \omega_H}} \quad (144)$$

і його довжина

$$l = R_H S / \rho \sqrt{\frac{P_H U^2 m}{4 (m + 1)^2 \rho \omega_H^2}} \quad (145)$$

При робочій температурі більше 700 °С не рекомендується застосовувати для елементів дріт діаметром менше 5 мм і стрічку товщиною менше 1,5 мм, так як малий перетин через окислення матеріалу призводить до значного скорочення терміну служби нагрівачів.

З формул (141) і (144) видно, що при зниженні напруги живлення розрахунковий переріз нагрівачів збільшується, а розрахункова довжина зменшується. Значить, розміщення нагрівачів в робочому просторі печі полегшується. При цьому підвищується термін їх служби.

Основні параметри нагрівачів можна розрахувати спрощено по робочому струму і розрахунковій температурі. Температуру робочої поверхні нагрівача $t_{раб}$ приймають такий, щоб вона була більше технологічно необхідної температури матеріалу.

Для відкритого нагрівального елементу

$$t_{раб} = t_{розр} \tag{146}$$

де $t_{раб}$ -температура робочої поверхні нагрівального елементу, °С; $t_{розр}$ - розрахункова температура нагрівача, °С.

Знаючи робочий струм і розрахункову температуру, по таблиці 5.1 Визначають діаметр дроту. Таблиця складена для нагрівального елементу з неізольованою ніхромового дроту круглого перетину, підвішеного в нерухомій повітряному середовищі.

Нагрівальний провід може бути намотаний в вигляді спіралі або укладений рівномірно на керамічний каркас і захищена пластинами з жароміцного електроізоляційного матеріалу або металу, що підвищує температуру елементів.

Щоб вибрати перетин нагрівача по таблиці 5.1, знаходять розрахункову температуру по формулі

$$t_{розр} = t_{роб} k_m k_c \tag{147}$$

де k_m – коефіцієнт монтажу, що враховує погіршення умов охолодження нагрівача через його конструктивного виконання; k_c – коефіцієнт середовища, що враховує поліпшення,

фактичних умов охолодження нагрівача в порівнянні з нерухомою повітряним середовищем.

Для нагрівального елементу з дроту у вигляді спіралі, k_m = 0,8...0,9; свитою в спіраль на керамічному підставі k_m = 0,6 ... 0,7; для дроту нагрівальних плиток і деяких трубчастих водонагрівачів k_m = 0,5...0,6; для дроту лабораторних печей, електронагрівачів статі і ґрунту k_m = 0,3...0,4. Менші значення k_m відповідають дротовим нагрівачів меншого діаметру, великі - більшого діаметру.

При роботі в умовах, що відрізняються від вільної конвекції, приймають k_c = 1,1...1,5 для нагрівальних елементів в повітряному потоці; k_c = 2,5 – в нерухомій воді; k_c = 3,0...3,5 – в потоці води.

Температура робочої поверхні нагрівача повинна задовольняти наступним умовам:

$$t_{\text{раб}} = t_{\text{расч}}/k_M k_c \leq t_{max} \qquad (148)$$

де t_{max} - максимальна допустима температура для матеріалу нагрівача.

За відомою розрахункової потужності нагрівального елементу визначають його робочий струм:

$$l_H = P_H/U \qquad (149)$$

де I_H , P_H , U - сила струму, потужність і напруга нагрівача.

З урахуванням виразів (136) і (139) довжина нагрівача

$$l = U^2 \pi d^2/(4P_H \rho) \qquad (150)$$

Тут d - діаметр дроту нагрівача, м; ρ - питомий опір матеріалу нагрівача при дійсній температурі, Ом·м.

Дротові нагрівачі орієнтовно можна також розрахувати за допустимої щільності струму матеріалу. перетин нагрівача

$$S = l_H/j_{\text{доп}} \qquad (151)$$

де $j_{доп}$ - допустима щільність струму для матеріалу нагрівачів, А/мм^2 (для ніхромового дроту $j_{доп}$ = 4...30 А/мм^2 . Великі значення щільності струму відповідають великим діаметрами і більш високим температурам нагрівача).

За обчисленому перетину розраховують діаметр дроту нагрівача, приймають стандартне його значення і за виразом (150) знаходять довжину.

У робочому просторі електротермічних пристроїв нагрівачі згинають зигзагоподібно або надають їм форму спіралі.

Для дротяних зиґзаґоподібних нагрівачів діаметром d = 6. .. 15 мм висоту А зиґзаґу приймають від 200 до 400 мм за умовою механічної міцності. Крок хвилі вибирають $l_ш \geq 5d$, з тим, щоб бездефектно зігнути дріт.

У стрічкових зиґзаґоподібних нагрівальних елементів висоту зиґзаґа приймають $A \leq 100$ мм^2, а крок хвилі $l_ш \geq 2b$. Конструктивна довжина дротяного і стрічкового зиґзаґоподібних нагрівальних елементів:

$$l_{Н.Э} = nl_{Ш} \qquad (152)$$

де n – число хвиль в нагрівальному елементі.

Для спіральних нагрівальних елементів з дроту приймають крок спіралі h> (2...4) d, з тим щоб сусідні її витки істотно не екранували одна іншу.

Діаметр спіралі вибирають з умов забезпечення механічної міцності – для сплавів, що містять нікель, і володіють підвищеною жароміцністю, $D_{сп}$ = (7...10) d , для хромалюмінієвих сплавів $D_{сп}$ = (5...7) d .

Конструктивна довжина спірального нагрівального елементу

$$l_{сп} = lh/\sqrt{h^2 + \pi D_{сп}^2} \qquad (153)$$

де n – число витків спіралі; h – крок спіралі; l - довжина дроту в нагрівальному елементі; $D_{сп}$ – діаметр спіралі.

3.4. Нагрівальні дроти та кабелі

Спеціальні, проводи та кабелі, будучи різновидом нагрівальних елементів при електронагріванні опором, мають струмопровідну жилу зі сталі або ніхрому, покриту зверху спеціальною ізоляцією.

Дріт використовують в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва, в яких робоча температура не перевищує 40 ° С і застосування інших нагрівальних пристроїв утруднено за умовами забезпечення електробезпеки або з інших причин; для обігріву ґрунту і повітря в спорудах закритого ґрунту, статі в тваринницьких і птахівничих приміщеннях, водопроводів на вводі в виробничі приміщення і т.д.

Нагрівальні дроти ПОСХП, ПОСХВ і ПОСХВТ мають сплетену сталеву струмоведучу жилу і поліетиленову або полівинілхлоридну ізоляцію. В проводі ПНВСВ підвищеної надійності, крім того, є додаткова ізоляція з фторопластовою стрічкою, екран зі сталевих дротиків діаметром 0,3 мм і зовнішня ПВХ оболонка. Така конструкція нагрівального дроту дозволяє в 4...5 разів збільшити термін його служби.

На відміну від проводів нагрівальні кабелі можуть мати до трьох струмопровідних жил з ніхрому. Їх ізолюють азбестом, силіконом, кристалічним оксидом магнієм, кремнієм з органічної гуми, периклазою і іншими теплостійкими матеріалами.

Зовні кабель покритий оболонкою зі свинцю, алюмінію, міді, нержавіючої сталі або полівінілхлоридного пластика, що оберігає його від впливу зовнішнього середовища і механічних пошкоджень. У порівнянні з нагрівальними проводами кабелі мають великі питомі, потужності і робочі температури. Так, кабелі із зовнішньою оболонкою з нержавіючої сталі і магнезитовою ізоляцією розраховані на температуру до 400°С. У деяких випадках їх зручніше використовувати, ніж тени, так, як при монтажі кабелі можна вільно згинати, надаючи їм необхідну форму без порушення їх цілісності.

Промисловість випускає нагрівальні кабелі типів КНРПВ і КНРПЕВ з однієї і двома струмопровідними жилами і оболонкою з полівінілхлоридного пластика. Кабелі розраховані на номінальну напругу 220 В і стійкі до впливу температури навколишнього середовища від - 50 до + 60 °С. Електричний опір ізоляції кабелю довжиною 1 км становить 100 МОм.

Нагрівальні пристрої з проводів і кабелів виконують фіксованим монтажем. Залежно від технологічного призначення вони можуть бути покладені зигзагоподібно або у вигляді паралельних ниток безпосередньо в середовищі, що нагрівається (грунт, бетон підлога і ін.), підвішені на ізоляторах (при обігріві повітря в парниках і теплицях), прокладені в трубах (обігрів).

Вихідні дані для розрахунку таких нагрівальних пристроїв: технологічно необхідна потужність $P_{вуст}$, Вт, напруга U, В, харчування нагрівачів. Завданням розрахунку є визначення довжини LC, м, проводу або кабелю в одній нагрівальної секції і числа n секцій.

Розрахунок виконують у такій послідовності. Задається робоча питома потужність проводу або кабелю довжиною 1 м за умовою

$$p_{1роб} = p_{1доп} \tag{154}$$

де $p_{1роб} = p_{1доп}$ – робоча питома і допустима питома потужності проводу або кабелю довжиною 1 м, Вт/м.

Допустима питома погонна потужність $p_{1доп}$ залежить від умов роботи нагрівальних елементів. При обігріві підлог тваринницьких приміщень і ґрунту в спорудах захищеного ґрунту вона становить для проводів ПОСХВ і ПОСХП близько 11 Вт / м, а для проводів ПОСХВТ і ПНВСВ – 16 Вт/м.

За технологічно необхідної загальної потужності $P_{вуст}$ пристрою і прийнятим значенням $p_{1раб}$ знаходять загальну довжину, м, нагрівального дроту

$$l = p_{уст}/p_{1роб} \tag{155}$$

Прийнятому значенням потужності $p_{1раб}$ відповідає напруга, В, що припадає на нагрівач довжиною 1 м.

$$U_1 = \sqrt{p_{1роб}R_1} \tag{156}$$

де R_1 - опір приводу або кабелю довжиною 1 м, Ом.

Довжина нагрівальної секції, м, підключеної до живлячої напруги U ,

$$l_c = U/U_1 \quad (157)$$

а число секцій

$$n = l/l_c \quad (158)$$

Число секцій n повинно бути цілим і кратним трьом, з тим щоб рівномірно завантажити фази мережі живлення нагрівальними секціями. Якщо це не вийшло відразу, то змінюють значення $p_{1раб}$ і повторюють весь розрахунок.

3.5. Схеми включення і регулювання потужності

Нагрівальні елементи електротермічних установок і пристроїв розраховують на певну потужність і певне напруження. Щоб забезпечити нормальний режим, нагрівальний елемент підключають до мережі живлення відповідної напруги. Кількість теплоти, що виділяється нагрівачем в одиницю часу, тобто його потужність, знаходять за рівнянням (129).

В процесі роботи електротермічних установок потужність електронагрівачів можна регулювати, змінюючи напругу і опір.

Найбільш просто потужність регулюють поступово, перемикаючи нагрівальні елементи на різні схеми. При цьому змінюються або число підключених до мережі елементів і їх загальний опір, або напруга на кожному з них.

У більшості елементів електротермічних установок застосовують стандартну напругу в електромережі.

Нагрівачі потужністю до 1 кВт зазвичай виконують однофазними, більшої потужності – трифазними.

Однофазні установки з регульованою потужністю мають два або більше нагрівальних елемента (секції) (Рисунок. 11, а). При використанні двох нагрівальних елементів потужність регулюють за рахунок переключення секцій, що включаються паралельно (максимальна потужність) або послідовно (мінімальна потужність). Середню потужність нагріву отримують при включенні однієї секції.

Якщо опір одного нагрівача одно R_{1H} , то при паралельному включенні n нагрівачів загальний опір нагрівального пристрою

$$R_1 = R_{1H}/n \qquad (159)$$

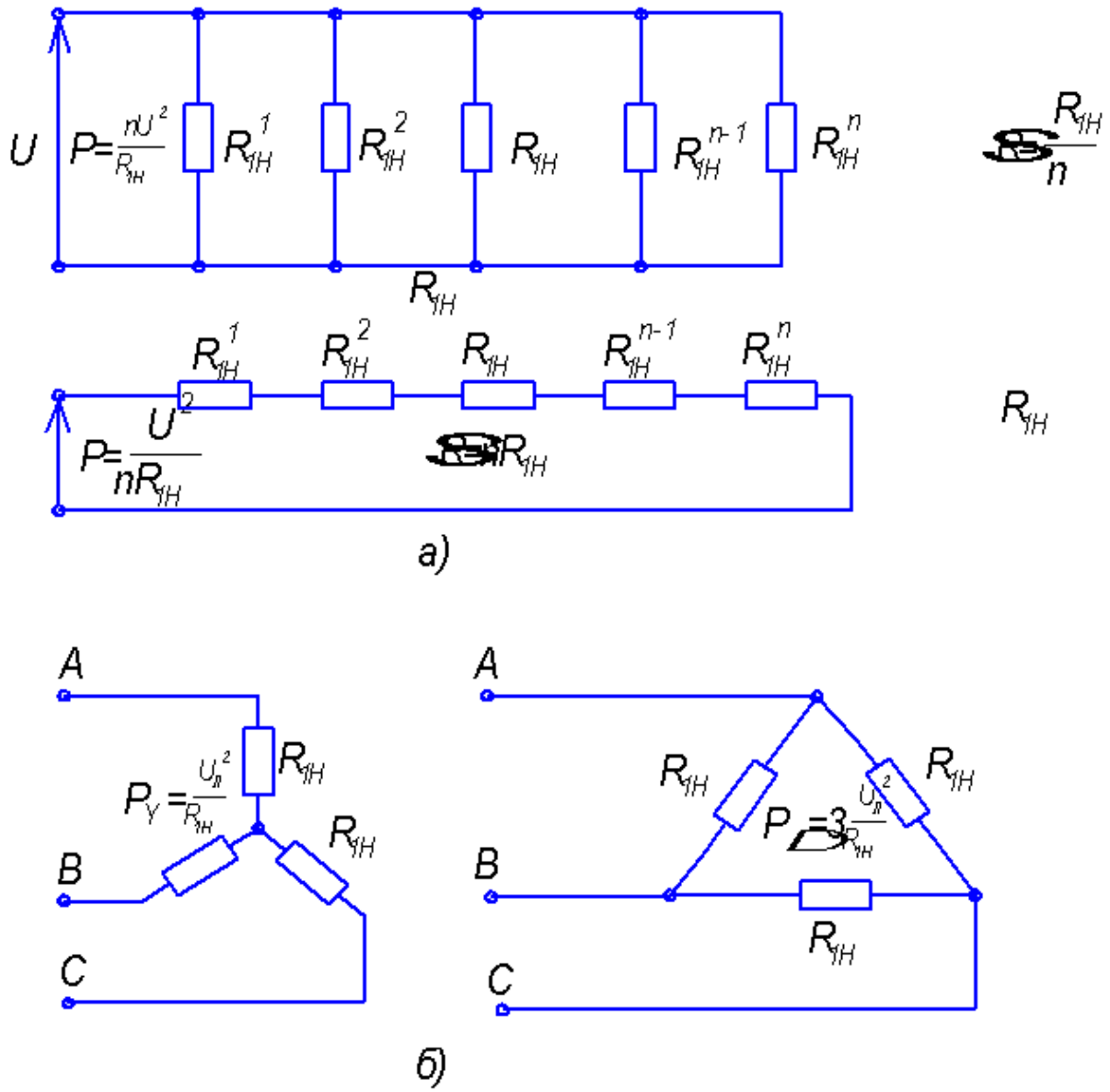

Рисунок. 11. Схеми включення нагрівальних секції: а) і б) – одно- і трифазних нагрівальних пристроїв

При включенні одного нагрівача повний опір пристрою

$$R_2 = R_{1H} \qquad (160)$$

При послідовному включенні *n* секцій повний опір нагрівального пристрою

$$R_3 = nR_{1H} \qquad (161)$$

Для розглянутих тут способів включення нагрівальних елементів потужність складе відповідно:

$$P_1 = U^2/R_1 = U^2 n/nR_{1H} \quad (162)$$

$$P_2 = U^2/R_2 = U^2/R_{1H} \quad (163)$$

$$P_3 = U^2/R_3 = U^2/nR_{1H} \quad (164)$$

Якщо прийняти потужність P_2 за одиницю, то співвідношення потужностей

$$P_1 : P_2 : P_3 = n : 1 : 1/n \quad (165)$$

Так, при n = 2 співвідношення потужностей

$$P_1 : P_2 : P_3 = 2 : 1 : 0{,}5 \quad (166)$$

тобто діапазон регулювання потужності дорівнює 4.

Для рівномірного завантаження мережі живлення в трифазних індукційних електротермічних пристроях число секцій кратно трьом.

При включенні трифазних приймачів в симетричну зірку або трикутник (Рисунок. 11, б) потужність визначають за формулою

$$P = 3P_ф = 3U_ф l_Ф cos\varphi \quad (167)$$

де $P_ф$ – потужність нагрівальних елементів однієї фази, Вт; $U_ф$ – фазна напруга, В; $I_ф$ –ток фази, А; cosφ коефіцієнт потужності для нагрівальних елементів, що володіють активним опором (cos φ = 1).

Для трифазного симетричною системи справедливі наступні співвідношення між фазними і лінійними напругами і струмами:

для симетричною зірки

$$l_л = l_ф \qquad U_л = \sqrt{3U_ф}, \quad (168)$$

для симетричного трикутника

$$U_л = U_ф \qquad l_л = l_ф, \quad (169)$$

При наявності трьох секцій, кожна з яких розрахована на лінійну напругу $U_л$, нагрівальні елементи можуть бути з'єднані в зірку або трикутник.

При з'єднанні секції зіркою потужність нагрівальних елементів

$$P_\tau = 3U_ф l_ф = 3U_ф^2/R_{lH} = U_л^2/R_{lH} \quad (170)$$

де R_{lH} - опір одного нагрівача, Ом.

При з'єднанні секції трикутником потужність нагрівальних елементів

$$P_\Delta = 3U_ф l_ф = 3\frac{U_л^2}{R_{lH}} \quad (171)$$

Ставлення потужностей $P_\Delta : P_\tau$ складе

$$P_\Delta : P_\tau = 3U_ф l_ф = 3\frac{U_л^2}{R_{lH}} : \frac{U_л^2}{R_ф} = 3:1 \quad (172)$$

Таким чином, перемиканням з зірки на трикутник можна отримати загальну потужність нагрівальних елементів в співвідношенні 1:3.

Змінюючи схему їх включення, потужність можна регулювати східчасто, що прийнятно в тих випадках, коли за умовами технологічного процесу не потрібно точну підтримку температури.

При плавному регулюванні потужності зміною напруги, що живить електротермічну установку, можна більш точно підтримувати температуру.

Контрольні питання

1. Розкажіть про будову і області застосування електрокалориферних установок серій СФОО і СФОЦ.

2. Як регулюють теплову потужність установки і температуру повітря на виході калорифера?

3. Чому калорифер встановлюють з боку всмоктувального патрубка вентилятора?

4. Яка максимальна температура повітря допускається в опалювальних калорифери?

5. Як зміняться споживана потужність і температура поверхні ТЕНів при зупинці вентилятора?

6. Яка блокування передбачена у схемі управління електрокалоріферною установкою?

7. Поясніть роботу електрокалоріферної установки в автоматичному режимі.

8. До яких наслідків може привести непрацюючий вентилятор?

9. Чим вимірюють швидкість повітря в калорифері?

10. Як буде працювати установка, якщо зміниться фазировка в мережі?

11. Як виявити несправні ТЕНи в електрокалорифері?

12. У яких випадках виходять з ладу запобіжники ТЕНів?

13. Розкажіть про переваги ТЕНів, порівнюючи їх з іншими нагрівачами.

14. За якими параметрами вибирають ТЕНи?

15. Якими властивостями повинна володіти матеріал наповнювача?

16. Від чого залежить питома потужність ТЕНа?

17. Чому при включенні водонагрівача без води ТЕНи виходять з ладу?

18. Структура умовного позначення ТЕНа.

19. Яким має бути опір ізоляції ТЕНів протягом всього терміну експлуатації?

20. Що необхідно виконати, якщо опір ізоляції ТЕНа не відповідає нормі?

21. Від чого залежать параметри трубки ТЕНа?

22. Переваги і недоліки елементних водонагрівачів.

23. Області використання елементних водонагрівачів.

24. Розкажіть про будову та принцип дії акумуляційного водонагрівача.

25. Перерахуйте основні правила техніки безпеки при використанні елементних водонагрівачів та особливості їх експлуатації.

26. Де встановлюються датчики контролю температури води водонагрівачів?

27. Перерахуйте с.-х. технологічні процеси, виконання яких пов'язане з використанням електроводонагрівачі.

28. Які переваги електроводонагрівачі перед вогневими водонагрівачами?

29. У яких режимах можуть працювати електроводонагрівачі?

30. Чим відрізняються електродні водонагрівачі від елементних?

31. Розкажіть про будову та принцип роботи електродного нагрівача.

32. Чому в електродних водонагрівачах обмежуються щільність струму на електродах і напруженість поля між ними?

33. Коли на корпусі електродного водонагрівача з'являється найбільший потенціал по відношенню до землі?

34. Як знаходять питомий електричний опір води дослідним шляхом?

35. Як регулюється потужність в електродному водонагрівачі?

36. Від яких параметрів залежить ККД електродного нагрівача?

37. Назвіть переваги і недоліки електродного водонагрівача з системою автоматичного регулювання постійної потужності нагріву в порівнянні з іншими електродними нагрівачами.

38. Принцип дії електродного водонагрівача з системою автоматичного регулювання постійної потужності нагріву.

39. Де застосовується електродний нагрів?

40. Назвіть типи електродних систем.

41. Яким недоліком володіє установка зі зміною напруги на електродної системі?

42. Які установки є найбільш перспективними?

43. Принцип дії саморегулюючих нагрівальних пристроїв.

Тема 4. Індукційний нагрів в АПК

4.1. Особливості індукційного нагріву в АПК

Індукційний нагрів в АПК здійснюється в змінному магнітному полі. Провідники, поміщені в поле, нагріваються вихровими струмами, що наводяться в них за законами електромагнітної індукції.

Інтенсивний нагрів можна отримати лише в магнітних полях високої напруженості і частоти, які створюються спеціальними пристроями – індукторами (індукційними нагрівачами), що живляться від мережі або індивідуальних генераторів струмів високої частоти (Рисунок. 12). Індуктор є як би первинною обмоткою повітряного трансформатора, вторинною обмоткою якого служить тіло, що нагрівається.

Залежно від застосовуваних частот установки індукційного нагріву розділяються таким чином:

а) низькою (промислової) частоти (50 Гц);

б) середньої (підвищеної) частоти (до 10 кГц);

в) високої частоти (понад 10 кГц).

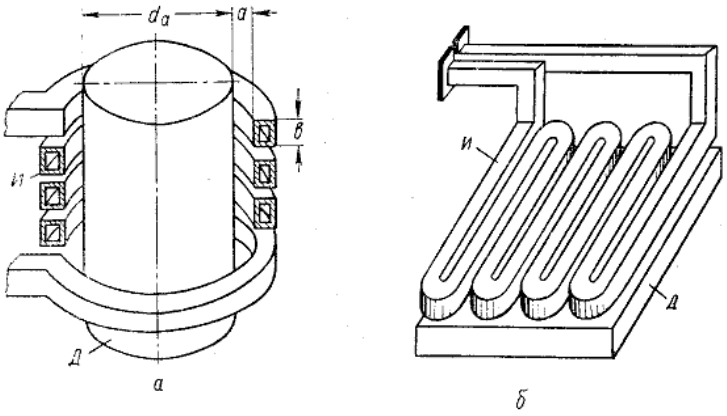

Рисунок. 12. Індуктори:
а - циліндричний; б - петлевий для нагріву плоских деталей; І - індуктор; Д - деталь

Розподіл індукційного нагріву в АПК по частотних діапазонах диктується технічними і технологічними міркуваннями. Фізична сутність і загальні кількісні закономірності для всіх частот однакові і ґрунтуються на уявленнях, про поглинання провідним середовищем енергії електромагнітного поля.

Частота робить істотний вплив на інтенсивність і характер нагріву. При частоті 50 Гц і напруженості магнітного поля 3000–5000 А/м питома потужність нагріву не перевищує 10 Вт/см^2, а при високочастотному (ВЧ) нагріванні потужність досягає сотень і тисяч Вт/см^2 . При цьому розвиваються температури, достатні для плавлення тугоплавких металів.

Разом з тим, чим вище частота, тим менше глибина проникнення струмів в метал і, отже, тонше нагрівається шар, і навпаки. На високих частотах здійснюють поверхневий нагрів. Знижуючи частоту і збільшуючи тим самим глибину проникнення струму, можна здійснити глибинний або навіть наскрізний нагрів, однаковий по всьому перетину тіла. Таким чином, вибираючи частоту, можна отримати необхідний за технологічних умов характер нагріву і його інтенсивність. Можливість нагріву виробів практично на будь-яку товщину – одне з основних переваг індукційного нагріву, який широко використовується для поверхонь загартування деталей і інструменту.

Поверхневе зміцнення після індукційного нагріву значно підвищує зносостійкість виробів в порівнянні з тепловою обробкою в печах. Індукційний нагрів успішно застосовується також для плавки, термічної обробки, деформації металів і в інших процесах.

4.2. Індуктори (індукційні нагрівачі)

Індуктор – це робочий елемент установки індукційного нагріву. Ефективність нагрівання тим вище, чим ближче вид випускаючої індуктором електромагнітної хвилі до форми

поверхні, яка нагрівається. Вид хвилі (плоска, циліндрична та ін.) визначається формою індуктора.

Конструктивне оформлення індукторів залежить від форми тіл, що нагріваються, цілей і умов нагрівання. Найпростіший індуктор є ізольованим провідником, який поміщений всередину металевої труби, витягнутий або згорнутий в спіраль. При пропущенні по провіднику струму промислової частоти в трубі наводяться вихрові струми, які гріють її. У сільському господарстві були спроби використовувати цей принцип для обігріву ґрунту в закритому гранті, сідало для птиці та ін.

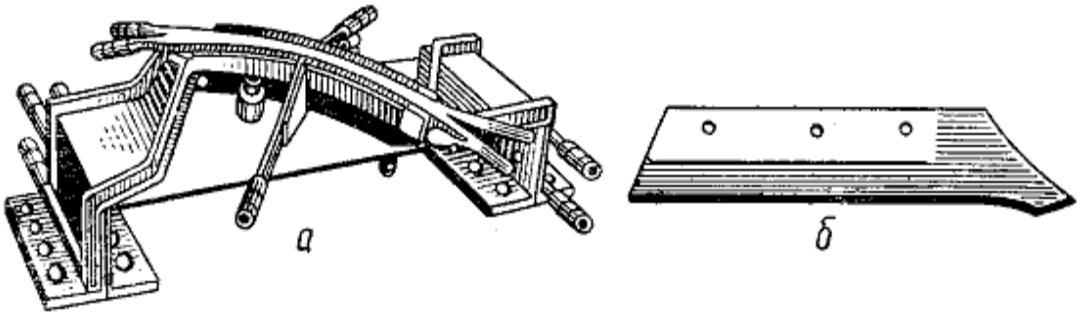

Рисунок. 13. Індуктор для загартування лемішів:
а - індуктор; б - леміш

В індукційних водонагрівачах і пастеризаторах молока (роботи по ним не вийшли поки за рамки експериментальних зразків) індуктори виконують за типом статорів трифазних електродвигунів. Всередину індуктора поміщений металевий посуд циліндричної форми. Магнітне поле, що обертається (або пульсуюче при однофазному виконанні), створюване індуктором, наводить в стінках судини вихрові струми і нагріває їх. Від стінок тепло передається і знаходиться в посудині рідини.

При індукційному сушінні деревини штабель дошок перекладають металевими сітками і поміщають (закочують на спеціальному візку) всередину циліндричного індуктора з провідників великого перерізу, намотаних на каркас з ізоляційного матеріалу. Дошки нагріваються від металевих сіток, в яких індукуются вихрові струми.

Наведені приклади пояснюють принцип установок непрямого індукційного нагріву. До недоліків таких установок відносяться низькі енергетичні показники і мала інтенсивність нагріву. Низькочастотний індукційний нагрів досить ефективний при прямому нагріві масивних металевих заготовок і певному співвідношенні між їх розмірами і глибиною проникнення струмів.

Індуктори високочастотних установок виробляють неізольованими, вони складаються з двох основних частин – індукуючого дроту, за допомогою якого створюється змінне магнітне поле, і струмопідводів для підключення індукуючого дроту до джерела електричної енергії.

Конструктивне виконання індуктора може бути вельми різноманітним. Для нагріву плоских поверхонь використовуються плоскі індуктори, циліндричних заготовок – циліндричні (соленоїдні) індуктори і (Рисунок. 12). Індуктори можуть мати складну форму (Рисунок. 13), обумовлену необхідністю концентрації електромагнітної енергії в потрібному напрямку, підведення охолоджуючої і закалочної води та ін.

Для створення полів високої напруженості по індукторам пропускають великі струми, які обчислюються сотнями і тисячами ампер. З метою зниження втрат індуктори виготовляють з можливо малим активним опором. Незважаючи на це, вони все ж інтенсивно нагріваються як власним струмом, так і за рахунок теплопередачі від заготовок, тому їх обладнають примусовим охолодженням. Індуктори зазвичай виконують з мідних трубок круглого або прямокутного перерізу, всередині яких пропускається проточна вода для охолодження.

4.3. Енергетичні співвідношення системи індуктор – виробка

Питома поверхнева потужність. Випромінювана індуктором електромагнітна хвиля падає на металеве тіло і, поглинаючись в ньому, викликає нагрівання. Потужність потоку енергії, що протікає через одиницю поверхні тіла, визначається формулою:

$$P_{\Delta} = \frac{1}{2} \frac{k}{\sigma} H_0^2 e^{-2kz} \qquad (173)$$

Питому потужність на поверхні тіла можна отримати, підставивши, в наведене вираз z = 0; $\frac{1}{\sigma} = \rho$ і значення k з формули

$$z_a = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}} \qquad (174)$$

з урахуванням виразу

$$z_a = 503 \sqrt{\frac{p}{\mu f}} \qquad (175)$$

Після перетворення отримуємо (Вт / м ^{2})

$$\Delta P \approx 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu f} \qquad (176)$$

У практичних розрахунках користуються розмірністю ΔP в Вт / см ^{2} , тоді

$$\Delta P \approx 10^{-4} H_0^2 \sqrt{\rho \mu f} \qquad (177)$$

де H_0 - в А / см; r - в Ом × см.

Величина $\sqrt{\rho \mu f}$ називається коефіцієнтом поглинання потужності. Виразимо ΔP через ампер-витки індуктора. З відомим наближенням напруженість магнітного поля H_0 можна представити у вигляді добутку діючого значення струму індуктора I і числа витків w_0 на 1 см його висоти:

$$H_0 = \sqrt{2 l \omega_0} \qquad (178)$$

Підставивши отримане значення H_0 в формулу, отримаємо

$$\Delta P \approx 2\cdot 10^{-4}(l\omega_0)^2\sqrt{\rho\mu f} \qquad (179)$$

Таким чином, потужність, що виділяється в виробі, пропорційна квадрату ампер-витків індуктора і коефіцієнту поглинання потужності. При незмінній напруженості магнітного поля інтенсивність нагріву тим більше, чим більше питомий опір r , магнітна проникність матеріалу m і частота струму f .

Формула (179) справедлива для плоскої електромагнітної хвилі. При нагріванні циліндричних тіл в соленоїдних індукторах картина поширення хвиль ускладнюється. Відхилення від співвідношень для плоскої хвилі тим більше, чим менше відношення r/z_a , де r – радіус циліндра, z_a – глибина проникнення струмів.

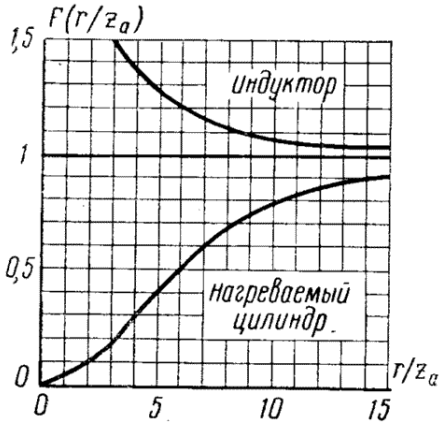

Рисунок. 14. Функції Берча для обчислення потужності у поверхні індуктора, що виділяється в циліндрі, що нагрівається, і індукторі

У практичних розрахунках все ж користуються простою залежністю (77), вводячи в неї поправочні коефіцієнти – функції Берча, що залежать від ставлення r / z_a (Рисунок. 14). Тоді

$$\Delta P \approx 2\cdot 10^{-4}(l\omega_0)^2\sqrt{\rho\mu f}F(r/z_a) \qquad (180)$$

К.К.Д. індукційного нагріву. З відомим наближенням можна вважати, що напруженість магнітного поля у поверхні заготовки і провідників індуктора однакова (в дійсності вона вище). При такому допущенні активну потужність, що виділяється в індукторі (потужність втрат), можна визначати за формулою, аналогічною

(78). Позначаючи величини, що відносяться до виробу і індуктора, відповідно індексами "а" і "і", маємо

$$\Delta P_a \approx 2\cdot 10^{-4}(l\omega_0)^2\sqrt{\rho_a\mu_a f_a}F_a(r_a/z_a) \qquad (181)$$

$$\Delta P_{\text{i}} \approx 2\cdot 10^{-4}(l\omega_0)^2\sqrt{\rho_{\text{i}}\mu_{\text{i}} f_{\text{i}}}F_{\text{i}}(r_{\text{i}}/z_a) \qquad (182)$$

Беручи висоту вироби та індуктора однаковою, візьмемо відношення повних потужностей P_a і P_i, які пропорційні в цьому випадку радіусів r_a і r_i, де r_i - внутрішній радіус циліндричного індуктора:

$$\frac{P_a}{P_{\text{i}}} = \frac{r_a\sqrt{\rho_a\mu_a}F_a(r_a/z_a)}{r_{\text{i}}\sqrt{\rho_{\text{i}}}F_{\text{i}}(r_{\text{i}}/z_a)} \qquad (183)$$

Формула (81) справедлива для суцільного індуктора без зазорів між витками. При наявності зазорів втрати в індукторі зростають. При зростанні частоти функції $F_a(r_a, z_a)$ і $F_i(r_i, z_a)$ прагнуть до одиниці (рис. 43), а відношення мощностей – до межі

$$lim(P_a/P_{\text{i}})_{f\to\infty} = \frac{r_a}{r_u}\sqrt{\frac{\rho_a\mu_a}{\rho_u}} \qquad (184)$$

Формула дозволяє отримати граничне значення К. К. Д. Індукційного нагріву для соленоїдного індуктора і циліндра

$$\eta_{max} = \frac{1}{1+\frac{r_u}{r_a}\sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_a\mu_a}}} \qquad (185)$$

З виразу (185) випливає, що К. К. Д. Зменшується зі збільшенням повітряного зазору і питомого опору матеріалу індуктора. Тому індуктори виконують з масивних мідних трубок або шин. Як випливає з виразу (83) і рисунку (Рисунок. 14), значення К. К. Д. Наближається до своєї межі вже при $r / z_a > 5 \div 10$. Це дозволяє знайти частоту, що забезпечує досить високий К. К. Д. Скориставшись наведеними нерівністю і формулою (15) для глибини проникнення z_a, отримаємо

$$f > (0{,}6 \div 2{,}5)10^1\frac{\rho}{\mu r^2} \qquad (186)$$

Слід зазначити, що прості та наочні залежності справедливі лише для обмеженого числа порівняно простих випадків індукційного нагріву.

Коефіцієнт потужності індуктора. Коефіцієнт потужності нагрівального індуктора визначається співвідношенням активного і індуктивного опорів системи індуктор – виріб. При високій частоті активну і внутрішнє індуктивне опору вироби рівні, так як фазовий кут між векторами $\bar{E}$ і $\bar{H}$ становить 45 ° і $|\Delta P| = |\Delta Q|$. Отже, максимальне значення коефіцієнта потужності

$$cos\varphi = \frac{\Delta P}{\sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \qquad (1877)$$

Однак до внутрішньої індуктивності вироби додається ще індуктивність, обумовлена наявністю магнітного потоку в повітряному зазорі між індуктором і виробом. Тому дійсне значення cos j завжди менше 0,707 і при нагріванні високими частотами обчислюється за формулою

$$cos\varphi = \frac{\mu z_a}{\sqrt{2a}} = \frac{503\sqrt{\rho\mu}}{\sqrt{2a}\sqrt{f}} \qquad (188)$$

де a - повітряний зазор між індуктором і виробом, м.

Таким чином, коефіцієнт потужності залежить від електричних властивостей матеріалу виробу, повітряного зазору і частоти. Зі збільшенням повітряного зазору зростає індуктивність розсіювання і коефіцієнт потужності знижується.

Коефіцієнт потужності обернено пропорційний кореню квадратному з частоти, тому необґрунтоване завищення частоти знижує енергетічні показники установок. Завжди слід прагнути до зменшення повітряного зазору, однак тут існує межа, обумовлений пробивний напруженістю повітря. В процесі нагрівання коефіцієнт потужності не залишається постійним, так як r і m (для феромагніти) змінюються зі зміною температури. В реальних умовах коефіцієнт потужності установок індукційного нагріву рідко перевищує значення 0,3, знижуючись до 0,1–0,01. Для розвантаження мереж і генератора від реактивних струмів і

паралельно індуктора зазвичай включають компенсуючі конденсатори.

4.4. Режими і оптимальна частота високочастотного індукційного нагріву

Основними параметрами, що характеризують режими індукційного нагріву, є частота струму і ККД. В залежності від застосовуваних частот умовно розрізняють два режими індукційного нагріву: глибинний нагрів і поверхневий.

Глибинний нагрів ("малими частотами") здійснюється при такій частоті f коли глибина проникнення $z_а$ приблизно дорівнює товщині нагрівається (гартувати) шару $x_{до}$ (Рисунок. 15, а). Нагрівання відбувається відразу на всю глибину шару $x_{до}$ швидкість нагріву вибирають такий, щоб передача тепла теплопровідністю в глиб тіла була незначною.

Оскільки в цьому режимі глибина проникнення струмів $z_а$ порівняно велика ($z_а \gg x_{до}$) , то, згідно з формулою:

$$z_a = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \qquad (189)$$

частота струму індуктора повинна бути відносно низькою ("малої"). Нагрівання відразу всього шару $x_{до}$ вимагає порівняно великої потужності генератора. Такий режим доцільний при поточному виробництві в умовах високого завантаження обладнання.

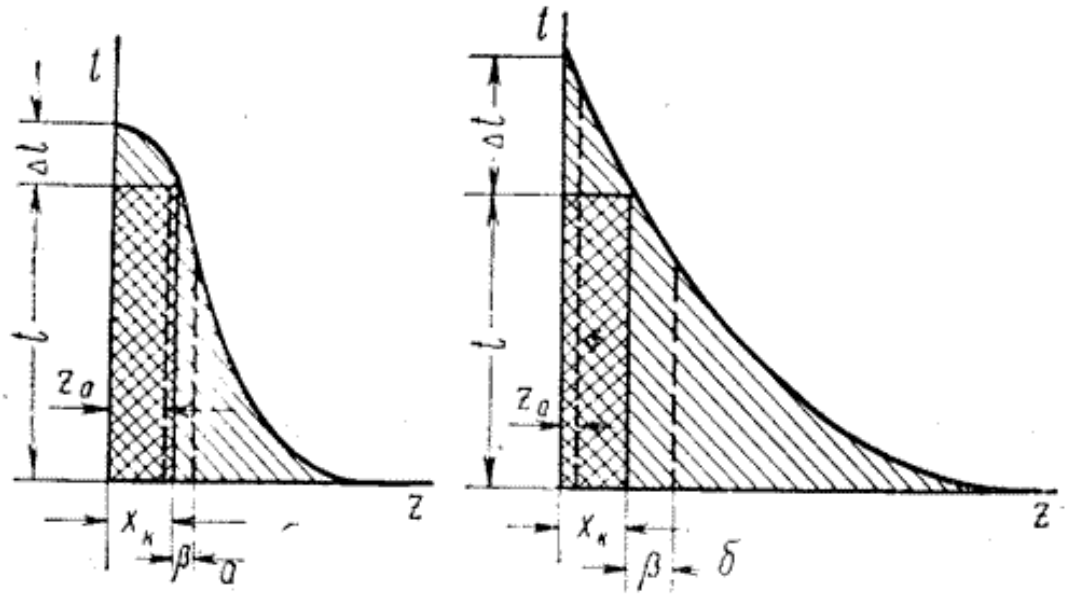

Рисунок. 15. Розподіл температури від поверхні в глиб тіла при глибинному (а) і поверхневому (б) індукційному нагріванні

Поверхневий нагрів ("великими частотами") проводять на порівняно високих частотах. При цьому глибина проникнення струмів $z_а$ значно менше товщини шару, що нагрівається $x_{до}$ (Рисунок. 15.б). Прогрів на всю товщину $x_{до}$ відбувається за рахунок теплопровідності металу. При нагріванні з цього режиму потрібні менші потужності генератора (Рисунок. 15) корисна потужність пропорційна заштрихованим площинам, які мають подвійне штрихування), але час нагрівання і питома витрата електроенергії зростає. Останнє пов'язано з прогріванням за рахунок теплопровідності глибинних шарів металу. К. К. Д. нагріву, пропорційний відношенню площ з подвійним штрихуванням до всієї площі, обмеженої кривою t_i осями координат, у другому випадку нижче. Разом з тим слід зазначити, що прогрів до певної температури шару металу товщиною b , що лежить за шаром гарту і званого перехідним шаром, абсолютно необхідний для надійного зв'язку загартованого шару з основним металом. При поверхневому нагріванні цей шар товщі і зв'язок надійніше.

При значному зниженні частоти нагрів стає взагалі неможливим, так як глибина проникнення буде дуже великою і поглинання енергії в виробі незначним.

Індукційним способом можна здійснювати як глибинний, так і поверхневий нагрів. При зовнішніх джерелах тепла (плазмовий нагрів, в електропечах опору) глибинний нагрів неможливий.

За принципом роботи розрізняють два види індукційного нагріву: одночасний і безперервно-послідовний.

При одночасному нагріванні площа індукуючого дроту, звернена до нагрівається поверхні виробу, приблизно дорівнює площі цієї поверхні, що дозволяє одночасно нагрівати все її ділянки. При безперервно-послідовному нагріванні виріб переміщається щодо індукуючого дроту, і нагрів окремих його ділянок відбувається в міру проходження робочої зони індуктора.

Вибір частоти. Досить високий ККД. Може бути отриманий лише при певному співвідношенні між розмірами тіла і частотою струму. Про вибір оптимальної частоти струму згадувалося вище. У практиці індукційного нагріву частоту вибирають по емпіричних залежностях.

При нагріванні деталей під поверхневу загартування на глибину $x_{до}$ (мм) оптимальну частоту (Гц) знаходять з наступних залежностей: для деталей простої форми (плоскі поверхні, тіла обертання):

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{k_k^2} \tag{190}$$

для деталей складної форми:

$$f = \frac{5 \cdot 10^5}{k_k^2} \tag{191}$$

При наскрізному нагріванні сталевих циліндричних заготовок діаметром d (мм) необхідну частоту визначають за формулою:

$$f = \frac{3 \cdot 10^{64}}{d} \tag{192}$$

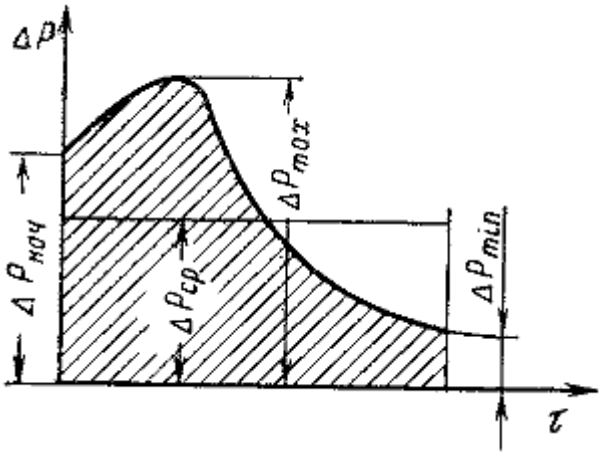

Рисунок. 16. Зміна питомої потужності, що виділяється в стали, в процесі нагрівання під загартування

В процесі нагрівання питомий опір металів r зростає. У феромагнетиків (залізо, нікель, кобальт і ін.) з підвищенням температури знижується значення магнітної проникності m . При досягненні точки Кюрі магнітна проникність феромагнетиків падає до 1, тобто вони втрачають свої магнітні властивості. Звичайна ж температура нагрівання під загартування 800-1000 °С, під обробку тиском 1000 – 1200 °С, тобто вище точки Кюрі. Зміна фізичних властивостей металів зі зміною температури призводить до зміни коефіцієнта поглинання потужності і питомої поверхневої потужності, що надходить в виріб в процесі нагрівання (Рисунок. 16). Спочатку внаслідок зростання r питома потужність ΔP збільшується і досягає максимального значення $\Delta P_{max} = (1,2 \div 1,5)\,\Delta P_{поч}$, а потім внаслідок втрати сталлю магнітних властивостей падає до мінімального ΔP_{min} . Для підтримки нагріву в оптимальному режимі (з досить високим ККД) Установки постачають пристроями узгодження параметрів генератора і навантаження, тобто можливістю регулювання режиму нагріву.

Якщо порівнювати наскрізний нагрів заготовок під пластичну деформацію індукційним і електроконтактним способом (обидва належать до прямого нагріву), то можна сказати, що по витраті електроенергії електроконтактні нагрів доцільний для довгих заготовок порівняно невеликого перерізу, а

індукційний - для короткомірних заготовок відносно великих діаметрів.

4.5. Розрахунок індукторів

Строгий розрахунок індукторів досить громіздкий і пов'язаний із залученням додаткових напівемпіричних даних. Ми розглянемо спрощений розрахунок циліндричних індукторів для поверхневого гарту, ґрунтуючись на отриманих вище залежностях.

Тепловий розрахунок. З розгляду режимів індукційного нагріву слід, що одну і ту ж товщину загартованого шару $x_{до}$ можна отримати при різних значеннях питомої потужності ΔP і тривалості нагріву t. Оптимальний режим визначається не тільки товщиною шару $x_{до}$, а й величиною перехідної зони b, що зв'язує загартований шар з глибинними шарами металу.

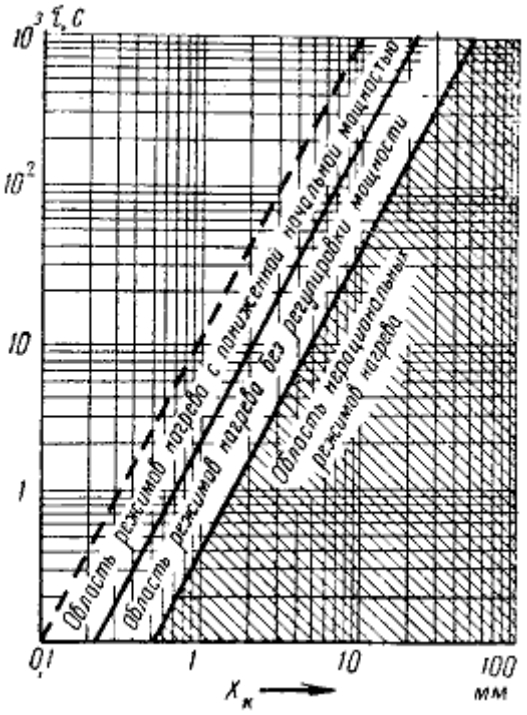

Рисунок. 17. Залежність тривалості нагріву від товщини гартувати шару

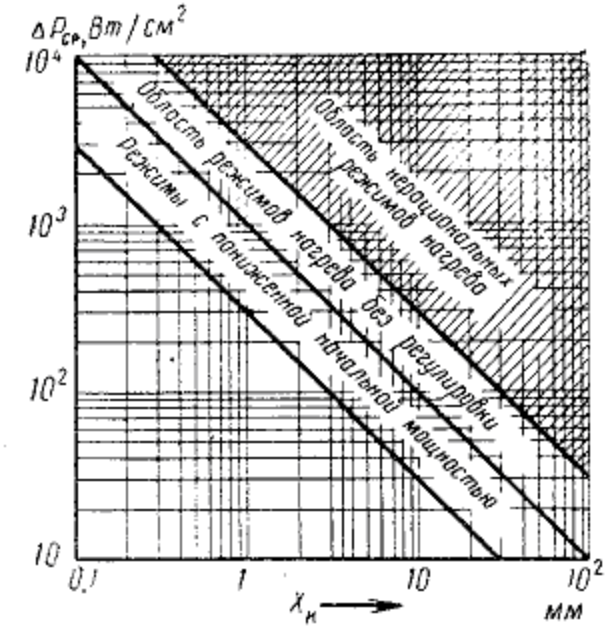

Рисунок. 18. Залежність середньої питомої потужності від товщини гартувати шару

При відсутності пристроїв регулювання потужності генератора характер зміни питомої потужності, споживаної сталевим виробом, зображений графіком, наведеним на рисунку (Рисунок. 16). В процесі нагрівання величина Рс змінюється і до кінця нагріву, після переходу через точку Кюрі, різко зменшується. Відбувається як би самовимкнення сталевого виробу, що забезпечує високу якість гарту без перепалу. При наявності регулюючих пристроїв потужність ΔP може бути рівною або навіть менше ΔP_{min} (Рисунок. 16), що дозволяє за рахунок подовження процесу нагріву зменшувати питому потужність, необхідну для даної товщини шару, який загартовують $x_к$.

Графіки режимів нагріву під поверхневе загартування для вуглецевих і малолегованих сталей при товщині перехідної зони, що становить 0,3 – 0,5 від шару, який загартовано, наведені на рисунку (Рисунок. 17 і Рисунок. 18).

Вибравши значення ΔP , неважко знайти потужність, що підводиться до індуктора,

$$P_{\text{i}} = \frac{\Delta P \pi d_a h_{\text{i}} 10^{-3}}{\eta_{\text{i}}} \quad (193)$$

де d_a – діаметр вироби, см;

h_i – висота індуктора (см), яка приймається на 10–20 % більше ширини гартувати шару;

η_{i} - ККД індуктора.

Коливальна потужність генератора

$$P_z = \frac{P_{\text{i}}}{P_{mp}} \quad (194)$$

де P_{mp} – К. К. Д. високочастотного (гартувального) трансформатора.

Потужність, споживана з мережі,

$$P_{\text{сп}} = \frac{P_z}{\eta_z} = \frac{P_{\text{i}}}{\eta_{mp}\eta_z} \quad (195)$$

де $h_г$ - ККД генератора (Рисунок. 19).

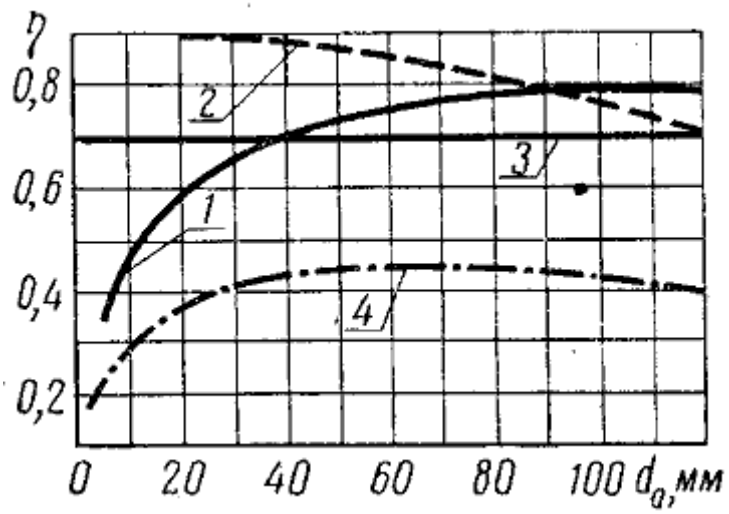

Рисунок. 19. Залежність К. К. Д. установок індукційного нагріву від діаметра заготовок: 1 – ККД індуктора; 2 – ККД високочастотного трансформатора; 3 – ККД генератора; 4 – загальний ККД

Потужність генератора (при номінальному завантаженні встановленої) може бути, відповідно до виразу

$$P_{\text{вст}} = Ga \quad (196)$$

визначена по питомій витраті електроенергії а (кВт-год/т) і продуктивності G (т/год):

$$P_{\text{сп}} = Ga \quad (197)$$

Питома витрата електроенергії (кВт-год/т) при індукційному нагріванні визначають за такими формулами:

для наскрізного нагріву

$$a_{\text{скв}} = \frac{\Delta i}{3{,}6(1-\beta)\eta_z\eta_{mp}\eta_z} \quad (198)$$

для поверхневого нагріву

$$a_{\text{пос}} = \frac{Dk_k S_3 \Delta i}{3{,}6M_3(1-\beta)\eta_z\eta_{mp}\eta_z\eta_{mn}} \quad (199)$$

де D_i – приріст тепловмісту заготовки в результаті нагрівання, кДж/кг;

D – щільність матеріалу заготовки, кг/м^3 ;

M_3 – маса заготовки, кг;

S_3 – поверхня гартувати шару, м^2 ;

b – угар металу (при індукційному нагріванні 0,5–1,5%);

$h_{\text{тп}}$ – ККД передачі тепла за рахунок теплопровідності всередині заготовки (при поверхневому загартуванню $h_{\text{тощо}}$ = 0,50).

Інші позначення пояснені вище.

Зразкові значення питомої витрати електроенергії при індукційному нагріванні: відпустк –120, гарт – 250, цементація – 300, наскрізний нагрів під механічну обробку – 400 кВт-год/т.

Електричний розрахунок. В основі електричного розрахунку лежить залежність (179). Розглянемо випадок, коли глибина проникнення z_a значно менше розмірів індуктора і деталі, а відстань а між індуктором і виробом мало в порівнянні з шириною індукуючого провідника b (Рисунок. 12). Для цього випадку індуктивність $L_з$ системи індуктор – виріб можна виразити за формулою

$$L_c = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \alpha l}{b} \quad (200)$$

де l - розгорнута довжина індукуючого провідника.

Тоді струм індуктора

$$l_i = \frac{U_i}{\omega L_c} = \frac{U_i b}{8\pi^2 10^{-9} \alpha l f} \quad (201)$$

Підставивши значення струму в формулу (180) і маючи на увазі, що

$$\frac{1}{b} = \omega_0 \quad (202)$$

після перетворення отримаємо

$$\Delta P = 3{,}18 \cdot 10^{10} \frac{U_i^2}{(\alpha l)^2} (\rho\mu)^{\frac{1}{2}} f^{\frac{3}{2}} \quad (203)$$

Формула (203) дає зв'язок між питомою потужністю, електричними параметрами і геометричними розмірами індуктора, фізичними характеристиками нагрівається металу. Беручи за функцію розміри індуктора, отримаємо

$$\alpha l = 1{,}78 \cdot 10^5 U_u \Delta P^{-\frac{1}{2}} (\rho\mu)^{\frac{1}{4}} f^{\frac{3}{4}} \quad (204)$$

Для вуглецевої сталі можна прийняти: в холодному стані r = 10^{-5} Ом×см, m = 100; в нагрітому до 800 °С стані r = 10^{4} Ом×см, m = 1. Тоді формула (204) прийме наступний вигляд:

для холодного стану

$$\alpha l = 3{,}18 \cdot 10^4 U_i \Delta P^{-\frac{1}{2}} f^{\frac{3}{4}} \quad (205)$$

для нагрітого стану

$$\alpha l = 1{,}78 \cdot 10^4 U_i \Delta P^{-\frac{1}{2}} f^{\frac{3}{4}} \quad (206)$$

Значення U_i при поверхневому загартуванню знаходиться в межах 50–100 В, а при наскрізному нагріванні 100–250 В. Формули (203), (204) дозволяють знайти будь-яку з вхідних в них величин при відомих інших.

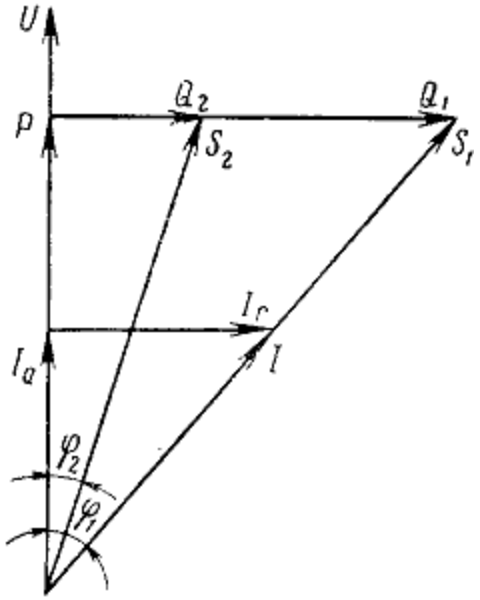

Рисунок.20. Векторна діаграма індуктора

Коефіцієнт потужності індуктора

$$cos\varphi = \frac{P_{\text{i}}}{U_{\text{i}} l} \tag{207}$$

зазвичай дуже низький. Для підвищення cos j до нормованого значення підключають конденсаторні батареї, реактивна потужність яких в 10 – 20 разів перевищує активну потужність установок.

Необхідну ємність компенсуючих конденсаторів при підключенні їх безпосередньо на вхід індуктора визначають наступним чином (Рисунок.20).

Компенсується реактивна потужність індуктора

$$\Delta Q_{\text{i}} = Q_1 - Q_2 = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \tag{208}$$

$$\Delta Q_k = \Delta Q_l = \omega C U_{\text{i}}^2 = 2\pi C U_{\text{i}}^2 \tag{209}$$

повинна дорівнювати реактивній потужності конденсаторів, звідки

$$C = \frac{P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{2\pi U_{\text{i}}^2} \tag{210}$$

де P – активна потужність індуктора, Вт;

U_{i} – напруга на індукторі, В;

f – частота, Гц.

При підключенні конденсаторів до первинного ланцюга високочастотного трансформатора ємність конденсаторів повинна бути збільшена для компенсації реактивності трансформатора і з'єднувальних провідників.

Приклад.

Розрахувати індуктор і вибрати високочастотну установку для поверхневого гарту циліндричних заготовок з вуглецевої сталі діаметром d_a = 30 мм і висотою h_a = 90 мм. Глибина шару гартування $x_к$ = 1 мм, напруга на індукторі U_i = 100 В. Знаходимо рекомендовану частоту за формулою (87):

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{1} = 5 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

Зупиняємося на найближчій із застосовуваних частот f = 67 кГц.

З графіка (Рисунок. 18) приймаємо Δ P = 400 Вт/см ^{2} .

За формулою (206) знаходимо αl для холодного стану:

$$\alpha l = 3{,}18 \cdot 10^4 \frac{100}{\sqrt{400}} \frac{1}{\sqrt[4]{(67 \cdot 10^3)^3}} = 38{,}2 \text{ см}^2$$

Приймаємо a = 0,5 см, тоді діаметр індуктора

$$d_u = 3 + 2 \cdot 0{,}5 = 4 \text{ см}$$

Довжина індукуючого провідника

$$l = \frac{38{,}2}{0{,}5} = 76{,}4 \text{ см}$$

Число витків індуктора

$$\omega = \frac{76{,}4}{3{,}14 \cdot 4} = 6 \text{ см}$$

Висота індуктора

$$h = (1{,}1 \div 1{,}2) \cdot 9 \approx 10 \text{ см}$$

Потужність, що підводиться до індуктора, по

$$P_{\text{i}} = \frac{400 \cdot 3{,}14 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{0{,}66} = 57 \text{ кВт}$$

де 0,66 – ККД індуктора (Рисунок. 19).

Коливальна потужність генератора

$$P_z = \frac{P_{\text{i}}}{\eta_{mp}} \frac{57}{0{,}88} = 64{,}8 \text{ кВт}$$

Вибираємо високочастотну установку ЛПЗ-2-67М, що має коливальну потужність 63 кВт і робочу частоту 67 кГц.

4.6. Генератори струмів високої частоти

У техніці індукційного нагріву використовуються струми низької (промислової) частоти 50 Гц, середньої частоти 150-10 000 Гц і високої частоти від 60 кГц до 100 МГц.

Струми середньої частоти отримують за допомогою машинних генераторів або статичних перетворювачів частоти. У діапазоні 150-500 Гц використовуються генератори звичайного синхронного типу, а вище (до 10 кГц) – машинні генератори індукторного типу.

Останнім часом машинні генератори витісняються більш надійними статичними частоти, виконуваними на трансформаторах і тиристорах.

Токи високої частоти від 60 кГц і вище отримують виключно за допомогою лампових генераторів. Установки з ламповими генераторами використовуються для виконання різноманітних операцій термічної обробки, поверхневого гарту, плавки металів та ін.

Не торкаючись теорії питання, викладається в інших курсах, розглянемо лише деякі особливості генераторів для нагріву.

Нагрівальні генератори виконуються, як правило, з самозбудженням (автогенератори). У порівнянні з генераторами незалежного збудження вони простіше по влаштуванню і мають кращі енергетичні та економічні показники.

Схеми лампових генераторів для нагріву принципово не відрізняються від радіотехнічних, але мають деякі особливості. Від цих схем не потрібно сувора стабільність частоти, що помітно їх спрощує. Принципова схема найпростішого генератора для індукційного нагріву наведена на русунку (Рисунок. 21).

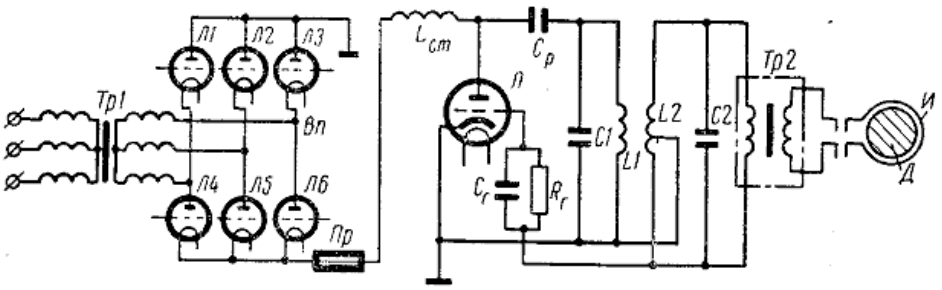

Рисунок. 21. Принципова електрична схема лампового автогенератора для індукційного нагріву: ТР$_1$ - трансформатор анодний; б $_п$ - випрямляч на тиратронах; П$_з$ - запобіжник; Lст - дросель анодний; Л - лампа генераторна; З $_р$ - конденсатор розділовий; Сг, Rг - конденсатор і опір грідліка; C$_1$, L$_1$ - конденсатор і індуктивність анодного контуру; L$_2$ - котушка зв'язку; C$_2$ - конденсатор нагрівального контуру; ТР$_2$- високочастотний трансформатор; І - індуктор; Д - деталь

Основним елементом схеми є генераторна лампа. У нагрівальних генераторах найчастіше використовуються трьохелектродні лампи, які в порівнянні з тетродами і пентодами простіше забезпечують достатню надійність і стійкість генерації. Навантаженням генераторної лампи служить анодний коливальний контур, параметри якого індуктивність L і ємність C підбираються з умови роботи контуру в резонанс на робочій частоті:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{211}$$

Для власної частоти еквівалентний резонансний опір контуру R $_a$ є чисто активним

$$R_a = \frac{L}{RC} \tag{212}$$

де R – приведений опір втрат контуру.

Параметри контуру R , L, C визначаються з урахуванням змін, внесених електрофізичними властивостями тіл, що нагріваються.

Харчування анодних ланцюгів генераторних ламп здійснюється постійним струмом від випрямлячів, зібраних на тиратронах або газотронах (Рисунок. 21). Харчування змінним струмом з економічних міркувань застосовується тільки для малих потужностей (до 5 кВт). Вторинна напруга силового (анодного) трансформатора, яка живить випрямляч, становить 8–10 кВ, випрямлена напруга 10–13 кВ.

Незгасаючі коливання в автогенераторі виникають при наявності достатнього позитивного зворотного зв'язку сітки з контуром і виконанні певних умов, що зв'язують параметри лампи і контуру.

Коефіцієнт зворотного сіткового зв'язку

$$k_c = \frac{\overline{U}_c}{\overline{U}_k} = \frac{\overline{U}_c}{\overline{U}_a} \tag{213}$$

повинен відповідати наступним аналітичним умовам самозбудження автогенератора:

$$k_c = D + \frac{1}{s_д R_a} \tag{214}$$

де $U_с$, $U_к$, $U_а$ – напруги відповідно на сітці, коливальному контурі і аноді генераторної лампи;

D – проникність лампи;

$s_д$ - динамічна крутизна анодно-сіткової характеристики лампи.

Зворотній сіткова зв'язок в генераторах для індукційного нагріву виконується найчастіше за трехточною схемою, коли сіткове напруга береться від частини індуктивності анодного або нагрівального контуру. На рисунку (Рисунок. 21) напруга на сітку подається від частини витків котушки зв'язку L_2, яка представляє собою елемент індуктивності нагрівального контуру.

Нагрівальні генератори на відміну від радіотехнічних найчастіше виконуються двоконтурними (Рисунок. 21) або навіть одноконтурні. Двоконтурні генератори легше налаштовуються в резонанс і більш стійкі в роботі.

В генераторах збуджуються коливання другого роду. Анодний струм протікає через лампу імпульсами, тільки протягом частини (1/2-1/3) періоду. Завдяки цьому знижується постійна складова анодного струму, зменшується нагрівання анода і підвищується ККД. Генератора. Форму імпульсів має і сітковий струм. Відсічення анодного струму (в межах кута відсічення q = 70-90°) здійснюється подачею на сітку постійного негативного зсуву, яке створюється падінням напруги на опорі грідліка $R_г$ при протіканні постійної складової сіткового струму.

Генератори для нагріву мають непостійну в процесі нагрівання навантаження, викликане зміною електрофізичних властивостей нагріваються матеріалів. Щоб забезпечити роботу генератора в оптимальному режимі, яке характеризується найбільшими значеннями віддається потужності і ККД., Установки обладнають пристроями узгодження навантаження. Оптимальний режим досягається підбором відповідного значення коефіцієнта зворотної сітчастої зв'язку $k_з$ і виконанням умов

$$R_a = R_e \tag{215}$$

де R_e – еквівалентний опір (оптимальне навантаження) генераторної лампи, залежне від типу і режиму лампи, напруги джерела живлення і коефіцієнта зворотного зв'язку $k_з$, що визначається за формулою

$$R_з = \frac{E_a - (U_c + E_c)}{l_{a_1}} \tag{216}$$

де E_a – напруга джерела живлення;

$E_з$ – постійний зсув на сітці;

I_{a1} – перша гармоніка анодного струму.

Для узгодження навантаження в схемах передбачається можливість регулювати резонансне опір контуру R_a і змінювати напругу на сітці $U_з$. Зміна цих величин досягається введенням в контур додаткових ємностей або індуктивністю і перемиканням

анодного, катодного та сіткового затискачів (щупів), що з'єднують контур з лампою.

4.7. Застосування індукційного нагріву

Установки індукційного нагріву вельми поширені на ремонтних заводах і підприємствах "Сільгосптехніки".

У ремонтному виробництві струми середньої і високої частоти застосовуються для наскрізного і поверхневого нагріву деталей з чавуну і сталі під загартування, перед гарячою деформацією (куванням, штампуванням), при відновленні деталей методами наплавлення і високочастотної металізації, при пайці твердими припаями і ін.

Особливе місце займає поверхневе загартування деталей. Можливість концентрації потужності в заданому місці деталі дозволяє отримувати поєднання зовнішнього загартованого шару з пластичністю глибинних шарів, що значно підвищує зносостійкість і стійкість до знакозмінних і ударних навантажень.

Переваги поверхневого гарту за допомогою індукційного нагріву полягають в наступному:

1) можливість гартувати деталі і інструмент на будь-яку необхідну товщину, при необхідності обробляючи тільки робочі поверхні;

2) значне прискорення процесу загартовування, що забезпечує високу продуктивність установок і знижує вартість термообробки;

3) зазвичай менша в порівнянні з іншими способами нагріву питома витрата енергії внаслідок вибірковості нагріву (тільки на задану глибину) і швидкоплинності процесу;

4) висока якість загартовування і зменшення браку;

5) можливість організації потокової виробництва і автоматизації процесів;

6) висока культура виробництва, поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці.

Установки індукційного нагріву вибирають за такими основними параметрами: призначенням, номінальною коливальною потужністю, робочої частотою. Випускаються промисловістю установки мають стандартну шкалу потужностей з наступними ступенями: 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0 кВт і далі при множенні цих чисел на 10, 100 і 1000.

Установки для індукційного нагріву мають потужності від 1,0 до 1000 кВт, в тому числі з ламповими генераторами до 250 кВт, а вище – з машинними генераторами. Робочу частоту, яка визначається розрахунком, уточнюють за шкалою частот, дозволених для застосування в електротермії.

Високочастотні установки для індукційного нагріву мають єдину індексацію: ВЧІ (високочастотні індукційні).

Після букв через тире позначається в чисельнику коливальна потужність (кВт), в знаменнику – частота (МГц). Після цифр пишуться літери, які позначають технологічне призначення. Наприклад: ВЧІ-40/0,44-ЗП – високочастотна установка індукційного нагріву, коливальна потужність 40 кВт, частота 440 кГц; літери ЗП – для загартування поверхонь (НС – для наскрізного нагріву, ЗТ – зварювання труб і т. п.).

Контрольні питання

1. Поясніть принцип індукційного нагріву. Область його застосування.
2. Перерахуйте основні елементи установки індукційного нагріву і вкажіть їх призначення.
3. Як виконується обмотка нагрівача?
4. Які переваги нагрівача?
5. У чому полягає явище поверхневого ефекту?
6. Де може застосовуватися індукційний повітряний нагрівач?

7. Від чого залежить глибина проникнення струму в нагрівається матеріал?

8. Чим визначається ККД кільцевого індуктора?

9. Чому для виконання індукційних нагрівачів на промисловій частоті необхідно застосовувати феромагнітні труби?

10. Що найбільш істотно впливає на cos індуктора?

11. Як змінюється швидкість нагріву з підвищенням температури нагрівається матеріалу?

12. На які параметри стали впливає вимір температури?

Тема 5. Електродуговий нагрів

5.1. Характеристика електричної дуги

Електрична дуга (дугового розряд), що представляє собою самостійний електричний розряд в суміші газів або парів металу між електродами, що знаходяться під напругою, характеризується малим анодно-катодних падінням напруги (10...20 В) і високою щільністю струму (100...1000 А/см^2). Висока напруга, яка в дузі, що є своєрідним провідником, відповідно до закону Ленца - Джоуля перетворюється в теплоту, яку в умовах сільського господарства використовують головним чином для розплавлення металів при зварюванні, різанні і наплавленні.

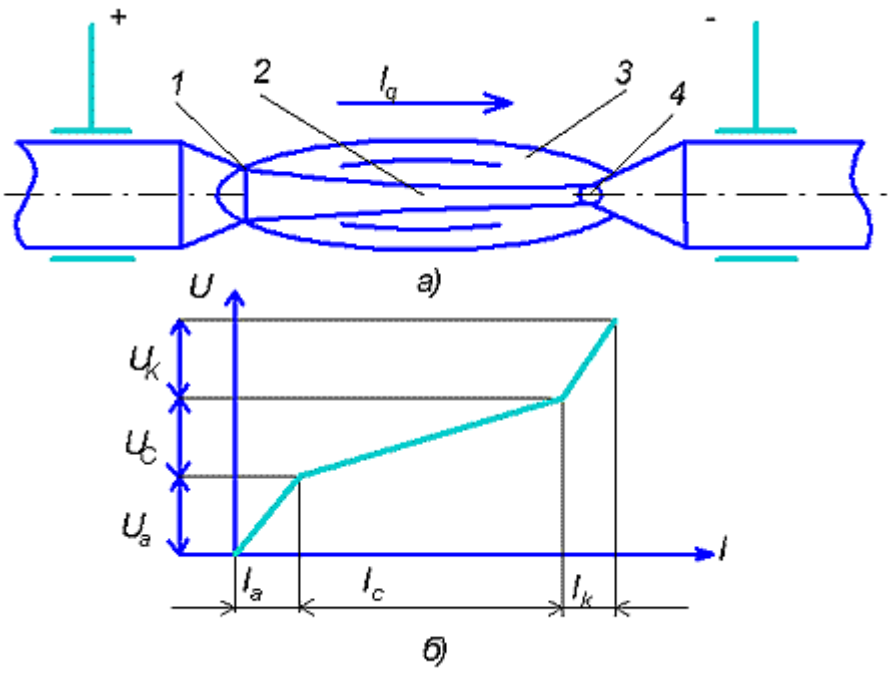

Рисунок.22. Електрична дуга (а) постійного струму і розподіл напруги (б) на її елементах: 1 – анодний кратер; 2 – стовп дуги; 3 – світиться оболонка; 4 – катодна плями

Відомо, що в звичайних умовах гази не проводять електричний струм, тобто є діелектриками. Тому для горіння електричної дуги необхідна наявність в газовому проміжку

заряджених частинок – електронів або іонів. Електрони, розвиваючи величезні швидкості в дузі, стикаються з атомами і молекулами газу, перетворюють їх на іони і тим самим збільшують його провідність. Процес утворення електрично заряджених частинок в міжелектродному просторі називають іонізацією. В електричній дузі іонізацію відносять до типу самостійних розрядів, так як вона відбувається за рахунок енергії джерела струму. У просторі, де відбувається розряд, виділяють катодний область 4 (катодна пляма) (Рисунок.22 а), стовп 2 дуги, анодний область 1 (анодний кратер). Бічною поверхнею розрядного проміжку є розпечені гази 3 (світиться оболонка), які не беруть участі в проходженні струму. Матеріал електрода переноситься від анода до катода, тому на поверхні анода з'являється поглиблення, а на поверхні катода – виступ, який представляє собою яскраву ділянку світиться.

На катоді відбувається емісія електронів, що дає початок електричної дуги. Емісія електронів з поверхні катода може здійснюватися за рахунок його нагрівання (термоелектронна емісія), а також за рахунок високої напруженості (10^6 В/см) електричного поля в катодній області (автоелектронна емісія). Щільність струму в катодній плямі дуже висока. Залежно від матеріалу електродів вона становить 1500...7000 А/см^2, в анодному ж кратері, що має в порівнянні з катодною плямою велику поверхню, щільність струму знижується приблизно в 10 разів.

Стовп дуги, що представляє собою суміш електронів, що яскраво світиться, позитивні іони та збуджені нейтральні атоми, що зветься плазмою, має температуру до декількох тисяч градусів. Він безперервно втрачає заряджені частинки внаслідок їх рекомбінації, що приводить до утворення нейтральних атомів, і дифузії в навколишнє середовище. При стаціонарному процесі спад заряджених частинок компенсується іонізацією в стовпі дуги.

Напруга на дузі складається з падінь напруг на окремих її областях – приелектродних і стовпі дуги. Довжина катодної

області близько 10^{-5} см, а падіння напруги $U_к$ на ній становить 10...20 В, що пояснює високу напруженість в даній зоні (Рисунок.22 б). Напруженість електричного поля практично постійна по всій довжині стовпа дуги, а падіння напруги в ньому залежить від протяжності ділянки. Довжина анодної області 10^{-4} см, анодне падіння напруги U_a і напруженість електричного поля дещо менше, ніж в катодній області.

Напруга на дузі і провідність стовпа дуги залежать від значення струму. Цю залежність при повільному зміні струму називають статичної вольт-амперної характеристикою (ВАХ) дуги. ВАХ дуги при постійних її довжині і діаметрі електродів показана нижче (Рисунок.23).

Характеристика складається з трьох ділянок струмів: малих I , середніх II і великих III . На першій ділянці збільшення струму призводить до зниження напруги дуги, так як при цьому зростають площа поперечного перерізу стовпа дуги і інтенсифікація процесів іонізації. Це сприяє зростанню електропровідності каналу дугового розряду.

На другій ділянці настає рівновага процесів іонізації і деіонізації в розрядному проміжку, площа поперечного перерізу стовпа дуги збільшується і напруга її стабілізується, тобто стає незалежним від значення струму. На третьому ділянці збільшення струму призводить до зростання напруги на дузі, так як катодна пляма займає всю площу торців електродів, а опір каналу розряду стабілізується.

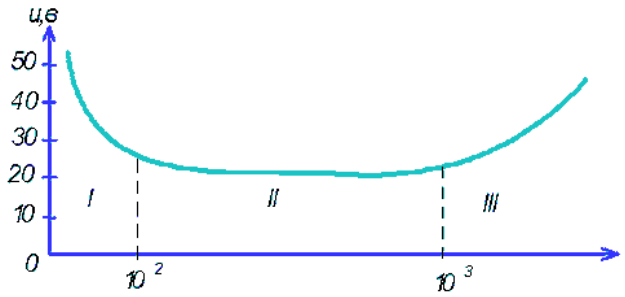

Рисунок.23. Статична вольт-амперна характеристика дуги постійного струму

Зв'язок загального падіння напруги $U_Д$ на дузі з падінням напруги на окремих її елементах в області малих струмів встановлює формула Г. Айртона:

$$U_Д = \alpha + \beta l + (\gamma + \delta l)/l_Д \quad (217)$$

де α – сумарне анодно-катодне падіння напруги, В; β – градієнт потенціалу в стовпі дуги, В/м; l – довжина дуги, м; γ і δ – потужності, що витрачаються на виривання електродів з катодного плями, Вт/А, і на просування електронів в міжелектродному проміжку на одиницю відстані, Вт/(А·м); $I_д$ – сила струму дуги, А.

У формулі (217) падіння напруги $(\gamma + \delta l)/l_Д$залежить від сили струму, що відповідає падаючому характеру ВАХ. Для середніх струмів це доданок мало.

$$U_Д = \alpha + \beta l \quad (218)$$

Середовище, в якому дуга горить, впливає на форму статичної ВАХ. Так, в середовищі інертних газів навіть при невеликих токах характеристика дуги зростаюча. Її застосовують при зварюванні в середовищі захисних газів, плазмодугових процесах.

Розглянуті явища відбуваються в електричній дузі постійного і змінного струму. Статична ВАХ на змінному струмі відповідає діючим значенням струму і напруги. При цьому катодний і анодний області дуги міняються місцями залежно від полярності прикладеної напруги. На рисунок 24 а, показано зміна струму і напруги при відсутності індуктивності в ланцюзі дуги. При напрузі $U_{іст}$ джерела живлення менше напруги Uз запалювання дуги вона не може спалахнути. У звичайній атмосфері напруження $U_з$ для сталевих електродів становить 30...35 В, а для вугільних - 45...55 В. Через проміжок часу t_1 напруга джерела збільшується до $U_з$ дуга запалюється і по ній протікає струм і досягнувши амплітудного значення $U_т$, напруга джерела зменшується і стає через проміжок часу t_2 менше

напруги UП згасання дуги, вона гасне, і струм через неї припиняється. На відрізку часу t3 + t1 дуга не горить, а потім відбуваються повторне її запалювання, горіння і згасання в негативній напівхвиль напруги живлення.

Для малопотужних дуг напруга Uз згасання дещо менше напруги Uз запалювання. При силі струму дуги більше 100 А напруга Uз мало відрізняється від $U_з$ і напруга $U_д$ горіння практично не залежить від струму дуги, тобто Uз ~ UП = Uд (Рисунок. 24).

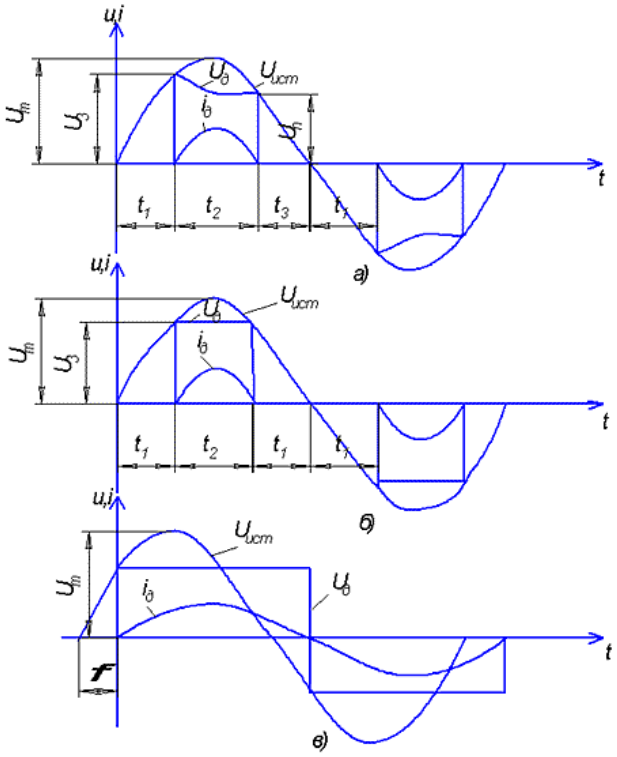

Рисунок. 24. Зміна струму $i_д$ і напруги $U_д$ в контурі з активним опором малопотужних (а) і потужних (б) дуг, в контурі дуги з індуктивним (в) опором

При включенні індуктивності послідовно з дугою зсувається ток щодо напруги на кут φ (рис. 24, в). Змінюючи значення індуктивності, можна отримати такий кут зсуву фаз, що при зменшенні напруги джерела нижче напруги горіння дуги ЕРС самоіндукції, що складається з напругою джерела, забезпечить напругу, достатню для підтримання горіння дуги до тих пір, поки струм не перейде через нульове значення. У цей момент напруга

джерела матиме інший знак і збільшиться до значення, достатнього для запалювання дуги, тобто ток в дузі виникає без усякої перерви. При малому значенні індуктивності з'являються перерви в горінні дуги і крива струму істотно спотворюється.

5.2. Запалювання, стійкість горіння і регулювання струму дуги

Джерело живлення зварювальної дуги має забезпечувати надійне запалювання дуги, її стійке горіння і регулювання струму.

Спочатку дуга запалюється при зіткненні електродів, одним з яких є виріб, і при подальшому їх розведенні. При зіткненні електродів замикається ланцюг джерела живлення, струм якого розплавляє і випаровує метал в місці контакту. При подальшому відриві електрода від виробу в просторі, заповненому іонізованими газами і парами металу, під дією напруження джерела виникає електрична дуга. Вона запалюється легше при високій напрузі джерела. Щоб забезпечити надійне запалювання, напруга холостого ходу джерела живлення повинна бути більше напруги запалювання дуги. У той же час напруга холостого ходу має бути безпечним для зварника.

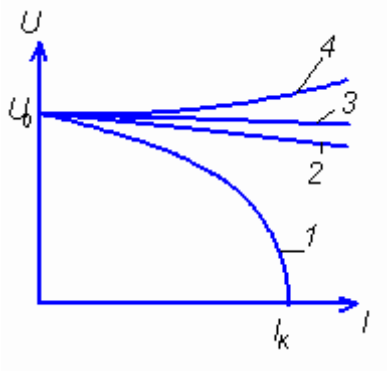

Рисунок. 25. Зовнішні характеристики джерел живлення зварювальної дуги: 1 і 2 – круто- і пологопадаючих; 3 – жорстка; 4 – зростаюча

Основна характеристика джерела – зовнішня, що представляє собою залежність між напругою на клемах і струмом, що протікає

через зварювальну ланцюг при навантаженні. Зовнішня вольт - амперна характеристика (Рисунок. 25) може бути круто падаючою 1 , пологопадаючою 2, жорсткою 3 і зростаючою 4. Важливим параметром джерела поряд з напругою U_o холостого ходу є струм $I_к$ короткого замикання, який по відношенню до номінального струму $I_н$ джерела зазвичай знаходиться в таких межах:

$$1{,}25 < Ic / Ic < 2 \qquad (219)$$

Таким чином, коротке замикання – один з робочих режимів при запалюванні електричної дуги. Джерело живлення при цьому повинно надійно працювати.

Стала горіння дуги забезпечується правильним вибором зовнішньої характеристики джерела живлення (Рисунок. 26). При падаючій статичній ВАХ 2 дузі джерело живлення повинно мати ще більше крутопадаючих зовнішню характеристику 1. Рівність струмів і напруг дуги і джерела в цьому випадку буде в точках А і В. З них тільки точка А відповідає сталому горінню дуги.

У статичному стані баланс напруг в зварювального ланцюга має вигляд

$$U_0 = l_д R_u + U_д \qquad (220)$$

U_o – напруга холостого ходу джерела живлення, В; $I_д$ – сила струму зварювального кола, А; R_u – опір джерела живлення, Ом; Uд – напруга дуги, В.

При зміні струму в зварювального ланцюга баланс миттєвих напруг виглядає наступним чином:

$$u_д = i_д R_u + u_д + L(di/dt) \qquad (221)$$

де L – індуктивність контуру зварювального кола, Гн; di / dt – зміна миттєвого значення зварювального струму, А/с,

ЕРС самоіндукції контуру з дугою

$$L\left(\frac{di}{dt}\right) = u_0 - i_д R_u - u_д \qquad (222)$$

У точці В при збільшенні струму I_1 на Δ IYL (di/dt)> 0. Так як L > 0, то di/dt> 0, то в результаті струм в ланцюзі буде продовжувати рости до значення Ia . При зменшенні струму і Δ IYL (di/dt) <0 і di/dt <0, внаслідок чого струм буде зменшуватися до нуля і дуга згасне. Отже, режим в точці В нестійкий.

Інша залежить від точки А. Якщо струм I_2 зросте на ΔI то відповідно L (di/dt) < 0 і di/dt <0. В результаті струм буде зменшуватися до значення I_2. При зниженні струму I_2 на Δ IYL (di/dt)> 0 і di/dt> 0, внаслідок чого струм зростає до колишнього значення I_2 , тобто дуга горить стійко.

При жорсткій статичної ВАХ стійке горіння дуги забезпечується при використанні джерел живлення з круто- і пологопадающих зовнішньою характеристикою. При зростаючій статичної ВАХ дуги застосовують джерела з жорсткими зовнішніми характеристиками.

Зварювальний струм при харчуванні дуги від джерела з падаючої ВАХ можна регулювати, змінюючи повний опір ланцюга дуги, її довжину, напруга холостого ходу джерела живлення.

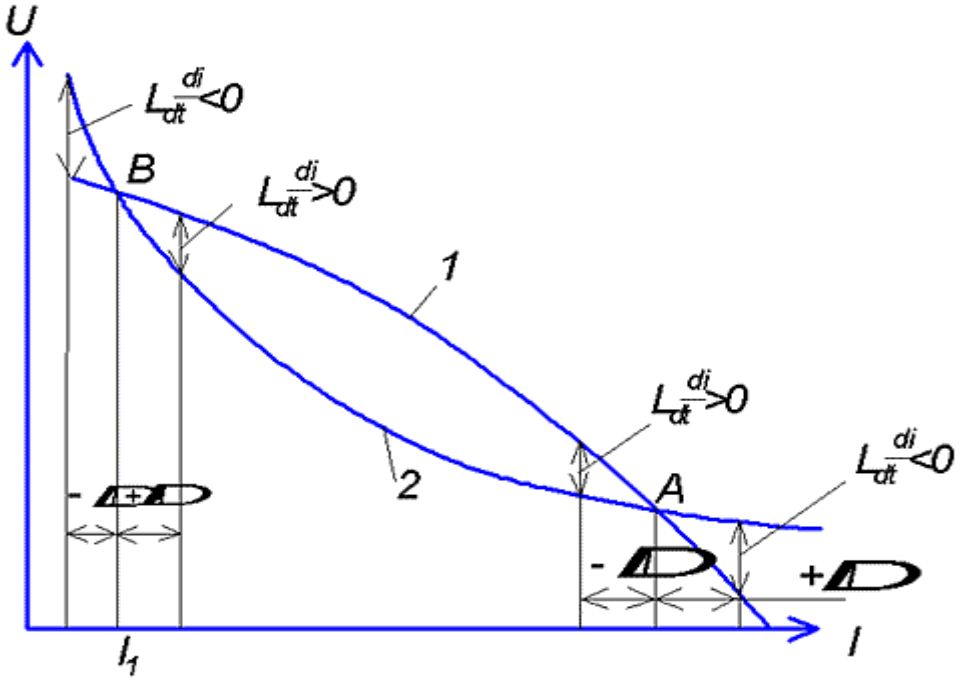

Рисунок. 26.Зовнішня характеристика 1 - джерела живлення і вольт-амперна 2 дуга

При зміні повного опору кола дуги (Рисунок. 27) дає змогу зменшити зварювальний струм від номінального значення до значення, відповідного перетину статичної ВАХ дуги і зовнішньої характеристики джерела. При великому повному опорі ланцюга дуга взагалі горіти не буде, так як для будь-якого значення струму напруга живлення буде менше напруги, необхідного для горіння дуги.

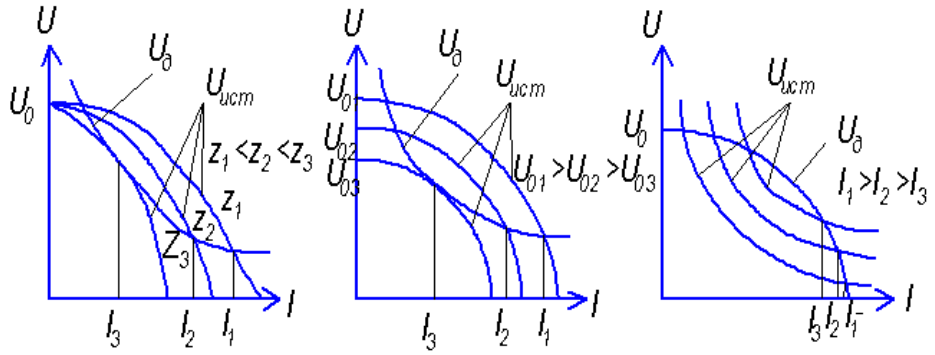

Рисунок. 27. Регулювання струму (а) зміною повного опору кола дуги, напруги (б) холостого ходу, довжини (в) дуги

При зменшенні напруги холостого ходу джерела його зовнішні характеристики зміщуються вліво (Рисунок. 27, б) і перетинаються зі статичної ВАХ дуги при менших значеннях струму. Очевидно, що знижувати напругу холостого ходу джерела можна до значень, при яких забезпечується запалювання дуги. При збільшенні її довжини статичні ВАХ зміщуються вгору, а точки їх перетину з зовнішньою характеристикою джерела будуть відповідати меншим значенням струму (Рисунок. 27, в). При надмірне збільшення довжини дуга згасне.

Крім основних вимог щодо забезпечення надійного запалювання, стійкості горіння і регулювання зварювального струму, які є загальними для всіх джерел живлення зварювальної дуги, до джерел змінного струму пред'являються додаткові вимоги. Вони пов'язані з їх динамічними властивостями, тобто здатністю відновлювати напругу відповідно до умов, що змінилися струмом. Так, при згасанні дуги напруга повинна швидко відновлюватися до значення запалювання, так як в

противному випадку повторного запалювання може не відбутися і в горінні дуги настануть значні перерви. Для надійного повторного запалювання дуги змінного струму необхідно збільшувати зварювальний струм і напруга холостого ходу джерела, а також використовувати джерела з великою індуктивністю.

Від динамічних властивостей джерел змінного струму залежить якість зварювального шва. Швидке наростання струму короткого замикання при торканні краплею електродного металу шва призводить до її розбризкування та погіршення якості зварювальних робіт. Для усунення цього в зварювальний ланцюг послідовно з дугою включають дросель або застосовують джерела з крутопадаючими характеристиками.

5.3. Режими зварювання і роботи джерел живлення зварювальної дуги

Шви зварних з'єднань в залежності від взаємного розташування деталей поділяють на стикові, кутові, таврові і нахльостані форми і розміри шва залежать від режиму зварювання. При ручному дуговому зварюванні основними параметрами режиму є діаметр електрода, значення струму і напруги, рід і полярність струму, швидкість зварювання.

Для високої продуктивності зварювального процесу та отримання якісного з'єднання дуга повинна горіти стійко. Це залежить від багатьох факторів, серед яких основне значення мають характеристики джерел живлення і наявність в матеріалі деталей, що зварюються і електродів – елементів з малим потенціалом іонізації. Для підвищення стійкості горіння дуги змінного струму в флюси вводять елементи з низьким потенціалом іонізації – калій, кальцій, натрій. Однак її ж на постійному струмі дуга горить надійніше. Тому якість зварного шва, виконаного на постійному струмі, вище, ніж на змінному.

При виборі значення зварювального струму необхідно пам'ятати, що з його збільшенням зростає кількість виділеної теплоти і підвищується тиск дуги. При цьому глибина провару зростає. Великий струм підвищує швидкість плавлення електрода і призводить до утворення швів з підвищеною напруженістю металу.

Значення зварювального струму визначається також видом з'єднання: таврові і нахльостного з'єднання виконують великим струмом у порівнянні зі стикових.

Якщо для робіт використовують електроди діаметром 1,5...6 мм, що відповідає товщині зварюваного металу 0,5...10 мм, значення робочого струму орієнтовно можна визначити за формулою

$$I_{\text{св}} = Kd_{\text{эл}} \qquad (223)$$

де К – коефіцієнт, що залежить від діаметра електрода і виду покриття, А/мм;

$d_{\text{ел}}$ – діаметр електрода, мм. При цьому керуються такими даними:

Таблиця 5. 1

Значення залежності розрахункового коефіцієнта від діаметрів електродів

$d_{\text{ел}}$, мм	1…2	3…4	5…6
К, А/мм	25…30	30…45	45…60

Великі значення коефіцієнта К приймають при виконанні горизонтальних зварних швів. Для отримання вертикальних швів зварювальний струм зменшують на 10...15 %, а стельових – на 15...20 %.

Зі зменшенням діаметра електрода при незмінній силі струму зростає щільність струму стабілізується переміщення.

5.4. Спеціальні види дугового зварювання

5.1.1. Аргонодугове зварювання

Сутність даного методу зварювання полягає в тому, що дуга горить між кінцем електрода і зварюваних виробом в середовищі захисного інертного газу – аргону. Крім захисту від шкідливого впливу навколишнього середовища аргон виконує кілька позитивних функцій:

- сприяє поліпшенню стійкості горіння дуги через менше катодне падіння напруги, ніж в повітрі;

- через меншу теплопровідності аргону зменшуються теплові втрати стовпа дуги, що також призводить до збільшення стійкості горіння дуги;

- при розряді в аргоні відбувається катодне розпилення металу, що призводить до його очищення, зокрема від оксидів, наприклад від оксиду алюмінію і поліпшенню якості шва.

Технічні дані апаратів для аргонодугового зварювання наведені в таблиці 5.2. при горінні дуги виникає термоемісія з катода.

Таблиця 5. 2

Технічні дані апаратів для аргонодугового зварювання

Тип апарату	Основне призначення	Товщина деталі, мм	Рід струму	Номін струм, А	Діаметр електрода, мм
УДАР-300	Сварка алюмінієвих сплавів	1-12	~	300	2-6
УДАР-500	Сварка нержавіючої сталі	1,5-20	~	500	2-10
АГВ-2	Автоматичне зварювання різних металів	0,8-16	=	400	2-6
АВТ	Автоматичне зварювання труб з нержавіючої сталі	0,5-10	=	250	1-3

Це явище небажане, тому для збільшення теплової потужності дуги застосовують зворотну полярність. Крім того, при прямій полярності розплавлена ванна металу покривається плівкою окису, що перешкоджає сплаву деталей. Тому аргонодугове зварювання ведуть на змінному струмі або на постійному струмі зворотної полярності. При зварюванні на змінному струмі в схему включається осцилятор для полегшення запалювання дуги і для підвищення стійкості її горіння.

Аргонодугове зварювання виробляється з плавкого і неплавкого вольфрамового електроду. Найчастіше використовується неплавким вольфрамовим електродом. При роботі на постійному струмі застосовуються звичайні зварювальні генератори з баластних реостатів РБ-200, РБ-300, що включаються послідовно в зварювальний ланцюг для регулювання зварювального струму при малих значеннях і для забезпечення стійкості горіння дуги. Максимальний зварювальний струм деяких пальників становить ГРАД-200-250, ГРАД-400-400, ЕЗР-3-58-100, АР-10 мала-120, АР-10 велика-400. Напруга холостого ходу 130-200 В.

5.1.2. Дугове зварювання в вуглекислому газі

Сутність цього методу полягає в тому, що в зону зварювання з постійною швидкістю подається електродний дріт діаметром 0,5–2 мм в струмені вуглекислого газу (Рисунок. 28). Роль вуглекислого газу полягає в захисті розплавленого металу від навколишнього середовища. З метою зменшення окислювальної дії вуглекислого газу електродний дріт має підвищений вміст розкислюючих елементів (марганцю, кремнію).

Даний спосіб зварювання особливо ефективний для зварювання металів невеликих товщин порядку 1-2 мм і особливо для швів складної конфігурації, так як їх зварювання іншими способами, наприклад під флюсом, утруднена або взагалі неможливе закриття шва шаром флюсу.

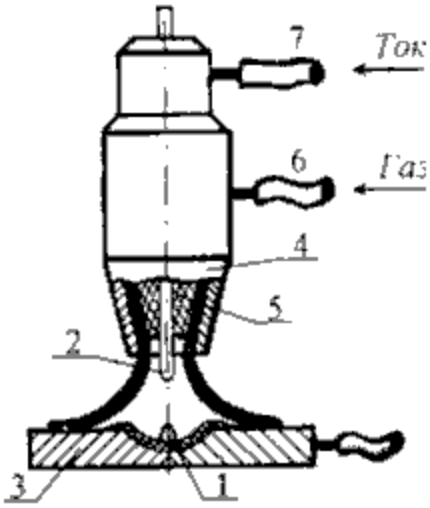

Рисунок. 28. Схема зварювання в вуглекислому газі.
1 – розплавлений метал, 2 – електрод, 3 – зварюються деталі, 4 – пальник, 5 – керамічна насадка, 6 – штуцер для подачі газу, 7 –токоввід

Сварка в вуглекислому газі виконується в напівавтоматичному мул "автоматичному режимі. Для цього використовуються джерела постійного струму:

- перетворювачі ПСО - 300, ПС-500, ПСМ - 1000 і ін,
- випрямлячі ВС - 200, ВС - 300, ВС - 500,
- генератори типу ГРС.

Пальники для напівавтоматичного зварювання бувають двох типів:

- для зварювання на малих токах без водяного охолодження (до 300 А).
- для зварювання на великих токах з водяним охолодженням. Для зварювання використовується вуглекислий газ, що отримується з вуглекислоти, що транспортується в чорних балонах з жовтим написом "CO_2 зварювальний" ємністю 40 л, в який заливається 12,7 м ^{3} вуглекислоти, що дає при випаровуванні 25 кг вуглекислого газу. Якщо використовувати харчову вуглекислоту, то її необхідно осушувати, для цього між балоном і редуктором встановлюється осушувач газу.

Найкращі результати виходять при зварюванні різних видів сталей і особливо при роботі на постійному струмі зворотної полярності. У цьому випадку зменшується розбризкування металу, зменшується стійкість горіння дуги.

5.1.3. Електрошлакове зварювання

Принцип даного виду зварювання полягає в тому, що розплавлення електродного металу і деталей, що зварюються здійснюється за рахунок протікання електричного струму через розплавлений флюс (шлак), що володіє електропровідністю. Цей вид забезпечує зварювання деталей великої товщини, яка доходить до 2,5 м, що неможливо здійснити іншими способами зварювання.

Деталі, що зварюються, полягають в мідні водоохолоджувані повзуни і нижню (початкову) і верхню (кінцеву) планки, службовці одночасно для початку і закінчення шва. Шлакова ванна формується внизу, в колодязі, утвореному деталями, що зварюються, власниками і нижньою планкою. У міру зварювання деталей мідні тримачі піднімаються вгору зі швидкістю, що дорівнює швидкості освіти шва.

Шлакова ванна утворюється або прямим пропусканням струму через шлак і попереднім нагріванням шлаку в окремій установці і подальшою затокою його у колодязь. При цьому забезпечується стійке горіння дуги. На стійкість горіння дуги впливає також зовнішня характеристика джерела, яка повинна бути жорсткою або зростаючою – зі збільшенням струму у ванні напруга повинна бути або незмінною, або зростати.

Електроди можуть бути дротяними, пластинчастими або стрічковими. Може бути один або кілька електродів. Найбільш поширені апарати з одним і трьома електродами, хоча можуть бути (і є) апарати з 9 і 18 електродами.

5.1.4. Електронно-променеве зварювання

Принцип електронно-променевого зварювання полягає в концентрованому нагріванні деталей, що з'єднуються за рахунок використання кінетичної енергії прискорених електронів в високому вакуумі. В результаті бомбардування електронним пучком кінетична енергія перетворюється в теплоту, яка використовується для здійснення зварювання плавленням.

Для здійснення цього виду зварювання необхідно отримати вільні електрони, сфокусувати їх в тонкий пучок і прискорити до необхідної енергії. Все це здійснюється в пристрої, званому електронною гарматою. Вільні електрони виходять з напруженого катода, а прискорення здійснюється при проходженні електронами електричного поля високої напруженості між катодом і анодом. Фокусування пучка здійснюється спеціальною магнітною лінзою, а його відхилення в заданому напрямку або сканування за певною програмою здійснюється котушками, що відхиляються.

Таблиця 5. 3

Технічні характеристики апаратів електрошлакового зварювання

Тип апарату	**Товщина деталей, мм**	**Номін. ток**	**$U_{раб}$, В**	**Кількість елек.**	**Діаметр електрода**
А-306А: Сварка прямолінійних	20-60	800	40	1	3-5
А-372Р: Сварка прямолінійних	До 450	300	45-55	3	3
А-741: Сварка прямолінійних і змінної кривизни стиків	До 2500	9000	36-55	3	3

Цей спосіб зварювання має ряд істотних переваг перед іншими, головними з яких є наступні:

1. Щільність, що надходить в зону енергії, можна дуже точно регулювати, що дозволяє широко варіювати глибину провару товщину виробів, що зварюються.

2. Можливе зварювання деталей будь-якої конфігурації, оскільки електронний промінь легко управляється за допомогою електричних і магнітних полів, то можливе зварювання деталей будь-якої конфігурації.

3. Шовна зона має дуже незначну товщину, тому при зварюванні практично не відбувається нагрів деталей, що зварюються.

4. Можливість фокусування пучка електронів до мікрон розмірів дозволяє використовувати цей вид зварювання для цілей мікроелектроніки, радіотехніки.

5. Сварка в вакуумі виключає будь-які окислення деталей, які зварюються. Це дозволяє з'єднувати деталі з досить тугоплавких матеріалів, таких як молібден, вольфрам, що недоступно для інших способів зварювання.

Недоліком даного способу є наявність вакуумних насосів і вакуумних систем, а також складність пристрою і технології, що вимагає висококваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Параметри деяких типів установок для електронно-променевого зварювання наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5. 4

Параметри деяких типів установок для електронно-променевого зварювання

Тип установки	**Діаметр камери**	**Довжина камери**	**$U_{кв}$, В**	**I, мА**
ЭЛУ4 Загальні види зварювання	700	1200	60	35
У-74: Зварювання труб	800	1000	40	75
У-101 Зварювання труб	500	500	25	500

Конструкційної основою електронно-променевого зварювання виявляється вакуумна камера на якій зверху монтується електронна гармата.

Камера має герметичні вводи для подачі енергії, подачі охолоджуючої води, передачі руху до механізму, що знаходиться всередині переміщення деталей, що зварюються. Камера відкачується форвакуумними і високовакуумними насосами для створення розрядження не вище 10^{-3} Па.

Струм пучка, а значить і потужність нагріву можна регулювати як зміною струму розжарення катода і щільності струму прискорених електронів, а також прискорюючою напругою. Катоди гармат можуть бути прямонакаленні вольфрамові у вигляді спіралей, ниток або підігрівним, що складаються з підігрівного катоду і підігрівної таблетки. Підігрівні катоди зазвичай виготовляються з гексаборид лантану, дають значно більшу щільність струму, ніж прямонакалювальні. Але вони більш складні у виготовленні.

5.1.5. Плазмове зварювання

Плазмове зварювання та плазмова різка засновані на створенні плазмового стовпа або плазмового струменя – потоку високоіонізованих частинок з великим запасом енергії, що дозволяє досягати температури 20 000 К.

Для створення потоку іонізованих частинок використовується дуговий розряд між двома електродами і продувається інертними газами у каналі, стінки якого охолоджуються водою. За рахунок охолодження зовнішньої частини плазмового стовпа, він концентрується в центрі каналу, що призводить до високого ступеня іонізації газу і концентрації в ньому великої енергії. Ця енергія і використовується для зварювання або різання металів.

Джерелами харчування плазмового зварювального апарату є зварювальні генератори постійного струму або зварювальні

випрямлячі. Порушення дугового розряду здійснюється осцилятором, включених паралельно джерелу струму, а регулювання зварювального струму здійснюється баластних опором, який включається послідовно джерела струму.

Потужність плазмового пальника істотно залежить від складу газу. Наприклад, суміш 86 % гелію і 14 % аргону дає потужність в 2 рази більшу, ніж при використанні чистого аргону, що пояснюється більш високим потенціалом іонізації гелію. Довжина блискучого ядра плазмового струменя може змінюватися від 2 – 3 до 40 – 50 мм в залежності від геометрії каналу, складу і швидкості подачі газу, струму і напруги дуги.

Плазмовий струмінь знайшов найбільш широке застосування для різання металів, що не піддаються звичайним способам різання, наприклад, для різання нержавіючої сталі, міді, алюмінію, кераміки. Зазвичай використовується суміші аргону з воднем, концентрація якого може досягати 30 %. Плазмовим струменем можна зварювати метали і неметали, а також їх поєднання. У таблиці 5.5 наведені параметри установок плазмового зварювання.

Таблиця 5. 5

Параметри установок плазмового зварювання

Тип установки	Призначення	U_{xx},В	Номин. струм, А	$W_{потр}$, кВт
УПСР-300-2	Сварка нерж.сталі до 5мм	65	300	16
А-1255	Сварка мет. і сплавів до 1мм	55	10	0,8
А-1326	Сварка мет. і сплавів до 1мм	80	30	2,5

5.5. Контактне зварювання

Контактне зварювання або зварювання опором. Цей вид зварювання відноситься до одного з різновидів зварювання тиском, при якій деталі механічно стискаються для отримання з'єднання і в місці стику якимось чином підводиться енергія, яка використовується для розігріву деталей, що зварюються. При контактному зварюванні або зварюванні опором енергія виділяється за рахунок пропускання струму через деталі, що

зварюються і виділення теплової енергії на великому опорі контакту. Якщо самі деталі не є практично опором електричному струму, то місце стику представляє великий опір і вся виділяється на ньому теплова енергія йде на розігрів деталей.

Контактне зварювання буває трьох різновидів, які визначають геометрією шва і електродів: стикова, точкова, роликова. На рисунку 29 показані ці типи зварювання.

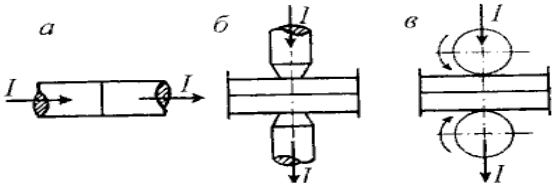

Рисунок.29. Основні різновиди контактного зварювання: а – стикове, б – точкова, в – роликовий. I – напрямок зварювального струму

У всіх випадках перехідний опір контакту може бути визначено виразом

$$R_k = \frac{K_1 K_T}{(0.1F_k)^m} \qquad (224)$$

де K_1 – коефіцієнт, що залежить від матеріалу контакту деталей;

F_k – зусилля стиснення контакту; m – коефіцієнт, що враховує форму поверхонь контактуючих деталей; $K_т$ - коефіцієнт, що враховує температуру контакту.

$$K_T = 1 + 0.67\alpha(T - 20) \qquad (225)$$

де α - температурний коефіцієнт опору матеріалу,

Т - температура контакту.

При $K_т$ близькою до кімнатної можна прийняти рівним одиниці.

Значення коефіцієнта K_1, для різних пар деталей, що зварюються наступне:

AL-AL-0,006; Cu-Cu-0,0004; AL-Cu-0,001 сталь-сталь-0,0076; Ag-Ag-0,0006; латунь-латунь-0,00067

Значення m для контакту площину – площину дорівнює одиниці, для контактів сфера – сфера і сфера – площину m = 0,5.

З цих чисельних значень коефіцієнтів випливає, що чим краще контакт, тим більше m , менше K_1 і тим менше опір.

5.6. Стикове зварювання

При стиковому зварюванні торці деталей, що зварюються наводяться в зіткнення, після чого через них пропускається струм, місце стику розігрівається до необхідної температури і поздовжнім стисненням досягається суцільність з'єднань - здійснюється пластична зварювання. По закінченню циклу зварювання струм вимикають і знімають зусилля.

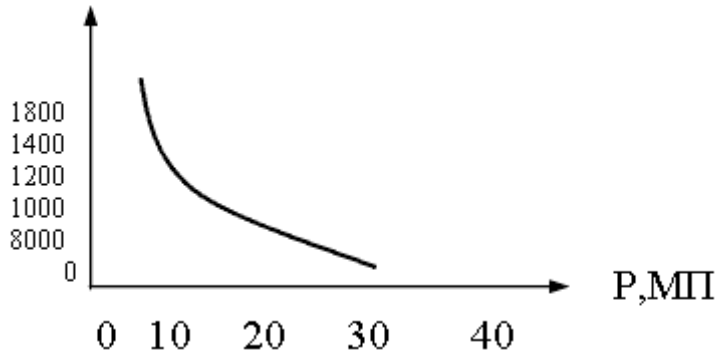

Рисунок. 30. Залежність зусилля стиснення від температури розігріву при стиковому зварюванні маловуглецевої стали

При стиковому зварюванні два параметра взаємопов'язані один з одним-температура стику і стискають зусилля. Чим вище температура, тим менше потрібно зусилля. На рисунку (Рисунок. 30) така залежність приведена для маловуглецевої сталі.

Стикове зварювання буває двох видів: без оплавлення (зварювання опором) і з оплавленням. У першому випадку нагрів торців здійснюють тільки пропусканням струму. Токи дуже великі, досягають 5-10кА, питома потужність складає 10-15 кВт/см^2. З'єднуються деталі в цьому випадку, як правило, невеликого поперечного перерізу. У другому випадку зварювання проводиться в кілька стадій: попередній підігрів, оплавлення і

остаточна осаду. Спочатку зусилля становить 5-20 МПа, потім включається струм і відбувається розігрів місця стику до 900-1100 К, після цього стискають зусилля знижують до 2-5 МПа, що призводить до збільшення опору контакту і зниження струму. В цей час контакт здійснюється на невеликій площі, на виступаючих вістрях, де температура підвищується до температури плавлення і виступи зникають. Потім такий же процес відбувається на наступних виступах і т. д. Чергові виступи розігріваються також за рахунок теплопровідності. Відбувається перегрів металу на виступах, його пароутворення, викидання пару і частинок рідкого металу із зони стику. Частина рідкого металу стікає вниз.

Контрольні питання

1. Як формуються падаючі характеристики в зварювальному трансформаторі?
2. Перелічіть способи регулювання зварювального струму.
3. Які величини визначають з дослідів холостого ходу і короткого замикання?
4. Назвіть способи зварювання зварювальними трансформаторами.
5. Як здійснюється плавне регулювання зварювального струму?
6. Яким має бути безпечна напруга для роботи зварника?
7. Для яких цілей при зварюванні необхідно регулювання зварювального струму?

Тема 6. Діелектричний нагрів в АПК

6.1. Особливості діелектричного нагріву в АПК

Токи високої частоти (ТВЧ) значно розширили технологічні можливості і області застосування електричного нагріву в різних галузях народного господарства, медицині, біології, побуті, наукових дослідженнях. Особливо велике значення ТВЧ для нагріву електрично не проводять і погано провідних матеріалів – діелектриків і напівпровідників.

Діелектричний нагрів в АПК здійснюється в високочастотному електричному полі. Принципова електрична схема найпростішої установки приведена на рисунку 31. Діелектрик Д поміщається між обкладинками робочого конденсатора Ск, що утворює з індуктивністю Lк і регульованою ємністю СКР коливальний контур лампового генератора струмів високої частоти. Робочий конденсатор, в якому відбувається нагрівання матеріалу, є діелектричним нагрівачем.

Нагрівання струмами високої частоти найбільш доцільний для матеріалів з поганою теплопровідністю. У сільськогосподарському виробництві до них відноситься більшість продуктів і кормів, які підлягатимуть сушінню: зерно, хміль, чай, тютюн, концкормів, – а також харчові рідини: молоко, фруктові соки та ін.

При звичайних (зовнішніх) способах підведення тепла процес сушіння або теплової обробки затягується. Тривале перебування продуктів в температурному полі негативно впливає на їх якість, зростають втрати тепла, продуктивність установок невисока.

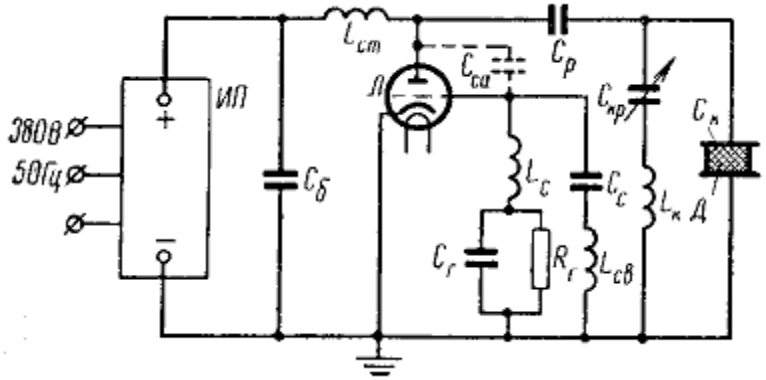

Рисунок 31. Принципова електрична схема лампового автогенератора для діелектричного нагріву: ІП - джерело живлення; Л - генераторна лампа; Сд-конденсатор блокувальний; Lст- дросель анодний; Порівн- конденсатор розділовий; $C_р$, $R_р$ - конденсатор і опір грідліка; LC, $C_с$ - дросель і конденсатор сітковий; LC- котушка зв'язку; $l_к$ - індуктивність коливального контуру; $C_к$-робочий конденсатор; СКР-який регулює конденсатор; Д - діелектрик; $C_{са}$-міжелектродному ємність сітка-анод

При нагріванні в поле конденсатора тепло виділяється одночасно по всьому об'єму однорідного по електрофізичних властивостях матеріалу, внаслідок чого тривалість нагріву різко скорочується. У процесах сушіння швидке нагрівання внутрішніх верств матеріалу призводить до створення градієнтів температури і тиску, спрямованих до зовнішньої поверхні тіла, що сприяє швидкому видаленню зайвої вологи. Якщо матеріал неоднорідний, стає можливим виборчий нагрів окремих компонентів, що мають різну спектральну чутливість до ТВЧ. Інтенсивність нагрівання практично обмежується лише технологічними умовами і цілісністю матеріалу.

Інтенсивний нагрів діелектриків можливий лише в електричному полі високої частоти. Нагрівання в полі конденсатора (власне діелектричний нагрів) здійснюється на частотах від 0,5 до 100 МГц. Область більш високих частот, від 100 до 300 МГц, складають струми надвисокої частоти (НВЧ).

Нагрівання струмами НВЧ (хвилями дециметрового і сантиметрового діапазону) здійснюється в об'ємних резонаторах або шляхом спрямованого випромінювання електромагнітної енергії. Цей вид діелектричного нагріву має свої особливості як за принципом генерування струмів НВЧ, так і за характером нагрівання. На цих частотах вже помітно проявляється поверхневий ефект внаслідок загасання електромагнітної хвилі в діелектрику.

Основні особливості високочастотного нагріву діелектриків полягають у наступному.

1. Нагрівання струмами високої частоти є прямим нагрівом - електрична енергія перетворюється в тепло безпосередньо в напівпровідниках або діелектриках, поміщених в швидкозмінних електричне поле. У багатьох випадках це дозволяє докорінно змінювати технологію процесів, підвищувати якість продукції та продуктивність праці. Прикладами цього можуть служити досвід застосування ТВЧ для сушіння зерна та інших сільськогосподарських продуктів і кормів, пастеризація і стерилізація молока і ін. При ВЧ нагріванні витрата електроенергії безпосередньо на зміну тепловмісту матеріалів найменшою в порівнянні з іншими способами, хоча загальна витрата електроенергії з урахуванням втрат в генераторах і допоміжних пристроях нерідко виявляється більше.

2. Токи високої частоти дозволяють здійснювати виборчий нагрів завдяки можливості концентрації потужності в потрібному напрямку і використання спектральної чутливості неоднорідних за фізичними властивостями матеріалів. Ця властивість використовується в процесах сушіння, дезінсекції зерна, замарівання коконів тутового шовкопряда і ін.

3. При ВЧ нагріванні досягається висока концентрація потужності в одиниці об'єму води, що нагрівається середовища, що дозволяє значно інтенсифікувати виробничі процеси. З'являється можливість використовувати механічні дії, що виникають в матеріалах при швидкому нерівномірному

нагріванні, наприклад при діелектричному руйнуванні каменів, спученні матеріалів органічного походження і ін. Крім того, ВЧ нагрівання діелектриків дозволяє знизити відходи продукції, здійснити поточність і широку автоматизацію виробництва.

У сільському господарстві діелектричний нагрів має великі можливості застосування для сушіння зерна, насіння трав, овочів, фруктів, чаю, бавовни, дезінсекції зерна, замарівання шовковичних коконів. Не менш важливо застосування ТВЧ для пастеризації, стерилізації молока і молочних продуктів, фруктових і ягідних соків, в процесах консервування.

До недоліків діелектричного нагріву слід віднести високу вартість обладнання, більш високий (у багатьох випадках) питома витрата електроенергії, необхідність у кваліфікованому обслуговуючому персоналі. Тому його застосування економічно доцільно там, де це веде до корінної удосконалення технології процесів і де високі капітальні та експлуатаційні витрати компенсуються підвищенням якості і збільшенням виходу продукції, значним зростанням продуктивності праці.

6.2. Вибір параметрів установок і розрахунок найпростіших діелектричних нагрівачів

До установок діелектричного нагріву пред'являються наступні основні вимоги:

1) забезпечити задані технологічні умови (за температурними режимами, швидкості нагріву і т. п.);

2) повністю зберегти матеріал і його якості, не допускати електричного пробою матеріалу;

3) можливість узгодження електричних параметрів навантаження з параметрами джерела живлення;

4) забезпечити стійкий режим роботи в конденсаторі без іскріння;

5) максимальне значення ККД.

Виконання цих вимог пов'язане в основному з правильним вибором потужності установок, напруженості поля і робочої частоти конденсатора.

Потужність установок. Потужність, що передається діелектрику в робочому конденсаторі, є корисною і носить назву номінальної потужності $P_н$. Її визначають за загальними формулами теплового розрахунку.

Потужність, що підводиться до конденсатора (коливальна потужність конденсатора):

$$P_k = \frac{P_н}{\eta_k} \tag{226}$$

Коливальна потужність генератора

$$P_z = \frac{P_н}{\eta_k \eta_э \eta_л} \tag{227}$$

Потужність, споживана генератором з мережі,

$$P_{потр} = \frac{P_н}{\eta_k \eta_э \eta_л \eta_z} \tag{228}$$

де $\eta_к = 0{,}80 \div 0{,}90$ – ККД робочого конденсатора;

$\eta_е = 0{,}65 \div 0{,}70$ – електричний ККД коливального контуру;

$\eta_л = 0{,}90 \div 0{,}95$ – ККД, що враховує втрати в провідниках, що з'єднують генератор з контуром;

$\eta_г = 0{,}65 \div 0{,}75$ – ККД генератора.

В результаті багаторазового перетворення енергії загальний ККД установок діелектричного нагріву виявляється досить низьким - 0,30-0,45, а питома витрата електроенергії високим.

Напруженість електричного поля вибирають, виходячи з неприпустимості електричного пробою матеріалу за умовою:

$$E_{доп} = \frac{E_{пр}}{1{,}5 - 2} \tag{229}$$

де $E_{доп}$ допустима потужність поля в матеріалі, що нагрівається;

$E_{пр}$ – електрична міцність матеріалу.

Значення Епр беруть з довідкової літератури. Так, для сухого повітря при температурі 25 °С Епр становить близько 30 кВ/см.

При нагріванні і сушінні різних матеріалів напруженість поля зазвичай не перевищує 1,5-2 кВ/см.

Частота поля конденсатора поряд з напруженістю поля визначає питому потужність, що виділяється в діелектрику:

$$\Delta P = 0{,}555\varepsilon tg\delta f E^2 \qquad (230)$$

При обраному значенні Е підвищення частоти – єдиний засіб збільшити інтенсивність нагріву. Однак при цьому необхідно враховувати технологічні умови нагріву і можливість узгодження параметрів генератора з навантаженням.

Технологічними умовами обмежується швидкість нагріву або швидкість випаровування вологи, де $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ – приріст температури матеріалу за час $\frac{\Delta W}{\Delta \tau}$ – кількість випарювальної вологи з одиниці сирої маси матеріалу (кг/кг) за час Δτ.

Швидкості нагріву і випаровування пов'язані з питомою потужністю, що підводиться до одиниці об'єму матеріалу, рівняннями теплового балансу. З урахуванням рівності (228) можна написати вирази для питомої потужності (Вт/см^3):

при нагріванні

$$\Delta P_{наг} = \frac{Dc}{\eta_k}\frac{\Delta t}{\Delta \tau}10^{-3} \qquad (231)$$

при випаровуванні (сушці)

$$\Delta P_{суш} = \frac{Dr}{\eta_k}\frac{\Delta W}{\Delta \tau}10^{-3} \qquad (232)$$

де r – питома теплота випаровування, кДж/кг;

c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг×°С);

D – щільність матеріалу або вологи, кг/м^3.

Прирівнявши ΔРнаг і ΔРсуш до DP, по формулі

$$\Delta P = 0{,}555\varepsilon tg\delta f E^2 \qquad (233)$$

знайдемо мінімальне значення частоти, при якій ще можна досягти заданої інтенсивності нагріву:

при нагріванні

$$f_{min} = 1{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{Dc}{\eta_k} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \frac{1}{K} \frac{1}{E_{доп}^2} \quad (234)$$

при сущці

$$f_{min} = 1{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{Dr}{\eta_k} \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \frac{1}{K} \frac{1}{E_{доп}^2} \quad (235)$$

де К = ε tgd – фактор втрат.

Вибираючи частоту вище f_{min}, можна знизити напруженість електричного поля. Верхнє допустиме значення частоти визначається з умови можливості настройки робочого контуру в резонанс і передачі необхідної потужності від генератора до навантаження:

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{min} C_{min}}} \quad (236)$$

де L_{min} – мінімально можлива індуктивність контуру, Г;

C_{min} – мінімальна можлива еквівалентна (з урахуванням матеріалу, що нагрівається) ємність робочого контуру, пФ.

Робоча частота вибирається в діапазоні, обмеженому значеннями f_{min} і f_{max}, з урахуванням того, що фактор втрат ε $tg\delta$ має найбільше значення при власній частоті діелектрика. Слід мати на увазі, що з підвищенням частоти знижується К. К. Д. нагріву, тому в кожному конкретному випадку необхідно шукати оптимальне рішення. При остаточному виборі частоти необхідно враховувати діапазон частот, дозволених для використання в техніці високочастотного нагріву.

Розміри камери нагріву визначають наступним чином. Коливальну потужність конденсатора можна знайти через питому потужність діелектричного нагріву (233) і обсяг матеріалу V в камері нагрівання:

$$\eta_k P_k = 0{,}555 \varepsilon \cdot tg\delta f E^2 V 10^{-3} \quad (237)$$

де V – в см^3.

Для плоского конденсатора, повністю заповненого діелектриком,

$$V = Fd \quad (238)$$

де F – площа обкладки, см^2;

d – відстань між обкладинками, см.

Якщо Uк – напруга, що підводиться до конденсатору (кВ), то

$$d = \frac{U_k}{E} \quad (239)$$

Поставивши собі за розміром однієї зі сторін обкладання конденсатора, з формул (237) і (238) знаходять розмір іншого боку. Приклад розрахунку діелектричного нагрівача наведено в розділі X.

Установки діелектричного нагріву випускаються стандартними ступенями потужностей в діапазоні від 0,16 до 630 кВт.

Установки, що випускаються промисловістю, мають індексацію ВЧД (високочастотні діелектричні). Після букв через дефіс в чисельнику – коливальна потужність (кВт), в знаменнику – частота (МГц). Букви після цифр позначають технологічне призначення. Наприклад, ВЧД-40/5-СД – установка високочастотна для діелектричного нагріву, коливальна потужність 40 кВт, частота 5 МГц, СД – для склеювання деревини (ЛП - приготування їжі, НП - нагрівання прес-порошків, ДН – діелектричного нагріву універсального призначення і т. п.).

6.3. Особливості генераторів ТВЧ для діелектричного нагріву. Магнетрони

Лампові генератори ТВЧ для діелектричного нагріву мають багато спільного з генераторами для індукційного нагріву. У них загальний принцип дії, і їх часто виконують на одних і тих же генераторних лампах. В обох випадках використовують, як правило, генератори з самозбудженням (автогенератори). Однак між ними існують і відмінності, зумовлені різними діапазонами частот, що генеруються. У техніці високочастотного нагріву частотний діапазон індукційного нагріву відносять до "низьких"

частот, а діелектричний нагрів, у якого частоти на 2-3 порядки вище, – до "високого".

У діапазоні високих частот (вище 5-10 МГц) на роботу генераторів помітний вплив чинять паразитні ємності і індуктивності монтажу, а також міжелектродні ємності лампи: катод – анод, сітка – катод, сітка – анод. Це ускладнює настройку генератора і ускладнює його роботу.

У високочастотних генераторах міжелектродні ємності використовуються як елементи зворотного сіткового зв'язку. На схемі, наведеній на рисунку (Рисунок 31), таким елементом є міжелектродна ємнісна сітка – анод ССА, показана пунктиром. Так як відповідно до теорії лампових генераторів реактивний опір між сіткою і катодом в цьому випадку має бути протилежного знаку, тобто індуктивним, то зворотна сіткова зв'язок з вигляду є індуктивної. Такий вид зворотного зв'язку найбільш поширений в схемах високочастотних генераторів.

При нагріванні в поле конденсатора зі зростанням температури змінюються параметри нагрівання матеріалу (вологість, електрофізичні властивості), які поряд з параметрами елементів коливального контуру визначають значення резонансного опору R_a

$$R_a = \frac{L}{RC} \tag{240}$$

Це призводить до порушення умови

$$R_a = R_з \tag{241}$$

оптимальності роботи генератора і зміни частоти. Підтримка оптимального режиму нагріву (узгодження навантаження) – одна з основних труднощів в роботі високочастотних генераторів (особливо значної потужності). Генератори зазвичай виконуються по більш складним, ніж на рисунку (Рисунок 31), двох- та многоконтурмими схемами, які забезпечують можливість узгодження навантаження в процесі нагрівання. Принципи узгодження такі ж, як у генераторів індукційного нагріву. Найпростіші одноконтурні схеми, подібно зображенню на рисунку

(Рисунок 31) з робочим конденсатором, що є частиною ємності коливального контуру, мають обмежену можливість настройки і застосовуються лише в установках невеликої потужності для виконання певного технологічного процесу.

Магнетрони. Підвищення вимог технології до нагрівання діелектриків призвело до використання струмів надвисоких частот (НВЧ), до яких прийнято відносити струми частотою вище 50–100 МГц.

Основні особливості нагріву енергією НВЧ полягають у наступному:

1) значне підвищення інтенсивності нагріву. Згідно зі слів (233), перехід до більш високих частотах є єдиним засобом підвищення питомої потужності нагріву, так як значення напруженості електричного поля обмежується електричною міцністю нагрівається матеріалу;

2) краще використання спектральної чутливості нагріваються матеріалів, що відкриває нові можливості для виборчого нагріву і підвищення ефективності високочастотної електротермії.

Нагрівання в поле НВЧ може використовуватися в тих же процесах, що і діелектричний нагрів. Значні перспективи має застосування НВЧ-нагрівання в процесах приготування їжі на підприємствах громадського харчування і в побуті.

Для генерування струмів НВЧ звичайні вакуумні тріоди і тетроди непридатні. При частотах понад 100 МГц вже помітно проявляється механічна інерція електронів, а час пробігу електрона між електродами лампа стає таким же періодом коливань. Це істотно ускладнює управління електронним потоком за допомогою керуючого електрода і, отже, генерування ВЧ-коливань модуляцією електронного потоку по щільності. Виникаючі при таких частотах навіть невеликі "паразитні" ємності і індуктивності в конструкційних елементах ламп вносять суттєві похибки в нормальний режим роботи ламп. Малопридатними виявилися і звичайні коливальні контури, що мають на цих частотах значні втрати на випромінювання.

Вихід був знайдений у використанні спеціальних електронних приладів – магнетронів, в яких генерування НВЧ-коливань здійснюється модуляцією електронного потоку по швидкості. Магнетрони значно розширили сферу застосування діелектричного нагріву.

У магнетронах (*Рисунок*. 32) використовується рух електронів у взаємно перпендикулярних електричному і магнітному полях, створюваних в кільцевому зазорі між катодом і анодом. Між електродами подається анодна напруга, що створює радіальне електричне поле, під дією якого вириті з підігрітого катода електрони спрямовуються до анода. Анодний блок поміщається між полюсами електромагніту, який створює в кільцевому зазорі магнітне поле, спрямоване по осі магнетрона. Під дією магнітного поля електрон відхиляється від радіального напрямку і рухається по складній спіральній траєкторії. У просторі між катодом і анодом утворюється обертова електронна хмара, що нагадує маточину колеса зі спицями. Пролітаючи повз щілин об'ємних резонаторів анода, електрони збуджують в них високочастотні коливання. Кожен з об'ємних резонаторів є коливальною системою з розподіленими параметрами. Електричне поле концентрується у щілин, а магнітне поле зосереджено всередині порожнини.

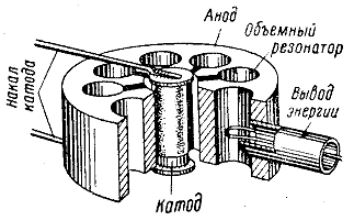

Рисунок. 32. Анодний блок магнетрона

Вивід енергії з магнетрона здійснюється за допомогою індуктивної петлі, що поміщається в один або частіше два сусідніх резонатора. По коаксіальному кабелю енергія підводиться до навантаження.

Нагрівання струмами НВЧ здійснюється в хвилеводах круглого або прямокутного перерізу або в об'ємних резонаторах, в яких порушуються електромагнітні хвилі найпростіших форм ТЕ10 (Н10) (в хвилеводах) або ТЕ101 (в об'ємних резонаторах). Нагрівання може здійснюватися з випромінюванням електромагнітної хвилі на об'єкт нагріву.

Живлення магнетронів здійснюється випрямленим струмом зі спрощеною схемою випрямляча. Установки дуже малої потужності можуть живитись змінним струмом. Простота пристрою і відносно невисока вартість магнетронів в поєднанні з високою інтенсивністю нагрівання і різноманітністю застосування струмів НВЧ відкривають перед ними великі перспективи застосування в різних галузях сільського господарства.

Контрольні питання

1. Назвіть способи передпосівної обробки насіння.
2. Необхідність передпосівної обробки насіння.
3. Фізична сутність термічної обробки з метою знезараження насіння.
4. Особливості діелектричного нагріву.
5. Поясніть роботу електричної принципової схеми НВЧ-печі.
6. У чому відмінність процесу нагріву продукту в мікрохвильовій печі від традиційних способів нагріву?
7. У чому полягає ефективність обробки насіння в мікрохвильовій печі?
8. Який з елементів печі відповідає за автоматичне включення в заданий час доби?
9. Чому в мікрохвильових печах не можна використовувати металевий посуд?
10. На чому заснована дія мікрохвильових печей?

Тема 7. Електропідривна обробка

7.1. Схеми випрямлячів для електропідривної обробки

Розроблено велику кількість випрямлячів, що розрізняються наявністю додаткових елементів: автотрансформатора, що обмежує опір і ємність в первинному колі, фільтра, що складаються з конденсатора й індуктивності (дроселя). На рисунках (Рисунок.33 і Рисунок . 34) наведені схеми випрямлячів на змінному і постійному струмі.

Тут АТР – автотрансформатор, L – дросель, $C_ф$ – конденсатор фільтра.

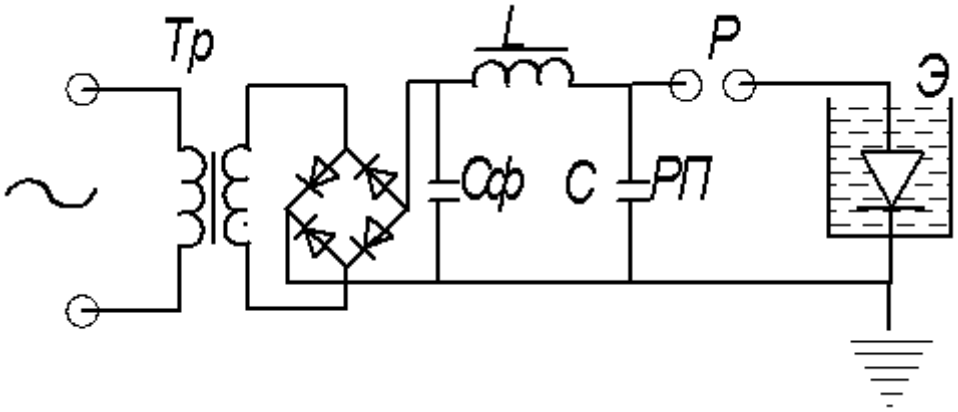

Рисунок.33. Схема випрямляча на постійному струмі

Принцип роботи випрямлячів, що застосовуються в електропідривних технологіях полягає в заряді конденсатора високої напруги до необхідної величини і його розряді через розрядний проміжок і послідовно з'єднаний з ним формує проміжок (розрядник). Роль формувального проміжку полягає в формуванні імпульсу необхідних параметрів – підвищення крутизни фронтів і скорочення тривалості.

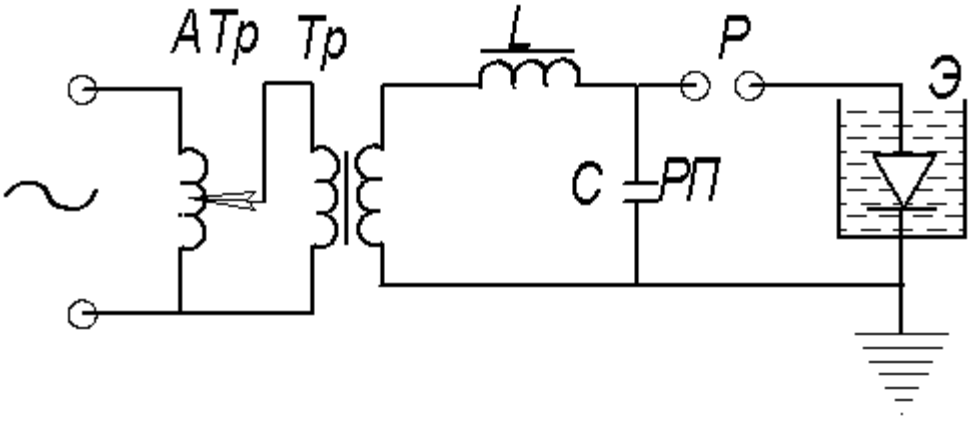

Рисунок . 34 Схема випрямляча на змінному струмі

7.2. Фізичні процеси при електроімпульсної руйнуванні матеріалів

При руйнуванні матеріалів електроімпульсним способом використовується залежність міцності діелектричного середовища від тривалості імпульсу. Якщо при статичній напрузі ($U_{ст}$) електрична міцність твердих діелектриків, як правило, перевищує міцність рідких діелектриків, то при імпульсній напрузі ($U_{імп}$) при тривалості імпульсу менш 10^{-1}с електрична міцність рідких діелектриків зростає так, що стає вище міцності твердих діелектриків і гірських порід.

При приміщенні матеріалів в рідину, наприклад в технічну воду, і при подачі на прикладені до матеріалу електроди імпульсу напруги з дуже крутим переднім фронтом відбудеться електричний пробій за обсягом твердого тіла між електродами і подальшим його руйнуванням.

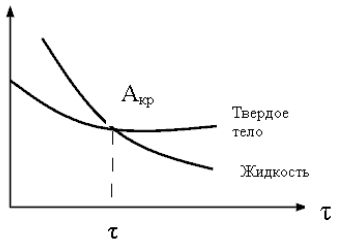

Рисунок.35. Вольт-секундні характеристики

На рисунку (Рисунок.35) показані вольт-секундні характеристики (залежність пробивної напруги $U_{пр}$ від тривалості імпульсу) твердого тіла і рідини. З русунку слід, що до критичної точки ($A_{кр}$) при довгих імпульсах пробивна напруга у твердого тіла вище, ніж у рідині. При менших значеннях $U_{пр}$ ситуація протилежна – електрична міцність рідини вище електричної міцності твердого тіла. Тому при здійсненні технологічних операцій руйнування матеріалів тривалість імпульсу повинна бути менше значення $\tau_{кр}$ для даної рідини і твердого тіла.

При руйнуванні різних матеріалів необхідно підбирати відповідну рідину. У реальних установках, як правило, використовується вода, трансформаторне масло, дизельне паливо.

Електроімпульсний спосіб використовують для буріння свердловин, дроблення матеріалів, руйнування залізобетонних виробів. На рисунку (Рисунок. 36) показані принципові схеми буріння свердловин і руйнування залізобетонних виробів електроімпульсним способом.

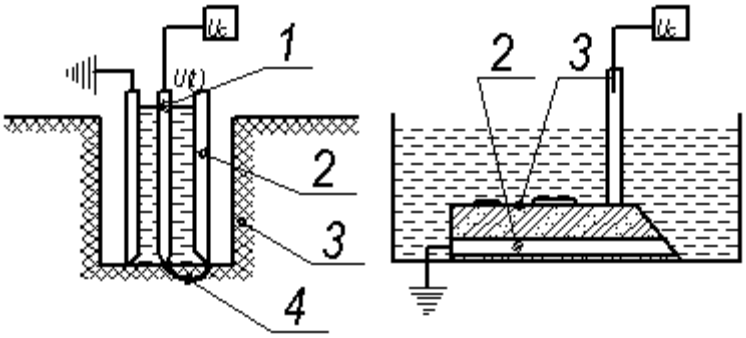

Рисунок. 36. Принципові схеми буріння свердловин і руйнування залізобетонних виробів електроімпульсним способом
Принципова схема буріння свердловин (а) і руйнування залізобетонних виробів (б) електроімпульсним способом. 1 – високовольтний електрод, 2 – заземлений електрод, 3 –руйнівна порода, 4 – іскровий канал, UC; – джерело високої напруги.

7.3. Буріння свердловин

Буріння свердловин електроімпульсним способом ефективно для міцних і особливо міцних порід, а також для мерзлих ґрунтів. Діаметр свердловини повинен бути не менше 100-150 мм, так як ефективність буріння збільшується зі збільшенням діаметра. Ефективність в порівнянні з механічним способом буріння зростає для свердловин некруглого перетину, при бурінні в ускладнених для обертання умовах (під водою, в умовах обмеженого простору).

7.4. Руйнування бетону та залізобетону

Руйнування бетону та залізобетону є важливою проблемою, оскільки при їх виробництві значну частку становить некондиціонована частина продукції. Крім того, джерелами відходів є зносяться будівлі і споруди, автодорожні покриття. Переробка зазначених відходів дозволяє повернути металеву арматуру і мінеральну сировину у виробництво і вирішити додаткові проблеми (звільнення земельних угідь, очищення територій і т. д.).

При механічних способах руйнування собівартості операцій дуже висока за рахунок зносу руйнівного інструменту, низького ККД, труднощів концентрації достатньої кількості енергії. Проблема ускладнюється тим, що необхідно повністю відокремити бетон від арматури.

Електроімпульсна технологія є безвідходною, тому що дозволяє повністю розділити бетон і арматуру, причому арматурний каркас може бути використаний повторно.

7.5. Дроблення руд

Дроблення руд електроімпульсним способом дозволяє отримати фракції необхідного розміру. Особливо сприятливими для даного способу є геологічні об'єкти і штучні матеріали, в яких

електричні та фізико-механічні властивості корисного компонента і складової частини руд поєднуються так, що корисний компонент володіє високою електричною міцністю і пластичністю, а порода має меншу електричну міцність і високу крихкість.

При електричному способі дроблення таких порід, пробій здійснюється у вміщуючій породі, яка, крихко руйнуючись, подрібнюється, залишаючи непошкодженими великі кристали.

Особливість електроімпульсного способу дезінтегрувати компоненти руд по пробивному напрузі дозволяє досягати високої продуктивності даної технології і реального її застосування на збагачувальних фабриках.

7.6. Штампування, видавлювання і витяжка деталей

Дані операції дозволяють отримувати з листів різних металів і сплавів деталі різної конфігурації та форми. Наприклад, отримувати деталі сферичної або конічної форми, отримувати гофри на трубчастій заготівці. У цій технології використовують тиск ударної хвилі, утвореної при подачі імпульсної напруги на електроди і виникнення розряду.

Схеми електропідривної отримання гофри на трубчастої заготівлі та штампування плоскою заготовки показані на рисунку (Рисунок. 37).

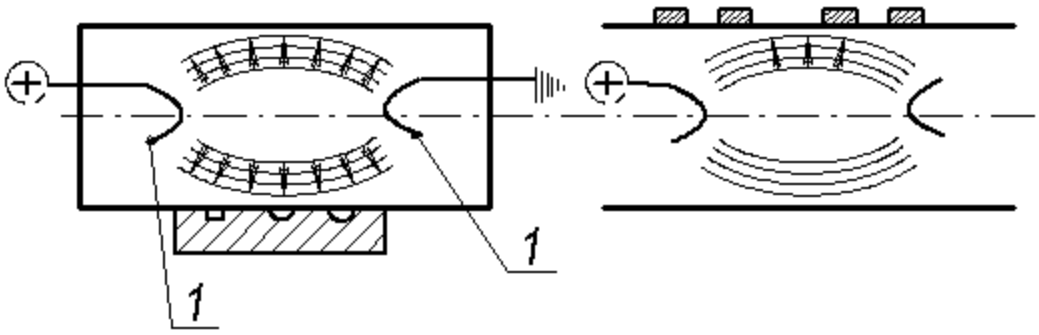

Рисунок. 37. Схеми електропідривної отримання гофри на трубчастої заготівлі та штампування плоскою заготовки

7.7. Роздача труб

Для отримання труб такої форми, щоб на кінцях вони мали звуження, через яке здійснювалася б їх стикування, використовують безматрічну роздачу тепловим вибухом.

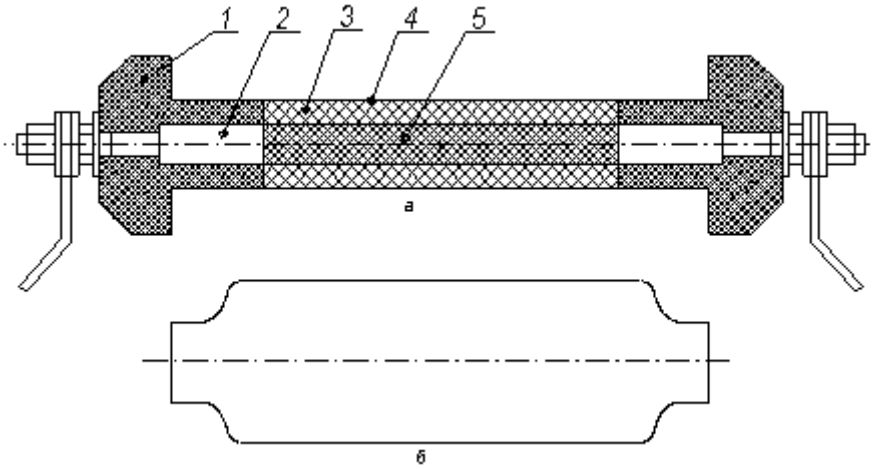

Рисунок.38. Схема роздачі труб

Принцип роботи такої технології полягає в випаровуванні поміщеного всередину труби вибухового стержня при подачі на нього імпульсу напруги і освіті необхідного обсягу газів. Освічені при вибуху гази розігрівають і розчавлюють поліетиленову втулку, вставлену в трубу, яка в свою чергу розчавлює трубу. Якщо труба на кінцях не має поліетиленовою вставки і вибухового стержня і в кінці вставлені упори, наприклад з текстоліту, то вони залишаються без зміни і після обробки їх діаметр стає меншим, ніж діаметр всієї труби. Схема роздачі труб показана на рисунку (Рисунок.38).

7.8. Електроімпульсне дроблення глибокоохолоджених гум і гумовотехнічних виробів, армованих металом

Постійне накопичення гумових і полімерних відходів вимагає ефективних методів їх переробки з метою повернення у

виробництво цінної сировини і поліпшення екологічного стану територій. В даний час найбільш перспективною є переробка відходів гумової промисловості та гумотехнічних виробів, що включає їх попереднє подрібнення. Для цього необхідні раціональні способи отримання з них гумової крихти різного ступеня дисперсності. В останні 10-15 років для цього традиційно використовується техніка кріогенного подрібнення, що реалізує руйнування матеріалу, охолодженого до температури крихкості, на механічних установках. Така технологія має два суттєвих недоліки при переробці резино-металевих відходів:

1) значний знос робочих інструментів;

2) велика товщина металевих включень (більше 2-3 мм)

При електроімпульсному дробленні робочим інструментом є електричні розряди, процес руйнування можна регулювати величиною енергії і тривалістю імпульсу, що дозволяє отримувати крихту заданої дисперсності. Крім того, при руйнуванні гумотехнічних виробів, армованих металом, можливо повне відділення гуми від металу.

У таблиці 7.1 наведені значення енергії імпульсу, продуктивності імпульсу, умовних енерговитрат при дробленні гум марки ШБТМ і ТСШ електроімпульсним методом.

Оптимальна частота посилки імпульсів становить 6-8 імп / с, витрата рідкого азоту для охолодження дорівнює 0,005 лс / імп. Порівняння абсолютних значень питомих показників енергетичних характеристик руйнування гірських порід і гумотехнічних виробів показує, що для гірських порід вони на порядок вище.

Таблиця 7. 1

Значення параметрів дроблення гум електроімпульсним методом

Марка гуми	**Розміри, мм**		**W, Дж**	**А, Г/имп.**	**А, кВтгод/кг**
	вихідний	**кінцевий**			
ШБТМ	30-50	2	550	1,01	0,1
		1	630	0,63	0,16
ТСШ	30-50	2	580	1.15	0.1
		1	700	0.47	027

Контрольні питання

1. В чому полягає принцип роботи випрямлячів?
2. Поясніть фізичні процеси, які відбуваються при електроімпульсної руйнуванні матеріалів.
3. Чи є ефективним буріння свердловин електроімпульсним способом?
4. Електроімпульсна технологія в системі руйнування бетону та залізобетону.
5. В чому сутність електроімпульсного дроблення глибокоохолоджених гум і гумовотехнічних виробів, армованих металом?

Тема 8. Магнітно-імпульсні технології

8.1. Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій

Фізика процесів в струмопровідних матеріалах під дією імпульсного магнітного поля.

При взаємодії імпульсного електромагнітного поля зі струмом, індукованим цим полем в струмопровідних матеріалах здійснюється їх деформація. Між індукованим струмом і електромагнітним полем виникає взаємодія, яке створює значні сили тиску, що деформують струмопровідний матеріал-заготовку. Величина тиску визначається індукцією поля.

Деформацію здійснюють двома шляхами:

1) електродинамічним при взаємодії струмів в збудника і заготівлі, включеної в ланцюг розряду конденсатора, що створює магнітне поле;

2) індукційним при взаємодії імпульсного магнітного поля з наведеними цим же полем в заготівлі струмами; при цьому заготовка не включена в електричний ланцюг, що створює поле.

Індукційний спосіб. Цей спосіб отримав більш широке поширення, так як заготівля в цьому випадку не включена в електричний ланцюг, що спрощує схему.

Електродинамічний метод заснований на законі електротехніки про взаємодію двох паралельних провідників, по яких протікає струм. Сила взаємодії, що виникає між провідниками пропорційна добутку сили струмів, довжині провідників і обернено пропорційно відстані між ними:

$$F = \frac{I_1 I_2}{r} l \qquad 242$$

де I_1, I_2 – сили струмів, що протікають по провідниках;

r – відстань між ними;

l – довжина провідників;

α – коефіцієнт пропорційності.

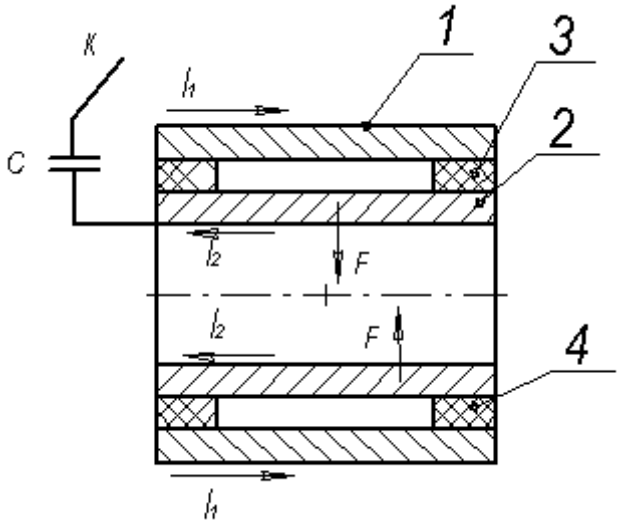

Рисунок . 39. Схема електродинамічного способу

Якщо одним провідником зробити котушку, іншим – заготовку і з'єднати їх електрично, то при подачі імпульсу напруги через конденсатор в котушці виникне магнітне поле, яке буде діяти на заготовку з силою F. Схема електродинамічного способу показана на рисунку Рисунок . 39).

I_1, I_2 – струми в котушці (1) і заготівлі (2), C – конденсатор, 3 – кільцева перемичка, що забезпечує електричний контакт, 4 – діелектрична кільцева вставка.

Сили F, що діють на заготовку, змінюють її профіль по будь-якій формі матриці, вставленої всередину заготовки. Якщо змінити схему так, щоб котушка була всередині заготовки, тоді матрицю необхідно надіти на заготовку, при цьому будуть діяти розтягують заготовку сили.

При індукційному способі заготівля не є частиною електричного кола. Струми, наведені в ній електромагнітним полем, взаємодіють з полем. Сили взаємодії здійснюють деформацію заготовки за формою матриці.

Щільність магнітної енергії (ρ_m), що діє на заготовку визначається виразом:

$$\rho_m = 0.5 \cdot B \cdot H = 0.5 \cdot \mu_0 \cdot H^2 \quad (243)$$

де μ_o – магнітна постійна, рівна 4π 107, гН/м. Щільність енергії пропорційна тиску, що діє на заготовку. Величину тиску можна розрахувати за виразом:

$$P = \frac{B_{max}^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot \pi} \quad (244)$$

де P – тиск, кг/см^2;

$B_{мах}$ – максимальне значення індукції в імпульсі, Тс. Енергія магнітного поля визначається індуктивністю котушки (L) і силою струму (I) згідно виразу:

$$W = L \cdot I^2/2 \quad (245)$$

Швидкість деформації заготовки залежить від величини магнітної індукції і щільності матеріалу заготовки:

$$V = \frac{B_{max}}{4\sqrt{pd}} \quad (246)$$

де d – щільність матеріалу заготовки, г/см^3

Товщина заготовки h повинна бути більше глибини проникнення магнітного поля в матеріал δ, яка визначається виразом:

$$\delta = \frac{\sqrt{\rho\tau/2}}{\pi} \quad (247)$$

де ρ – питомий опір матеріалу,

τ – тривалість напівцикл імпульсу струму.

При магнітному формоутворенні енергія магнітного поля витрачається на створення тиску і на нагрівання заготовки.

Підвищення температури поверхні заготовки на глибині проникнення магнітного поля визначається величиною поля і питомою теплоємністю (c_p) матеріалу згідно виразу:

$$\Delta T = \frac{B_{max}^2}{8_{c_p}} \quad (248)$$

Нагрівання заготовки впливає на її деформацію. У деяких випадках заготовка розігрівається до 1000–3000 К. Підбором умов обробки можна змінювати співвідношення між механічною і тепловою складовими впливу і створити умови обробки заготовок з матеріалів, що не проявляють пластичності при нормальній температурі.

Принципова схема установки для магнітно-імпульсної обробки.

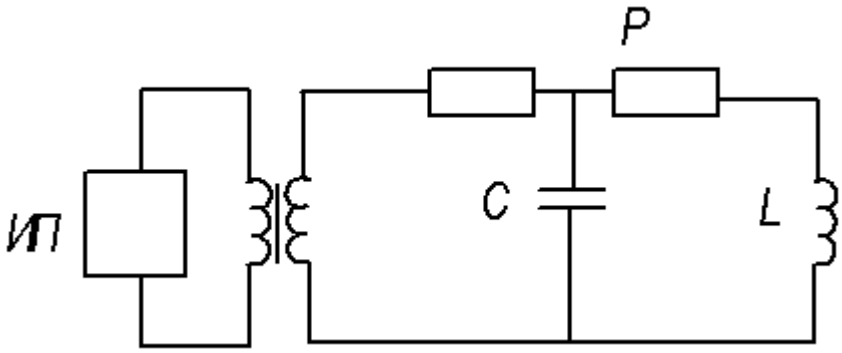

Рисунок. 40. Принципова схема установки магнітно-імпульсної обробки

Принципова схема установки для магнітно-імпульсної обробки показана на рисунку (Рисунок. 40).

Зарядка конденсатора С здійснюється джерелом струму ІП через трансформатор Тр і випрямляч В. Розрядка конденсатора на індуктор L здійснюється за допомогою розрядника Р. Запасена в конденсаторі енергія визначається його ємністю і величиною напруги:

$$E = \frac{CU^2}{2} \tag{249}$$

Струм, що протікає в розрядному ланцюзі визначається напругою і параметрами ланцюга. Сила струму змінюється з часом за законом:

$$I = \frac{U}{\omega L} e^{\frac{-Rt}{2L}} sin(\omega t) \tag{250}$$

де L – індуктивність розрядного ланцюга, R – активний опір розрядного ланцюга, ω – кругова частота струму розряду.

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (251)$$

Амплітудне значення напруженості магнітного поля, що створюється в індукторі залежить від електричних параметрів ланцюга і форми індуктора і визначається виразом:

$$H_{max} = k_1 \frac{U}{r} \sqrt{\frac{40C}{l}} \quad (252)$$

де r і l – радіус і довжина індуктора відповідно; k_1 – коефіцієнт, що залежить від форми індуктора і швидкості загасання коливань в контурі і змінюється від 0 до 2.

Тривалість напівциклу імпульсу тиску обернено пропорційна частоті струму імпульсу і для трубчастої заготовки може бути визначена виразом:

$$\tau = k_2 \sqrt{\frac{\text{СД}}{l}} \quad (253)$$

де Д – діаметр заготовки, l – величина зазору між індуктором і заготівлею з урахуванням глибини проникнення магнітного поля, k_2 коефіцієнт пропорційності.

8.2. Технологічні операції, що виконуються магнітно-імпульсним способом

Особливості магнітно-імпульсного формоутворення.

Магнітно-імпульсні технології мають ряд особливостей, що відрізняють їх від інших технологій.

1. Метод найбільш ефективний для матеріалів з високою електропровідністю, що забезпечує низькі теплові втрати і досить високий ККД.

2. Діелектричні матеріали даним методом не обробляються, так як вони прозорі для магнітного поля. Тому камери для обробки зручно виготовляти з пластмас або скла.

3. Товщина заготовки повинна бути більше глибини проникнення магнітного поля в матеріал заготовки, але не занадто великою для даного значення електромагнітних сил.

4. Оскільки інструментом є магнітне поле, то відсутній механічний опір з деталлю, що дозволяє обробляти заготовки з захисно-декоративними покриттями.

5. Завдяки високим швидкостям обробки і наявності значного виділення тепла в заготівлі можлива обробка твердих і маловязких матеріалів – матеріалів, що не володіють достатньою пластичністю при звичайних швидкостях і температурах.

6. Значна частина енергії перетворюється в тепло в зарядному і розрядному ланцюгах, в самій заготівлі. Тому ККД процесу низький і становить 10-40 %, він залежить від матеріалу заготовки (щільності, електропровідності) і співвідношення габаритів (радіусу і товщини).

8.2.1. Інструмент для магнітно-імпульсної обробки

Робочим інструментом для магнітно-імпульсної обробки є індуктор. Індуктори бувають одноразового та багаторазового використання.

Індуктори одноразового використання застосовують в одиничному виробництві, вони руйнуються під дією першого імпульсу магнітного поля, тому не повинні мати підвищену міцність, а повинні бути прості у виготовленні і дешеві. Вони являють собою звичайно один або кілька витків ізольованого дроту або шини.

Індуктори багаторазового використання бувають одновиткові, багатовиткові і являють собою спіралі, ізольовані від корпусу. Одновиткові індуктори мають високу механічну міцність, але вони не дозволяють отримати високу індукцію. Багатовиткові індуктори більш ефективні в роботі, але вони складніші у виготовленні і дорожчі. Так як індуктори багаторазового використання піддаються ударним

навантаженням, то вони повинні мати високу механічну міцність. Оскільки у них повинна бути і висока електропровідність в поверхневому шарі, то їх виготовляють зі сталі, плакованої матеріалом з високою електропровідністю.

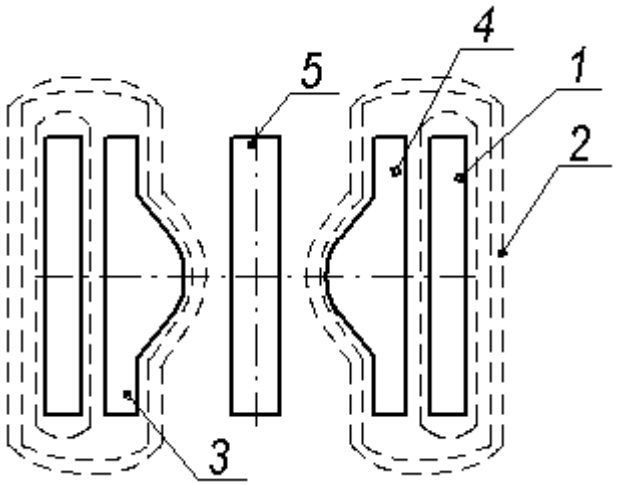

Рисунок. 41. Схема концентрування магнітного поля

Для збільшення міцності індукторів і для додання їм універсальності служать концентратори магнітного поля, поміщені всередину індуктора. Концентратор магнітного поля представляє собою дуже товсту втулку з високоміцного матеріалу, який володіє хорошою електропровідністю (наприклад, з берилієвої бронзи), з розрізом уздовж твірної, заповненою ізоляцією, для запобігання утворення вихрових струмів. За площею заготовки магнітне поле може бути рівномірним або сконцентрованим на певній ділянці за допомогою металевих концентраторів, що змінюють щільність магнітних силових ліній.

На рисунку (Рисунок. 41) показана схема концентрування магнітного поля. Концентрування магнітних силових ліній (1), створених індуктором (2) в області (3) концентратором (4) і заготівлею (5). У реальних установках для деформації заготовок необхідні імпульсні магнітні поля 2 10^5-10^6 Гс, які дозволяють отримати тиск 3 10^3 - 4 10^4 кг/см^2.

Тривалість імпульсу при цьому повинна бути 10-20 мкс.

8.2.2. Штампування за допомогою імпульсних магнітних полів.

Магнітно-імпульсна обробка матеріалів і сплавів займає чільне місце серед імпульсних високоенергетичних методів металообробки. Штампування з плоских і трубчастих заготовок знайшло широке застосування. У порівнянні з іншими методами штампування магнітне штампування має низку істотних переваг, основними з яких є:

а) велика швидкість зміни форми оброблюваного матеріалу,

б) можливість точного регулювання параметрів процесу,

в) можливість широко автоматизувати операції процесу,

г) висока продуктивність.

Даний метод придатний для обробки різних металів і сплавів, але найбільше застосування він знайшов для металів і сплавів з високою електропровідністю (мідь, алюміній та їх сплави). Це пов'язано з тим, що у заготовок з високою електропровідністю здійснюється пряме формоутворення. Для заготовок з недостатньо високою електропровідністю (наприклад, вуглецеві нержавіючі сталі) деформування заготовок здійснюють через передавальну середу або проміжні матеріали мають високу електропровідність ("супутники"), що поміщаються на оброблювану заготовку.

Існують різні схеми штампування труб і плоских заготовок, що відрізняються формою заготовки, місцем розташування індуктора (всередині або зовні заготовки), наявністю або відсутністю еластичного передавального середовища. На рисунку (Рисунок 42) наведені схеми роздачі (а) і обтиску (б) труб. При роздачі індуктор (1) вставляється в трубу (2), при обтиску труба знаходиться всередині індуктора.

В обох випадках магнітне поле створює тиск, який змінює форму труби за формою матриці (3). Аналогічно змінюється і форма плоских заготовок. Тиск, що діє на деформовану заготовку при її обтиску в циліндричному індукторі зростає при зменшенні

поверхні, що знаходиться всередині індуктора, тощо. При зменшенні діаметра і довжини заготовки. Максимальне значення цього тиску досягається при певному співвідношенні глибини проникнення поля в заготовку з її діаметром і товщиною стінки.

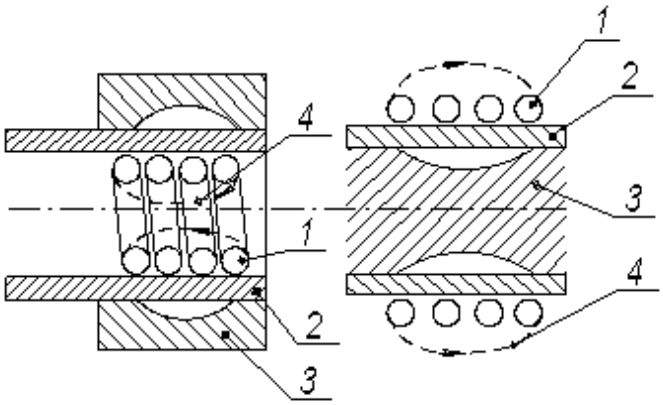

Рисунок 42.
Схеми роздачі й обтиску труб

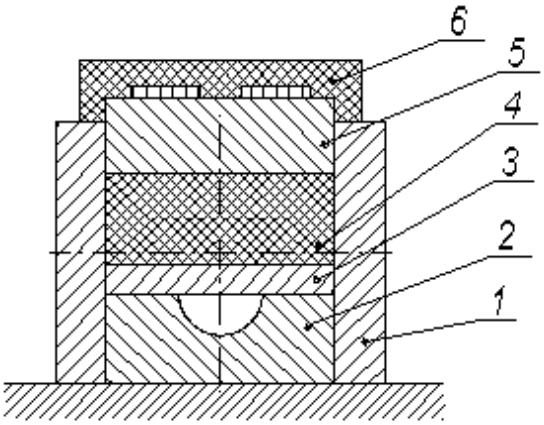

Рисунок 43.
Схема магнітно-імпульсного способу штампування

Експериментально було отримано співвідношення

$$Д = \frac{P\tau Mk}{\eta d} \qquad (254)$$

що встановлює математичну залежність між зміною діаметра заготовки Д, імпульсом тиску P, часом його дії τ, шириною формуючої ділянки M, товщиною заготовки η і щільністю матеріалу заготовки d. Тут k - коефіцієнт пропорційності.

На рисунку (Рисунок 43.) приведена схема магнітно-імпульсного штампування листового металу через еластичне передавальне середовище. При цьому методі штампування в товстостінний контейнер 1 поміщають металеву матрицю 2, потім заготовку 3, на яку укладають блок з еластичного матеріалу 4. Цей блок закривається рухливою пластиною 5, що представляє комбінацію з електропровідного матеріалу (алюмінію, міді і т.д.) з боку індуктора 6 і сталі чи високоміцного сплаву з боку пластичного матеріалу.

Тиск, що створюється імпульсним магнітним полем через рухливу пластину передається на пластичний матеріал, який вдавлює заготовку в поглиблення матриці. Як матеріал для еластичних блоків використовують гуми певних сортів і поліуретан. Крім еластичного середовища використовують рідину.

8.2.3. Збиральні операції, що виконуються з використанням імпульсного магнітного поля

Імпульсні магнітні поля дозволяють виробляти з'єднання деталей, які відрізняються від механічних способів низкою переваг.

1. Можна з'єднувати трубчасті деталі з деталями самої різної форми.

2. Виключається небезпека пошкодження зовнішньої поверхні через відсутність дотику деталі з інструментом.

3. Процес складання легко піддається автоматизації.

4. Якість збірки не залежить від кваліфікації оператора. Найбільш поширеною операцією складання деталей є поєднання двох трубчастих деталей обтиском зовнішньої труби по внутрішній стороні або з'єднання трубчастої деталі зі стрижнем таким же способом. Цей спосіб дозволяє з'єднувати деталі з різних матеріалів, що неможливо або утруднено виконати методом звичайної зварювання. Підвищення міцності з'єднання досягають нарізуванням кільцевих канавок на внутрішній або обох деталях.

Іншою областю застосування магнітно-імпульсного методу є напресування та паяння наконечників на кінці кабелів. Алюмінієві провідники під дією високого тиску деформуються, приймаючи шестигранну форму. Якщо провідники попередньо обслужені, то одночасно з обпресуванням може проводитися пайка наконечника з кабелем.

Міцність з'єднання методом обтиску залежить від величини зазору між деталями і від шорсткості поверхонь. Величина зазору,

що забезпечує максимальну міцність становить приблизно 0,3 мм, при великих і менших його значеннях міцність з'єднань зменшується. З ростом шорсткості в діапазоні 10 – 49 мкм міцність з'єднання збільшується.

Магнітно-імпульсним методом здійснюють напресування алюмінієвих наконечників на порцелянові ізолятори. Оскільки в такій технології легко контролювати і підтримувати на необхідному рівні ударне навантаження, то операції здійснюють без пошкодження тендітного фарфору.

Даний метод застосовують для опресовування шлангів високого тиску, опресування наконечників на канати, з'єднання проводів трубкою. Широке поширення отримали зварювання деталей магнітно-імпульсним способом. Цей вид зварювання схожий на холодне зварювання тиском, так як в структурі зварного з'єднання відсутні деформації поверхневих шарів в зварювальних деталях.

Таке зварювання застосовується при виготовленні теплообмінних апаратів, де необхідно з'єднувати труби між собою або труби з трубними решітками, виконаними з різнорідних металів. Міцність зварного з'єднання також як і при обтиску зростає зі збільшенням шорсткості поверхні.

Іншою можливою областю застосування магнітно-імпульсної зварювання є ядерна енергетика: приварка заглушок зі сплаву, що погано піддається зварюванню звичайними методами, до оболонок паливних елементів із сплавів з великим електричним опором R = 3 мкОм/см у сплаву SAP, R = 74 мкОм/см – у сплаву "ціркалой -2". Результати дослідження структури і механічних властивостей зварного з'єднання сплаву "ціркалой-2" показали, що змін твердості не відбувається, а випробування на розтягування і стиснення, що виконуються при 733 К і швидкості деформування 0,2 мм / хв, показали переваги магнітно-імпульсної зварювання по порівняно з електрозварюванням.

Можлива дифузійне зварювання енергії в магнітному полі. Процес зварювання складається з двох стадій:

- індукційного нагріву з'єднаних деталей,

- подальшого стискання деталей магнітним полем. Частота струму залежить від товщини деталей.

Контрольні питання

1. В чому сутність фізики процесів в струмопровідних матеріалах під дією імпульсного магнітного поля?
2. Поясніть принципову схему установки для магнітно-імпульсної обробки.
3. Перерахуйте особливості магнітно-імпульсного формоутворення.
4. Які ви знаєте інструменти для магнітно-імпульсної обробки?
5. Які ви знаєте збиральні операції, що виконуються з використанням імпульсного магнітного поля?
6. Назвіть стадії зварювання.

Тема 9. Електроерозійна обробка матеріалів

9.1. Фізичні основи електроерозійної обробки

9.1.1. Історія розвитку електроерозійної обробки

Електрична ерозія є шкідливим явищем, що виникають на різних контактах електричних пристроїв – реле, рубильників, вимикачів. Вона призводить до руйнування контактів і скорочення їх термінів служби. Тому багато досліджень було присвячено вивченню цього явища і розробці способів боротьби з ним.

В роки II світової війни над цією проблемою працювали радянські вчені Б.Р. Лазаренко і Н. І. Лазаренко. Вони, вивчаючи явище електричної ерозії металів, прийшли до висновку, що його можна використовувати для обробки матеріалів. Цей винахід мало визначне значення в техніці обробки матеріалів, оскільки до традиційних методів механічної обробки (різання, шліфування, свердління) додавався новий метод, заснований на явищах в електричних розрядах.

У наступні роки електроерозійної обробка успішно розвивалася, схеми вдосконалилися, показники поліпшувалися. У цьому велика заслуга належить вітчизняним ученим і інженерам Б. Н. Золотих, А. Л. Лівшиць, Л. С. Палатніков і іншим.

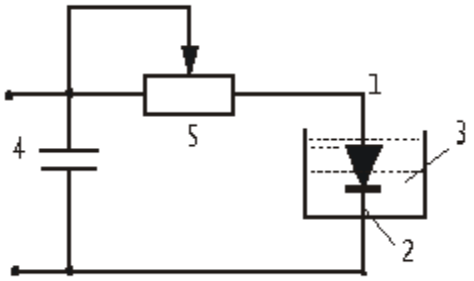

Рисунок 44. Схема установки Лазаренко Б. Р.

Схема першої експериментальної електроерозійної установки Лазаренко Б. Р. і Лазаренко Н. І. показана на рисунку (Рисунок 44). На поміщені в рідкий діелектрик 1 електрод 2, який є інструментом, і електрод 3, що є оброблюваної деталлю, подавався імпульс напруги від конденсатора 4. Зарядку конденсатора здійснювали від джерела постійної напруги, час зарядки регулювали реостатом 5.

Принцип роботи схеми полягає в наступному. При подачі імпульсу струму на електроди 2 і 3 між ними створюється електричне поле, напруженість якого залежить від міжелектродного відстані. При зближенні електродів між ними виникає розряд, який призводить до руйнування матеріалу заготовки деталі. Краплі металу охолоджуються діелектричною рідиною і у вигляді кульок видаляються з міжелектродного проміжку. Таким чином, основними елементами першої схеми ЕЕО були: генератор імпульсів, конденсатор, реостат, джерело напруги, електрод - інструмент, що обробляється деталь і рідкий діелектрик.

9.1.2. Фізичні процеси при електроерозійній обробці

Видалення металу з заготівлі здійснюється за рахунок мікророзрядів, що виникають в середовищі діелектрика між інструментом і заготівлею і розігрівають їх поверхневі шари. Ці процеси відбуваються при зближенні електрода – інструменту і заготовки, в результаті чого напруженість поля Е збільшується за законом.

$$\Delta E = \frac{U}{\Delta d} \qquad (255)$$

де U – напруга між електродами,

d – відстань між електродами.

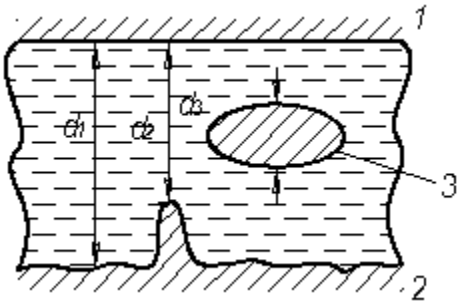

Рисунок 45. Схема розташування інструменту (1), заготовки (2) і струмопровідного включення (3); d_1 – найбільша відстань; d_2 – найменша відстань; d_3 – розмір включення

Найбільша напруженість виникає на тих ділянках, де є виступи або де в зазорі знаходяться будь-які проводять включення. На рисунку (Рисунок 45) показана схема розташування інструменту, заготовки та діелектричного проміжку. Найбільша відстань між електродом-інструментом 1 і заготівлею 2 одно d_1 найменше d_2. За рахунок токопроводжувального включення 3 відстань d_1 зменшується на величину d_3.

При зближенні електродів до величини зазору, рівного критичного, відбувається пробій міжелектродного проміжку і виникає електричний розряд. Метал заготовки нагрівається за рахунок бомбардування його частинками розряду.

Якщо заготовка є анодом, то вона бомбардується електронами, а на електрод – інструмент рухаються іони. Оскільки швидкість руху цих частинок при однаковій напрузі визначається їх масою, згідно виразу

$$\frac{MV^2}{2} = qU, \qquad V = \sqrt{\frac{2qU}{m}} \tag{256}$$

де m, V, q – маса, швидкість і заряд зарядженої частинки, відповідно, U – прискорює напруга, то електрони будуть досягати поверхні заготовки швидше, ніж іони досягнуть поверхні електрода – інструменту.

Електрони будуть розігрівати поверхню заготовки, і розплавлений метал буде вилітати з заготівлі, охолоджуватися

діелектричною рідиною в зазорі і в вигляді кульок віддалятися разом з рідиною з зазору. В результаті утворюється поглиблення у вигляді лунки. Потім пробою виникає в іншому місці, де відстань досягає критичного значення $d_{кр}$ і там відбувається видалення металу. Таким чином відбувається вирівнювання поверхні заготовки і видалення металу.

Для того щоб менше руйнувався електрод – інструмент при подачі на нього негативної напруги (пряме включення полярності) необхідно підбирати таку тривалість імпульсу, при якій іони не встигатимуть досягати катода за час дії імпульсу. Такий спосіб обробки називається електроіскровим,

Але при малій тривалості імпульсу швидкість обробки буде зменшуватися, зменшуватися буде і продуктивність. Тому тривалість імпульсу підбирають такий, щоб і швидкість обробки була достатньою і знос електрода-інструменту був малий.

Якщо необхідно мати великі швидкості знімання матеріалу заготовки, то слід збільшувати тривалість імпульсу і поміняти полярність: позитивний потенціал подати на інструмент, негативний – на заготовку. Тоді під дією іонів розряду інтенсивно руйнуватиметься заготовка, а на інструмент йтимуть електрони. Така схема включення буде називатися електроімпульсною обробкою.

При електроерозійної обробці напруга становить 40-180 В в електроіскровому способі і 18-136 В – в електроімпульсної способі. Напруженість поля в міжелектродному проміжку в момент пробою досягає 107 В/м, в зоні розряду утворюється плазма, швидкість наростання струму в якій становить 105 А/с. Тривалість імпульсу струму при чорновій обробці деталей становить від 200 до 105 мкс, а при чистової – від 5 до 200 мкс. Величина струму досягає від 20 до 100 А при чорнової і від 0,5 до 50 А при чистової обробки відповідно.

Основні стадії і закономірності електроерозійної обробки.

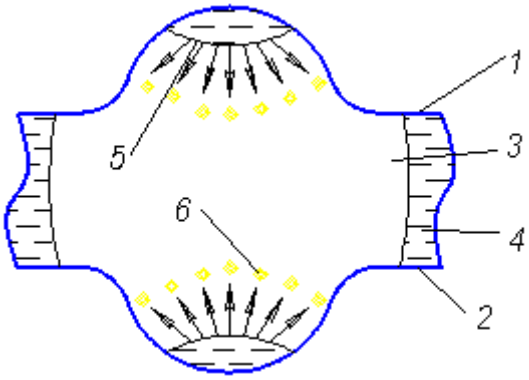

Рисунок.46. Схема третьої стадії електроерозійного процесу: 1, 2 – електроди; 3 – газовий міхур; 4 – стисла рідина; 5 – лунка; 6 – розплавлений метал

Можна виділити три стадії електроерозійного процесу:

I. Нагрівання, оплавлення металу, освіту лунки.

II. Освіта газового міхура з парів металу і рідини.

III. Розширення газового міхура, відрив ударної хвилі від газового міхура і її гасіння рідиною.

Після нагріву, оплавлення металу і освіти лунки, настає друга стадія ерозійного процесу – утворення газового міхура з парів металів і рідини. У каналі провідності, утвореному в місці виникнення мікророзрядів, створюється високий тиск, що досягає значень 2 · 107 Па. Канал провідності розширюється, утворюється газовий міхур, який стискає навколишнє газову фазу. Кордон міхура рухається з високою швидкістю, що досягає 22 м/с. Між газовим міхуром і навколишнього рідиною утворюється фронт ущільнення, в якому тиск стрибкоподібно змінюється від вихідного в рідині до 107 Па.

Третя стадія процесу характеризується припиненням струму між електродами, розширенням газового міхура, відривом ударної хвилі від газового міхура і гасінням її рідиною. При розширенні міхура тиск в ньому різко падає і що міститься в лунках розплавлений метал викидається в міжелектродний проміжок і застигає у вигляді кульок. Схема третьої стадії показана на рисунку (Рисунок.46).

Між електродами 1 і 2 утворюється газовий міхур 3, який, розширюючись, стискає рідину 4. З лунки 5 розплавлений метал 6 у вигляді кульок викидається в міжелектродний простір.

В якості рідин використовують різні діелектрики: масла, гас, які виконують двояку роль – роль діелектричного проміжку і роль охолоджуючого середовища. Крім того, вона забирає продукти обробки. Тому рідина прокачується через проміжок з певною швидкістю. Якщо ж швидкість обробки мала, то ємність з рідиною роблять відповідного обсягу і рідина не прокачується.

Якщо електроерозійну обробку проводять в повітряному середовищі, то замість електроіскрового розряду виникає більш тривалий електродугової розряд, оскільки охолодження менш інтенсивне, ніж у рідині. Такий спосіб обробки називається електроконтактний. Схема електроконтактної обробки показана на рисунку (Рисунок. 47).

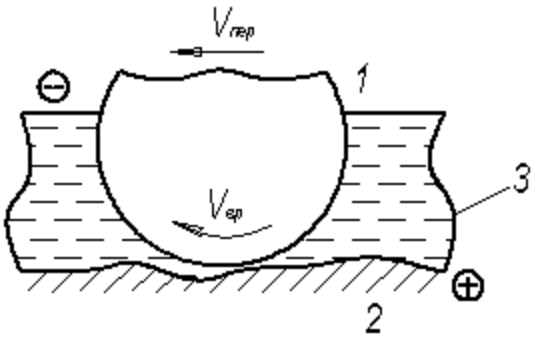

Рисунок. 47. Схема електроконтактні обробки: 1-інструмент; 2-деталь; 3-діелектрик; Vпер-швидкість переміщення; Vвр-швидкість обертання інструменту

Між електродом – інструментом 1 і деталлю 2 знаходиться діелектрик. Поверхні електродів мають виступи і не є ідеально гладкими. Тому при зближенні до певного значення dкр виникає розряд. Якщо обробка ведеться в повітряному середовищі, то виникають тривалі дугові розряди. Виплавляються великі ділянки заготовки. Оскільки зазор між електродами в такій схемі обробки малий, то можливий варіант не тільки знімання металу, а й нарощування матеріалу інструменту на заготівлі за рахунок

попадання розплавленого матеріалу інструменту і його застигання на заготівлі. Цей процес називається електроерозійним легуванням.

При електроконтактній обробці напруга на електродах зазвичай становить 1-2 В і досягає до 12 В в повітряному середовищі і від 8 до 40 В в рідкому середовищі. Існують три джерела тепла, внесок яких залежить від напруги і швидкості обертання електрода-інструменту: механічний, дугового і електричний. Механічний визначається швидкістю обертання електрода-інструменту, дугового – напругою, струмом і тривалістю дугового розряду, електричний опір в місцях електричного контакту.

При електроконтактній обробці при малих напругах (1-2) В основний внесок в нагрів дає тертя, при напрузі порядку 10 В нагрів йде, в основному, за рахунок дугового розряду.

Викидання розплавленого металу в електроконтактному способі здійснюється рухомим електродом-інструментом, який крім обертання переміщається по поверхні заготовки.

Великою перевагою електроконтактного способу є можливість здійснення легування заготовки і її зміцнення. Оскільки: матеріал електрода-інструменту (аноду) не переноситься на заготовку (катод), то відбувається їх взаємодія і утворення нових сплавів в поверхневому шарі. При цьому утворюються нітриди або карбіди – шари з високою зносостійкістю. Відбувається також дифузія матеріалу анода в глибші шари заготовки.

9.1.3. Матеріали для електрода-інструменту.

Критеріями вибору матеріалів для електрода-інструменту:
- ерозійна стійкість,
- питома провідність,
- міцність,
- корозійна стійкість,

- можливість виготовлення інструменту необхідної форми з мінімальними витратами,

- вартість.

За ерозійної стійкості, в порядку її зростання, матеріали можна розташувати в ряд: алюміній і його сплави, сірий чавун, латунь, мідь, вольфрам, графітові матеріали.

Ерозія матеріалу залежить від теплопровідності і температури плавлення. При постійній енергії імпульсу нагрівання тим менше, чим більше теплопровідність, так як тепло швидше йде всередину матеріалу. Тому електроди-інструменти виконують зазвичай з міді, латуні, алюмінію, оскільки їх ерозія менше, ніж ерозія твердих сплавів і сталі. У той же час матеріал повинен мати високу температуру плавлення. Тому для виготовлення електрода-інструменту іноді застосовують графіт, вольфрам, композиції міді і вольфраму. Найчастіше ж застосовують електроди з міді та латуні, так як вони більш дешеві і можуть бути виготовлені будь-якої форми.

Найбільш цікавим вирішенням питання про підвищення зносостійкості інструменту є процес нанесення (осадження) на поверхні шару вуглецю, що утворюється в результаті розкладання вуглецювміщувальної робочої рідини. У разі рівного розподілу швидкостей зносу і осадження шару форма і розміри інструменту будуть постійними в процесі роботи. Цього можна досягти підбором особливої форми імпульсу напруги: з крутим переднім фронтом, необхідним для забезпечення розряду і гребінчастим заднім фронтом, необхідним для розкладання робочої рідини і виділення вуглецю. Прикладом є таке осадження вуглецю на мідь. Зносостійкість підвищується в десятки разів.

9.1.4. Теплові процеси при електроерозійній обробці

Наближений розрахунок температури в околиці розряду виробляють при наступних припущеннях:

- розряд є стаціонарним джерелом теплоти,

- теплофізичні характеристики електродів і міжелектродного проміжку є постійними в часі.

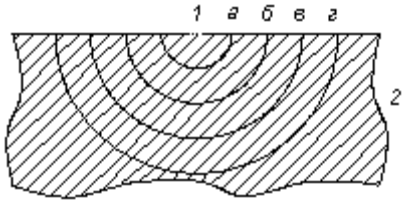

Рисунок.48. Схема поширення тепла в матеріалі заготовки: 1–точкове джерело тепла; 2 – заготовка

Схема поширення теплоти в матеріалі заготовки показана на рисунку (Рисунок.48).

Точкове джерело тепла 1 випромінює енергію в усі сторони, але велика її частина через малі розміри потрапляє на електрод – заготовку 2. Зміна температури заготовки визначається виразом:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{Q\eta P}{c\rho r^3} \qquad (257)$$

де Q – безрозмірний параметр температури, що враховує теплопровідність заготовки λ і час дії імпульсу енергії τ;

P – енергія імпульсу;

c – питома теплоємність матеріалу заготовки;

ρ – щільність матеріалу заготовки;

r – відстань від джерела тепла до точки визначення температури;

η – коефіцієнт корисної дії імпульсу енергії.

Коефіцієнт корисної дії імпульсу енергії визначається виразом:

$$\eta = (1 - k_1)(1 - k_2)(1 - k_3)(1 - k_4) \qquad (258)$$

де k_1 –коефіцієнт, що враховує втрати енергії на нагрів рідини, освіта газового міхура і ударної хвилі і рівний 0,5 при електроіскровому режимі і 0,47 при електроімпульсної режимі;

k_2 – коефіцієнт, що враховує нагрів електроду-інструменту і залежить від його теплофізичних характеристик і розташування щодо заготовки;

k_3 – коефіцієнт, що характеризує властивості діелектричного середовища, що змінюється від 0,2 (гас) до нуля (масла);

k_4 – коефіцієнт, що враховує зміну напруги, що дорівнює +0,1, якщо напруга вище номінального, і -0,1, якщо напруга нижче нормального.

Як приклад в таблиці 9.1 показана залежність температури металу від відстані від точкового джерела по сферичним кривим (ізотерми) в кінці дії імпульсу потужністю 0,54 Дж тривалістю 8 мс.

Таблиця 9. 1

Залежність температури металу від відстані від точкового джерела тепла

г, мкм	0	5	10	15	20	30	40	50
Т, К	5700	4850	3350	2870	1850	630	335	296

Температура плавлення металу дорівнює 1850 К, перегрів до температури 5700 К необхідний для забезпечення його рідинотекучості при викиданні з лунки. Глибина лунки при цих умовах становить 20 мкм.

9.2 Технологічні процеси виготовлення деталей і показники ЕЕО

9.2.1. Схеми електроерозійної обробки.

Технологічні схеми електроерозійної обробки, використовувані в промисловості, такі:

а) прошивання отворів,

б) розрізування,

в) електроерозійне шліфування,

г) електроерозійне зміцнення.

Прошивання – це видалення металу з порожнин, заглиблень, отворів, пазів. Існує два види прошивання:

- пряме копіювання, коли інструмент розташований над заготівлею;

- зворотне копіювання, коли інструмент розташований під заготівлею.

У другому випадку полегшується видалення продуктів обробки. Розрізання профільним або непрофільним інструментом передбачає поділ заготовки на частини – відрізання, або отримання непрямолінійного контуру – вирізання. Відрізання виконується пластиною або диском. В обох випадках інструмент переміщається до заготівлі, але диск додатково ще обертається.

Електроерозійне шліфування виконується за допомогою диска, що здійснює обертальний і поступальний рух. При цьому заготовка може бути нерухомою або обертається. Якщо обертання відбувається в одну сторону, шліфування називається попутним, якщо в різні боки –зустрічним.

Електроерозійне зміцнення відбувається як за рахунок легування, так і за рахунок нарощування поверхні. Воно зазвичай здійснюється при електроконтактному способі, тому буде більш детально розглядатися далі.

9.2.2. Прошивання отворів і порожнин.

Схема електроерозійного прошивання отворів і порожнин показана на рисунку (Рисунок 49) між електродом-інструментом 1 і заготівлею 2 подається напруга і виникає електричний розряд. У ванній 3 електролітом 4 виносяться продукти обробки 5 у вигляді кульок.

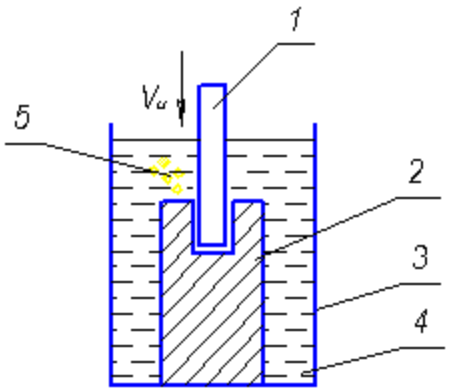

Рисунок 49. Схема прошивання отворів і порожнин: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – електроліт; 5 – продукти обробки; V_i – швидкість подачі інструмента

Операції прошивання застосовуються в багатьох випадках.

1) Видалення з оброблюваних деталей уламків мітчиків, свердел і інших інструментів. У таких випадках використовують схему прямого копіювання. Для електрода-інструменту застосовують мідь, латунь, алюміній або його сплави. Електроерозійний спосіб видалення уламків інструменту і кріплення застосовується на заключних операціях, дозволяє усунути брак технологічного процесу, виключити необхідність відпалу деталі, який застосовують для зниження твердості уламків інструменту.

2) Виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів, таких як жароміцні сплави, загартовані деталі, магнітні сплави. Для виконання таких операцій проводять розрахунки режимів обробки (енергію імпульсу, напруга холостого ходу, тривалість обробки, продуктивність), виходячи з умов шорсткості отвору.

Матеріалом електрода-інструменту є графітові композиції при обробці загартованих, жароміцних і твердих сталей; при обробці титанових сплавів застосовують латунь. Зазвичай такі операції проводять без прокачування робочої рідини, але для підвищення точності обробки виробляють прокачування або відсмоктування рідини.

При прошивці глибоких отворів виникають труднощі, пов'язані з підтриманням необхідних режимів при значному

впровадженні електрода-інструменту в заготовку, так як при цьому різко зростає вібрація інструмента, утруднене видалення продуктів обробки з отвору.

Конструкція електрода-інструменту залежить від ставлення глибини отвору е до його діаметру d. При е / d <= 20 і d <5мм, l <= 100 мм можна використовувати суцільний стрижень, але при цьому продуктивність обробки в міру поглиблення електрода-інструменту в деталь знижується на 10-15%, при l/d> 20 застосовують електроди–інструменти у вигляді трубки з міді, латуні, графітових матеріалів. Отвори дозволяють прокачувати або відсмоктувати робочу рідину і скоротити час обробки за рахунок усунення періодичного виведення інструменту з поглиблення. Така конструкція дозволяє отримувати глибокі отвори з співвідношенням l/d = 40. Якщо потрібно отримати отвори з l/d> 40, то застосовують трубки з нарізним спіральним каналом для видалення продуктів обробки, іноді використовують обертання інструменту.

3) Прошивання некруглих отворів і пазів проводять дуже часто в тих випадках, коли необхідно такий профіль отримувати на твердих сплавах. Наприклад, при виготовленні лопаток турбін авіаційних двигунів, при виготовленні матриць і штампів, виготовленні каналів і пазів в насосах, турбінах, компресорах. Електрод-інструмент в таких випадках виготовляють з міді, латуні, чавуну або графітового сплаву. Якщо профіль отвору складний і по довжині непрямолінійний то передбачають поворот електрода-інструменту в процесі обробки.

4) Прошивання сполучних каналів в корпусах гідроапаратури важко здійснити методами механічної обробки. Якщо ж поперечний переріз каналів некруглих, то його отримання можливо тільки із застосуванням електричних методів, зокрема електроерозійним прошиванням.

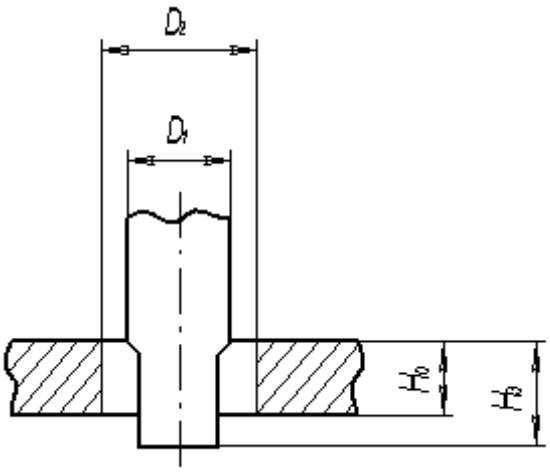

Рисунок. 50. Схема наскрізної обробки циліндричного отвору

Розрахунок розмірів електрода-інструменту для обробки наскрізних або глухих отворів різної форми наведено в спеціальній довідковій літературі. Тут ми розглянемо найбільш прості форми отворі і формули для розрахунку розмірів електрода-інструменту.

На рисунку (Рисунок. 50) приведена схема наскрізний обробки циліндричного отвору.

Тут позначено D_o, H_o – діаметр отвору і його глибина відповідно, d e – розмір робочої частини електрода-інструменту в горизонтальній площині; HPE-довжина робочої частини електрода-інструменту.

При такій схемі обробки при однопрохідному прошивці отворів розміри електрода-інструмента визначаються виразом:

$$D_Э = D_0 - 2l, \quad (259)$$

$$H_{РЭ} = H_0[(1{,}5 \div 2) + \gamma_Э] \quad (260)$$

де l – бічний міжелектродний зазор, рівний 0,35 ÷ 1,48 мм в залежності від значення максимального струму обробки в імпульсі, що змінюється в межах 50 – 300 А;

γ_e – відносний знос електрода-інструменту, залежить від його матеріалу (мідь, чавун графітований), форми і частоти імпульсів, матеріалу заготовки.

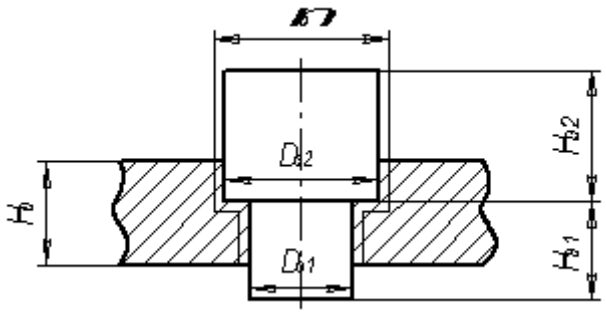

Рисунок . 51. Схема наскрізної обробки отвору ступінчастою форми

Наприклад, при f = 22 кГц прямокутних, імпульсах е Електроди графітові, при обробці стали, γ_e = 3–5%; при гребенчатій формі імпульсів і тих же параметрах γ_e = 0,08-0,15%. Якщо отвір ступінчастою форми, то формули для розрахунку розмірів електрода інструменту ускладнюються (Рисунок . 51)

$$D_{э1} = D_0 - 2[l + (0{,}2 \div 0{,}5)] \quad (261)$$

$$D_{э2} = D_{э0} + \frac{\Delta}{2} - 2(l - \gamma_э)(l - l_\tau) \quad (262)$$

$$H_{э1} = H_0[(1{,}5 \div 2{,}0) + \gamma_э] \quad (263)$$

$$H_{э2} = H_0[(1{,}1 \div 1{,}3) + \gamma_э] \quad (264)$$

Тут Δ – допуск на розмір отвору в горизонтальній площині;

$l\tau$ – торцевої міжелектродний зазор, що залежить від частоти, форми і струму імпульсів і змінюється від 0,01 до 0,5 мм.

Крім розглянутих вище операцій, велике місце займають прошивання зовнішніх поверхонь, виготовлення сіток, грат, тонкостінних деталей конструкцій, а також маркування деталей.

9.2.3. Електроерозійне шліфування

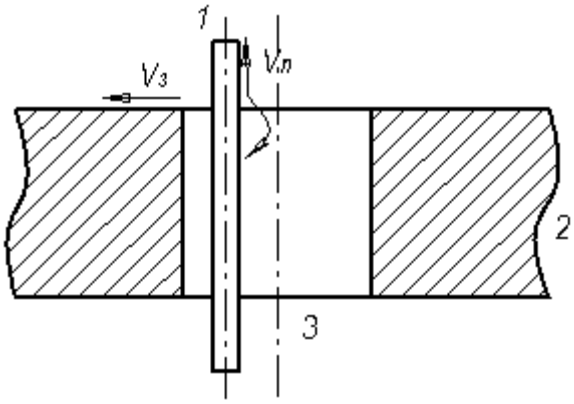

Рисунок 52. Схема шліфування дротяним електродом: 1–електрод-інструмент; 2–заготовка; 3–отвір; Vп, Vз– швидкість подачі і швидкість переміщення дроту і деталі відповідно

Електроерозійне шліфування застосовують для обробки магнітних злитків, електротехнічних виробів, зібраних з тонких пластин. Перевага електроерозійного шліфування перед механічним полягає в тому, що відсутні великі навантаження, виключається сколювання твердосплавних і магнітних матеріалів.

Для шліфування дрібних отворів, наприклад, в твердосплавних фільтрах застосовують дротяний електрод, який постійно простягається, що виключає вплив його зносу на точність обробки. Схема такого шліфування показана на рисунку (Рисунок 52).

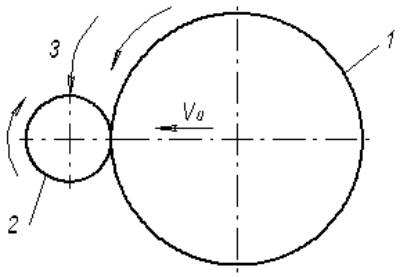

Рисунок 53. Схема зустрічного шліфування: 1–електрод-інструмент; 2–заготовка; 3–сопло поливу рідиною; V_U– швидкість подачі інструмента

Електрод-інструмент (дріт) 1 вводиться в заготовку 2 через попередньо розкрите отвір 3. Обертання і пересування (V_3) до стінки отвори призводить до шліфування, а пересування (V_u) дроту дозволяє уникнути зносу інструменту.

Крім шліфування дротяним електродом застосовується зустрічне шліфування, схема якого показана на рисунку (Рисунок 53). В цьому випадку електрод-інструмент 1, виготовлений у вигляді диска, і заготівля 2 обертаються в протилежних напрямках. Заготівля поливається робочою рідиною, яка подається через сопло 3. Електрод-інструмент подається з постійною швидкістю V і до заготівлі в міру її обробки.

9.2.4. Електроерозійне розрізання заготовок.

Розрізання заготовок електроерозійним способом здійснюють диском або стрічкою. При розрізуванні диском заготовка може бути нерухомою або обертається. Функція обертання дає змогу підвищити продуктивність в 3 – 4 рази. Якщо обертання немає, то доцільно при розрізанні товстих заготовок (більше 100 мм) заготовку перевернути після проходження середини і подальші операції виробляти зі зворотного боку.

Процес ведуть на повітрі або в рідкому середовищі при струмі 600, 800 А. Диск виконується з листової сталі до 1 мм завтовшки і до 1000 мм діаметром. Похибка досягається не більше 0,2 – 0,3 мм. Якщо розрізається жароміцна сталь, то час скорочується в 8 –10 разів в порівнянні з механічним розрізанням. При розрізуванні стрічкою її товщина невелика і значно зменшити товщину різу. Застосовують латунні стрічки товщиною 0,1 мм і сталеві товщиною 0,3 мм. Електроерозійне розрізання використовують в основному виробництві для поділу нежорстких заготовок, наприклад, тонкостінних трубок. В інструментальному виробництві цим методом відрізають заготівлі для різців, штампів з твердосплавних матеріалів. При виготовленні вирубних штампів філер, матриць використовують.

9.2.5. Електроерозійне зміцнення деталей

Оскільки в електричному розряді здійснюється перенесення металу, то електроерозійним методом можливо зміцнення деталей. Воно може бути декількох видів:

- нарощування значного шару металу з метою зміцнення і відновлення зношених ділянок деталей;
- нанесення тонких покриттів з благородних металів, наприклад, для електричних контактів;
- зміцнення за рахунок зміни фізико-механічних властивостей поверхні без зміни розмірів деталі.

Сучасне обладнання для зміцнення дозволяє проводити операції в різних режимах – "грубі", "чорнові" і "чистові".

9.2.6. Продуктивність електроерозійної обробки

Продуктивність електроерозійної обробки визначається відношенням маси або обсягу віддаленого металу до часу обробки і виражається в г/с або мм^3/с. Вона пропорційна потужності, яка витрачається в міжелектродному проміжку.

$$Q = \frac{m}{t} = \frac{v}{t}, \qquad Q = CP \tag{265}$$

$$P = Af, \qquad Q = CA\,f \tag{266}$$

де С – коефіцієнт, що залежить від теплофізичних характеристик матеріалу;

Р – потужність;

А – енергія в імпульсі;

f – частота проходження імпульсів.

Якщо ж проводити відрізання заготовки електроерозійним методом, то таке визначення продуктивності буде неправомірним, оскільки маса знятого матеріалу в цьому випадку не є критерієм операції. Площа бічної поверхні різу в цьому випадку є мірою виконаної операції, а її відношення до часу обробки – продуктивністю (S/t). Площа визначається твором товщини заготовки на довжину різу або площею кола для круглих

заготовок. Продуктивність легування з метою зміцнення матеріалу визначається відношенням площі нанесеного шару до часу обробки:

$$Q = \frac{S}{t} \tag{267}$$

У будь-якому випадку продуктивність залежить від потужності, реалізованої в міжелектродному проміжку. Зі збільшенням потужності збільшується швидкість обробки, але при цьому збільшується і кількість продуктів обробки, які гальмують процес знімання металу. У міру поглиблення в заготовку, ускладнюється видалення продуктів обробки і надходження свіжої рідини в міжелектродний проміжок. У міжелектродному проміжку утворюється велика кількість електропровідних крапель застиглого металу і енергія витрачається на вторинне розплавлення цих частинок. Для їх видалення і підвищення продуктивності використовують примусову прокачування робочої рідини.

Залежно від властивостей робочого середовища змінюється частка корисного використання енергії імпульсу. Тому для кожного виду обробки застосовують оптимальну діелектричну середу: якщо в процесі електроерозійної обробки використовується мала енергія імпульсу, то застосовують дистильовану і технічну воду або гас, при високих енергіях імпульсу застосовують масла, дизельне паливо, тощо. Важкі фракції нафти. На рисунку (Рисунок 54) показано вплив складу середовища на продуктивність обробки при прошивці мідно-графітових електродом ферросіліда. Видно, що з трьох видів діелектричної рідини найбільша продуктивність досягається при обробці в гасі, найменша – при обробці в воді.

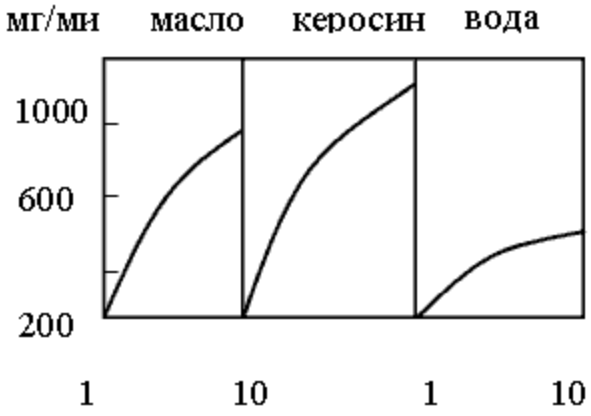

Рисунок 54. Вплив типу середовища на продуктивність для Си-С електродів

Для порівняння ефективності електроерозійної обробки різних металів і сплавів введено поняття оброблюваності, яке визначається відношенням маси знятого металу до маси металу, знятого з заготовки сталі.

9.2.7. Точність ЕЕО.

Під точністю електроерозійної обробки розуміється ступінь відповідності форми і розмірів деталі кресленням. Відхилення від форми і розмірів називається похибкою.

На точність ЕЕО впливають:

- точність виготовлення електрода-інструменту;
- знос електрода-інструменту;
- похибка форми і розмірів поглиблення на заготівлі щодо електрода-інструменту, що залежить від нестабільності режимів обробки, викликаної коливаннями напруги в мережі, змінами швидкості подачі і зносом електрода-інструменту.

Знос електрода-інструменту є основним фактором, що впливає на точність обробки. Для більшості режимів обробки він становить:

- при прошивці сталей в електроіскровому режимі мідним електродами 30–95 % від обсягу знятого металу з заготівлі;
- при роботі в електроімпульсної режимі мідно - графітовим електродами 0,1–4 %;

- при електроконтактному різанні на повітрі до 30%.

Для зниження впливу зносу на точність обробки необхідно:

а) виготовляти електрод-інструмент із стійкого до ерозії матеріалу (з вольфраму, меднографіта і ін.);

б) використовувати безізносні схеми, в яких частина матеріалу і робочої середовища беруть в облогу на електроді-інструменті, компенсуючи тим самим його знос;

в) замінювати зношені ділянки електрода-інструменту шляхом його переміщення.

Похибка при електроерозійному легіруванії визначаєте нерівномірністю наносного шару і досягає 20 % від його товщини.

9.3. Електроерозійне обладнання

9.3.1. Компонування обладнання.

Верстати для електроерозійної обробки включають такі блоки системи:

- генератори імпульсів,
- засоби регулювання і управління,
- систему подачі і очищення робочої рідини.

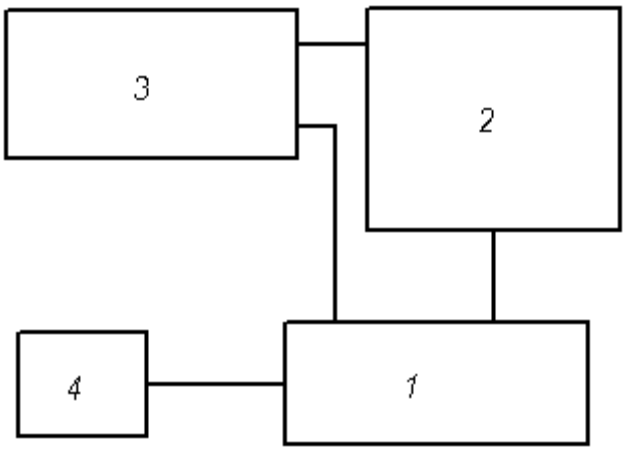

Рисунок 55. Блок-схема електроерозійного верстата

Блок - схема електроерозійного верстата показана на рисунку (Рисунок 55). Вона включає: механічну частину (1), що складається з робочого столу пристрої для закріплення електрода-

інструменту, системи регулювання і управління; генератор імпульсів (2) електрошафа (3) з розміщеними в ньому пускачами, рубильниками, запобіжниками; ванну з робочою рідиною, насосами, фільтрами (4). Електроерозійне обладнання випускається або серійно, або за індивідуальними замовленнями. Він може бути універсальним, спеціалізованим, спеціальним.

8.3.2.Генератори імпульсів

В даний час відомо кілька типів генераторів імпульсів: релаксаційні, машинні, лампові, напівпровідникові. Основна вимога до генераторів – отримання імпульсів необхідної форми і потужності. Хронологічно першими були релаксаційні генератори, розроблені Б. Р. Лазаренко і Н. І. Лазаренко. Параметри імпульсу в цих генераторах визначаються станом міжелектродного проміжку. На рисунку (Рисунок.56) показані 4 типи RC–генераторів. Це RC (а), RLC (б), RCL (в), LC (г) – генератори. Все релаксаційні генератори мають зарядний і розрядний ланцюг. Зарядний ланцюг включає джерело живлення ІП, ключ К, струмообмежуючий резистор К (в LC – генераторах його немає). Розрядний ланцюг складається з міжелектродного проміжку МЕП, конденсатора С і, можливо, індуктивного елемента L.

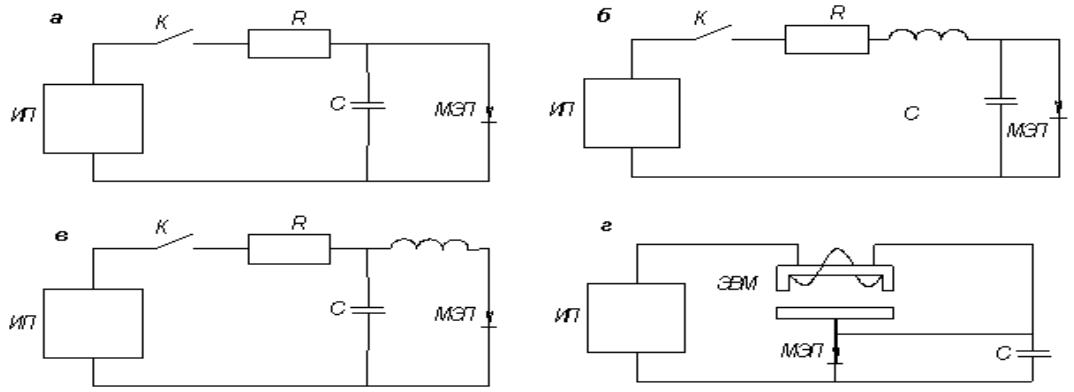

Рисунок.56. Схема RC-генераторів різних типів: а–RC, б–RLC, в–RCL, г–LC

Принцип роботи всіх RC – генераторів полягає в зарядці конденсатора до напруги і від джерела живлення при замиканні ключа. Постійна зарядки τ визначається твором RC. При досягненні U, рівного пробивному $U_{проб}$, відбувається пробій проміжку, електроерозійний процес і розрядка конденсатора.

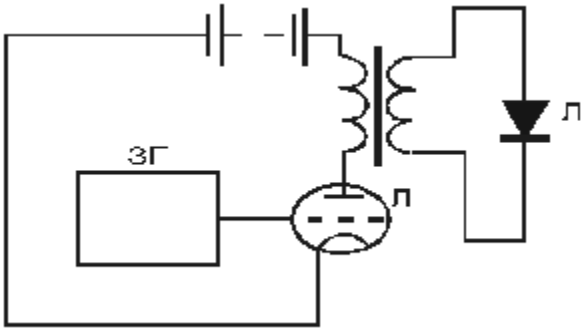

Рисунок 57. Схема лампового генератора імпульсів

Струм через проміжок припиняється, відбувається процес деіонізації проміжку (відновлення діелектричних властивостей середовища) і зарядка конденсатора. Необхідно, щоб час зарядки було більше період деіонізації τ> T і щоб розряд не перейшов в дуговий. Це досягається підбором R і C. Якщо швидко зближувати електроди, то час зарядки зменшується, розряди будуть відбуватися часто, напруга і енергія проміжку будуть малі. При дуже малих відстанях час між розрядами буде мало і деіонізація проміжку буде недостатня. Розряд може перейти в дугового. Таким чином, від стану МЕП (відстань між електродами, параметри середовища) залежить режим роботи генератора.

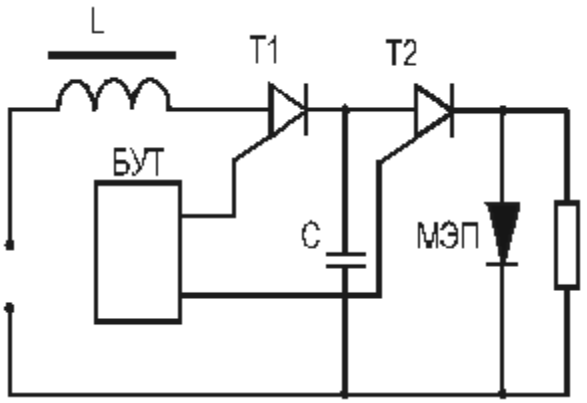

Рисунок 58. Схема напівпровідникового генератора імпульсів

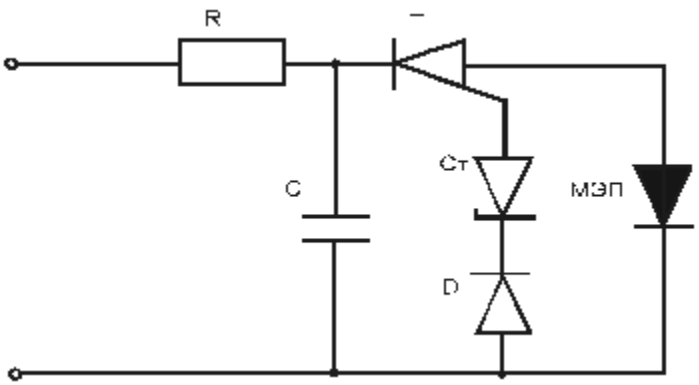

Рисунок.59. Схема генератора імпульсів зі стабілізатором

Звичайний RC–генератор має малий ККД (25%) і малу потужність (5-7 кВт) через нагрівання резистора. Підвищити потужність за рахунок зменшення часу зарядки і підвищення напруги вдається введенням L-елемента в RLC - генераторах. Але при цьому, як і в RC генераторах, виникає зворотна полухвиля, яка руйнує електрод-інструмент. Цей недолік вдається усунути в RCL-генераторах. Але при цьому знижується потужність. Тому такі генератори використовують для чистової обробки, коли анодом служить інструмент.

З метою підвищення ККД. розроблені LC-генератори, в які виключений обмежує резистор, і введений електромагнітний вібратор ЕМВ, якір якого жорстко пов'язаний з електродом інструментом. При подачі напруги струм протікає через обмотку вібратора, якір притягається до сердечника і переміщує інструмент від заготовки.

В цей час тече струм через конденсатор С. При досягненні мулових напруги зарядки сердечником U_{max} інструмент підходить до загшотовке, проміжок пробивається, струм через конденсатор припиняється, якір не утримується, горить розряд, відбувається електроерозійний процес, конденсатор розряджається. Потім процес повторюється. Такі генератори використовуються для чорнової обробки.

Для підвищення продуктивності процесу використовуються електронні лампи, оскільки в RC - генераторах збільшення енергії імпульсу пов'язано зі зростанням часу накопичення заряду. У

ламповому генераторі (Рисунок 57) частота проходження-імпульсів визначається задаючим генератором ЗГ. Частоту проходження імпульсів вдається підвищити до 20 кГц. Недоліком лампового генератора є низький ККД, висока напруга живлення (кілька кВ).

Для отримання широкого діапазону режимів обробки використовуються напівпровідникові генератори імпульсів. Схема генератора показана на рисунку (Рисунок 58).

При подачі напруги блок управління тиристорами (БУТ відкриває тиристор Т) і струм тече через конденсатор С до його повної зарядки Після зарядки БУТ закриває тиристор T_1 і відкриває тиристор T_2. У цей час відбувається пробій міжелектродного проміжку розрядки конденсатора. Струмообмежувальним елементом є котушка індуктивності L, опір ланцюга дозволяє розряджатися конденсатору при розімкнутому МЕП.

Недоліком таких генераторів є нестабільність напруги пробою, що призводить до зміни режимів обробки. Для усунення цього недоліку використовують схеми зі стабілітроном $C_т$ (Рисунок.59). У ній заряд здійснюють через резистор R або котушку індуктивності. В цей час тиристор Т закритий. Після зарядки напруга на конденсаторі стає вище напруги на стабілітроні Uc> Uст і стабілітрон відкриває тиристор. Відбувається розряд зі строго дозованою енергією через проміжок.

9.3.3. Регулятори подачі електрода-інструменту.

Основне призначення регулятора подачі електрода-інструменту підтримувати необхідний розмір міжелектродного проміжку 1 протягом всього часу обробки. Оскільки величина проміжку мала (десяті частки міліметра), то регулятор повинен володіти високою чутливістю, швидкодією. У разі коливань напруги або попадання провідних частинок в міжелектродний проміжок регулятор повинен відпрацьовувати відповідні команди.

Основними елементами регулятора є:
-вимірювально перетворювач,
-блок порівняння,
-підсилювач,
-виконуючий механізм.

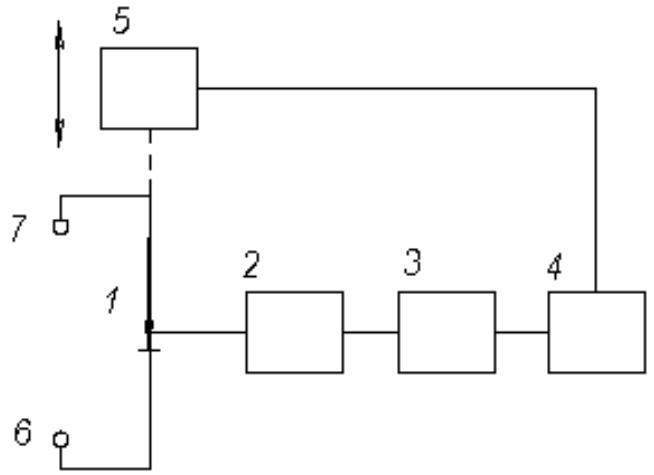

Рисунок 60. Регулятор подачі електрода-інструменту: 1–МЕП; 2–вимірювальний перетворювач; 3–порівняння; 4–підсилювач; 5–виконавчий механізм; 6,7–затискачі для генераторів імпульсів

На рисунку (Рисунок 60) показана блок-схема регулятора. Інформація про зазорі з МЕП 1 надходить на вимірювальний перетворювач 2, звідки у вигляді електричне сигналу передається в блок порівняння 3, де відбувається його порівняння з опорним сигналом

Віднімання і подальше посилення в підсилювачі 4 Якщо сигнал з блоку 2 більше опорного сигналу, то виконавчий механізм зробить зменшення МЕП; якщо сигнал менше опорного то виконавчий механізм збільшить зазор.

Регулятори бувають електрогідравлічні та електромеханічні. У електрогідравлічного регулятора виконавчим механізмом є гідропривід, у електромеханічного - електродвигун. Схема електромеханічного регулятора показана на рисунку (Рисунок 61).

Сигнал з МЕП 1, на який подається напруга від генератора імпульсів 2, подається на дільник напруги 3. На нього ж подається

і опорний сигнал з блоку 4. Якщо вони відрізняються, то різницевий сигнал подається на електродвигун 5, який, обертаючись, змінює міжелектродний проміжок. Напрямок обертання ЕД визначається знаком разносного сигналу. У цій схемі підсилювачем - перетворювачем є дільник напруги, тобто він виконують роль перетворювача блоку порівняння і підсилювача, виконавчим механізмом є електродвигун.

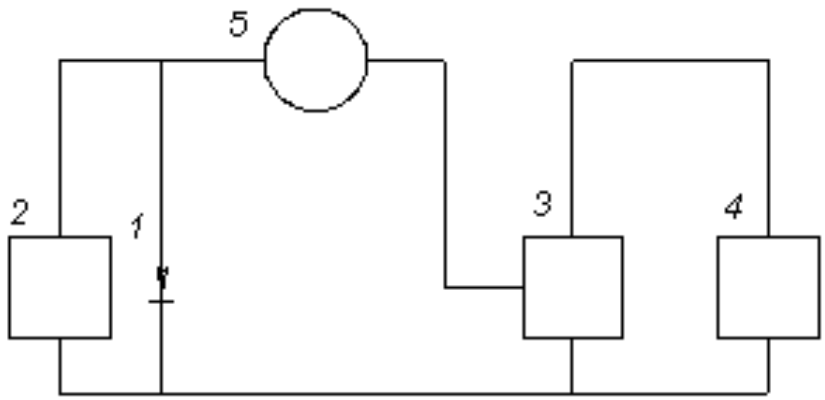

Рисунок 61. Схема електромеханічного регулятора: 1–МЕП; 2–генератор імпульсів; 3–дільник напруги; 4–джерело опорного напруги; 5–двигун

9.4. Системи очищення і подачі робочої рідини

Робоча рідина може перебувати в МЕП нерухомо між електродом - інструментом і оброблюваною деталлю або прокачуватися. При прокачуванні поліпшується якість і точність обробки, збільшується продуктивність. Для цього призначена гідравлічна система верстата. На Рисунок 62 показана схема такої системи. З бака 1 насосами 2 через фільтри 4 і пристрій регулювання витрати робочої рідини 5 регулятор витрати, 6-конус для скидання, 7-вентиль для скидання, подається робоча рідина.

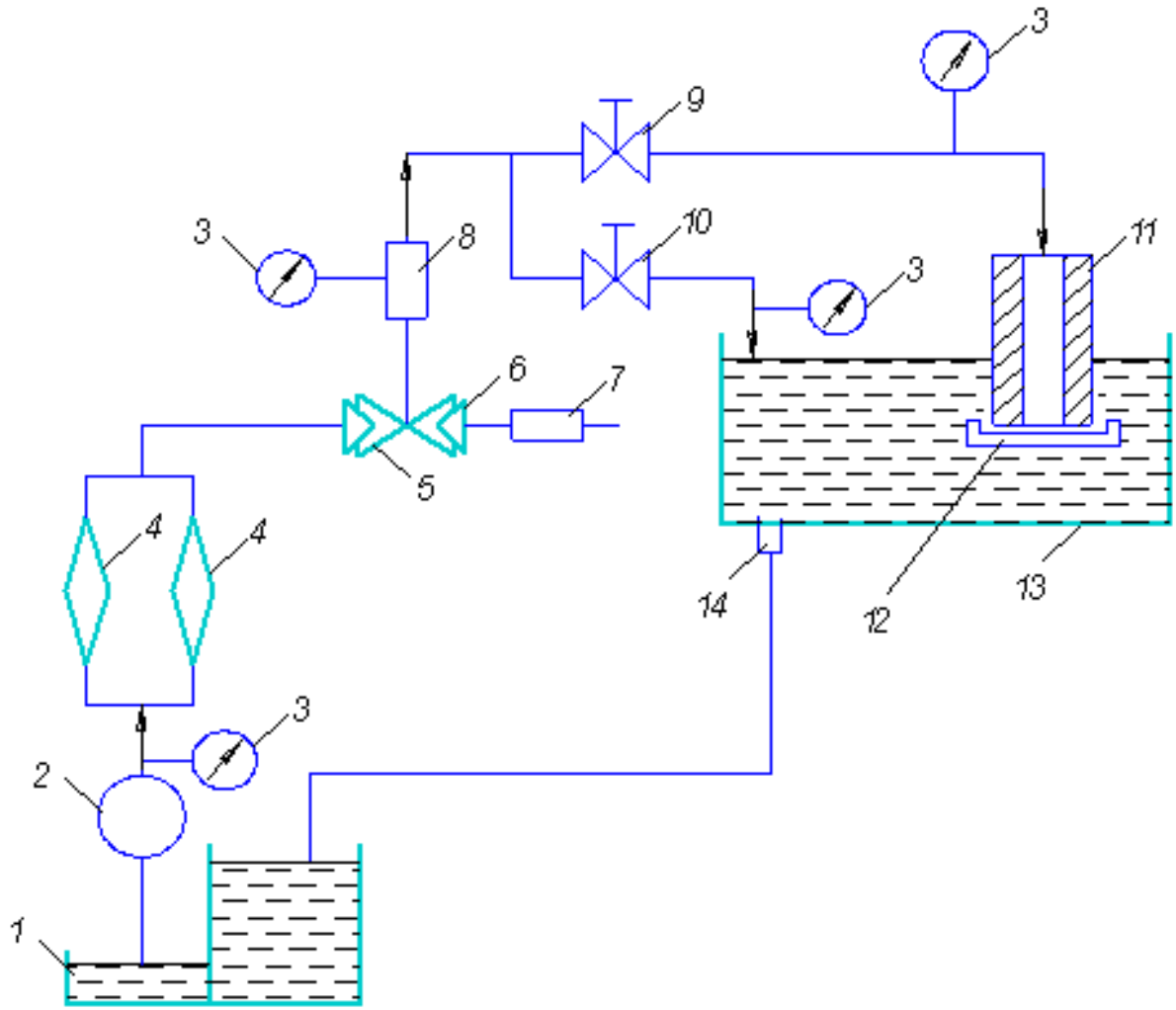

Рисунок 62. Система очищення і подачі робочої рідини

При цьому виникає два варіанти подачі робочої рідини: або Через порожнину електрода-інструменту 11 до деталі 12 при відкритому крані 9, або через кран 10 безпосередньо в робочу ванну 13. Вимірювання тиску здійснюється манометрами 3, злив рідини з робочої ванни в бак 1 здійснюється через отвір 14. Витрата рідини вимірюється ротометром 8.

Контрольні питання

1. Які технологічні процеси виконуються електропідривним способом?

2. Яка величина напруги при електрогідравлічному ефекті?

3. Як виглядає найпростіша схема отримання електрогідравлічного ефекту?

4. Які технологічні операції виконуються магнітно-імпульсним способом?

5. Які фізичні основи електроерозійної обробки?

6. Назвіть застосування іскрового розряду в процесах рослинництва.

Тема 10. Обробка сильними електричними полями (електронно-іонна технологія)

10.1. Загальні відомості про застосування електричних полів в технологічних процесах

У сільськогосподарському виробництві застосовують різні види впливу електричних полів на вміщені в них об'єкти: теплове, силове, біологічне. Використання теплового впливу електричного поля розглядалося в першій частині цього посібника.

Силовий вплив електричного поля застосовують в електронно-іонної технології (ЕІТ). ЕІТ - це область електротехнології, що використовує взаємодію сильних електричних полів з електрично зарядженими частинками твердого або рідкого матеріалу з метою надання їм різних форм упорядкованого і цілеспрямованого руху. Розглянемо деякі особливості ЕІТ.

Чинним електричним фактором, свого роду робочим органом, в апаратах ЕІТ є так звані сильні електричні поля, тобто поля з напруженістю понад 100 кВ / м. Як правило, застосовують постійні електричні поля: електростатичне і поле коронного розряду.

Об'єктом обробки в апаратах ЕІТ є матеріал, що представляє собою сукупність окремих частинок, розміри яких можуть знаходитися в межах від часток мікрометра до десятка міліметрів і вище (пил, порошок, насіння, волокна і т.д.).

В основі процесів електронно-іонної технології лежать чотири характерні стадії: подача матеріалу, зарядка його частинок, рух заряджених частинок матеріалу в електричному полі, формування готового продукту.

Сільськогосподарська ЕІТ стала оформлятися в самостійний напрям електротехнології починаючи з 50-х років в результаті робіт, проведених в ЧІМЕСХ під керівництвом А. М. Басова.

У сільському господарстві за допомогою електронно-іонної технології частки матеріалів можуть розділятися (очищення і сортування насіння, відділення обваленого проса, лушпиння від ядра соняшнику, насіння пшениці від мішечків твердої сажки та т. і.), Осідати (очищення повітря від пилу і мікробів, різні види аерозольної обробки: нанесення отрутохімікату на насіння і рослини, електрозабарвлення і т. д.) і змішуватися (наприклад, змішування компонентів комбікормів). Технологічні процеси поділу, осадження і змішування становлять основу і промислової ЕІТ. Однак принципова відмінність сільськогосподарської ЕІТ полягає в тому, що в сільському господарстві електричним полем обробляють об'єкти, що мають найчастіше біологічну природу (наприклад, насіння, бульби картоплі, живці, мікробні тіла і т. д.).

Можливість біологічної дії випливає з того, що в комплекс чинників, під впливом яких зароджувалася і формувалася життя на Землі, входить і власне електричне поле Землі. В результаті тривалої еволюції живі організми придбали сприйнятливість до електричних впливів зовнішнього середовища. Це проявляється в тому, що будь-яка жива клітина має електричним потенціалом, що змінюються в залежності від зовнішніх впливів.

Уже тривалий час в стадії досліджень і розробки знаходяться численні прийоми впливу електричними полями на сільськогосподарські біологічні об'єкти для стимулювання або придушення життєдіяльності останніх. З цих прийомів найбільш вивчені і отримали найбільше застосування в дослідно-виробничому порядку передпосівна і предпосадова обробка насіннєвого матеріалу і штучна іонізація повітря в сільськогосподарських приміщеннях.

Перш ніж познайомитися з процесами сільськогосподарської ЕІТ, розглянемо використовувані в них основні фізичні явища (коронний розряд, зарядка часток, силова дія електричних полів).

10.2. Коронний розряд

Коронним розрядом, або скорочено короною, називають вид електричного розряду в газі (повітрі), що виникає в різко неоднорідному полі, коли радіус кривизни одного або обох електродів набагато, менше міжелектродного відстані.

Розрізняють корону постійного і змінного струму. Корона постійного струму буває біполярної і уніполярної. При біполярній короні коронуючими є обидва електроди. Уніполярна корона існує в тому випадку, коли коронуює тільки один з двох електродів. Цей електрод, який має малий радіус кривизни, називається коронуючим, а другий – некоронуючим (або осаджувальних).

Уніполярна корона може бути позитивною і негативною. У першому випадку на коронуючий електрод подається позитивний потенціал, у другому випадку - негативний.

Розглянемо сутність негативною уніполярної корони на прикладі системи електродів "провід - площину" (рис. 7.1, б). При подачі на електроди постійної напруги U в міжелектродному проміжку створюється неоднорідне електричне поле, напруженість якого максимальна на поверхні проводу і спадає в міру наближення до площини.

При відносно малому U сила струму I в ланцюзі електродів практично дорівнює нулю (Рисунок 63). Якщо підвищувати U, то при деякому його значенні Uo напруженість електричного поля біля поверхні проводу досягає такого значення Eo, при якому у поверхні дроту починається іонізація повітря. В іншій частині міжелектродного проміжку напруженість електричного поля недостатня для підтримки процесу іонізації. Електрони, що рухаються від негативно зарядженого проводу до площини, втрачають швидкість через різкий спад напруженості поля і "прилипають" до нейтральних молекул, утворюючи негативні іони.

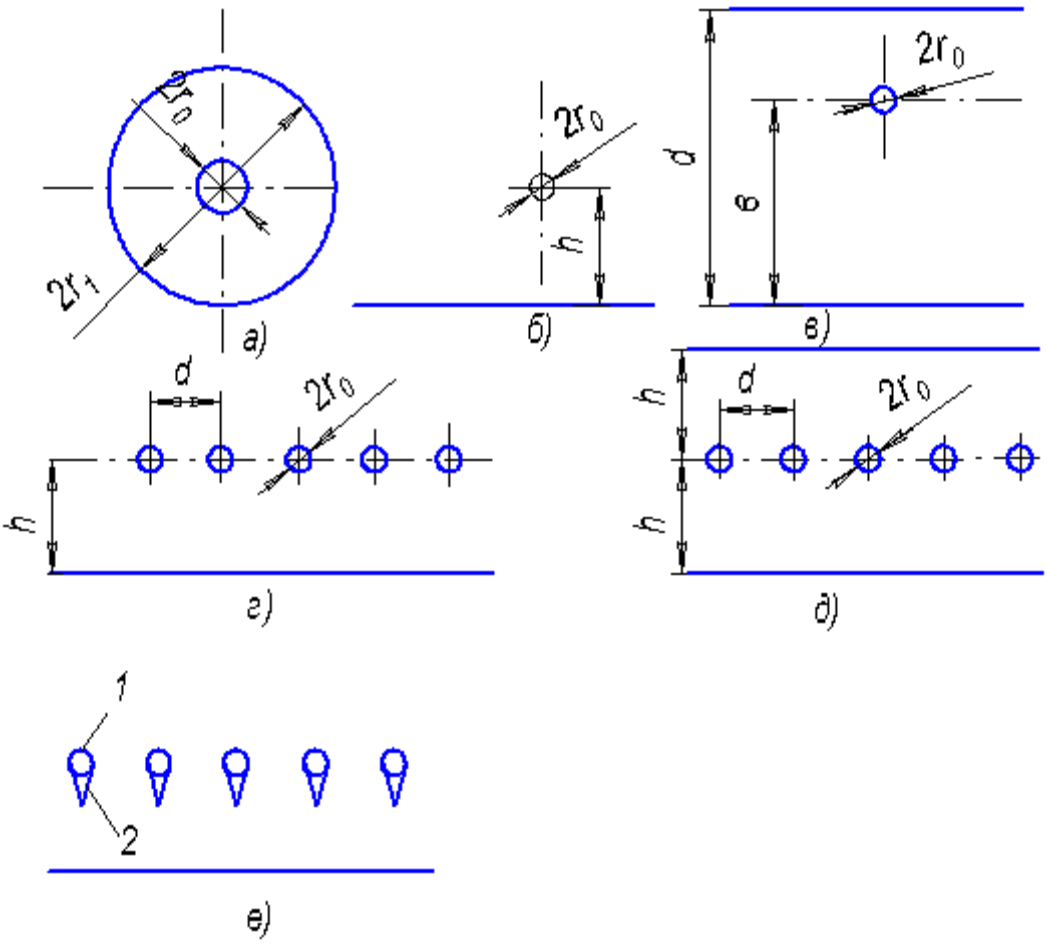

Рисунок 63. Деякі системи електродів для створення поля коронного розряду: а – провід по осі циліндра; б – провід - площину; в – провід між двома площинами; г – ряд проводів - площину; і-ряд проводів посередині між двома площинами; е-ряд стрижнів з голками-площину; 1 – стрижень; 2 – голка

Ці іони рухаються до площини, створюючи струм короткого розряду. При подальшому підвищенні напруги сила струму корони I збільшується до тих пір, поки при певній напрузі $U_{проб}$ не наступить пробой проміжку з переходом в дуговий або іскровий розряд.

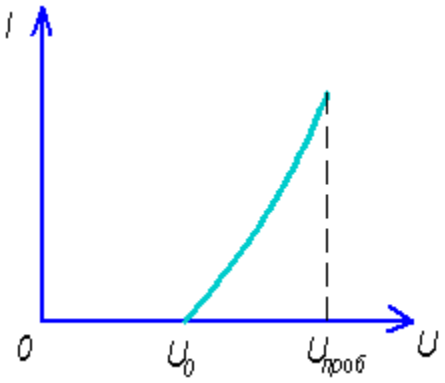

Рисунок 64. Вольт-амперна характеристика коронного розряду

Таким чином, при уніполярній короні практично весь міжелектродний простір заповнений іонами одного знака, що збігається зі знаком потенціалу на коронируючому електроді.

Коронний розряд супроводжується утворенням озону і оксидів азоту, електромагнітним випромінюванням в діапазоні від радіохвиль до УФ-променів і іншими ефектами.

Деякі типові системи електродів для створення коронного розряду показані на рисунку (Рисунок 63).

Розглянемо розрахунок основних параметрів уніполярного коронного розряду для дротяних коронуючих електродів.

Початкову напруженість коронного розряду визначають за емпіричною формулою Піка:

$$E_0 = 30{,}3 \cdot 10^{-5} \delta \left(1 + \frac{0{,}0298}{\sqrt{\delta r_0}}\right), \qquad (268)$$

де r_0 – радіус коронируючого дроту, м; δ – відносна щільність повітря;

$$\delta = 289 \cdot 10^{-5}\, p/T \qquad (269)$$

Тут p – атмосферний тиск. па; T – температура повітря, К; δ = 1 при p = 1,013 · 10^5 Па і T = 293 К.

Початкова напруга, В, коронного розряду

$$U_0 = E_0\, r_0\, A \qquad (270)$$

де A - функція геометричних параметрів даної системи електродів (табл. 16.1).

Значення рухливості негативних іонів можна визначати за кривими на рисунку (Рисунок. 65). Рухливість позитивних іонів в середньому на 20 % нижче рухливості негативних.

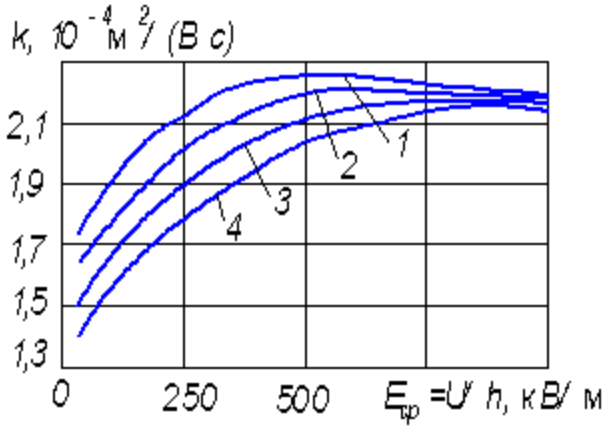

Рисунок. 65. Рухливість негативних іонів в залежності від відстані (h) між коронуючим і некоронуючим електродами: 1 – h = 5 см; 2 – h = 10 см; 3 – h = 15 см; 4 – h = 20 см

При розвиненій уніполярній короні напруженість поля, В/м, і об'ємну щільність, Кл/м ^{3}, електричного заряду іонів поблизу некоронуючого електрода можна розрахувати за формулами

$$E = D\sqrt{\frac{I_l}{2\pi\varepsilon_0 k}} \tag{271}$$

$$\rho_э = L\sqrt{\frac{I_l\varepsilon_0}{2\pi k}} \tag{272}$$

де D і L – параметри, що залежать від системи електродів.

10.3. Зарядка частинок в електричних полях

Зарядкою часток називають передання їм надлишкового вільного електричного заряду. Основні способи зарядки частинок в електричних полях: іонна, зарядка на електроді в електростатичному полі, поєднання іонної зарядки з зарядкою на електроді.

Іонна зарядка здійснюється за рахунок осадження на поверхні частинки іонів з об'єму газу, що оточує її. Як правило, для іонної зарядки використовують уніполярний коронний розряд, оскільки він дозволяє найбільш просто отримувати високі концентрації іонів однакової полярності. Іонна зарядка в чистому вигляді відбувається, якщо немає контакту частинки з електродами. Якщо частка матеріалу виявляється в поле уніполярного коронного розряду, то частина силових лінії поля перетинає поверхню частинки.

Іони, що рухаються по цим силовим лініям, стикаються з часткою і залишаються на її поверхні, повідомляючи їй надлишковий заряд того ж знака, що і потенціал коронуючого електрода.

Іони, які осідають на частку, створюють своє власне поле, яке відштовхує наближаються до неї чергові іони. Тому з плином часу зарядка припиняється, і частка отримує граничний заряд Q_{max1}. Для досягнення заряду, практично близького до граничного, зазвичай потрібен час порядку 0,1 с.

Частинки, оброблювані в апаратах ЕІТ, у багатьох випадках мають форму, близьку до двовісного елліпсойду. Для таких частинок Q_{max1} Кл, можна розрахувати за формулами:

при орієнтації великою віссю уздовж поля

$$Q_{max\,1} = \frac{\pi\varepsilon_0 b^2 \varepsilon_r}{1 + (\varepsilon_r - 1)d_\alpha} \qquad (273)$$

а при орієнтації великою віссю поперек поля

$$Q_{max\,1} = \frac{\pi\varepsilon_0 ab\varepsilon_r}{1 + (\varepsilon_r - 1)d_b} \qquad (274)$$

де a і b – відповідно велика і мала осі еліпсоїда, м; ε_r – відносна діелектрична проникність матеріалу частинки; E – напруженість електричного поля в місці знаходження частки, В/м; d_a і d_b – коефіцієнти деполяризації еліпсоїда, що характеризують ступінь спотворення їм зовнішнього поля в напрямку відповідно великої і малої його

осей. Значення d_a і d_b залежать від коефіцієнта сферичності $k_c = b/a$. Графіки цих залежностей наведені в літературі.

Вираз для граничного заряду діелектричної сферичної частинки може бути отримано з формули (273) або (274), якщо врахувати, що в даному випадку a = b і $d_a = d_b = 1/3$

$$Q_{max\,1} = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r a^2}{(\varepsilon_r + 2)}E \qquad (275)$$

де a – діаметр сфери, м.

Заряд провідних частинок може бути розрахований за формулами (273), (274), (275).

Переваги іонної зарядки полягають в універсальності (можна заряджати частки будь-яких матеріалів: як проводять, так і ізоляційних) і в можливості заряджати частки, зважені в потоці повітря або газу.

Зарядка на електроді в електростатичному полі (контактна зарядка) здійснюється за рахунок переходу вільного заряду під дією поля з електрода на частку або, навпаки, з частки на електрод. При цьому знак заряду частинки збігається зі знаком потенціалу того електрода, на якому знаходиться частинка. Якщо цей електрод заземлений, зарядку іноді називають індукційною.

Для провідної сферичної частинки діаметром a , м, за умови, що перехідний опір в місці контакту частинки з електродом дорівнює нулю, граничний заряд, Кл, при розглянутому способі зарядки

$$Q_{max\,2} = \frac{\pi^3}{\sigma}\varepsilon_0 E a^2 \qquad (276)$$

Непровідні частки на електроді в електростатичному полі практично не заряджаються.

Переваги зарядки на електроді в електростатичному полі полягають у відносно малому споживанні енергії та відсутності побічних газоподібних продуктів (озону і оксидів азоту), властивих коронному розряду.

Поєднання зарядки на електроді з іонним (цей спосіб будемо називати для стислості комбінованої зарядкою) відбувається при знаходженні частки на некоронірующім електроді в поле коронного розряду. В даному випадку частка заряджається одночасно іонами, що рухаються від коронуючого електрода, і контактним способом – від некоронуючого електрода. В результаті частка отримує граничний заряд $Q_{max\,3}$ знак якого залежить в основному від питомої електричної провідності частинки, перехідного опору контакту "частинка-електрод" і питомої електричної провідності коронного розряду $\rho_e k$ поблизу частки. Знак заряду частинок з низькою провідністю збігається зі знаком потенціалу коронуючого електрода, а знак заряду провідних частинок при хорошому їх контакті з металевим некоронуючим електродом може збігатися зі знаком потенціалу некоронуючого електрода.

Граничний заряд частинки при комбінованої зарядці

$$Q_{max\,3} = Q_{max\,1}\,\mu_k \tag{277}$$

де μ_k - коефіцієнт, який визначається за виразом:

$$\mu_k = \frac{2\tau\beta + 1 - \sqrt{1 + 4\tau\beta\left(1 + \frac{Q_{max2}}{Q_{max1}}\right)}}{2\tau\beta} \tag{278}$$

Тут $\beta = \rho_e k / 4\varepsilon_0$; τ постійна часу зарядки частки на електроді, с. Для полуелліпсоїда, орієнтованого велика піввісь уздовж поля:

$$\tau = \varepsilon_0(d_a\varepsilon_r + 1 - d_a)/(d_a\gamma) \tag{279}$$

де γ – питома електрична провідність частки, См/м.

Негативний або позитивний знак μ_k свідчить про збіг знака граничного заряду Q_{max3} зі знаком потенціалу відповідно некоронуючого або коронуючого електрода.

10.4. Силова дія електричних полів на частинки матеріалів

Частинки матеріалу можуть зазнати впливу різних сил і моменту електричної природи. Розглянемо основні з них.

Сила Fк, Н, викликана дією електричного поля на заряд частинки:

$$F_K = EQ \qquad (280)$$

де E – напруженість електричного поля в місці розташування частинки, В/м; Q – заряд частинки, Кл.

Якщо частка знаходиться в полі коронного розряду силу $F_к$ розраховують в такій послідовності: E_o визначають за формулою (268); U_o –по формулі (269) I_j –по формулі (270); E за формулою (271); Q_{max} – по одній з формул (273)...(277); $F_к$ – за формулою (280).

В апаратах ЕІТ переважно застосовують уніполярну корону негативного знака, так як при ній пробивна напруга істотно вище, ніж при позитивній короні. За рахунок цього досягаються більш високі значення E, Q_{max} і в кінцевому рахунку Fк.

Таблиця 10.1 дає чисельне уявлення про силу Fк в порівнянні з силою тяжіння F_q сферичний діаметр *a*, виконаних з двох різних матеріалів: матеріалу 1 умовного діелектрика з його і щільністю $\rho = 1 \cdot 10^3$ кг/м ^{3}, матеріалу 2 – умовного провідника з $\varepsilon_r = \infty$ і $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м ^{3}.

Таблиця 10. 1

Порівняння сили, викликаної дією електричного поля на заряд частинки, з силою тяжіння

Тип матеріалу	а, **м**	Fк, **Н**	F_q, **Н**	$F_к/F_q$
Матеріал 1	$3 \cdot 10^{-5}$	$12{,}6 \cdot 10^{-9}$	$0{,}139 \cdot 10^{-9}$	91
	$3 \cdot 10^{-3}$	$12{,}6 \cdot 10^{-5}$	$13{,}9 \cdot 10^{-5}$	0,91
Матеріал 2	$3 \cdot 10^{-5}$	$18{,}8 \cdot 10^{-9}$	$1{,}11 \cdot 10^{-9}$	17
	$3 \cdot 10^{-3}$	$18{,}8 \cdot 10^{-5}$	$111 \cdot 10^{-5}$	0,17

Примітка. Дані таблиці отримані розрахунком за таких умов: частки мають граничний заряд Q_{max1} ; $E = 5 \cdot 10^5$ В/м.

З таблиці випливає, що при досить малих розмірах частинок сила $F_к$ порівнянна з силою F_q і може навіть значно перевершувати останню.

Сила $F_з$, викликана взаємодією заряду частинки з електродом (сила дзеркального відображення). Нехай в повітрі на відстані h від провідній площині поміщений точковий заряд Q . Цей заряд наводить (індукує) на площині протилежний за знаком заряд – Q . Між індукованим зарядом – Q і точковим зарядом Q виникає сила тяжіння $F_з$, яку називають силою дзеркального відображення. Силу $F_з$ можна визначити за законом Кулона як силу взаємодії двох точкових різнойменних зарядів Q і – Q , розташованих на відстані 2h один від іншого:

$$F_3 = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0(2h)^2} \qquad (281)$$

Знак "мінус" означає, що сила F з направлена в сторону електрода.

Сила F П , викликана неоднорідністю електричного поля. Виникнення цієї сили пов'язано з тим, що частка в електричному полі поляризується (Рисунок 66). На її кінцях накопичуються різнойменні поляризаційні заряди + q і -q , на які з боку електричного поля діють сили, спрямовані в протилежні сторони. У неоднорідному полі зазначені сили не рівні одна одній, так як не рівні напруженості зовнішнього поля E_1 і E_2 в місцях розташування зарядів +q і -q . Тому на частку діє результуюча сила F п, відмінна від нуля. Якщо частка знаходиться в повітряному середовищі, ця сила спрямована в бік зростання напруженості поля.

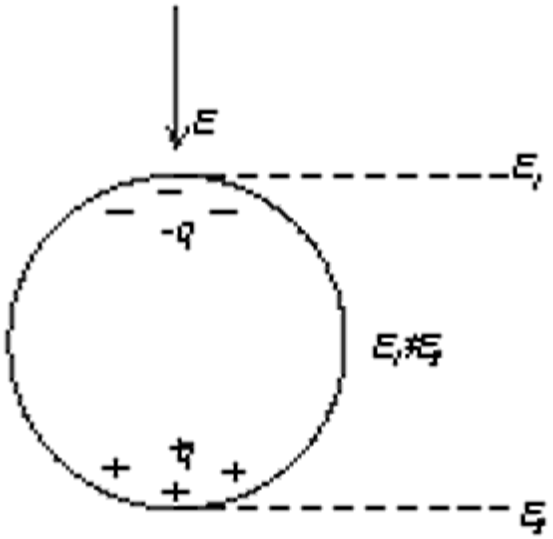

Рисунок 66. Поляризаційна частка в неоднорідному електричному полі в повітряному середовищі

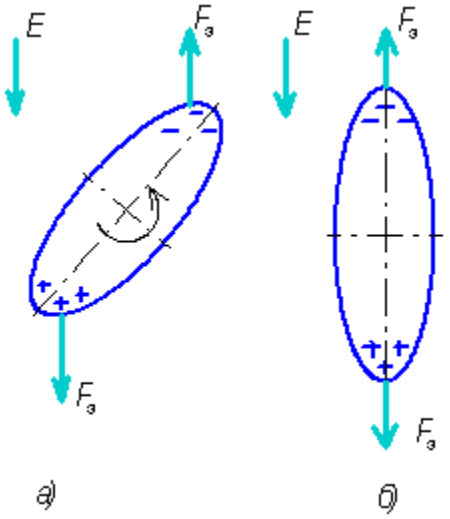

Рисунок 67. Орієнтація витягнутої частки в електричному полі в повітряному

Сила, Н , що діє на діелектричну сферичну частинку діаметром *a* в повітряному середовищі в неоднорідному електричному полі:

$$F = \frac{\pi \varepsilon_0 a^3}{2} \frac{\varepsilon_{r-1}}{\varepsilon_r + 2} E grad E \qquad (282)$$

Орієнтуючий момент. Якщо велика вісь витягнутої частки, розташованої в електричному полі, становить певний кут з напрямком вектора напруженості E (Рисунок 67, а), то

сили F_e, що діють з боку поля на різнойменні поляризаційні заряди частинки, створюють обертаючий момент. Під дією цього моменту частка прагне зорієнтуватися великою віссю вздовж напрямку поля. У цьому положенні крутний момент дорівнює нулю (Рисунок 67,б).

Розглянувши основні фізичні явища в апаратах електронно-іонної технології, перейдемо до вивчення конкретних процесів сільськогосподарської ЕІТ.

10.5. Очищення і сортування насіння в електричних полях

Найбільший обсяг розробок в сільськогосподарській ЕІТ виконаний з очищення та сортуванню зерна і насіння за допомогою електричних полів.

Пристрої, призначені для поділу сипучих сумішей матеріалів в електричних полях, отримали назву електросепараторів. Їх можна класифікувати: по виду електричного поля – на сепаратори електростатичні, коронні, зі змінним полем і комбіновані; по конструкції – на камерні, барабанні, транспортерні (стрічкові), решітні і ін.

У електросепараторів частки матеріалів поділяються за сукупністю фізичних, в тому числі і електричних, властивостей. Ця сукупність властивостей називається ознакою подільності. Він може бути регульованим, якщо ступінь впливу входять до нього властивостей на процес поділу залежить від параметрів режиму сепаратора, і нерегульованим, якщо такої залежності немає. Крім того, розрізняють динамічні ознаки подільності, що залежать від часу перебування частинок в електричному полі, і статичні, які не залежать від нього.

Коронний барабанний сепаратор. Принцип електричного очищення і сортування насіння розглянемо на прикладі коронного барабанного сепаратора (рис. 68, а). Насіння з завантажувального

бункера 3 надходять на поверхню заземленого барабана 6 і виявляються в поле коронного розряду, де відбувається їх комбінована зарядка (іонна зарядка + зарядка від барабана). Зазвичай електрична провідність насіння кондиційної вологості настільки низька, що вони отримують заряд того ж знака, що і потенціал коронуючого електрода.

У верхньому напівциліндра (тобто в зоні поля) на частку 4 діють наступні активні сили: сила тяжіння F_g (її можна розкласти на нормальну F_{g1} і тангенціальну F_{g2}, відцентрова сила $F_ц$; електричні сили $F_{до}$ і $F_з$. Сили $F_ц$ і F_{g2} прагнуть відірвати частку від барабана, сили F_{g1}, $F_{до}$ і $F_з$ притискають її до барабану.

Якщо частка не відривається від барабана в його верхній частині, вона, залишаючись на ньому, виходить із зони поля і виявляється на нижній частині барабана. Напруженість поля в цій частині поступово спадає до нуля, сила $F_{до}$ зникає, а сила F_{g1} стає відриває. Заряд частки на нижній частині заземленого барабана поступово стікає. Тому сила $F_з$ поступово зменшується.

Залежно від сумарного дії сил одні частинки відриваються від барабана у верхній його частині, інші – поза зоною поля, треті можуть бути відокремлені від нього тільки щіткою 2.

Оскільки всі перераховані сили залежать від властивостей насіння, то насіння з різними властивостями відриваються в різних точках барабана і потрапляють потім в різні секції приймального бункера 1.

Для виведення аналітичного виразу ознаки подільності в коронному барабанному сепараторі приймемо такі припущення: частинки мають форму двухосного еліпсоїда; вони миттєво отримують граничний заряд Q_{max3} знака коронуючого електрода і потім зберігають його в зоні поля незмінним; частинки мають постійну орієнтування великою віссю поперек поля; частинки знаходяться в стані спокою відносно барабана, тобто їх швидкість дорівнює окружній швидкості барабана; напруженість поля і об'ємна щільність електричного заряду на поверхні барабана під коронуючими електродами постійні.

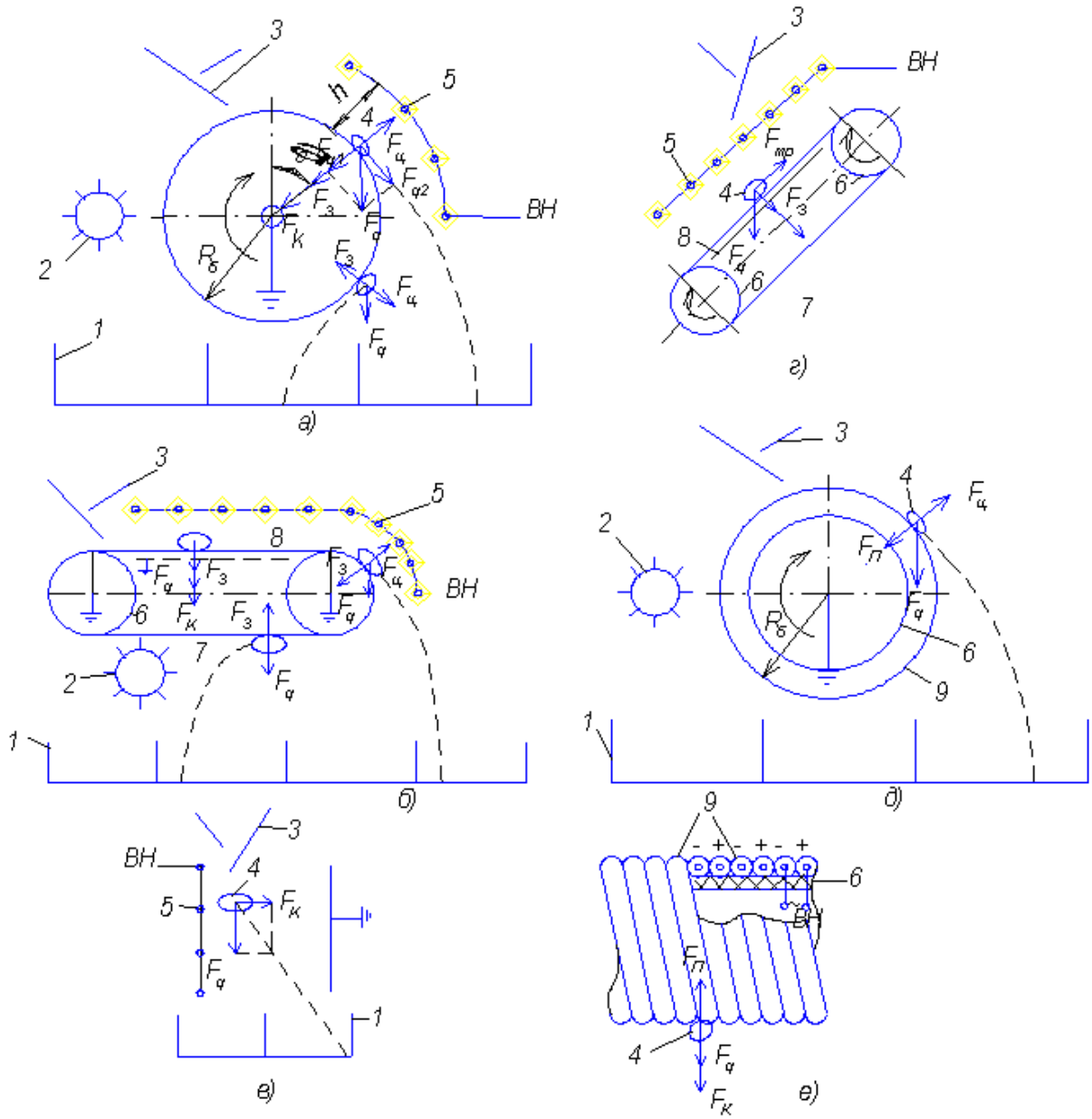

Рисунок 68. Схеми деяких електросепараторів: а – коронний барабанний; б – коронний транспортерний; в –коронний камерний; г – коронний типу гірка; д, е – діелектричний барабанний; 1 – приймальний бункер; 2 – щітка; 3 – завантажувальний бункер; 4 – насіння; 5 – коронуючим електроди; 6 – барабан; 7 – стрічка транспортера; 8 – заземлена металева площина (некоронуючий електрод); 9 – біфілярного обмотка; ВН – висока напруга

Частка при зроблених припущеннях відірветься від барабана тоді, коли результуюча сила, нормальна до поверхні барабана,

виявиться рівною нулю. Умова відриву частинки в зоні поля коронного розряду записується у вигляді

$$F_k + F_c + F_g \cos\alpha_0 = F_c \quad (283)$$

де α_0 – кут відриву.

Звідси

$$cos\alpha_0 = \frac{F_ц - F_k - F_з}{F_g} \quad (284)$$

Сили $F_ц$ і F_g , Н, можуть бути знайдені з наступних співвідношень:

$$F_ц = \frac{mv^2}{R\sigma} \quad (285)$$

$$F_g = mg \quad (286)$$

де m – маса частинки, кг; v – окружна швидкість барабана, м/с; $R_б$ – радіус барабана, м; g – прискорення вільного падіння, м/с ^{2} ;

Для частинок в формі двухосного еліпсоїда

$$m = V\rho = \frac{\pi}{\sigma} ab^2\rho \quad (287)$$

де V – об'єм еліпсоїда; ρ – щільність матеріалу.

При розрахунку сили $F_З$ по формулі (255) для двовісного еліпсоїда, що лежить на електроді малої віссю нормально до поверхні, слід приймати h = b / 4 [6]. В цьому випадку

$$F_З = \frac{Q^2}{\pi\varepsilon_0 b^2} \quad (288)$$

Підставляючи в формулу (258) замість сил $F_ц$, $F_{до}$, $F_З$, F_g їх вираження відповідно з співвідношень (259), (254), (262) і (260) з урахуванням формул (261), (251) і (258), отримуємо остаточно

$$cosa_0 = \frac{v^2}{gR_\sigma} - \frac{\sigma\varepsilon_0}{g} E^2 C_\sigma \quad (289)$$

де величина

$$C_\sigma = \frac{\mu_k\varepsilon_r}{b\rho[1 + (\varepsilon_r - 1)d_\sigma]}\left[1 + \frac{a}{b}\frac{\mu_k\varepsilon_r}{1 + (\varepsilon_r - 1)d_\sigma}\right] \quad (290)$$

є ознака подільності для коронного барабанного сепаратора. При зроблених припущеннях ця ознака є статичним нерегульованим.

Коронний барабанний сепаратор може бути використаний для остаточного очищення насіння зернових, овочевих культур, трав; видалення сажкових домішок; знепилювання насіння; сортування шляхом відділення травмованих, морозобійних, пророслого насіння і насіння зі зниженою масою.

Конструктивні параметри сепаратора: $R_б$ = 100...200 мм; r_0 = 0,15...0,25 мм; h = 80...100 мм; d = 75...125 мм; зона поля займає чверть кола. Режимні параметри: U = 20...50 кВ; частота обертання барабана n = 20...80 об/хв; на 1 м довжини барабана продуктивність становить 2,5...4 т/год (на насінні зернових); сила струму корони I = 0,1...1 мА.

Попередня зарядка насіння перед їх надходженням в зону поділу – один із шляхів підвищення продуктивності барабанного сепаратора при збереженні якості поділу. У цьому випадку насіння поділяються під час перехідного процесу їх зарядки, тобто реалізується динамічний ознака подільності.

Коронний транспортерний сепаратор. У цьому сепараторі процес поділу (рис. 7.6, б) багато в чому аналогічний процесу в барабанному сепараторі. Різниця полягає лише в тому, що зони зарядки і розрядки частинок значно довші.

У зоні зарядки частки зрівнюють свою швидкість зі швидкістю транспортерної стрічки і отримують граничний заряд. Внаслідок цього значно зменшується збивання одних частинок іншими в циліндричної частини некоронуючого електрода і поліпшується якість поділу в порівнянні з коронним барабанним сепаратором.

Розширення зони розрядки дозволяє більш чітко проводити поділ насіння по електричним властивостям.

Транспортерний сепаратор можна використовувати для очищення і сортування насіння зернових і технічних культур, а також насіння трав. Він добре показав себе на сепарації крупи,

відділенні обваленого проса. Але найкращі результати отримані при очищенні насіння овочевих культур, зокрема цибулі-батун.

Для очищення насіння рекомендується застосовувати транспортерну стрічку з металевою фільтрувальної сітки, сталевої стрічки товщиною 0,2...0,3 мм або зі спеціальної електропровідний тканини (ЕП, ПЕН). При сортуванні насіння можна використовувати транспортерну стрічку з непровідного матеріалу (бельтинг, технічна гума та ін.), Підкладаючи під стрічку заземлений металевий лист 8.

Коронний камерний сепаратор. В даному сепараторі насіння, вийшовши з завантажувального бункера 3, отримують заряд за рахунок іонної зарядки і падають вниз під дією сили тяжіння F_g, одночасно зміщуючись по горизонталі під дією в основному електричної сили F_k. В результаті насіння потрапляють в залежності від співвідношення сил F_g і F_k в різні секції приймального бункера 1 (рис. 7.6, в).

Найкращі результати в камерному сепараторі отримують при очищенні насіння зернових культур від легких домішок (пил, полова, дрібна солома, насіння легких бур'янів), і особливо при очищенні і сортуванні по щільності і розміру насіння трав і тютюну.

Коронний сепаратор типу гірка розроблений в ЧІМЕСХ на базі звичайної насіннеочисної гірки, що представляє собою нескінченну похиле полотно, на яке подається насіннєва суміш. Горки застосовують для очищення насіння від домішок, що відрізняються формою і станом поверхні (наприклад, для очищення насіння цукрових буряків від стеблинок і листя). Основний недолік відомих насіннєочисних гірок – низька продуктивність. Щоб підвищити продуктивність, запропонували конструкцію коронної гірки, в якій під робочою гілкою полотна встановлений контактує з нею заземлений металевий електрод 8, а над полотном, паралельно йому, розміщені коронуючим електроди 5 (рис. 7.6, г) .Внаслідок того що насіння отримують заряд (за рахунок іонної зарядки), на них діють додаткові

притискаючи сили F_g і $F_з$. Це дозволяє збільшити кут нахилу полотна і швидкість його руху і тим самим підвищити продуктивність на 30...50 %.

Діелектричні сепаратори. У цих пристроях використовується сила, викликана неоднорідністю електричного поля. Даний принцип застосований в сепараторах МІСП [53]. Наприклад, в діелектричному барабанному сепараторі (рис. 7.6, д, е) на поверхні барабана 6 покладена біфілярного обмотка 9, яка намотується одночасно в два ізольованих проводи. Змінна напруга (до 5 кВ) промислової частоти 50 Гц подається на два вхідних кінця обмотки, а два інших кінця на виході залишаються роз'єднаними. У такій обмотці сусідні дроти є різнойменно заряджені і ізольовані один від іншого електроди (знаки "+" і "-" на русунку 7.6, е умовно показують знаки потенціалу жив в певний довільно обраний момент часу), які створюють неоднорідне електричне поле, $F_п$. Кут відриву насіння від обертового барабана визначається співвідношенням сил $F_п$, F_g і $F_ц$, які залежать, зокрема, від властивостей насіння. Чим важче, крупніше насіння, тим раніше вони відриваються від поверхні барабана. На сортуванні насіння овочевих культур сепаратор може працювати при подачі 70 ... 230 кг / год на 1 м довжини барабана, споживана потужність 1 кВ·А.

Решітний електросепараторів розроблений в ЧІМЕСХ. У ньому використовується накладення електростатичного поля на плоскі сортувальні решета з круглими отворами.

Під дією орієнтуючого моменту насіння прагнуть встановитися довгою віссю уздовж поля, тобто перпендикулярно площині решета, що збільшує ймовірність проходження їх через отвори. Внаслідок цього може бути збільшена подача насіння на решето. Додатковий позитивний ефект може бути отриманий за рахунок різниці орієнтуючого моменту у часток з різними властивостями.

Електроаеродінамічні сепаратори. Завдяки цілеспрямованій орієнтації насіння електричним полем можна

підвищити якість їх сепарації і в вертикальному повітряному потоці. На даному принципі і працюють електроаеродінамічні сепаратори.

10.6. Електроаерозольна обробка

Аерозолями називають системи, що складаються з твердих або рідких частинок, зважених в газоподібному середовищі. Розмір аерозольних часток приблизно від 1 нм до доль міліметра.

При перекладі речовин і матеріалів в аерозольний стан площа їх поверхні в розрахунку на одиницю маси значно збільшується. Тому аерозолі мають підвищену фізико-хімічну активність.

У сільському господарстві аерозолі використовують для боротьби з шкідниками і хворобами культурних рослин (обробка отрутохімікатами рослин і насіння); дезінфекції та дезінсекції приміщень; профілактики і лікування тварин і птахів; забарвлення виробів в ремонтному виробництві.

У багатьох випадках ефективність аерозольної обробки можна істотно підвищити, якщо використовувати уніполярні електроаерозолі, тобто аерозолі, частки яких мають надлишковий електричний заряд одного знака.

Для електроаерозольної обробки використовують аерозольний генератор, що складається з розпилювача із зарядним пристроєм і джерела високої напруги. В генераторах електроаерозолі застосовують в основному два способи зарядки аерозольних часток: іонну і зарядку на електроді в електростатичному полі.

У генераторах з іонної зарядкою струмінь аерозолю, створена звичайним розпилювачем, проходить далі через зарядний пристрій з уніполярним коронним розрядом.

У генераторах з зарядкою часток на електроді в електростатичному полі процеси утворення аерозолю і його зарядки суміщені в часі і в просторі. Наприклад, у відцентровому розпилювачі електроаерозолі (рис. 69) проводить рідина

безупинно випливає тонкою цівкою з голки 2 шприца 3 і надходить в центр обертового заземленого конуса 6. Рідина, розтікаючись по його поверхні у вигляді тонкої плівки 5, рухається під дією відцентрових сил до периферії конуса 6, зривається з його кромки і при цьому розпадається на дрібні краплі 4. Разом з конусом 6 обертається високовольтний конічний електрод 1, індукуючий на поверхні плівки електричні заряди, які несуться і утворюються крапельками. Протилежні за знаком заряди йдуть через конус 6 в землю.

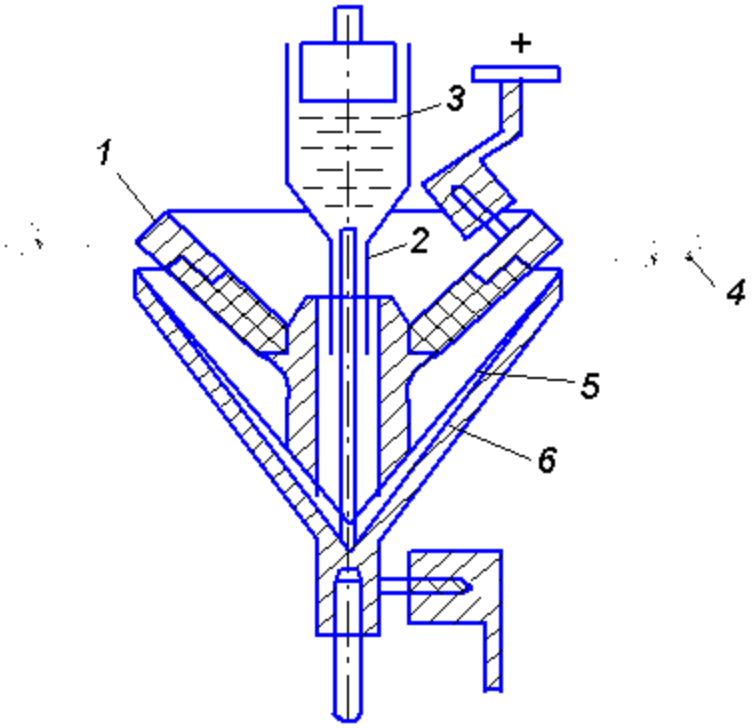

Рисунок 69. Схема відцентрового розпилювача електроаерозолі з індукційної зарядкою: 1 – високовольтний конічний електрод; 2 – голка; 3 – шприц; 4 – розпорошується аерозоль; 5 – плівка рідини; 6 – обертається заземлений конус

Звичайний аерозоль осідає на оброблюваний об'єкт під дією сили тяжіння, інерційних сил, броунівського руху і інших явищ. Електроаерозолі осідають, крім того, ще й під дією електричних сил, які можуть бути більш значними, ніж названі сили неелектричного походження.

Розглянемо електричні сили, що викликають осадження уніполярного електроаерозоля. Якщо між генератором електроаерозоля і об'єктом, що оброблюється, докладена напруга, то на заряджені аерозольні частинки діє сила $F_{до}$з боку зовнішнього електричного поля. В результаті цього частинки рухаються по траєкторіях, близьким до силових ліній електричного поля, і потрапляють на оброблюваний об'єкт. Крім того, між частинками уніполярного аерозолю діють сили взаємного відштовхування, які викликають так зване електростатичне розсіювання, під дією якого хмара зарядженого аерозолю безперервно збільшується в розмірах, причому у всіх напрямках однаково. До того ж, на частинки, що знаходяться поблизу або на поверхні оброблюваного об'єкта, впливає притягає сила дзеркального відображення $F_з$.

Дія електричних сил збільшує кількість матеріалу, що осів на об'єкт, підвищує рівномірність його осадження, сприяє кращому утриманню осіли частинок на поверхні об'єкту. Все це дає можливість досягти того ж технологічного ефекту при істотно меншій витраті матеріалу, ніж при використанні незарядженого аерозолю.

Наприклад, при обробці рослин електроаерозолем густота покриття поверхні листя зростає в порівнянні з незарядженим аерозолем на верхній стороні листя в 1,2...3 рази, на нижньому боці – в 5...20 разів. При цьому витрата хімікату може бути знижена в 1,2...3 рази. При нанесенні на заряджені насіння протилежно заряджених частинок препарату-протруйника у вигляді порошку або розпорошеного розчину можна зменшити, за даними ЧІМЕСХ, норму витрати препарату в 2...3 рази без зниження ефективності протруювання.

Електрозабарвлення – один із широко застосовуваних на практиці видів електроаерозольної обробки. Її сутність полягає в розпиленні фарби, зарядці її частинок і осадженні їх на виріб в електричному полі. Поле створюється за рахунок того, що між розпилювачем фарби і заземленим виробом докладено постійне

високу напругу (60 ... 120 кВ). При електрозабарвлення втрати лакофарбового матеріалу не перевищують 5...10%, в той час як при пневматичному розпиленні вони складають близько 50 %. Крім того, внаслідок притиснення зарядженого шару фарби до виробу електричними силами покриття виходить рівним і щільним.

Для електрозабарвлення в умовах ремонтного виробництва найбільш доцільно використовувати пересувні установки з ручними електрораспилітелямі: УЕРЦ, УГЕР, УРЕГ і ін. Їх споживана потужність не більше 250 Вт.

10.7. Деякі інші види використання силової дії електричних полів

10.7.1. Застосування електрофільтрів для очищення повітря від пилу і мікробів.

Принцип дії електрофільтру заснований на тому, що очищається газ або повітря пропускають через поле уніполярного коронного розряду. Зважені в газі або повітрі частки (пилу, диму, туману і т.п.) заряджаються за рахунок іонної зарядки і під дією електричних сил осідають на електродах.

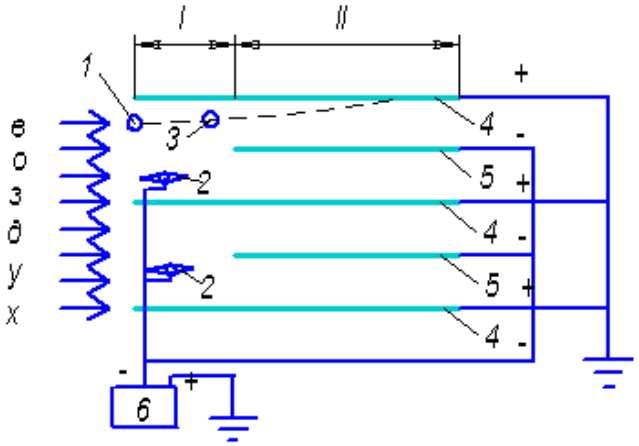

Рисунок70. Схема двухзонного електрофільтру:
1 – незаряджена частинка пилу на вході в електрофільтр; 2 – коронуючи електроди; 3 – заряджена частинка пилу на вході в

зону осадження; 4 – заземлення осаджувальні електроди; 5 – високовольтні електроди; 6 – джерело високої напруги; I – зона зарядки; II – зона осадження

Переваги електрофільтрів: низький аеродинамічний опір; уловлювання частинок в широкому діапазоні розмірів (від сотень до доль мкм); зручність автоматизації; можливість комплексної обробки повітря (очищення, іонізації і створення регульованих концентрацій озону).

Для очищення повітря та повітря всередині тваринницьких і птахівничих приміщень можна застосовувати двозонні електрофільтри, в яких частинки заряджаються і осідають в різних конструктивних зонах (Рисунок70). Параметри двозонних електрофільтрів: напруга живлення електродів – 6...15 кВ; споживана потужність – 10...30 Вт в розрахунку на об'ємну витрату повітря 1000 м ^{3}/год; швидкість повітря в перерізі фільтра – 2 м/с, при цьому аеродинамічний опір – 10...50 Па. Електрофільтри затримують 90...95 % пилу і 80...85 % мікроорганізмів.

Малогабаритні електрофільтри, використовувані всередині птахівницьких (тваринницьких) приміщень, забезпечують власними вентиляторами. В цьому випадку електрофільтри працюють в режимі рециркуляції; забирають повітря з приміщення, комплексно обробляють його і викидають назад у теж саме приміщення. Наприклад, при використанні за даною схемою електрофільтру, розробленого в ЧІМЕСХ, в інкубаційному шафі знижується концентрація пилу на 70 %, повітря насичується іонами і озоном (концентрація їх склала відповідно $5 \cdot 10^3$ см $^{-3}$ і 1,7 мг/м ^{3}) і в кінцевому рахунку підвищується виводимість курчат на 6 %. Подібні позитивні результати отримані і ВІЕСХ при електрофільтрації повітря в пташниках.

10.7.2. Використання електричних явищ в сипучих середовищах.

За допомогою електричного поля можна управляти витратою сипучих матеріалів, змішувати і дозувати їх. На цьому принципі створений, наприклад, гравітаційний живильник дрібного насіння. У живильнику насіннєвий матеріал з бункера надходить в просторі між електродами, до яких докладено напруга від високовольтного джерела. Насіння орієнтуються уздовж поля. При цьому за рахунок взаємодії поляризаційних зарядів утворюються ланцюжки з орієнтованих насіння, які тягнуться від одного електрода до іншого. Орієнтація частинок і утворення ланцюжків збільшують внутрішнє тертя в обсязі сипучого матеріалу. Тому зі збільшенням прикладеної напруги витрата насіння через щілину між електродами зменшується до повного припинення витікання. Перевага цього методу полягає в легкості управління малими витратами. Наприклад, для насіння тютюну витрата забезпечується в діапазоні 0,6...1,6 г/с (на 1 м довжини щілини).

10.7.3. Використання електричного поля для підбору бавовни-сирцю

Через недосконалість існуючих бавовнозбиральних машин до 10 ... 12% коробочок бавовни збивається на землю. Витрати на збір цієї частини врожаю становлять в середньому 50% загальних витрат. При підборі бавовни-сирцю до сих пір не виключена ручна праця. Запропоновано новий спосіб підбору бавовни, який реалізований в електромеханічному підбирачі (Е. Т. Калафатов і ін.). Основна частина підбирача – діелектричний барабан, на зовнішній поверхні якого укріплені діелектричні пальці, а всередині у поверхні – електрод на нерухомої осі. Діелектричні пальці при подачі на електрод високого потенціалу та одночасному обертанні барабана порушують механічну зв'язок

бавовни з грунтом, а електричне поле орієнтує бавовна і притягує його до барабану. Потім хлопок транспортується повітряним потоком в бункер бавовнозбиральної машини.

10.8. Штучна іонізація повітря в сільськогосподарських приміщеннях

Під дією різних фізичних факторів (радіоактивного випромінювання речовин, що знаходяться в повітрі, ґрунті, воді і т. д.; космічних променів і ін.) В атмосфері безперервно відбувається природна іонізація повітря. Залежно від рухливості атмосферні іони умовно можна розділити на дві групи: легкі ($k > 0,1...0,5$ см ^{2}/В·с) і важкі ($k < 0,1...0,5$ см ^{2}/(В$_{ос}$).

Легким іоном називають іонізовану молекулу, оточену групою нейтральних молекул водяної пари. Важкий іон є аерозольною часткою (порошинка, крапелька вологи, мікробне тіло і т. і.), що несе електричний заряд. У чистому повітрі біля поверхні Землі в 1 см ^{3} міститься до 500...1000 легких іонів і до декількох тисяч важких кожного знака.

Встановлено, що легкі негативні іони в певних дозах сприятливо впливають на людей і тварин, в той час як для легких позитивних іонів така дія не характерною. Важкі іони, перш за все позитивні, є фізіологічно несприятливим фактором.

У закритих населених приміщеннях, в тому числі тваринницьких і птахівницьких, іонний склад повітря може бути істотно спотворений в порівнянні з іонним складом зовнішнього повітря. Це пояснюється наступним. Живі організми видихають велику кількість важких іонів, тому концентрація останніх всередині жилого приміщення буває зазвичай набагато вище, ніж зовні. Легкі іони зовнішнього повітря частково осідають в елементах припливної вентиляційної системи (калорифере, вентиляторі, воздуховодах і ін.) І губляться всередині приміщення на освіту важких іонів, а також за рахунок рекомбінації і

осадження на внутрішніх поверхнях приміщення і внаслідок вдихання їх мешканцями приміщення. В результаті концентрація легких іонів всередині приміщення знижується до деякого нескоротного мінімуму,

При тривалому перебуванні тварин і птахів в повітрі зі спотвореним іонним складом знижується їх опірність до захворювань і зменшується продуктивність. Послабити або навіть повністю виключити ці небажані явища можна, штучно насичуючи повітря приміщення легкими негативними іонами. У 20-х роках А. Л. Чижевський вперше обґрунтував необхідність штучної іонізації повітря (аероіонізації) в приміщеннях.

Аероіонізація (АІ) при оптимальних дозуваннях здатна підсилювати в організмі тварин і птахів окислювально-відновні і обмінні процеси, збільшувати легеневий газообмін і активність ферментів, підвищувати захисні функції.

Крім того, при аероіонізації приміщень повітря очищається від пилових і мікробних частинок. Сутність цього процесу полягає в іонної зарядці аерозольних часток і подальшому їх осадженні під дією електричного поля на заземлення поверхні. Основне джерело цього поля – об'ємний заряд іонів в приміщенні. Ступінь очищення повітря від аерозольних часток при аероіонізації залежить від багатьох факторів і тому коливається в широких межах (зазвичай 20 ... 90%).

У таблиці наведені рекомендовані режими аероіонізації, що включають в себе наступні параметри: $п_л$ – концентрація легких негативних іонів в зоні дихання тварини (птиці), 1 / см ^{3} ; $t_{до}$ – тривалість курсу сеансів АІ, сут; $t_п$ – тривалість паузи між курсами сеансів АІ, сут; $t_з$ – добова тривалість сеансів АІ, год.

Згідно з експериментальними даними, при реалізації режимів аероіонізації, наведених у таблиці, господарські показники підвищуються в таких межах: виводимість курчат при інкубації – на 2...6 %, їх збереження в період вирощування – на 2...10, несучість курей- несучок – на 2...10, приріст живої маси телят – на

10...20, надої корів – на 8, приріст живої маси поросят – на 10...15, молочність свиноматок – на 18 %.

Ведуться дослідження по застосуванню аероіонізації в картоплі-, овоче- і фруктосховища для підвищення якості і термінів зберігання сільськогосподарської продукції.

Штучну іонізацію повітря здійснюють за допомогою пристроїв, званих аероіонізатор. Для сільськогосподарських приміщень найбільш прийнятні коронні аероіонізатори, в яких використовується уніполярний коронний розряд.

Таблиця 10. 2

Режими штучної іонізації повітря в птахівницьких і тваринницьких приміщеннях

Вид і вік об'єкта, піддається дії аероіонізації	$п_л$, **10^8 1/см^2**	t_k, **діб.**	$t_п$, **діб.**	t_c, **год**	**Особливості режиму**
Інкубаційні яйця (курячі)	13	19	-	24	
Курчата яєчних порід:					
3…20 діб.	25	5	5	1…2	Після 1 год. іонізації перерв 1 год.
21…40 діб.		5	5	3	
41…60 діб.		5	5	4	
Бройлери:					
3…10 діб.	60…70	3	3	0,5	Один раз на добу. Доза ділиться на два сеанси: вранці і ввечері
11…40 діб.		7	5	2	
41…65 діб.		7	5	3	
Ремонтний молодняк курей:					
60…80 діб.	20…50	5	5	0,5…4	
81…100 діб.	20…50	5	5	5…10	
101…120 діб.	60…100	5	5	4…5	
121…140 діб.	110…160	5	5	6…12	
141…150 діб.	160	5	5	13…16	
Кури-несучки					
1…5 міс.	100…150	30	30	4…8	
6…10 міс.	150…250	30	-	9…12	
Телята до 30 діб.	150…250	30	-	6…8	
Корови	300	30	10…20	5	
Поросята-сисуни	300…350	28…30	21…28	0,5	
Поросята-від’ємиші	350…400	28…30	21…28	0,5	
Дорослі свині	400…500	28…30	21…28	0,5	

Застосовують різноманітні конструкції коронних аероіонізаторів, що розрізняються типом коронуючих електродів

(дротові, голчасті й ін.) І місцем їх розміщення (в припливних повітроводах або безпосередньо всередині приміщення).

Аероіонізатор з коронуючими електродами, розташованими всередині приміщення, можна проектувати в такій послідовності.

1. Оцінити середнє значення концентрації легких негативних іонів всередині приміщення $п_л$, $см^{-3}$, з урахуванням рекомендацій таблиці.

2. Знайти необхідне значення питомої (на одиницю внутрішнього об'єму приміщення) сили струму коронного розряду I_v, мкА/$м^3$, за наближеною формулою Н. М. Багірова:

$$I_v = 0{,}44 \cdot 10^{-12} н_{л^2}, \qquad (291)$$

3. Визначити загальну силу струму всіх коронуючих електродів в даному приміщенні, А:

$$I = I_v V_п 10^6, \qquad (292)$$

де $V_п$ - внутрішній об'єм приміщення, $м^3$.

4. Розрахувати питому (на одиницю довжини коронуючого електрода) силу струму корони, А/м:

$$I_1 = I/1 \qquad (293)$$

де l -загальна довжина коронуючих електродів аероіонізатора, м.

5. Рішенням рівняння (293) або експериментально визначити напруга U, яке необхідно подавати на коронуючи електроди, щоб отримати необхідне значення I_l.

Коронуючи електроди при відкритому розміщенні необхідно встановлювати на безпечній відстані від людей, тварин і технологічного обладнання.

Перспективним підходом до технічної реалізації АІ в тваринницьких і птахівничих приміщеннях є створення установок комплексної дії, які здійснюють АІ в поєднанні з ІК-обігрівом, видимим і УФ-випромінюванням.

Для вимірювання концентрації іонів найбільш широко використовують прилади (лічильники іонів) аспіраційного типу: САИ ТГУ-70, Uт-6914, АСД-1 і ін. В цих приладах повітря,

концентрацію іонів в якому треба виміряти, поганяється вентилятором через конденсатор. До обкладкам конденсатора прикладено постійну напругу. Іони, що пролітають через конденсатор, притягуються до збирає обкладанні, знак якої протилежний знаку іонів. Сила струму в ланцюзі збирає обкладання конденсатора виявляється пропорційною концентрації іонів.

10.9. Високовольтні джерела живлення установок EIT

Для отримання високої напруги постійного струму в установках електронно-іонної технології застосовують в основному два типи джерел живлення: високовольтні випрямлячі і каскадні схеми (схеми множення напруги).

У високовольтних випрямлячах змінну напругу підвищується трансформатором до потрібного рівня і потім випрямляється. У найпростішому випадку трансформації піддається мережева напруга промислової частоти. Перспективним є живлення трансформатора на проміжній підвищеної частоті. При цьому живлення на первинну обмотку трансформатора подається не безпосередньо від мережі, а через перетворювач змінної напруги промислової частоти в змінну напругу підвищеної частоти (зазвичай сотні і тисячі Гц). Завдяки підвищенню частоти можна зменшити площу поперечного перерізу сердечника і довжину проводів обмотки, тобто в кінцевому рахунку, знизити габарити і масу трансформатора. Для випрямлення однофазного струму найбільш поширені однонапівперіодна і двонапівперіодна бруківка схеми.

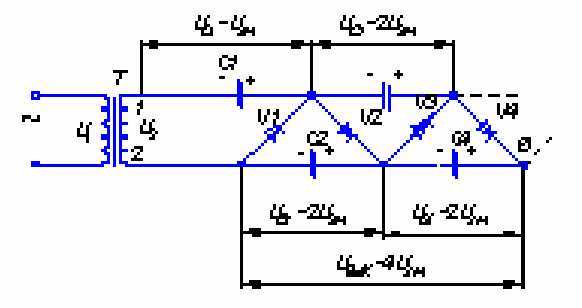

Рисунок 71. Принципова електрична схема двох перших ступенів найпростішого каскадного випрямляча: Т - підвищувальний трансформатор

Принцип дії каскадних схем (схем множення) заснований на тому, що на навантаження розряджаються послідовно включені конденсатори, кожен з яких заряджений від випрямляча до порівняно невеликого напруги.

На рисунку (Рисунок 71) показана спрощена принципова схема двох перших ступенів найпростішого каскадного випрямляча. До першого ступеня відносяться конденсатори C_1 , C_2 і вентилі V_I , V_2 , до другої – конденсатори C_3 , C_4 і вентилі V_3 , V_4. У схемі не показане навантаження, яке зазвичай приєднують паралельно конденсаторам нижньої частині схеми (при наявності одного ступеня – до точок 2 і 4, при наявності двох ступенів – до точок 2 і 6 і т. д.).

Нехай в початковий момент часу Е.Р.С. вторинної обмотки трансформатора спрямована від точки 1 до точки 2. Тоді конденсатор C_1 заряджається через відкритий вентиль V_1 до амплітудного значення напруги на вторинній обмотці трансформатора U_{2m} . Коли напрямок Е.Р.С. вторинної обмотки зміниться, буде заряджатися конденсатор C_2 по колу: точка 1, конденсатор C_1 , вентиль V_2 , конденсатор C_2 , точка 2 вторинної обмотки трансформатора. Оскільки в цей час конденсатор C_1 і вторинна обмотка трансформатора виявляються включеними послідовно, конденсатор C_2 заряджається до напруги $U_{c2} \approx U_{2m} + U_{c1} \approx 2U_{2m}$. Наступний напівперіод заряджається конденсатор C_3 по ланцюгу: точка 2, конденсатор C_2 , вентиль V_3 ,

конденсатор C_3, конденсатор C_1, точка 1 вторинної обмотки. Конденсатор C_3 заряджається до напруги $U_{c3} \approx U_{2m} + U_{c2} - U_{c1} \approx U_{2m} + 2U_{2m} - U_{2m} = 2U_{2m}$.

Міркуючи аналогічно, можна показати, що при черговій зміні полярності е. р. с. вторинної обмотки зарядиться вже конденсатор C_4 до напруги $U_{c4} \approx 2U_{2m}$. У сталому режимі сумарна напруга на виході схеми (між точками 2 і 6) $U_{вих} = U_{c2} + U_{c4} \approx 4U_{2m}$. У загальному випадку вихідна напруга каскадної схеми $U_{вих} \approx 2nU_{2m}$, де *n* – число ступенів каскаду.

Перевага каскадних схем (схем множення) полягає в тому, що вони дозволяють отримати на виході досить високу напругу при використанні вентилів з відносно низькою допустимою зворотною напругою і трансформатора з порівняно малими (через зменшеного коефіцієнта трансформації) габаритами і масою. Основний недолік цих схем, що посилюється з ростом числа ступенів, – значне зниження випрямленої напруги при збільшенні сили струму навантаження.

Щоб запобігти можливій поразки персоналу струмом при експлуатації установок ЕІТ, все високовольтне обладнання повинно бути огороджене або піднято на безпечну висоту. Корпус установки має бути заземлений. Установка повинна мати наступну захисну апаратуру.

1. Обмежувальний резистор, що включається послідовно в ланцюг високовольтних електродів установки для зниження до безпечного значення сили струму $I_б$ в високовольтного ланцюгу в разі дотику людини до електродів, а також при короткому замиканні. Як обмежувального використовують один або кілька послідовно з'єднаних високовольтних резисторів, наприклад типу КЕВ. Опір обмежувального резистора знаходять з умови

$$R_0 \geq \frac{U}{l_\sigma} - R_\tau \qquad (294)$$

де U – висока випрямлена напруга джерела живлення; R – опір тіла людини, прийняте зазвичай рівним 1000 Ом. Значення $I_б$ можна брати рівним 5 мА.

2. Автоматичний (тобто спрацьовує без участі людини) розрядник для зняття залишкового заряду з електродів після відключення установки. Крім того, в установках корисно передбачати наявність ручної ізолюючої штанги для накладання заземлення.

В установці повинні бути дверна блокування, що не дозволяє включати високу напругу при відкритих дверцятах корпусу, а також сигналізація про подачу високої напруги на електроди.

Контрольні питання

1. З яких елементів складається електрична огорожа і який принцип її роботи?

2. Коли і з якою метою застосовують режим очікування роботи генератора імпульсів?

3. Чому висока напруга в імпульсі (6 ... 9 кВ) не є небезпечним для життя тварин?

4. Яке допустима кількість електрики в імпульсі для тварин?

5. Поясніть роботу генератора імпульсів в автоматичному режимі.

6. Як регулюють частоту і силу імпульсу?

7. Розкажіть, як працює генератор імпульсів в режимі очікування.

8. Як визначають енергію і силу імпульсу?

9. Техніка безпеки при експлуатації ЕІ.

10. За допомогою яких пристроїв на схемі забезпечується постійна частота імпульсів?

Тема 11. Ультразвукова та магнітна обробка

11.1. Характеристика ультразвуку як фізичного фактору

Природа ультразвуку. По своїй фізичній природі ультразвук (УЗ), так само як і чутний звук, являє собою пружні коливання і хвилі, тобто чергуються в часі процеси механічного стиснення і розрідження, що поширюються в твердому, рідкому і газоподібному середовищах.

Від чутного звуку ультразвук відрізняється лише частотою. Чутний звук охоплює діапазон частот від 16 Гц до 15...20 кГц, а ультразвук – область нечутних частот від 15...20 кГц до 10^9 Гц.

Основні параметри ультразвуку. Частинки середовища, в якій поширюється УЗ, періодично коливаються біля положення рівноваги. Наближено можна вважати, що коливання частинок відбуваються в часі за синусоїдальним законом з амплітудою зміщення А.

Згущення і розрідження, які утворюються в середовищі при проходженні в ній пружної хвилі, додатково змінюють тиск по відношенню до середнього (статичному). Ця додаткова змінна частина тиску називається звуковим тиском. Його амплітуда, Па:

$$P_{зм} = 2\pi\rho c f A \qquad (295)$$

де ρ – щільність середовища, кг/м ^{3} ; с – швидкість поширення пружної хвилі (швидкість звуку), м / с; f – частота коливання, Гц; А – амплітуда зміщення, м.

Величина ρ_c – найважливіша акустична характеристика середовища. Її називають хвильовим опором.

При поширенні ультразвукової хвилі в середовищі відбувається перенос енергії. Енергію хвилі, що

проходить в одиницю часу через одиничну площадку, перпендикулярну поширенню хвилі, називають інтенсивністю ультразвуку, Вт/м ^{2}:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} = 2\rho c \pi^2 f^2 A^2 \qquad (296)$$

Закономірності поширення ультразвуку. У міру поширення ультразвукової хвилі в середовищі ультразвук поглинається, тобто його енергія переходить в інші види енергії, зокрема в теплоту. Інтенсивність плоскої звукової хвилі, що розповсюджується вздовж осі x , зменшується з відстанню як $e^{-2\alpha x}$, де α - коефіцієнт поглинання звуку, м $^{-1}$.

При переході УЗ-вої хвилі з одного середовища в іншу, якщо їх хвильові опору не рівні, частина енергії хвилі відбивається від кордону розділу двох середовищ назад в першу середу, а інша частина проходить у другу середу. Відношення інтенсивності відбитої хвилі до інтенсивності падаючої, зване коефіцієнтом відображення k_o , залежить від хвильових опорів середовищ:

$$k_0 = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}\right)^2 \qquad (297)$$

При переході УЗ-вої хвилі з твердого тіла в повітря коефіцієнт відображення близький до одиниці. Наприклад, при русі УЗ-вої хвилі з нікелю в повітря $k_o = 0{,}99996$, тобто УЗ в повітря практично не проходить. Істотно менша частина енергії УЗ відбивається від кордону "тверде тіло – рідина". Наприклад, при русі УЗ-вої хвилі з нікелю в воду $k_o = 0{,}88613$. Тому УЗ-вая обробка проводиться з використанням проміжної робочої рідини, з якої контактують як випромінювач УЗ, так і обробляється об'єкт.

Основні ефекти ультразвуку. Ефекти, які може викликати УЗ в середовищі, діляться на первинні і вторинні.

Первинні ефекти мають механічну природу. До цих ефектів належать вже згадувані раніше звуковий тиск, поглинання УЗ, а також кавітація та інші явища.

Кавітація полягає в тому, що в рідині в фазі розрідження утворюються розриви або порожнини, які закриваються в фазі стиснення, викликаючи миттєві піки тиску, що досягають десятків мегапаскалей.

Вторинні ефекти УЗ є наслідком первинних і мають різну природу. Виділяють чотири групи вторинних ефектів.

1. *Механічні ефекти*. До них відносять ультразвукову коагуляцію (зближення і подальше злипання зважених в газі або рідини дрібних частинок), дегазацію (зменшення вмісту газу в рідині), розпорошення (тонке подрібнення твердих або рідких речовин в якому-небудь середовищі) і інші явища.

2. Тепловий ефект – нагрівання середовища через поглинання енергії ультразвукових хвиль.

3. Хімічні ефекти – зміна швидкості протікання або виникнення певних хімічних реакцій під дією УЗ.

4. Біологічні ефекти – явища, що виникають в біологічних тканинах при проходженні через них УЗ-вих хвиль. Ультразвукові коливання частинок середовища створюють свого роду мікромасаж тканин і там, де ультразвук поглинається, тканини нагріваються. Крім того, в тканинах відбуваються фізико-хімічні перетворення. При малих інтенсивностях УЗ перелічені явища сприяють життєдіяльності біологічного об'єкта за рахунок поліпшення обміну речовин. При великій інтенсивності УЗ біологічні тканини руйнуються під дією сильного нагрівання і кавітації.

11.2. Генерування ультразвуку

На русунку 8.1 показана найбільш поширена схема генерування УЗ. Розглянемо окремі елементи цієї схеми.

Генератори ультразвукової частоти (ультразвукові генератори) – це пристрої, призначені для перетворення електричної енергії змінного струму промислової частоти в електричну енергію змінного струму високої частоти, що

дорівнює частоті УЗ. Ультразвукові генератори (УЗГ) в залежності від типу перетворювального пристрою діляться на машинні, лампові і напівпровідникові (транзисторні та тиристорні). УЗГ в основному виконують на напівпровідникових приладах, причому найчастіше на транзисторах (Рисунок 71).

Принципові електричні схеми УЗГ подібні зі схемами високочастотних установок для діелектричного нагріву.

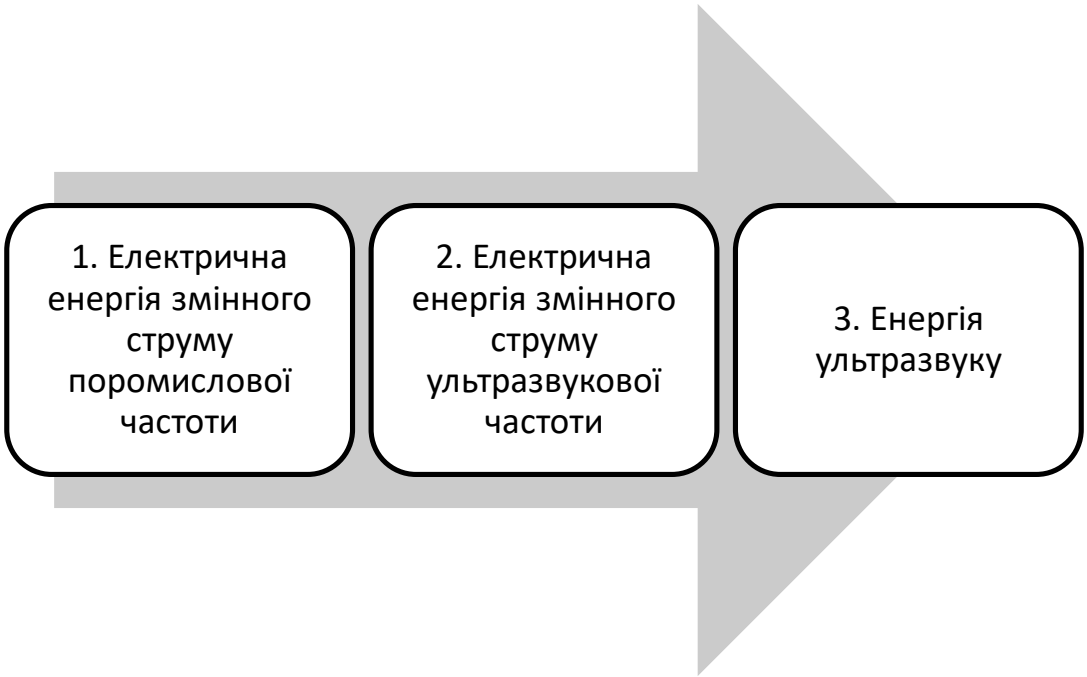

Рисунок 72. Блок-схема генерування ультразвуку:
1 генератор ультразвукової частоти; 2 - електроакустичний перетворювач; 3 - акустичний трансформатор

Електроакустичні перетворювачі - це пристрої, що перетворюють електричну енергію змінного струму в енергію коливань твердого тіла (стрижня, платівки і т.п.). З електроакустичних перетворювачів найбільш поширені магнітострикційні і п'єзоелектричні.

Магнітострикційні перетворювачі. Якщо стрижень з феромагнітного матеріалу помістити в спрямоване вздовж нього магнітне поле, то довжина стрижня зміниться, причому в залежності від матеріалу стрижень може як вкоротити, так і

подовжиться. Це явище називається прямим магнітострикційним ефектом. Існує і зворотний магни-тострікціонний ефект: зміна намагніченості феромагнетика при його деформації. Прямий магнітострикційний ефект використовується в випромінювачі УЗ, а зворотний-в приймачах УЗ.

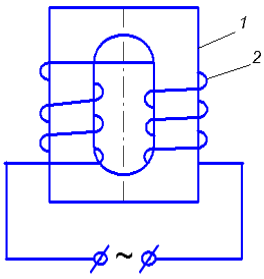

Рисунок 73. Схема двухстержневого магнітострікційного перетворювача: 1-сердечник (пакет з пластин магнітострикційного матеріалу); 2-обмотка; стрілка показує напрямок деформації сердечника

На рисунку (Рисунок 73) показана схема двухстержневого магнітострикційного перетворювача, широко застосовується в ультразвуковій технологічній апаратурі. За обмотці перетворювача пропускають змінний струм з частотою, рівний частоті УЗ. Цей струм створює в осерді змінне магнітне поле. Під дією періодичного намагнічування стрижні сердечника періодично змінюють свою довжину, і що коливаються торці сердечника збуджують в навколишньому середовищі ультразвукову хвилю.

Для виготовлення сердечників перетворювачів найбільш широко застосовують нікель і пермендюр (сплав, який містить 49 % заліза, 49 % кобальту і 2 % ванадію), що володіють високою магнітострикцією.

Магнітострикційні перетворювачі працюють при порівняно невеликих частотах (до 100...200 кГц), так як зі збільшенням частоти ростуть втрати на гістерезис і вихрові струми.

Основні переваги магнітострикційних перетворювачів: більш висока механічна міцність і надійність; значні відносні

деформації, за рахунок чого можна отримати порівняно великі акустичні потужності; стійкість до корозії.

Промисловість випускає магнітострикційні перетворювачі серій ПМС і ПМ. Їх робоча частота дорівнює, як правило, одному з трьох стандартних значень: 18, 22 і 44кГц, споживана потужність становить 0,4 ... 4 кВт, напруга живлення – 220 і 440 В. Інтенсивність ультразвуку у магнітострикційних перетворювачів може досягати 200 кВт / м ^{2}и більше. П'єзоелектричні перетворювачі. При стисненні і розтягуванні в певних напрямках деяких кристалів на їх поверхні з'являються електричні заряди, обумовлені поляризацією. Це явище називається прямим п'єзоелектричним ефектом і використовується в приймачах УЗ. Зворотний п'єзоелектричний ефект (деформація кристалів під дією електричного поля) застосовують в УЗ випромінювачі. П'єзоелектричні перетворювачі часто виконують у вигляді виготовленої з п'єзоелектричного матеріалу пластинки з нанесеними на неї великими межами електроди. До електродів підводиться змінна напруга від генератора ультразвукової частоти. При зміні прикладеного електричного поля пластинка змінює товщину і випромінює УЗ в навколишнє середовище.

Як п'єзоелектричних матеріалів використовують кристали кварцу, сегнетової солі, а також штучно одержувану п'єзокераміка: титанат барію і цирконат-титанат свинцю.

П'єзоелектричні перетворювачі здатні працювати на дуже високих частотах (аж до десятків МГц) з огляду на те, що п'єзоелектричний ефект є практично безінерційним і не пов'язаний з втратами на гістерезис. Однак вони можуть розвивати відносно невелику потужність (зазвичай не більше сотень ват) через низьку механічної міцності п'єзоелектричних матеріалів. Напруга живлення становить 50...400 В для п'єзокерамікі і 2...20 кВ для кварцу, інтенсивність УЗ досягає 100 кВт/м ^{2} .

П'єзоелектричні перетворювачі застосовують в основному в ультразвукової інформаційно-вимірювальної техніки.

Акустичні трансформатори призначені для посилення коливань магнітострикційного перетворювача (трансформатори швидкості) і для узгодження механічного опору технологічного навантаження з опором пакета перетворювача (трансформатори опору). Трансформатори швидкості називаються концентраторами.

Концентратор являє собою стрижень змінного перерізу, що приєднується до пакету перетворювача більш широким торцем. Менший торець концентратора підводить коливання до технологічному середовищі. Енергія концентрується завдяки зменшенню площі перетину. Концентратори можуть посилювати амплітуду ультразвукових коливань в 10...15 разів і доводити її до 50 мкм.

11.3. Використання силової і фізико-хімічної дії ультразвуку

Найбільш поширені технологічні процеси, пов'язані з впливом УЗ на рідину. Оскільки в цих процесах основну роль грає ультразвукова кавітація, то для них використовують, як правило, низькі частоти (18...44 кГц), на яких кавітація настає при відносно невисоких інтенсивностях УЗ.

Розглянемо приклади технологічного використання УЗ в основних напрямках, що становлять інтерес для сільськогосподарського виробництва.

Застосування УЗ в процесах, заснованих на тепломасообміннах. Ультразвук використовують для очищення поверхонь твердих тіл (деталей, складальних одиниць, виробів) від забруднення. Предмети, що підлягають очищенню, поміщають в ванну, заповнену миючим розчином. Електроакустичний перетворювач вбудовують в дно або стінки ванни або занурюють в розчин. Параметри процесу: f = 18...44 кГц, I = 2,5...100 кВт/м ^{2} , час очищення - від десятків секунд до десятків хвилин.

Бульбашки кавітацій, які відіграють основну роль у процесі УЗ-очищення, проникають під плівку забруднення і розривають її.

Застосування ультразвуку дозволяє значно прискорити процес очищення; підвищити її якість (наприклад, при прополіскування деталей на їх поверхні залишається до 88 % забруднення, при вібраційному очищенні – близько 55 %, при ручному – близько 20 %, а при УЗ – не більше 0,5 %); виключити шкідливу ручну працю; замінити дорогі токсичні або пожежонебезпечні розчинники водою або дешевими водними розчинами.

Ультразвукове очищення застосовують перед ремонтом, складанням, забарвленням, хромуванням, нікеліруванням і іншими операціями. Особливо ефективно УЗ застосовувати для очищення деталей, що мають складну форму і важкодоступні місця (вузькі щілини, прорізи, маленькі отвори і т.д.). УЗ можна використовувати і для миття доїльної апаратури і молочного посуду.

Промисловість випускає велику кількість установок для ультразвукового очищення, що розрізняються конструктивними особливостями, місткістю ванн, потужністю УЗ (табл. 11.1).

Таблиця 11. 1

Основні технічні дані деяких ультразвукових очисних установок універсального призначення

Найменування показників	УЗУ-0,1	УЗУ-0,25	УЗУ-0,4	УЗВ-15М	УЗВ-16В	УЗВ-17М	УЗВ-18М	УЗУ13-25/16
Робоча частота, кГц	18	18	18	22	22	22	22	16
Вихідна потужність генератора, кВт	0,1	0,25	0,4	2,5	5,0	7,5	10,0	25,0
Місткість ванни	1	5	5	42	82	128	163	350

Ультразвук можна використовувати також і для інших процесів, пов'язаних з тепломасообмінних: сушіння матеріалів, просочення пористої-капілярних матеріалів рідиною (наприклад,

при просочуванні електричної ізоляції лаком, при олужненні соломи) і т.д.

Застосування УЗ для розмірної обробки твердих крихких матеріалів. Сутність цієї обробки полягає в тому, що між інструментом 2, що коливається з частотою 18...44 кГц і амплітудою 10...60 мкм, і оброблюваної поверхнею заготовки 1 подаються зважені у воді зерна абразиву 3. Інструмент періодично вдаряє по зернам абразиву, які виколюють мікрочастинки з поверхні заготовки. Оскільки інструмент притискається до оброблюваної поверхні, то на ній поступово утворюється поглиблення, що копіює форму робочої частини інструменту. Таким чином здійснюється відповідна операція: вирізування, прошивання, свердління і т. і.

Ультразвукова розмірна обробка на відміну від електроерозійної придатна для обробки як проводять, так і діелектричних матеріалів. Найбільш ефективна ультразвукова обробка при виготовленні деталей і отворів складної форми у виробах з твердих крихких матеріалів (скло, кераміка, алмаз, германій, кремній і ін.), Обробка яких іншими методами утруднена.

Застосування УЗ для з'єднання матеріалів. Ультразвук можна успішно застосовувати для пайки та зварювання металів.

Ультразвукова пайка відрізняється від звичайної тим, що жало паяльника жорстко пов'язано через концентратор з електроакустичним перетворювачем і робить коливання з частотою 18...44 кГц і амплітудою 3...20 мкм. Ультразвукові коливання викликають в розплавленому припої кавітацію, яка сприяє руйнуванню окисної плівки на поверхні металу. Чистий метал облужують. Ультразвук дозволяє проводити пайку легкоокисних металів (наприклад, алюмінію) без спеціальних флюсів і підвищує якість з'єднань. Для ультразвукової пайки застосовують пристрої різної потужності (від 0,01 до 0,6 кВт): УП-21, УЗУП-2, УЗП 2-0,025 і ін.

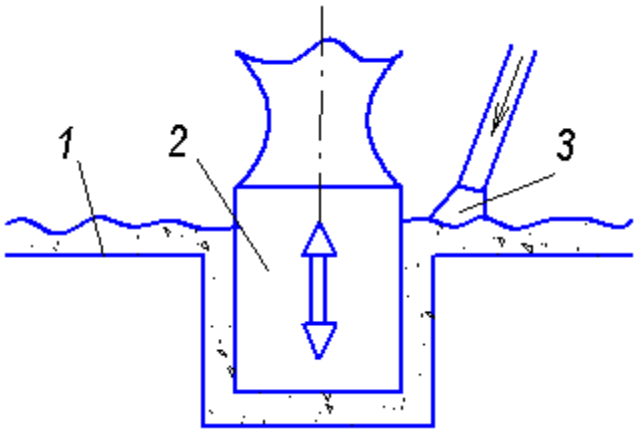

Рисунок. 74. Схема ультразвукової розмірної обробки матеріалів:
1 – оброблювана поверхня заготовки; 2 – інструмент, що коливається з ультразвуковою частотою; 3 – зерна абразиву, зважені у воді

Ультразвукове зварювання . При ультразвукової зварюванні металів з'єднуються деталі притискаються одна до іншої під дією відносно невеликий сили, спрямованої нормально до поверхні їхнього зіткнення. По дотичній до цієї поверхні спрямовані ультразвукові коливання, які руйнують плівку окису на поверхні деталей і викликають в зоні зварювання стан пластичності або плинності. При цьому під дією нормальної сили деталі з'єднуються.

Сварка відбувається без помітного нагрівання металу, внаслідок чого його структура в зоні зварювання змінюється мало. Ультразвук можна використовувати для зварювання листів дуже малої товщини (частки міліметра), при цьому вимоги до чистоти поверхні знижені. Експлуатуються різні типи ультразвукового устаткування для зварювання металів потужністю 0,1...4 кВт; машини МТУ і зварювальні кліщі КТУ для точкового зварювання, машини МШУ для шовного зварювання і т.д.

Застосування УЗ для диспергування і коагуляції. Використовуються такі види ультразвукового диспергування: утворення суспензій (подрібнення твердих тіл в

рідині), рідких аерозолів (розпорошення рідин в повітрі) і емульсій (отримання дрібних крапельок однієї з взаємно нерозчинних рідин в середовищі іншої).

Для отримання емульсій випускають змішувач-емульгатор УГС-10 і інші апарати. Ультразвукове емульгування може бути використано, наприклад, при змішуванні риб'ячого жиру з водою для випоювання його тваринам і птахам.

Ультразвук застосовують також для гомогенізації молока (роздроблення жирових кульок в молоці з метою підвищення його збереження і засвоюваності), боротьби з накипформування і для інших цілей.

Застосування УЗ при відновленні зношених деталей. Роботи, проведені в ЧІМЕСХ (під науковим керівництвом І. Е. Ульмана і М. В. Авдєєва), а також в інших сільськогосподарських вузах і НДІ, показали можливість застосування ультразвуку для підвищення якості відновлення деталей методами вибродугового наплавлення і наплавлення під шаром флюсу. Ультразвукові коливання в розплавлений метал можуть вводитися як через додатковий присадний матеріал, так і через основний матеріал деталі. Вплив ультразвуку викликає дегазацію рідкого металу, в результаті чого значно (в 3 ... 5 разів) знижується такий характерний для наплавлення дефект, як пористість наплавленого металевого шару. Під дією ультразвуку знижується ступінь технологічного викривлення наплавляються подовжених деталей, наприклад колінчастих валів. Ультразвуковий вплив виявився ефективним і для зміцнення робочої поверхні відновлюваних деталей після їх наплавлення. Зміцнення досягається за рахунок пластичного деформування поверхні інструментом, хто вагається з ультразвуковою частотою.

11.4. Використання біологічної дії ультразвуку

Ультразвук використовують для пастеризації молока, передпосівної обробки насіння з метою прискорення їх проростання і підвищення врожайності, стерилізації молока та інших рідких харчових продуктів, лікування тварин, відлякування гризунів від сільськогосподарських приміщень і т. Д.

Встановлено, що ультразвук інтенсивністю 1 ... 12 кВт / м ^{2} і частотою від сотень кілогерц до декількох мегагерц можна ефективно використовувати для профілактики і терапії хвороб очей, суглобів, кісток, маститів, ранових інфекцій, фурункульозу та інших хвороб. У ветеринарній практиці застосовують ультразвукові апарати Урскам-7Н, УТС-1, ВУТ-1 і ін.

11.5. Використання ультразвуку для отримання інформації

Застосування ультразвуку для отримання інформації засновано на аналізі ультразвукового сигналу, що пройшов через досліджуваний об'єкт або відбитого від нього. Як приймач ультразвуку найчастіше застосовують п'єзоелектричні перетворювачі. Методи отримання інформації за допомогою ультразвуку можна розділити на дві групи.

Методи, засновані на вимірі загасання і швидкості поширення ультразвукових хвиль у середовищі. Коефіцієнт поглинання α і швидкість звуку з залежать від складу і властивостей середовища. Ця залежність може бути використана, наприклад, при побудові вологомірів для різних сільськогосподарських матеріалів; для визначення вмісту білка і жиру в молоці; для контролю концентрації миючих розчинів, що застосовуються при ремонті сільськогосподарської техніки і т. д.

Методи, засновані на відображенні ультразвукових хвиль від кордону розділу двох середовищ, застосовують в таких областях,

як гідролокація (визначення положення підводних об'єктів), дефектоскопія, медична і ветеринарна діагностика та ін.

Як приклад використання ультразвуку у ветеринарній діагностиці можна привести прилад "Супор-БМ", призначений для раннього визначення поросності у свиней. Принцип дії приладу заснований на наступному. Головка випромінювача УЗ через шар контактної мастила стикається з поверхнею шкіри тварини. Ультразвукові хвилі проникають всередину тіла і поширюються в ньому вузьким пучком. Якщо свиня супоросна, то в її матці накопичується рідина, що позначається на відображенні ультразвукового променя. Прилад працює на частоті 2 мГц. Цінність такого приладу для практики полягає в тому, що раннє визначення поросності дозволяє економити корм і знижувати витрати робочого часу на утримання тварин.

Аналогічні прилади можна використовувати і для прижиттєвого визначення товщини жирового шару і м'язів у свиней.

11.6. Отримання магнітних полів

У технологічних процесах магнітні поля зазвичай використовують з індукцією до 4 Тл. Такі поля отримують головним чином за допомогою електромагнітів і постійних магнітів.

Постійні магніти виготовляють шляхом попереднього намагнічування магнітно-твердих матеріалів, тобто таких матеріалів, які після усунення намагнічує поле здатні зберігати велику магнітну індукцію. Широко застосовують постійні магніти, виконані з феррітобаріевих сплавів, сплавів магніко (Fe - Ni - A1 - Co - Cu), алні (Fe - Ni - A1 Cu) і ін.

Постійні магніти в порівнянні з електромагнітами дешевше і простіше по конструкції, не вимагають електропроводки і джерел електроживлення, безпечні в пожежному відношенні. При їх використанні магнітне поле не може раптово зникнути. Основні

недоліки постійних магнітів полягають в скрутності регулювання магнітної індукції і ослабленні магнітного поля з часом. Остання обставина змушує періодично намагнічувати постійні магніти.

Різновидом постійних магнітів є магнітофори. Їх виготовляють шляхом формування суміші з в'яжучих речовин (цементу, каучуку, смоли і ін.) і порошкоподібних феромагнітних наповнювачів (оксидних або металевих сплавів). Вироби, отримані таким чином, намагнічивають в спеціальних режимах, після чого на поверхні виробів (магнітофорів) виявляється "записаним" магнітне поле з будь-якими заданими конфігурацією і числом пар магнітних полюсів на одиницю площі.

11.7. Використання силового дії магнітного поля

На частку, вміщену в неоднорідне магнітне поле, діє сила $F_м$, Н, яку при досить малих розмірах частки можна розрахувати за виразом

$$F_M = \mu_0 x_0 V H grad \qquad (298)$$

де x_0 – магнітна сприйнятливість частки; V– обсяг частки, $м^3$; Н – напруженість магнітного поля, А/м.

$$x_0 = \frac{x}{1 + Nx} \qquad (299)$$

де x_0 – магнітна сприйнятливість речовини; N – коефіцієнт розмагнічування.

$$x = \mu_r 1 \qquad (300)$$

тут μ_r – відносна магнітна проникність речовини.

$$N = \frac{\vartheta In\left(\vartheta + \sqrt{\vartheta^2 - 1}\right) - \sqrt{\vartheta^2 - 1}}{(\sqrt{\vartheta^2 - 1})^3} \qquad (301)$$

Тут υ - відношення довжини частинки до її діаметру.

Для феромагнітних матеріалів x може бути в сотні тисяч разів більше, ніж для парамагнітних (і тим більше діамагнітних). Ця різниця, позначається відповідним чином і на значенні сили $F_м$, покладено в основу магнітної сепарації

(розділення) матеріалів, що відрізняються магнітною сприйнятливістю.

У сільськогосподарському виробництві магнітну сепарацію застосовують для очищення насіння культурних рослин від насіння бур'янів і для очищення кормів від феромагнітних домішок.

Магнітна очищення насіння. Її принцип розглянемо на прикладі електромагнітному зернонавантажувачі ЕМС-1А, призначеному для виділення насіння бур'янів з шорсткою поверхнею (повитиця, плевел, подорожник, смілка, волошка, гірчак рожевий і ін.) з насіння конюшини, люцерни, льону та інших дрібнонасінних культур, що мають гладку поверхню.

Насіння попередньо обробляються магнітним порошком. Порошок добре пристає до шорсткою поверхні насіння бур'янів і не пристає до гладкої поверхні насіння культурних рослин. Насіння, оброблені порошком, надходять на поверхню обертового барабана, виготовленого з неферомагнітними матеріалу (латуні). Усередині барабана знаходиться електромагніт, полюси якого займають приблизно половину окружності від верху до низу. Насіння бур'янів, покриті порошком, і надлишки порошку притягуються до поверхні барабана і скидаються внизу під барабаном. Насіння культурної рослини, не покриті порошком, вільно падають з барабана, не досягнувши його нижньої частини.

Умова утримання насіння бур'яну на поверхні барабана в нижній частині останнього має вигляд

$$F_{м} > F_{ц} + F_{g} cos\beta \qquad (302)$$

де $F_{ц}$ і F_{g} – відцентрова сила і сила тяжіння, що діють на насіння; β – кут між напрямком відцентрової сили і вертикальною віссю. Сили $F_{ц}$ і F_{g} визначають з виразів (301) і (302).

Продуктивність ЕМС-1А на очищення насіння конюшини - 180 ... 250 кг / год, сумарна встановлена потужність 3,1 кВт (в тому числі електропривод 2,2 кВт; селеновий випрямляч для живлення

електромагніту 0,9 кВт), частота обертання барабана 42...43 об/хв, витрата магнітного порошку 1...2,5 % від маси очищаються насіння.

Передбачається заміна машини ЕМС-1А на нову машину аналогічного призначення СМЩ-0,4 потужністю 2,6 кВт і продуктивністю на очищення насіння конюшини 400 кг/год, льону – 500 кг/год.

Магнітне очищення кормів – важлива складова частина технологічного процесу кормоприготовления, так як металеві включення в кормах (шматочки дроту, цвяхи, гайки, болти і т. і.) викликають поломки подрібнюючих машин, а також, проникаючи в організм тварин, знижують продуктивність останніх і можуть бути причиною їх травм і навіть загибелі.

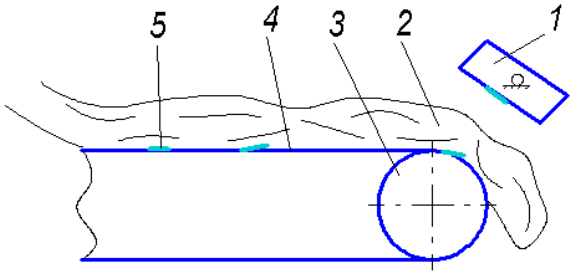

Рисунок 75. Електромагнітний сепаратор грубих кормів: 1 – електромагніт підвісного типу; 2 – кормова маса; 3 – немагнітний барабан; 4 – транспортерна стрічка конвеєра; 5 – металеві включення

На підприємствах комбікормової широко використовують магнітні сепаратори, які виділяють феромагнітні домішки із зерна і продуктів його подрібнення, з борошнистої сировини і комбікормів. У кормоцехах тваринницьких комплексів починають застосовувати магнітну очистку стебельчастих кормів (сіна, соломи, сінажу). У МІСП розроблений електромагнітний сепаратор грубих кормів. У сепараторі використаний серійний електромагніт постійного струму М-22 В, підключений до мережі через випрямний міст і має встановлену потужність 2,2 кВт. При швидкості транспортерної стрічки конвеєра 1,5 м/с, куті нахилу

магнітної системи 45 ° і зазорі між немагнітним барабаном і полюсами електромагніту 0,2 м забезпечується 100%-вий витяг феромагнітних домішок з стебельчастих кормів при їх подачі 40 т/год.

11.8. Використання фізико-хімічної дії магнітного поля

Найбільш вивчено фізико-хімічне дію магнітного поля на водні системи, зокрема магнітна обробка води з метою зменшення утворення накипу.

При магнітної обробки вода пропускається через зазор магніту. Після проходження води через магнітне поле солі жорсткості в основному втрачають здатність кристалізуватися на робочій поверхні теплообмінного апарату і випадають у вигляді суспендованих частинок (шламу), легко що буря потоком води і вловлюються в подальшому шламовідділювачем. Та накип, яка все ж відкладається на стінках апарату, має більш рихлу структуру і значно меншу товщину, ніж накип, що утворюється з необробленої води, і тому легко очищується.

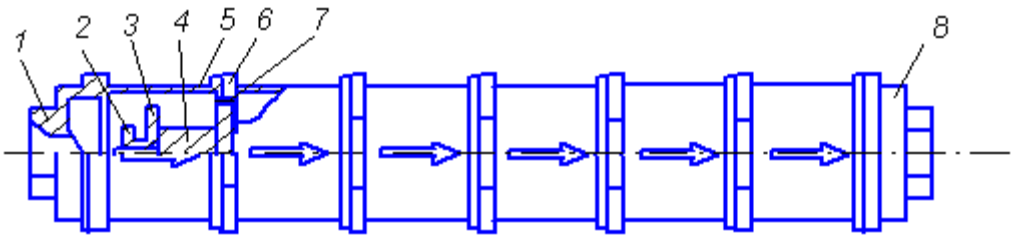

Рисунок 76. Апарат для магнітної обробки води ПМУ-1: 1 – нижня кришка; 2 – гайка; 3 – полюсні наконечники; 4 – постійний магніт; 5 – чавунний стакан (магнітопровід); 6 – прокладка; 7 – отвір в дні чарки; 8 – верхня кришка

Після закінчення певного часу вода втрачає набуті властивості, і її здатність до накипоутворення стає такою ж, як і у необробленої води. Тому час між магнітною обробкою води і її

надходженням в теплообмінний апарат має бути не більше 1 ... 4 год.

Магнітна обробка води з метою зменшення накипоутворення ефективна лише тоді, коли концентрація розчиненого в ній вільного двоокису вуглецю CO_2 менше так званої рівноважної концентрації. В цьому випадку вода перенасичується по карбонату кальцію $CaCO_3$ (основному накіпеутворювачу) і стає схильною до утворення його кристалів. Тому ефект протинакипної магнітної обробки води залежить від пори року. Влітку обробка більш ефективна, ніж взимку, так як споживання CO_2 рослинами взимку скорочується.

Поруч експериментальних досліджень встановлено, що протинакипний ефект магнітної обробки пов'язаний з наявністю в воді феромагнітних домішок (оксидів заліза і їх гідратів), частинки яких в магнітному полі, мабуть, злипаються і служать центрами кристалізації солей жорсткості безпосередньо затравочними в обсязі води, а не на теплообмінних поверхнях.

Для магнітної обробки води запропоновано понад сімдесят різних конструкцій апаратів. Деякі з них випускають серійно. Найбільш часто використовують апарати з постійними магнітами, наприклад апарати ПМУ. Апарат ПМУ-1 складається з трьох - п'яти однотипних, послідовно з'єднаних чавунних секцій. Кільцевій зазор між постійними магнітами і корпусом становить 2,5 мм, напруженість магнітного поля – 88...143 кА/м, швидкість води – 1...2 м/с, об'ємний витрата води – 2...7 м ^{3}/год.

Область можливого застосування магнітної обробки води в сільському господарстві не обмежується, проте, боротьбою з накипоформуванням. Результати деяких досліджень свідчать про те, що магнітна обробка води здатна давати позитивний ефект при зрошенні посівів (врожайність різних сільськогосподарських культур підвищується на 6...40 %), передпосівному замочуванні насіння (врожайність цукрових буряків і рису підвищується на 7...16 %), розсоленням ґрунтів (витрата промивної води

скорочується на 30...50%, вимивання солей збільшується в 1,2...2 рази) і т. д.

Загальноприйнятої теорії, яка строго пояснювала б механізм впливу активованої в магнітному полі води на різні об'єкти, ще не створено. Це ускладнює пояснення нестабільності одержуваних результатів і розрахунок конструкцій застосовуваних апаратів. Відсутність теоретичного обґрунтування магнітної обробки водних систем стримує її широке застосування в сільському господарстві ще й тому, що сама можливість зміни фізико-хімічних властивостей води після перебування в магнітному полі ставиться деякими вченими – представниками фундаментальних наук – під сумнівом виходячи з міркувань саме теоретичного характеру.

Контрольні питання

1. Перерахуйте основні параметри ультразвуку.
2. Як проявляється дія ультразвуку на фізичні та біологічні об'єкти?
3. Поясніть принцип дії ультразвукових перетворювачів.
4. У яких технологічних процесах використовують ультразвук?
5. Поясніть принцип дії магнітних сепараторів.
6. Які технологічні процеси виконують, використовуючи магнітні поля?
7. З якою метою і яким чином воду обробляють магнітним полем?

Тема 12. Показники ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі

12.1. Система показників ефективності використання енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі

Рішення завдання подолання кризи в сільському господарстві пов'язані не тільки з насиченням його сучасною технікою і обладнанням, а й раціональним використанням паливно-енергетичних ресурсів, питома вага яких в структурі собівартості продукції рослинництва і тваринництва постійно зростає.

Забезпеченість паливно-енергетичними ресурсами та їх правильне використання у вирішальній мірі впливають на стабільність технологічних процесів. Зростає роль переходу до ефективних енергозберігаючих технологій та використання альтернативних енергетичних ресурсів.

Теоретичні та методичні питання використання паливно-енергетичних ресурсів, як складової частини виробничого потенціалу в сільському господарстві набули особливої актуальності з кінця XX століття, що пов'язано з прискореним розвитком науково-технічного прогресу, механізацією, електрифікацією і автоматизацією виробничих процесів, переходом в рослинництві і тваринництві на якісно нові технології виробництва сільськогосподарської продукції.

Що ж таке енергія? Енергія – це загальна кількісна міра різних форм руху та взаємодія всіх видів матеріалів. Для зручності відрізняються механічна, теплова, електрична, ядерна та інші види енергії. Енергія використовується як засіб виробництва та забезпечення умов виробництва.

Згідно першого закону термодинаміки, що затверджує збереження енергії в термодинамічних системах різни види енергії

(механічна, теплова, електрична, магнітна) вимірюють в однакових одиницях. Величина енергії (у всіх її проявах) вимірюється в джоулях (Дж). Це дозволяє здійснювати оцінку енергетичних витрат різних процесів.

Ефективність використання енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі можна визначити за допомогою системних показників. Можна розділити їх на такі статистичні групи:

- показники наявності або забезпеченості енергоресурсами – показують забезпеченість аграрного формування енергетичних потужностей;
- показники використання – показують обсяги використання енергетичних ресурсів;
- показники результативності – показують ефективність використання енергетичних ресурсів в процесі виробництва кінцевого продукту.

До першої групи показників відносять енергоозброєність, енергозабезпеченість, електроозброєність, електрозабезпечення, енергетичний потенціал підприємства тощо.

До другої групи – нижчу теплоту згоряння палива, витрати палива (абсолютні, питомі, погодинні т.д.), коефіцієнт енергетичної завантаженості і т.д.

До третьої – коефіцієнт корисної дії, питому витрату палива, енергоємність (виробництва і продукції), енерговіддачу, критерій енергетичної ефективності і т.д.

Велике значення має усунення протиріччя між економічною і енергетичною ефективністю. Це можна здійснити в такий спосіб. По-перше, енергетична ефективність має підлегле значення. По-друге, при виборі одного з декількох економічно рівнозначних варіантів перевагу слід віддавати тому, у якого вище енергетична ефективність. Слід підкреслити, що підвищувати ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів в сільськогосподарському виробництві за рахунок погіршення екологічних та економічних показників неприпустимо.

Таким чином, застосування основних підходів енергетичного аналізу дозволяє оптимізувати процес розробки енергозберігаючих заходів в агробізнесі.

12.2. Структура використання енергоресурсів в агропромисловому комплексі та класифікації моторних палив

У сільськогосподарському виробництві використовується широкий спектр енергетичних ресурсів. Вирощування сільськогосподарських культур вимагає широкого застосування і таких технологічних матеріалів як насіння, добрива, гербіциди і т.д. На їх виробництво також витрачаються енергетичні ресурси. Слід враховувати і витрати людської праці, хоча його величина незначна. Тому що застосовуються методики повинні враховувати не тільки прямі витрати енергетичних ресурсів на виконання технологічних операцій, але і непрямі витрати енергії, які виникають при виробництві добрив, засобів захисту рослин, обладнання. Узагальненим показником, що характеризує витрати всіх видів енергії (моторних палив, електричної енергії, теплової енергії, витрати енергії на виробництво добрив, машин, механізмів, споруд тощо) є енергоємність продукції.

Під енергоємністю сільськогосподарської продукції слід розуміти сумарні витрати енергетичних ресурсів на виробництво одиниці продукції. Повні витрати складаються з трьох основних складових: прямі, непрямі і інвестиційні (рис. 77). Розглянемо їх.

Прямі витрати енергетичних ресурсів - це витрати паливно-енергетичних ресурсів на здійснення всього виробничого циклу. До них слід віднести моторні палива (дизельне паливо, бензин, газоподібні моторні палива тощо), електричну енергію та котельне паливо (рідке, газоподібне або тверде).

Непрямі витрати енергетичних ресурсів – це ті витрати, які були здійснені в процесі виробництва добрив, засобів захисту рослин, сировини, матеріалів і т.п. Особливо високу енергоємність мають азотні добрива, зокрема аміак.

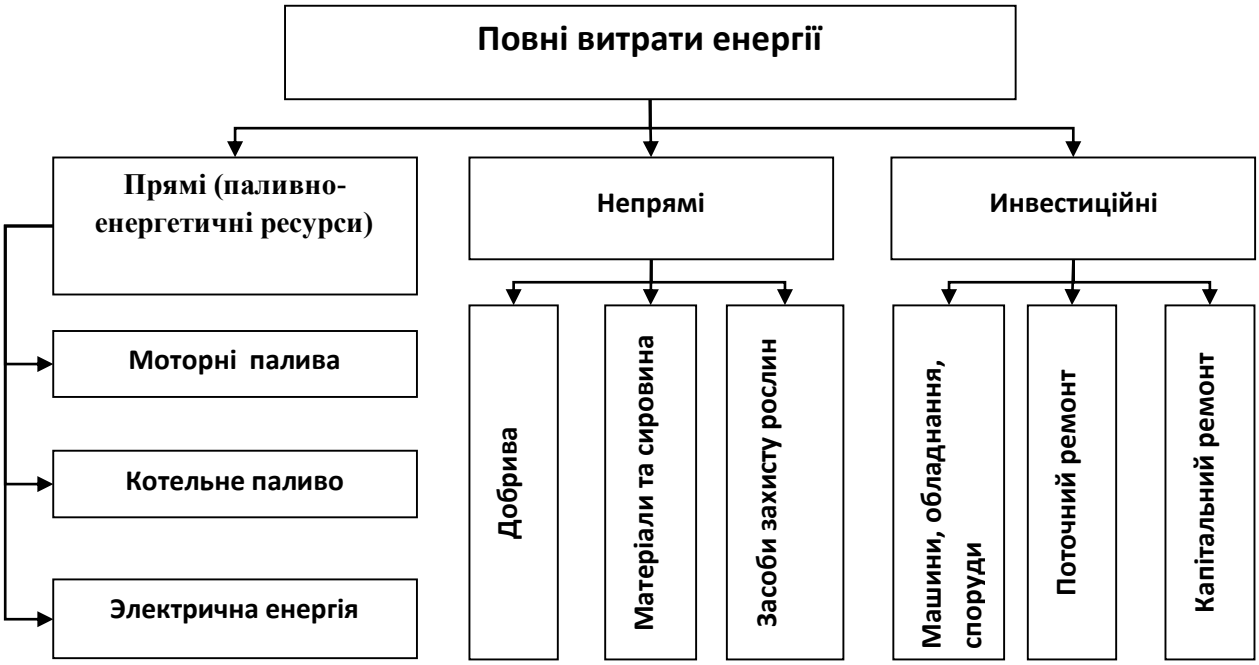

Рисунок 77. Структура повних витрат енергії витрат енергії

Так, наприклад, енергетичний еквівалент мінеральних добрив становить, МДж/кг:

• аміачна селітра – 27,6;

• карбамід – 36,8;

• аміачна вода – 16,4;

• аміак рідкий – 65,6.

Для порівняння, нижча теплота згоряння дизельного палива – 42,5 МДж/кг.

При визначенні повної енергоємності продукції сільськогосподарського виробництва необхідно враховувати і інвестиційні витрати. Під ними слід розуміти витрати енергетичних ресурсів на виготовлення машин, устаткування і виробничі споруди. При цьому необхідно враховувати термін експлуатації основних засобів і витрати енергетичних ресурсів на виконання поточного та капітального ремонтів. Так, енерговитрати на мобільні енергетичні засоби складають 86,4 МДж/кг, сільськогосподарських машин – 75 МДж/кг; будівель і споруд - від 177 до 5662 МДж/м^2.

У даній класифікації не розглядаються природно-кліматичні енергетичні ресурси, такі енергія сонця, вітру, води, ґрунту і т.п.

У процесі вирощування, збирання, зберігання, транспортування і переробки сільськогосподарських культур застосовують різні мобільні та стаціонарні енергетичні засоби: трактори, комбайни, автомобілі, котли, сушарки, теплогенератори тощо. Вони використовують моторне і котельне паливо, теплову та електричну енергію.

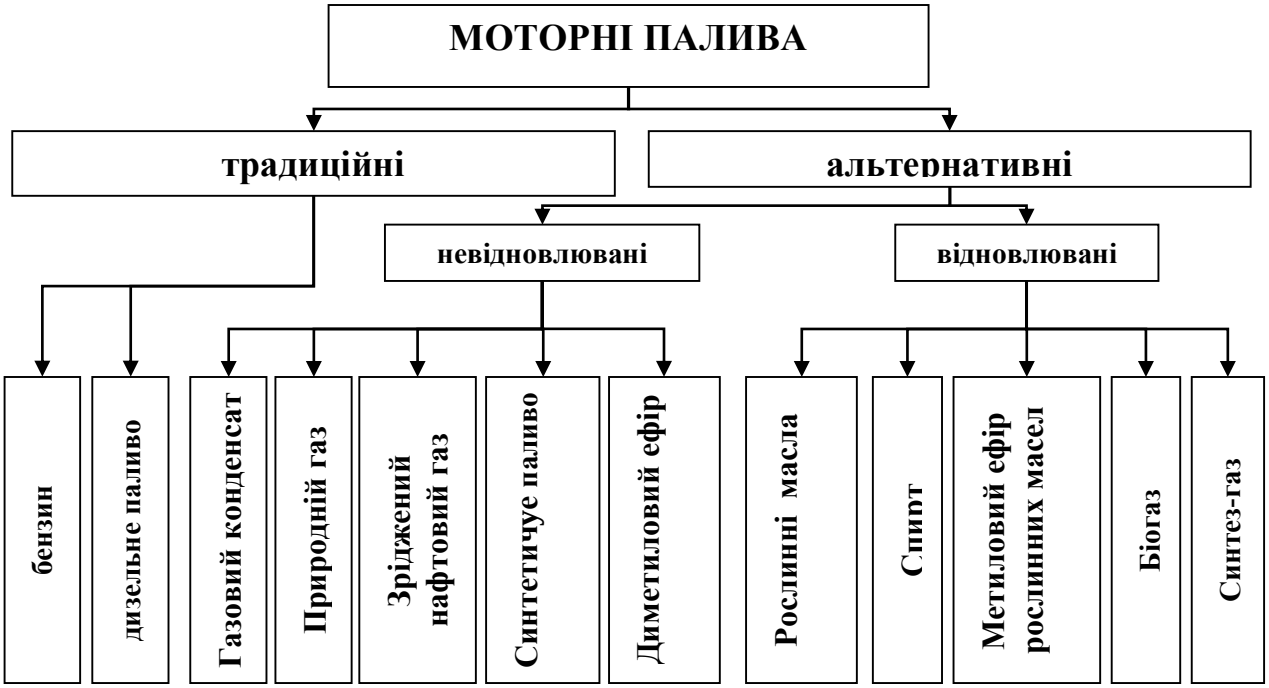

Рисунок. 78. Класифікація моторних палив

Надалі будемо розглядати прямі витрати енергії на моторні палива, як основну складову енерговитрат. Класифікацію моторних палив, які можуть використовуватися в сільському господарстві наведені на рис. 78.

Моторні палива можна розділити на дві групи: традиційні та альтернативні. До першої групи належать нафтопродукти: гас, бензин і дизельне паливо.

У другій групі розрізняють невідновлювані та відновлювані палива. До поновлюваних відносять:

• природний газ;

• скраплений нафтовий газ (пропан-бутан);
• газовий конденсат;
• синтетичні палива, які виробляються з вугілля і горючих сланців;
• диметиловий ефір, вироблений з природного газу.

Поновлювані палива виробляються з сировини органічного походження. До них відносять:

• рослинні олії;
• метилові ефіри рослинних олій;
• спиртові палива - метиловий, етиловий, бутиловий;
• кисне місткі добавки;
• біогаз;
• синтез-газ.

Слід зазначити, що палива рослинного походження і газоподібні палива істотно відрізняються від традиційних нафтових палив за фізико-хімічними властивостями. Це ускладнює їх використання.

Тому в теплових двигунах внутрішнього згоряння можуть використовуватися сумішеві палива, що містять нафтопродукти і компоненти не нафтового походження. Вони за своїми властивостями близькі до традиційних палив. Найбільшого поширення знаходять наступні комбінації:

• дизельного палива і рослинних олій;
• дизельного палива і метилових ефірів рослинних олій;
• бензину і спиртів (етилового, метилового, бутилового).

Газоподібні палива можуть використовуватися в двигунах всіх типів: і з запалюванням від стиснення, і від іскри. У дизельних двигунах, як правило, використовують газорідинну систему харчування, в якій рідке паливо (дизельне) використовується тільки для спалахування газоповітряної суміші в циліндрах двигуна.

12.3. Показники використання в агропромисловому комплексі. Умовне паливо, теплові та технічні паливні еквіваленти

В агропромисловому комплексі використовуються різні види енергетичних ресурсів, які істотно відрізняються як за фізико-хімічними властивостями, так і по нижчій теплоті згоряння. Так, теплота згоряння твердого палива змінюється від 8...12 МДж/кг у торфу до 25...26 МДж/кг у кам'яного вугілля; рідких палив - від 40 МДж/кг у мазутів і до 47 МДж/кг у бензинів. Ще більший розкид в теплоті згоряння у газоподібних палив. Так якщо у генераторного газу нижча теплота згоряння 4...6 МДж/м^3, у біогазу - 19...23 МДж/м^3, то у попутних газів нафтових родовищ вона підвищується до 47 МДж/м^3.

Таким чином, облік і планування витрат палива, контроль за його економним споживанням сильно ускладнені не тільки в загальнодержавних масштабах, але і в межах будь-якого підприємства. Тому для порівняння теплової цінності різних видів палив, варіантів замін одного палива іншим, складання норм витрат палива і планування його потреби введені такі техніко-економічні поняття, як умовне паливо, теплової та технічний паливні еквіваленти.

Умовним називається паливо, яке має теплоту згоряння $Q_у$ = 29,3 МДж/кг або МДж/м^3. Ця величина прийнята як відправна для планування витрат і звіту про використання палива. Відносна цінність різних палив розглядається в порівнянні з умовним за допомогою теплових паливних еквівалентів.

Тепловим паливним еквівалентом $E_т$ називається відношення нижчої теплоти згорання робочої маси реального палива до теплоти згорання умовного палива:

$$E_m = \frac{Q_н^p}{Q_y}. \qquad (303)$$

Тепловий паливний еквівалент застосовується при плануванні витрат теплової енергії та у звітності. Паливні еквіваленти дозволяють виробляти перерозподіл витрат теплової енергії з умовного в реальному, та навкоротньому, на основі співвідношення:

$$Bp = \frac{By}{Em}, \qquad (304)$$

де B_p і B_y – розходи відповідно реального та умовного палива, кг/с (кг/год, т/рік і т.п.).

При неможливості лабораторного визначення теплоти згорання палива або його визначення розрахунковим шляхом, слід використовувати дані сертифікатів постачальників (таблиця 12.1).

Таблиця 12. 1.

Коефіцієнти перерахунку в умовне паливо

Паливо та енергетичні ресурси	**Одиниці вимірювання**	**Тепловий паливний еквівалент (вугільне паливо)**
Вугілля кам’яне	тон	0,768 (*)
Сланцевий нафтовий	тон	0,300
Дрова для обігріву	м³ (густ.)	0,266
Нафта, в тому числі газовий конденсат	тон	1,430
Природний газ	тис. м³	1,154
Вугільні брикети	тон	0,605
Мазут	тон	1,370
Паливо побутове пічне	тон	1,450
Скраплений газ	тис. м³	1,570
Дизельне паливо	тон	1,450
Моторний бензин	тон	1,490
Електроенергії	тис. кВт год	0,123
Теплова енергія	Гкал	0,149

Перетворення різних видів енергії в еквівалент теплового палива (вугілля) наведено в таблиці 12.2.

Таблиця 12. 2

Коефіцієнти для перерахунку палива та енергії

Тип енергії	**Коефіцієнти для перерахунку**			
	електроенергія	**теплова енергія**	**теплова енергію**	**умовне паливо**
	кВт·год	**ккал**	**ГДж**	**кг**
Електроенергія, кВт·год	1	860	$3{,}6\cdot 10^{-3}$	0,123
Теплова енергія, ккал	$1{,}163\cdot 10^{-3}$	1	$4{,}19\cdot 10^{-6}$	$143\cdot 10^{-6}$
Теплова енергія, ГДж	$0{,}278\cdot 10^{3}$	$0{,}239\cdot 10^{6}$	1	34
Умовне паливо, кг	8,141	7000	$29{,}3\cdot 10^{-3}$	1

Останнім часом все частіше використовують нафтовий еквівалент. Тонна нафтового еквівалента (*toe*) дорівнює 41,868 ГДж або 11,63 МВт·год.

Порівняння моторних палив по тепловому паливному еквіваленту виконується без урахування впливу їх застосування на ефективний коефіцієнт корисної дії теплового двигуна. Облік цього чинника на ефективність використання палива здійснюється за допомогою технічного паливного еквівалента (ε_m):

$$\varepsilon_m = \frac{Q_n \cdot \eta}{Q_y \cdot \eta_y} \qquad (305)$$

де η – ефективна ефективність теплового двигуна на деяких видах палива;

η_y – ефективна ефективність теплового двигуна на звичайному паливі.

Використання концепції технічних паливних еквівалентів дозволяє проводити кількісні перерахунки погодинної витрати моторного палива B_p на витрати еквівалентного моторного палива або навпаки:

$$B_p = B_y \cdot \varepsilon_m, \qquad (306)$$

де B_y – погодинна витрата номінального палива в тепловому двигуні.

Такий підхід також може бути використаний при порівняльному аналізі ефективності використання традиційної нафти та альтернативних видів палива. При цьому вартість технічного еквівалента складає:

$$\varepsilon_m = \frac{Q_Б \cdot \eta_Б}{Q_{ДП} \cdot \eta_{ДП}}, \tag{307}$$

де $Q_{ДП}$ – нижча теплота згоряння традиційного нафтового палива;

$Q_Б$ – нижча теплота згоряння альтернативного моторного палива;

$\eta_{ДП}$ – ефективна ефективність теплового двигуна при роботі на традиційному нафтовому моторному паливі;

$\eta_Б$ – ефективна ефективність теплового двигуна при роботі на альтернативному моторному паливі.

Погодинна витрата альтернативного моторного палива (B_B) складе:

$$B_Б = \frac{B_{ДП}}{\varepsilon_m}, \tag{308}$$

де $B_{ДП}$ – погодинна витрата традиційного нафтового палива.

Тоді можна визначити співвідношення вартості традиційного та альтернативного палива:

$$\xi = \frac{B_Б \cdot Ц_Б}{B_{ДП} \cdot Ц_{ДП}} = \frac{Ц_Б}{\varepsilon_m \cdot Ц_{ДП}}, \tag{309}$$

де $Ц_Б$ – ціна альтернативного моторного палива;

$Ц_{ДП}$ – ціна традиційного палива для нафтових двигунів.

Якщо $\xi < 1$, використання альтернативних видів палива доцільно.

Розглянемо наступний **приклад.** Необхідно визначити доцільність використання біопалива в дизельному двигуні при наступних умовах:

- ККД двигуна при роботі на нафтовому дизельному паливі $\eta_д$ = 0,375;
- нижча тепла згоряння дизельного палива – $Q_д$ = 42,5 МДж/кг;
- ціна дизельного палива – *Цд* = 0,880 у.о./кг;
- ККД двигуна при роботі на біопаливі $\eta_б$ = 0,369;
- нижча тепла згоряння біопалива – $Q_б$ = 40,62 МДж/кг;
- ціна біопалива – *Цд* = 0,778 у.о./кг.

Рішення.

Визначаємо технічний паливний еквівалент, приймаючи дизельне паливо за умовне

$$\varepsilon_m = \frac{Q_Б \cdot \eta_Б}{Q_д \cdot \eta_д} = \frac{40{,}62 \cdot 0{,}369}{42{,}5 \cdot 0{,}375} = 0{,}94 . \qquad (310)$$

Визначаємо співвідношення вартостей палив

$$\xi = \frac{Ц_Б}{\varepsilon_m \cdot Ц_Д} = \frac{0{,}778}{0{,}94 \cdot 0{,}88} = 0{,}941 . \qquad (311)$$

Так як $\xi < 1$, то використання біопалива та доцільність.

12.4. Показники забезпеченості енергоресурсів

Наявність і забезпеченість енергетичними засобами з розрахунку на одиницю трудових ресурсів характеризується показником енергоозброєності праці. Енергоозброєність праці – це сумарна потужність всіх джерел механічної енергії машинно-тракторного парку і інших двигунів, яка доводиться на одного працівника, зайнятого в даному виробництві. Використовуються поняття номінальної, потенційної і фактичної енергоозброєності праці.

Номінальне значення енергоозброєність праці:

$$EB_н = \frac{\sum_{i=1}^{k} (Ne_i \cdot m_i)}{n} \text{, кВт/люд,} \qquad (312)$$

де Ne_i - номінальна потужність *i*-го типу обладнання;

k - кількість видів обладнання;
m_i - кількість обладнання і-го типу;
n - середньорічна кількість працівників.

Потенційна *(ЕВп)* і **фактична** *(ЕВф)* енергоозброєність робочої сили в більшості випадків істотно відрізняється від номінального значення. **Потенційна** енергоозброєність робочої сили враховує наявність зайвих, резервних і виснажених енергоресурсів, але тільки кількість операторів машин

$$EB_n = \frac{\sum_{i=1}^{k}(Ne_i \cdot m_i) - N_1}{n - n_1}, \text{ кВт/люд,} \tag{313}$$

де N_1 – зайві, резервні і такі, що підлягають списанню унаслідок фізичного і морального зносу енергетичні потужності, кВт;
n_1 - середньорічна кількість працівників соціальних та побутових підрозділів, планово-бухгалтерських служб, молодшого обслуговуючого персоналу, охорони тощо.

Фактичне співвідношення потужності до кількості робочої сили, крім вищесказаного, також враховує фактичне навантаження двигунів і наявність не використовуваних потужностей.

$$EB_ф = \frac{\sum_{i=1}^{k}(Ne_i \cdot m_i \cdot Xe_i) - N_1 - N_2}{n - n_1}, \text{ кВт/ люд,} \tag{314}$$

де N_2 – енергетичні потужності, придатні для експлуатації, але не використовуються з різних організаційних і технічних причин, наприклад, нестачі трудових ресурсів, що ремонтують і т.д., кВт;
Xe_i – коефіцієнт з урахуванням фактичного навантаження двигуна і-го мобільного енергетичного засобу, що є наслідком використання певних технологічних режимів, зниження паспортної потужності за рахунок зносу, порушення регулювання вузлів і механізмів .

Енергозабезпеченість характеризує наявні енергетичні потужностей з розрахунку на одиницю площі (100 га) сільськогосподарського підприємства:

$$E3 = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^{k} (Ne_i \cdot m_i)}{F}, \quad (315)$$

де F – площа сільськогосподарських угодій, га.

Електроозброєність праці - показник, що характеризує забезпечення праці електричною енергією. Підвищення електроозброєності праці є важливою умовою науково-технічного прогресу і зростання продуктивності праці.

Розрізняють електроозброєність праці та електроозброєність робітників. Коефіцієнт електроозброєність праці визначається діленням кількості електричної енергії, спожитої на виробництві, на число фактично відпрацьованих людино-годин.

Електроозброєність праці - це кількість електроенергії, що використовується для виробничих потреб, на середньорічного працівника аграрного комплексу:

$$E_{л.в.} = \frac{W_{ел.ен.}}{n}, \quad (316)$$

де W – річне споживання електричної енергії, кВт·год.

Електроозброєність робітників характеризується потужністю електроприводу в кВт, яка припадає на одного робітника. Порівняння коефіцієнта електроозброєння і коефіцієнта енергопостачання характеризує рівень електрифікації виробництва.

12.5. Показники ефективності енергоресурсів

Показники ефективності можна розділити на три групи:

- технологічна ефективність;
- енергоефективність технологічних операцій;
- паливна ефективність – використання таких електростанцій, як двигуни внутрішнього згоряння, котли, сушарки, обігрівачі вентиляторів і т.д.

При вирішенні проблеми оптимального використання енергоресурсів важливе значення набуває така економічна

категорія, як «енергоефективність». Підвищення енергоефективності призводить до збільшення обсягів виробництва товарної продукції на одиницю витрачених енергоресурсів. Ця категорія є об'єктивною. Вона дозволяє виявити тенденції в конкретномувикористанні енергії. Ця категорія враховує всю енергію, що використовується для виробництва продукції (прямі, непрямі та інвестиційні витрати).

Важливе місце у визначенні енергоефективності сільськогосподарського виробництва становить підбір і обґрунтування відповідних критеріїв. Вони дають можливість визначити ефективність використання енергоресурсів у виробничому процесі.

$$R = \frac{П}{E}, \tag{317}$$

де $П$ - енергія, що міститься в кінцевому продукті (основний і бічний);

E - повне енергоспоживання для виробництва.

Із загального критерію ви дотримуєтеся часткових критеріїв визначення ефективності використання енергоресурсів в окремих технологічних процесах і при виробництві певних видів продукції. Слід зазначити, що необхідно дотримуватися принципу узгодженості цих критеріїв.

Доцільно враховувати потенціал і **фактичну** енергоефективність сільськогосподарського виробництва.

Потенційна енергоефективність - це відношення потенційних обсягів виробництва до стандартних витрат енергоресурсів.

Енергоефективність фактична - це відношення фактичного обсягу виробництва до фактичного витрачання енергоресурсів.

При визначенні конкретних витрат енергоресурсів необхідно розрахувати питоме використання енергії на грошову одиницю, враховуючи всі витрати паливно-енергетичних ресурсів за наступними формулами:

$$ПЕ = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i \cdot m_i) + 0{,}1229 \cdot W}{ВП}, \text{ кг у.п./у.о.,} \quad (318)$$

де ε_u – тепловий паливний еквівалент *і-о* типу палива;

m_i - річна витрата палива типу *і-о*, кг;

W - щорічне використання електричної енергії, кВт·год;

ВП - річна вартість реалізованої продукції, у.о.;

n - кількість типів пального.

Цей показник широко використовується при порівнянні енергоємності галузей і економік держав.

Розглянемо наступний **приклад.** Визначити енергоємність виробництва молока за такими базовими даними:

- річне виробництво молока *ВМ* = 4860 ц;
- ціна молока *Цм* = 70 у.о./ц;
- річне споживання дизельного палива *Мд* = 8,3 т;
- річне споживання бензину *Мб* = 6,6 т;
- річне споживання електроенергії W = 12,2 тис. кВт·год.

Рішення.

Визначте витрату стандартного палива за формулою:

$$ВУП = \sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i \cdot M_i) + 0{,}1229 \cdot W, \text{ кг у.п.,} \quad (319)$$

де ε_i – тепловий паливний еквівалент *типу* енергоресурсу.

Тепловим еквівалентом моторного палива є:

- для дизельного палива $\varepsilon_д$ = 1,45;
- для бензину $\varepsilon_б$ = 1,5.

Після заміни отримуємо:

$$ВУП = \left(1{,}45 \cdot 8{,}3 \cdot 10^3 + 1{,}5 \cdot 6{,}6 \cdot 10^3\right) + 0{,}1229 \cdot 12{,}2 \cdot 10^3 = 23{,}4343 \cdot 10^3$$

кг у.п. (320)

Енергетичну інтенсивність виробництва молока визначаємо за формулою:

$$ЕВ = \frac{ВУП}{ВМ}. \quad (321)$$

Після заміни отримуємо:

$$E_1 = \frac{23{,}4343 \cdot 10^3}{4860} = 4{,}82 \text{ кг у.п./ц.} \qquad (322)$$

Тоді конкретне використання енергії на грошову одиницю буде

$$ПЕ = \frac{E_1}{Цм} = \frac{4{,}82}{70} = 0{,}0689 \text{ кг у.п./у.о.} \qquad (324)$$

Однак такий показник, як питоме споживання енергоресурсів на грошову одиницю, не дає абсолютно об'єктивної картини. Справа в тому, що, по-перше, можна використовувати паливно-енергетичні ресурси з різними цінами; по-друге, закупівля палива може здійснюватися в різні пори року з урахуванням сезонних коливань їх цін. Показники собівартості дуже важливі і потребують врахування. Для цього пропонується використовувати не конкретну вартість еквівалентного палива на грошову одиницю, а відношення собівартості використаних паливно-енергетичних ресурсів *(ВПЕР)*до собівартості продукції (ВП)

$$ПЕВ = \frac{ВПЕР}{ВП}. \qquad (325)$$

Цей показник показує частку паливно-енергетичних ресурсів у собівартості продукції.

Енергоємність технологічної експлуатації можна визначити по-різному: як часткова від поділу витрати палива на погодинну продуктивність агрегату; кількість потужності на метер захоплення агрегату і т.д.

Енергоємність технологічної експлуатації враховує загальні енергетичні витрати на її реалізацію (прямі, непрямі та інвестиційні), з урахуванням продуктивності машинно-тракторного агрегату.

$$E_i = E_п + E_{ур} + E_{ж.п} + E_т + E_м + E_{зч}, \qquad (326)$$

де $E_п$ – прямі витрати енергії за рахунок дисперсії моторного палива, МДж/га;

$E_{ур}$ – непрямі витрати на енергію, які визначаються енергоспоживанням для виробництва добрив, засобів захисту рослин, технологічних матеріалів і т.д., МДж/га;
$E_{ж.п}$ – енергетичні витрати на живу працю, МДж/га;
$E_{т}$, $E_{м}$, $E_{зч}$ – енергоємність засобів виробництва відповідно тракторної, сільськогосподарської техніки, муфти тощо, МДж/га.

Моторні палива використовуються тепловими двигунами для характеристики економічності яких використовується ряд показників.

Питома витрата палива - це відношення годинної витрати палива до потужності двигуна. Його використовують для характеристики паливної ефективності двигунів. Одиниця виміру питомої витрати палива залежить від вибору одиниць для параметрів, що входять у визначення. Наприклад: питома витрата палива може вимірюватися в наступних одиницях: г/(к.с.·год), кг/(кВт·год), м^3/(кВт·год).

ККД (коефіцієнт корисної дії) є відношенням корисної роботи до підведеної енергії. Для теплових двигунів корисна робота - це робота, яка передається з фланця колінчастого вала споживачеві. Підведена енергія - це енергія, яка виділяється при згорянні палива.

Взаємозв'язок між ККД і питомою витратою палива двигуна

$$\eta = \frac{3600}{be \cdot Q_н^р},$$

де η – ККД двигуна;
be – питома витрата палива, кг/(кВт·год);
$Q^р_н$ – нижча теплотворна цінність палива, кДж/кг.

Розглянемо наступний **приклад.** Визначте ефективність двигуна за результатами його випробувань, які показали, що питома витрата палива be = 0,341 кг/(кВт·год). Зниження тепла використовуваного палива – $Q^р_н$ = 26900 кДж/кг.

Рішення.

ККД двигун знаходиться за формулою

$$\eta = \frac{3600}{be \cdot Q_н^р} = \frac{3600}{0{,}341 \cdot 26900} = 0{,}392. \qquad (327)$$

Таким чином, ККД складає 39,2%.

Контрольні питання

1. Що відноситься до показників результативності використання енергетичних ресурсів?
2. Перерахуйте, що належить до непрямих витрат енергетичних ресурсів
3. Назвіть, що враховується при визначенні теплового паливного еквівалента.
4. Назвіть, що враховується при визначенні номінальної енергоозброєності праці враховується.
5. Що таке фактична енергетична ефективність та що вона враховує?
6. Що таке потенційний обсяг виробництва?
7. Як можна розуміти потенційну витрату енергетичних ресурсів?

Тема 13. Ефективність використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів в агропромисловому комплексі

13.1. Методика оцінки палив. Експлуатаційно-споживчі показники

Порівнювати моторні палива, які використовуються в агропромисловому комплексі можна за такими основними показниками:

• експлуатаційно-споживчі;
• виробничо-технологічні;
• екологічні;
• економічні.

До експлуатаційно-споживчими показниками відносять зручність заправки; зручність мобільного енергетичного засобу; експлуатаційна безпека; щільність енергії на одиницю об'єму і маси.

До виробничо-технологічними показниками відносять такі як: енергетична віддача інвестицій; масштабованість виробництва; сталість виробництва; простота видобутку або виробництва.

До екологічних показників відносять токсичність; викиди часток саж; викиди сполук, що сприяють утворенню кислотних дощів; створення парникового ефекту; забруднення землі і води; землекористування; безпеку.

Економічні показники характеризуються вартістю палива, інфраструктурою засобів заправки і т.д.

Розглянемо докладніше запропоновані критерії. Почнемо їх розгляд з експлуатаційно-споживчих.

Важливим критерієм ефективності є щільність енергії на одиницю маси і об'єму. Чим більше щільність, тим краще енергоресурс з точки зору споживача, тому що велика щільність

енергії вимагає менше місця для зберігання в конструкції машин і обладнання, що використовують даний енергоресурс. Щільність енергії визначається за формулою

$$DE = Q \cdot \rho, \text{ ГДж/м}^3, \quad (328)$$

де Q – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

ρ – густина палива, т/м^3.

З цієї точки зору, повернення (кінець XIX і початку XX століття) з дров до вугілля було ефективним, так як щільність енергії на одиницю об'єму з такою ж масою вугілля приблизно в 2 рази вище, ніж у дров (рис. 79). Перехід від вугілля до нафти був настільки ж ефективним. Нафта навіть більш «енергетично щільніша», ніж вугілля, і тому більш ефективна.

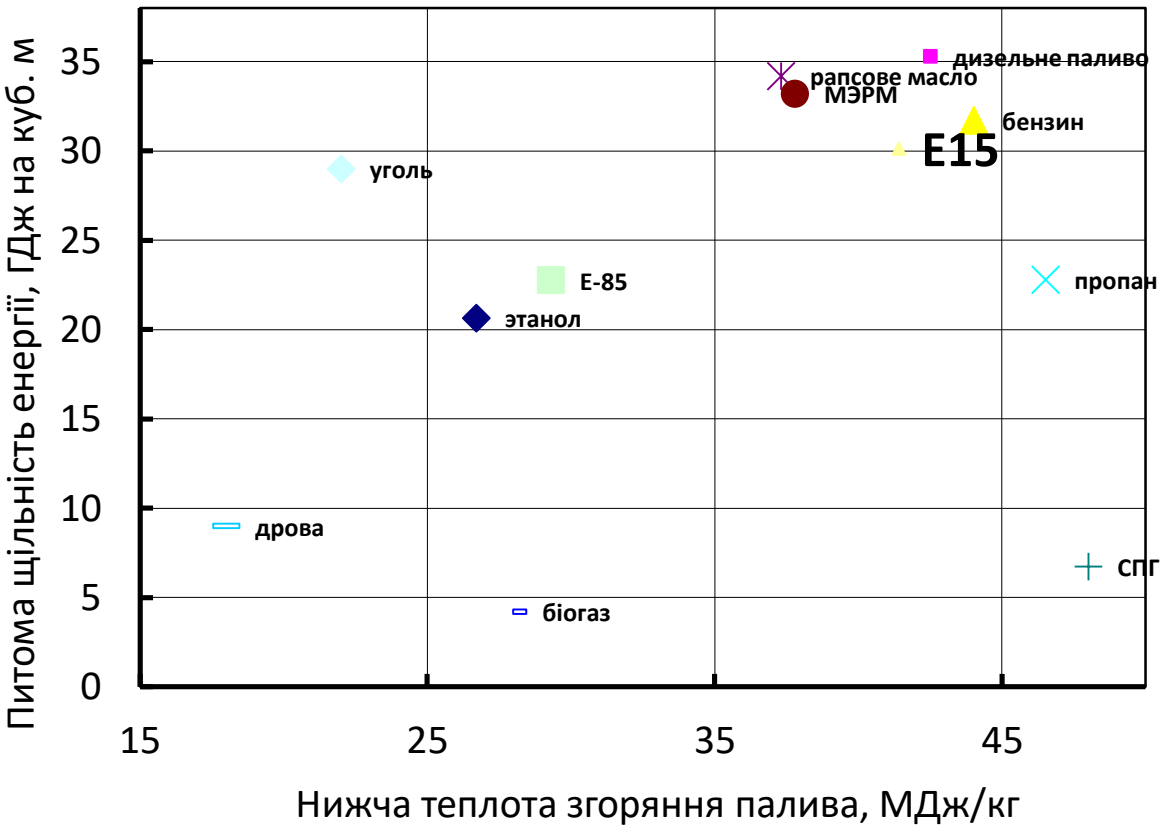

Рисунок 79. Питома щільність енергії на одиницю об'єму

Найбільш ефективним енергетичним ресурсом за цим параметром є нафтопродукти: дизельне паливо і бензин. До них за своїми властивостями підходять біодизелеве паливо або

метиловий ефір рослинних олій і рослинних олій. Слід зазначити, що паливо на основі біоетанолу і газоподібне паливо мають низьку щільність енергії, і це одна з основних проблем в їх використанні.

Щоб заправка автомобілів, тракторів і комбайнів паливом була організована правильно, потрібно дотримуватися таких умов. Сільськогосподарські машини повинні заправлятися на місці їх роботи. Це скорочує холості переїзди, сприяючи тим самим економії пального. При використанні для роботи автомобілів етилованого бензину закрита заправка оберігає обслуговуючий персонал від обливання токсичним пальним і вдихання його парів.

Що стосується зручності заправки техніки рідкі біопалива, що містять біоетанол, метиловий ефір рослинних масел або рослинні масла, то слід зазначити наступне. Їх можна транспортувати, зберігати і розподіляти також, як нафтопродукти.

Сільськогосподарська техніка може використовувати і газоподібні палива, такі як стиснутий природний газ, пропан-бутанової суміші і біогаз. Ці палива безпечні у використанні, а також позитивно впливають на ресурс двигуна. Однак деякі проблеми може створювати заправка газоподібним паливом, особливо стисненим природним газом.

Для її здійснення необхідно застосування пересувних автомобільних газових заправників. Якщо у аграрного формування є не менше 10 тракторів і по його території прокладено газопровід середнього тиску, то доцільним може стати придбання газокомпресорної станції служби. А це вимагає відповідних капітальних вкладень і експлуатаційних витрат.

Крім того необхідно враховувати той факт, що час роботи автомобілів і тракторів на газоподібному паливі, як правило, менше ніж на рідкому нафтовому. Таким чином потрібно частіше проводити заправку техніки.

13.2. Виробничо-технологічні показники

Розглянемо такі чинники виробничо-технологічних показників як енергетична віддача інвестицій; масштабованість виробництва; сталість виробництва; простота видобутку або виробництва.

1. Енергетична віддача інвестицій (EBI) визначається в енергетичних одиницях. Міжнародне визначення цього показника - EROEI або Energy returned on energy invested. Відомо, що будь-яке виробництво має приносити дохід, тобто виручка від діяльності повинна бути більше, ніж повна собівартість. Стосовно до видобутку енергоресурсів і подальшому провадженню палива, в тому числі відновлюваних, крім грошового доходу, процес повинен бути вигідний з енергетичної точки зору. Очевидно, що витрати енергії на видобуток, транспортування та переробку сировини повинні бути менше, ніж виходить з видобутих ресурсів. Це можна назвати енергетичної віддачею інвестицій, або **EROEI** (**Energy return on energy invested**). Вперше цю ідею запропонував в 70-х роках минулого століття американський вчений-біолог Чарльз Холл коли проводив дослідження міграції риб. Тоді він сформулював твердження, що хижак не може витрачати більше енергії, ніж він отримує в результаті полювання. Далі він переніс цю ідею на видобуток нафти і виробництво інших енергоносіїв, в тому числі відновлюваних.

Енергетична віддача інвестицій визначається наступним чином

$$EROEI = \frac{ER}{EI}, \qquad (329)$$

де ER – енергія, яка отримується в результаті видобутку або виробництва енергетичного ресурсу;

EI – енергія, яка була витрачена на видобуток або виробництво енергетичного ресурсу.

З цієї математичної залежності випливає, що можливі три принципово різні варіанти.

Перший, коли *EROEI* = 1. Це означає, що таку ж кількість енергії довелося витратити на одну одиницю отриманої енергії. Таким чином, виробництво енергії має нульовий результат.

Другий, коли *EROEI* < 1. І тут видобуток чи виробництво енергетичного ресурсу енергетично збиткове і тому недоцільно.

Третій, коли *EROEI* > 1. Це свідчить про те, що видобуток енергоресурсів є енергоприбутковим.

З наведеної вище формули можна зробити висновок, що величина енергетичної віддачі інвестицій залежить від ряду факторів, а саме:

- теплоти згорання енергоресурсу на одиницю об'єму або маси;
- технології видобутку або виробництва енергоресурсу;
- технології виробництва енергії на відповідних енергоустановках, в разі якщо енергоресурс не має форми накопичення.

Таким чином, EROEI є важливою характеристикою видобутку енергоресурсів і виробництва палива або в загальному випадку просто енергії. Очевидно, що чим вище енергетична віддача інвестицій, тим ефективніше видобуток і виробництво. Це відноситься як до видобутку традиційних енергоресурсів, так і до виробництва поновлюваних. Очевидно, що для найбільшої суспільної вигоди, при інших рівних умовах, вибір слід робити на користь тих напрямків енергетики, де EROEI вище. Значення енергетичної віддачі інвестицій для деяких видів енергетичних ресурсів представлені в таблиці 13.1.

Таблиця 13. 1.

EROEI для деяких видів енергоресурсів

Енергетичні ресурси	**Орієнтовні дані Чарльза Холла**		**Данні EROEI Ричарда Хейнберга, 2009 рік [9].**
	Орієнтовний рік	**EROEI**	
Нафта і газ	2005	11…18	
Світовий видобуток нафти	1999	35	19
Природний газ	2005	10	10
Вугілля	1970	30	50
Ядерна енергія		15	1,1…15
Етанол із цукрової тростини	1986	0,8…1,7	8…10 (Бразилія)
Кукурудзяний етанол	2006	0,8…1,6	1,1…1,8
Біодизель	2008	1…3	1,9…9

З таблиці видно, що, наприклад, виробництво рідкого палива з біомаси характеризується вкрай низьким EROEI і за цим критерієм є малоефективним. Хоча цей критерій для виробництва дизельного біопалива та біоетанолу з цукрової тростини знаходиться на одному рівні з природним газом.

Так, за розрахунками фахівців з США, EROEI виробництва біоетанолу в США близько до 1, що робить його виробництво з енергетичної точки зору енергії неефективним. За цим критерієм нетрадиційні та відновлювані енергоресурси менш ефективні, ніж традиційна нафту.

Другим важливим критерієм ефективності є масштабованість виробництва. Іншими словами, це можливість в задані терміни збільшити видобуток або виробництво енергоресурсу до необхідних обсягів, і може визначатися як максимально можливий темп зростання і максимально можливий обсяг видобутку або виробництва в рік.

Наявність енергоресурсів, або існуюча можливість виробляти енергоресурси це необхідна, але не достатня умова. Так, наприклад, в світі є можливість виробляти етанол, але немає достатньої кількості посівних площ для вирощування біоенергетичної сировини, щоб повністю замінити традиційні нафтопродукти. В даний час світовий видобуток нафти перевищує 3 млрд. тон. Для того щоб повністю замінити нафту альтернативним енергоресурсом, необхідно налагодити їх виробництво у відповідних обсягах.

Існуючі альтернативні нафти енергоресурси, такі як біодизель, етанол, нетрадиційні джерела палива здатні внести вклад в загальне виробництво, але не в тих масштабах, які необхідні, і за цим критерієм є менш ефективними, ніж нафта.

Третє - це сталість виробництва енергоресурсу, або сталість генерації енергії. Енергія суспільству необхідна кожен день, не можна допускати того, щоб в залежності від обставин значно знижувався загальний потік енергії. Видобуток нафти, газу і вугілля легко прогнозуються на десятиліття вперед, чого не можна сказати про виробництво біопалив, так як виробництво залежить від врожайності, що піддається прогнозу набагато гірше. За цим критерієм нафту ефективніше біоетанолу або біодизеля. Ще складніше в цьому плані з вітрової і сонячної енергетики: мінливість виробництва енергії робить можливим їх використання тільки в якості допоміжного джерела.

Четверте, простота видобутку і виробництва. Щоб добути або зробити енергоресурс потрібно затратити певну кількість ресурсів, в тому числі і енергетичних. Для виробництва біопалива потрібна достатня кількість біоенергетичної сировини. Вирощування відповідного врожаю вимагає використання добрив, в тому числі азотних, для виробництва яких використовується природний газ. На сучасному етапі не представляється можливим замінити біопалива весь обсяг споживаних нафтопродуктів. Тому цей вид енергетичних ресурсів може бути тільки допоміжним.

13.3. Екологічні показники палива

Робота автотракторних дизелів оцінюється комплексом експлуатаційно-технічних показників, таких як питома потужність, масогабаритні показники, паливна економічність, токсичність відпрацьованих газів (ВГ) і ін. Найважливішими з них в даний час є показники токсичності ВГ, тобто кількість викидів двигуном шкідливих речовин.

Склад і фізико-хімічні властивості більшості альтернативних палив істотно відрізняються від складу та властивостей нафтового дизельного палива. Тому переклад дизельних двигунів з штатного дизельного палива на альтернативні палива, як правило, призводить до трансформації робочих процесів (подачі палива, сумішоутворення і згоряння) і, як наслідок цього, до значних змін основних параметрів дизельного двигуна. Це відноситься і до показників токсичності ВГ дизелів.

Властивості застосовуваного палива значно впливає на екологічні якості дизелів. При цьому використання альтернативних палив в дизелях може супроводжуватися як поліпшенням показників токсичності ВГ, так і погіршенням цих показників.

З екологічної точки зору нафтовий газ або пропан-бутанової суміш і природний газ, основним компонентом якого є метан, є більш чистими моторними паливами в порівнянні з традиційними моторними паливами - бензином і дизельним паливом. Це, в першу чергу, відноситься до викидів сажі (С), бензапірену (БП) і оксидів азоту (NO_x). Експериментальні дослідження показали, що, наприклад, застосування природного газу як моторного палива призводить до зниження токсичних компонентів у відпрацьованих газах від 62% для оксиду азоту до 99% для вуглеводнів.

Істотно відрізняються від дизельних палив за своїми фізико-хімічними властивостями і спиртові палива, зокрема метиловий спирт (метанол - CH_3OH) і диметиловий ефір (ДМЕ - CH_3OCH_3).

Відмінними рисами цих палив є низькомолекулярний вуглеводневий склад і знижені в порівнянні з дизельним паливом щільність і в'язкість. Слід зазначити і наявність в їх складі значної кількості кисню (близько 50 % по масі - в молекулі метанолу і близько 30 % - в молекулі ДМЕ) (див. табл. 13.2). Ці особливості фізико-хімічних властивостей і зумовлюють відмінності показників токсичності ВГ дизелів, що працюють на цих нетрадиційних паливах.

Значний вміст кисню в молекулах цих палив призводить до відповідного зниження стехиометрического кількості повітря, необхідного для згоряння одного кг палива. Так, цей показник становить, кг повітря на кг палива: метанол - 6,4; ДМЕ - 9,0; дизельне паливо - 14,3. Це призводить до зростання коефіцієнта надлишку повітря і зменшення температур згоряння. В результаті викиди з ВГ оксидів азоту знижуються приблизно в 3 рази в порівнянні з роботою на дизельному паливі.

Біопалива та газоподібні палива не містять або містять незначну кількість сполук сірки. Тому суттєво скорочуються або взагалі виключаються оксиди сірки в ВГ.

Альтернативні палива найбільш помітно впливають на екологічні показники двигунів з іскровим займанням. Це пояснюється наступними причинами.

Перше, спирти і газоподібні палива мають більш високе октанове число, ніж бензин. Так, у метану цей показник досягає 110, у пропан-бутану - 100, у метанолу - 136, а у етанолу - 129. Це дозволяє підвищувати ступінь стиснення двигуна, що призводить до збільшення його ККД і зниження питомої витрати палива

Так використання газохолу (суміш 10 % етанолу і 90 % бензину) підвищує ККД двигуна на 2...4 %. Це призводить до поліпшення екологічних характеристик двигуна.

Таблиця 13. 2

Фізико-хімічні властивості палива

Фізико-хімічні властивості	Паливо			
	Дизельне паливо	метан	пропан	метанол
Щільність при 20°С, кг/м^3	830	416	490	795
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	42,5	50,3	46,5	20,1
Цетанове число	45	3	16	3
Температура самовоспламенення, °С	250	540	487	464
Вміст, % по масі:				
С	87	76,0	81,8	37,5
Н	12,6	24,0	18,2	12,5
О	0,4	0	0	50,0
S	0,2	0	0,015	0
Густина при 20°С, кг/м^3	794	668	916	877
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	27,72	28,9	37,3	37,8
Цетанове число	8	55-60	36	48
Температура самозаймання, °С	-	235	318	230
Вміст, % по масі:				
С	52,2	52,2	77,0	77,5
Н	10,9	13,0	12,0	12,0
О	36,9	34,8	11,0	10,5
S	0	0	0,002	0,002

Друге, заміна бензину альтернативними паливами призводить до зниження або навіть повного виключення застосування антидетонаторів, які є, як правило, отруйними рідинами.

Суворого математичного рішення завдання визначення сумарної токсичності ВГ при використанні різних палив немає.

Але розроблено кілька інженерних методів вирішення цього завдання.

Для порівняльної оцінки токсичної значущості різних компонентів ВГ автотракторних двигунів використовується коефіцієнт їх агресивності Аі. Він враховує не тільки відносини гранично допустимих концентрацій (ГДК), а й імовірність накопичення в атмосфері шкідливих речовин, їх вторинних хімічних перетворень, осідання твердих частинок на поверхню землі, вплив токсичних компонентів ВГ на сільськогосподарські рослини і тварин.

Значення відносного коефіцієнта агресивності компонентів палив Аі:

1. чадний газ CO – 1;
2. оксид азоту NO_x – 41.1;
3. углеводороди CH_x – 3,16;
4. твердих частинок (сажі С) бензину – 300;
5. твердих частинок (сажі С) дизельного палива – 200;
6. окис сірки SO_2 – 22.

При оцінці загальної токсичності двигуна ах з використанням *коефіцієнта* агресивності A_i дане масове випромінювання кожного токсичного компонента о розраховується як добуток питомої масової емісії компонента e_i і його коефіцієнта агресивності A_i, а потім підбиваючи підсумки отриманих знижених викидів, визначають загальну токсичність о у вигляді

$$m = \sum_{i=1}^{k} (e_i \cdot A_i), \qquad (330)$$

де k – кількість токсичних компонентів в ВГ.

Проведена порівняльна оцінка умовної агресивності різних традиційних і нетрадиційних палив. Відносний коефіцієнт умовної агресивності деяких видів традиційних та альтернативних палив становить:

1. бензин – від 3 до 17,5;
2. дизельне паливо – 2,1;

3. природного газу – 0,15;
4. пропан-бутан – 0,45;
5. метанол – 5,9;
6. етанол – 0,1.

Таблиця 13. 3.

Викиди токсичних компонентів ВГ дизелів, що працюють на різних паливах

Тип палива або компонента	**Викиди з продуктами горіння, г/(кВт·год)**		
	дизельне паливо	**бензин**	**природний газ**
оксид азоту NO_x	19,2	13,2	10,6
чадний газ CO	10,6	232	70
вуглеводи CH_x	4,95	18,9	13,2
тверді частинки (сажа C)	3,6	0,94	0,31
оксиди сірки SO_2	2,6	0,94	0,7
Сумарна агресивність *m*, г/(кВт·ч)	969,7	1136,7	656,4
Показник $(A_m \cdot m)/(A_m \cdot m)_{дт}$	1,0	1,02	0,03
оксид азоту NO_x	13,2	3,3	6,6
чадний газ CO	230	70	95
вуглеводи CH_x	16,1	13,2	15,0
тверді частинки (сажа C)	0,91	0,15	0,2
оксиди сіркиSO_2	0,45	0	0
Сумарна агресивність *m*, г/(кВт·ч)	1106,3	147,3	413,7
Показник $(A_m \cdot m)/(A_m \cdot m)_{дт}$	0,15	0,26	0,01

Викладені вище дані дозволяють оцінити санітарно-гігієнічні показники самих палив і сумарну агресивність продуктів їх згоряння. Пропонується інтегральні токсикологічні властивості розглянутих палив оцінювати у вигляді твору умовної агресивності самого палива Ат на сумарну агресивність продуктів його згоряння m, віднесеного до величини (Ат·m) дт, отриманої для дизельного палива. Значення цього показника

токсикологічних властивостей палив наведені в табл. 13.3. За цими даними слід зазначити високі екологічні якості природного газу та етанолу при їх використанні в якості палив для дизелів. Хороші екологічні властивості мають і інші нетрадиційні палива - пропан-бутанові суміші і метанол.

Так застосування природного газу дозволяє знизити сумарну агресивність палива і його продуктів згоряння на 97%. Пропан-бутанової суміш менш ефективна і дає поліпшення екологічних показників за все на 9%. Спирти мають хороші показники, але їх ефективне застосування можливе лише в двигунах з іскровим займанням.

13.4. Вартість енергії палива

Щоб прийняти рішення про використання того чи іншого виду палива, необхідно мати інформацію не тільки про їх фізико-хімічні властивості, але і про економічні характеристики. Одним з них є ціна паливної енергії. Ми оцінимо ефективність різних марок палива за умови, що ефективні значення ефективності двигунів рівні. визначається наступним чином

$$ЦЕ = \frac{Цт}{DE} = \frac{Цт}{Q \cdot \rho}, \text{ у.о./ГДж}, \qquad (331)$$

де *Цт* - ціна палива, у.о./м^3;

Q - нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

ρ - густина палива, т/м^3.

У знаменнику цього рівняння знаходиться питома щільність енергії. У разі змішаних видів палива ціна на енергію визначається наступним чином:

$$BE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Цт_i \cdot g_i)}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i \cdot \rho_i \cdot g_i)}, \text{ у.о./ГДж}, \qquad (332)$$

де *Цті* - ціна *і-го* компонента палива, у.о./м^3;

Qi - нижча теплота згоряння *і-го* компонента палива, МДж/кг;
ρ_i - щільність і-го компонента палива, т/м^3;
n - кількість компонентів;
g_i - часть і-го компонента палива.

ККД двигуна внутрішнього згоряння залежить від ряду факторів, у тому числі і від виду застосовуваного палива. Так, ефективний ККД дизельного двигуна Д-245.12С на режимі максимального крутного моменту при роботі на дизельному паливі складає 37,5 %, а на суміші, що складається з 40 % ріпакової олії і 60 % дизельного палива - 37,2 %.

Дослідження проведені для двигунів з іскровим займанням марки ЗМЗ 405.2 показали наступне. Найвищий ефективний ККД спостерігається при роботі двигуна на бензині і пропане - 33,7%. При роботі двигуна на метані ефективний ККД знижується до 31 %. А при роботі на біогазі максимальне значення ефективного ККД не перевищує 29 %.

Тому доцільно визначати вартість одиниці енергії, яка буде використана для здійснення корисної роботи

$$CE = \frac{BE}{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Цm_i \cdot g_i)}{\eta \cdot \sum_{i=1}^{n}(Q_i \cdot \rho_i \cdot g_i)}, \text{ у.о./ГДж,} \qquad (333)$$

де η - ефективний ККД двигуна на конкретному виді палива.
Дану математичну залежність можна використовувати для порівняння різних видів палива. Кращим буде той вид, у якого менше вартість енергії.

При енергетичному аналізі аграрного формування необхідно знати не тільки вартість енергії кожного окремого виду палива, але і одиниці енергії умовного палива, яке було використане. Для цього пропонується залежність такого виду:

$$ВУП = \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i \cdot Ц_i) + Це \cdot W}{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i \cdot m_i) + 0{,}1229 \cdot W}, \text{ у.о./кг у.т.,} \quad (334)$$

де *Ці* - ціна *і-о* типу палива, у.о./кг;

Це - ціна електричної енергії, у.о./(кВт·год);

$\varepsilon_и$ – тепловий паливний еквівалент *і-о* типу палива;.

m_i - річна витрата палива *і-о* типу, кг;

W - річне споживання електричної енергії, кВт·год;

n - кількість видів палива.

13.5. Доцільність виробництва палив рослинного походження для АПК

На цьому методологічному підході ґрунтуються наступні продукти. Виробництво біопалива буде економічно доцільним у тому випадку, коли обсяг його виробництва на одиницю площі ($V_б$) за енергетичну вартість перевищить той же показник для нафтового палива, який можна придбати в умовах продажу врожаю на одиницю площі ($V_Н$). Математичний запис цієї умови виглядає наступним чином:

$$K = \frac{V_б}{V_Н} \cdot \frac{Q_б}{Q_Н} \cdot \frac{\rho_б}{\rho_Н}, \quad (335)$$

де $Q_б, Q_Н$ - нижча теплота згоряння біопалива і нафтового палива, МДж/кг;

$\rho_б, \rho_Н$ - щільність відповідно біопалива і нафтового палива, т/м^3.

Обсяг рідкого біопалива, яке можна отримати з одного гектара площі, прямо пропорційний врожайності і виходу біопалива на одиницю енергетичної сировини.

$$V_б = \varphi \cdot U, \quad (336)$$

де φ - вихід біопалива з біосипірмних агрегатів;

U - врожайність енергетичного біосировини (сільськогосподарської культури), т/га.

В умовах реалізації сільськогосподарських культур можна придбати нафтове паливо в обсязі, прямо пропорційному вартості врожаю з гектара і обернено пропорційному ціні нафтопродуктів.

$$V_H = \frac{U \cdot Ц_Б}{Ц_H}, \qquad (337)$$

де $Ц_Б$ - ринкова ціна рослинної сировини, у.о./т;

$Ц_H$ - ціна на нафтове паливо, грн/м^3.

Підставляючи вирази (337) і (336) у формулі (335) отримуємо наступне рівняння для визначення критерію ефективності

$$K = \varphi \cdot \frac{Ц_H \cdot Q_б \cdot \rho_б}{Ц_Б \cdot Q_H \cdot \rho_H}. \qquad (338)$$

Результати розрахунків цього критерію виробництва біодизеля в Україні наведені на рис. 80. Як видно, виробництво цього палива без економічних стимулів недоцільно. Існують лише поодинокі періоди часу, коли виробництво біодизеля є економічно доцільним, як це відбувається у другій половині 2014 року.

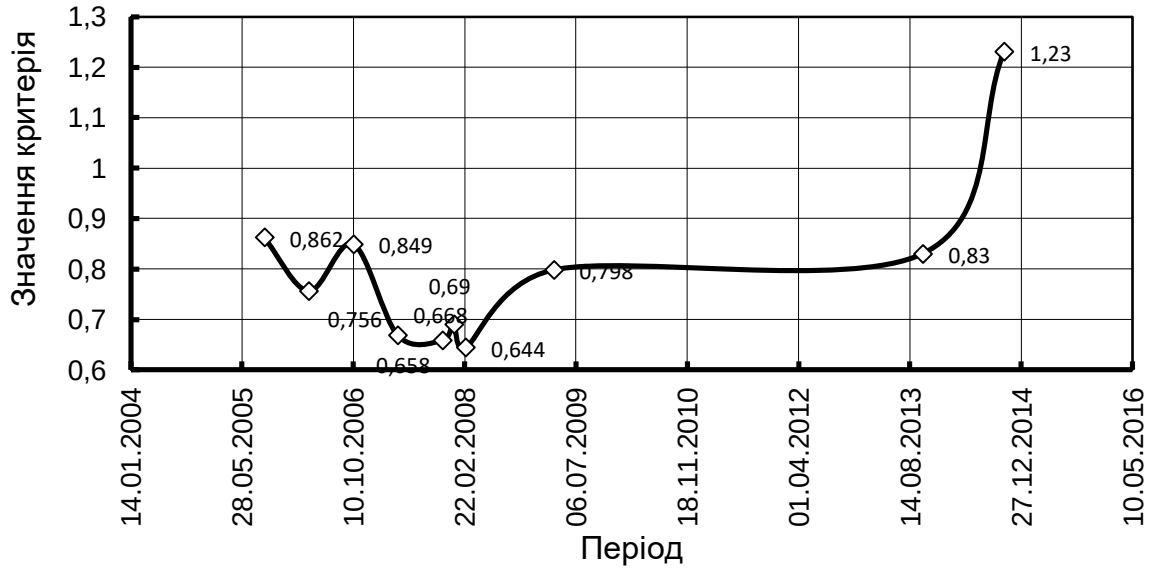

Рисунок 80. Динаміка значення критерію К для біодизеля в Україні

Що стосується виробництва етилового спирту, слід зазначити наступне. По-перше, ефективність виробництва залежить від сировини; По-друге, з типу бензину, який замінюється, значення критерію ефективності виробництва біоетанолу з цукрових буряків, пшениці та кукурудзи на заміну бензинів А-80 і А-95 наведено в таблиці 13.4.

Таблиця 13. 4

Коефіцієнти ефективності виробництва біопалив

Біосировина	**Марка бензину**	
	А-80	**А-95**
Кукурудза	1,295	1,443
Цукрові буряки	1,170	1,303
Пшениця	1,052	1,172

Наведений вище методичний підхід має і деякі вади. Так, він не враховує реалізацію супутніх продуктів виробництва. Щодо дизельного біопалива, то це шрот і гліцеринова маса, щодо етанолу - вуглекислий газ і сухий корм. Реалізація даних продуктів дозволяє отримати кошти для придбання нафтового палива. Це можна поліпшити значення критерію доцільності виробництва біопалив.

Застосовуючи даний підхід наведений обсяг виробництва біопалива буде визначатися таким чином

$$V_б = \varphi \cdot U + U \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i \cdot Ц_i)}{Ц_Н} \cdot \frac{Q_Н \cdot \rho_Н}{Q_б \cdot \rho_б}, \qquad (339)$$

де n - кількість супутніх товарів;

m_i - вихід супутнього продукту і-го виду з 1 т сировини;

$Ц_i$ - ринкова ціна супутнього продукту і-го виду, у.о./т.

Так отримаємо вираз для визначення критерію ефективності

$$K = \varphi \cdot \frac{Ц_Н \cdot Q_б \cdot \rho_б}{Ц_б \cdot Q_Н \cdot \rho_Н} + \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i \cdot Ц_i)}{Ц_б} \quad . \qquad (340)$$

Ця методика дає більш високі значення коефіцієнта ефективності виробництва біопалива.

З рівнянь (339) і (340) видно, що економічна доцільність виробництва біопалив, головним чином залежить від співвідношення цін на нафтове пальне і біосировину для виробництва біопалив. Тому ціна енергетичного рослинної сировини не повинна перевищувати значення

$$Ц_б < \varphi \cdot Ц_Н \cdot \frac{Q_б \cdot \rho_б}{Q_Н \cdot \rho_Н}. \qquad (341)$$

З урахуванням побічних продуктів виробництва, вартість біоенергетичного рослинної сировини повинна задовольняти нерівності

$$Ц_б < \varphi \cdot \frac{Ц_Н \cdot Q_б \cdot \rho_б}{Q_Н \cdot \rho_Н} + \sum_{i=1}^{n}(m_i \cdot Ц_i). \qquad (342)$$

13.6. Оцінка ефективності використання альтернативних моторних палив

Для визначення ефективності використання альтернативних видів палив з урахуванням комплексу показників, які враховують зміну коефіцієнта корисної дії двигуна внутрішнього згоряння, ваги мобільного енергетичного засобу, тягового зусилля трактора і т.д., пропонується використовувати безрозмірні критерії.

Нехай необхідно визначити ефективність застосування альтернативного палива вантажним автомобілем. Вартість традиційного палива, яке використовується для перевезення однієї тони вантажу на 100 км, становить

$$Cm = \frac{V_m \cdot Цm}{G_m}, \text{ у.о./(т·100 км)}, \qquad (343)$$

де G_m - вантажопідйомність транспортного засобу при використанні традиційного нафтового палива, т;

V_m - об'ємне споживання традиційного нафтового палива, л/(100 км);

$Ц_m$ - ціна традиційного нафтового палива, у.о./л.

При використанні альтернативного моторного палива його вартість для перевезення однієї тони вантажу на 100 км становить

$$Ca = \frac{\sum_{i=1}^{n}(g_i \cdot V_i \cdot Ц_i)}{G_a}, \text{ у.о./(т·100 км)}, \qquad (344)$$

де G_a - вантажопідйомність автомобіля при використанні альтернативного моторного палива, т;

V_i - об'ємна витрата *і-го* компонента альтернативного моторного палива, л/(100 км);

$Ц_i$ - ціна і-го компонента альтернативного моторного палива, у.о./л;

g_i – об'ємна *частина і-го* компонента альтернативного моторного палива;

n – кількість компонентів альтернативного палива.

Вантажопідйомності автомобіля може змінитися внаслідок ряду причин. Перше, збільшення маси конструкції автомобіля в результаті розміщення на його борту важкого устаткування, наприклад, балонів, додаткових баків, газогенераторної установки і т.д. Друге, внаслідок зменшення питомої щільності енергії палива, зростає його маса на борту автомобіля для збереження його пробігу.

Значення критерію ефективності являє собою відношення вартості альтернативного і традиційного палива, які були використані для перевезення однієї тони вантажу на 100 км

$$K_A = \frac{\sum_{i=1}^{n}(g_i \cdot V_i \cdot ЦПо_i) \cdot G_T}{Цm \cdot V_m \cdot G_A}. \qquad (345)$$

Якщо значення критерію менше одного ($К_A < 1$),то доцільним є використання альтернативного палива.

Для сільськогосподарських тракторів пропонується інший підхід. Необхідно визначити вартість погодинної витрати палива на кН тягової сили. Для традиційного нафтового палива

$$C_{mm} = \frac{be_m \cdot Ne_m}{\rho_m \cdot P_{крт}} \cdot Ц_m, \text{ у.о./кН}, \qquad (346)$$

де Ne_m - номінальна потужність двигуна при використанні традиційного нафтового палива, кВт;

$P_{крт}$ - тягове зусилля при використанні традиційного нафтового палива, кН;

be_m - питома витрата палива традиційного нафтового палива, кг/(кВт·год);

$\rho_т$ - щільність традиційного нафтового палива, кг/л.

При роботі на альтернативному паливі отримуємо

$$C_{ma} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{be_i \cdot Ц_i}{\rho_i}\right) \cdot Ne_a}{P_{кра}}, \text{ у.о./кН}, \qquad (347)$$

де Ne_a - номінальна потужність двигуна при використанні альтернативного моторного палива, кВт;

$P_{кра}$ - тягнучої сили при використанні альтернативного моторного палива, кН;

be_i - питома витрата *і-го* компонента альтернативного моторного палива, кг/(кВт·год);

ρ_i - щільність і-го компонента альтернативного моторного палива, кг/л.

Тягове зусилля трактора при роботі двигуна на альтернативному моторному паливі може знизитися в результаті наступних причин:

• збільшення експлуатаційного ваги трактора;

• зниження потужності двигуна.

Перший варіант можливий, наприклад, при застосуванні ГБО. Другий - у разі застосування палива з меншим значенням

питомої щільності енергії. Це можливо, наприклад, при застосуванні генераторного газу.

Значення критерію ефективності являє собою відношення годинної вартості альтернативного і традиційного палива на один кН тягового зусилля

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{be_i}{\rho_i}\cdot Ц_i\right)\cdot Ne_A \cdot P_{крт}}{\frac{be_m \cdot Ne_m}{\rho_m}\cdot Ц_m \cdot P_{кра}}. \qquad (348)$$

Якщо значення $К_т$ <1, то використання альтернативного палива доцільно. Таким чином, можна запропонувати наступний алгоритм прийняття рішення з економічної доцільності застосування альтернативних палив мобільними енергетичними засобами (рис. 81).

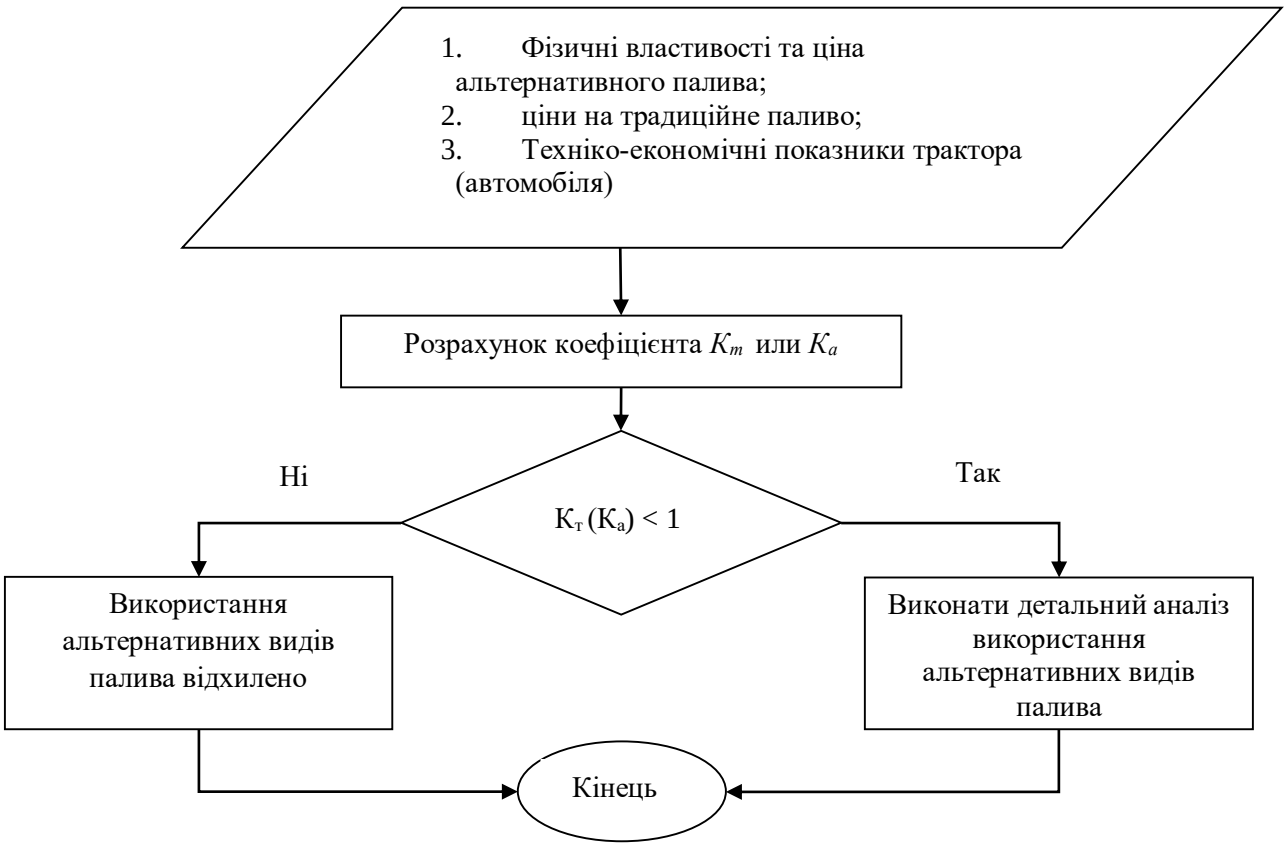

Рисунок 81. Алгоритм прийняття рішень

Перше, збір вихідної інформації, а саме: ціна традиційного палива; фізичні властивості і ціна альтернативного палива; техніко-економічні показники тракторів і автомобілів на цих видах палива.

Друге, визначення критерію ефективності Кт або КА.

Третє, порівняння отриманого критерію з одиницею. Якщо він більше або дорівнює одиниці, то проект відхиляється. Якщо він менше одиниці, то це є підставою для більш глибокого і всебічного аналізу ефективності застосування альтернативного палива.

Результати розрахунків для деяких видів техніки в разі застосування стисненого природного газу наведені на рис. 82.

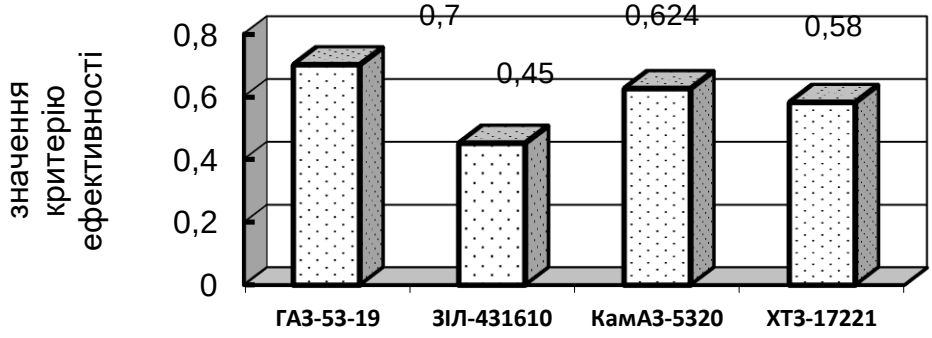

Рисунок 82. Критерії ефективності використання стисненого природного газу

Як видно, застосування стисненого природного газу дозволяє істотно знизити витрати на моторне паливо. У дизельної техніки цей показник менше. Це пояснюється тим, що в якості запальний дози необхідно використовувати більш дороге дизельне паливо.

Контрольні питання

1. Визначте щільність енергії палива на одиницю об'єму (ГДж /м^3) якщо його нижча теплота згоряння - 40 МДж кг, а щільність 0,9 кг/л.

2. Від чого залежить енергетична віддача інвестицій?

3. Яке значення відносного коефіцієнта агресивності монооксиду вуглецю CO?

4. Визначити вартість енергії палива (у.о./ГДж) якщо ціна палива - 1020 у.о./м^3, нижча теплота згоряння - 42,5 МДж/кг, щільність - 0,8 т/м^3:

5. Вкажіть фактори, які впливають на доцільність виробництва біопалива.

6. Вкажіть фактори, які впливають на критерій ефективності застосування альтернативних палив вантажними автомобілями.

Тема 14. Визначення основних економічних показників інвестиційного проекту

14.1. Основні економічні показники інвестиційного проекту

Реалізації інвестиційного проекту передує розробка бізнес-плану. Він містить основну інформацію, яка потрібна для обґрунтування проекту з економічної точки зору. До основних економічних показників відносять наступні:

- Net Present Value (NPV) – чистий приведений дохід;
- Profitability Index (PI) – індекс прибутковості;
- Internal Rate of Return (IRR) – внутрішня норма доходності;
- Payback Period (PP) – строк окупності інвестицій.

Їх визначають на основі аналізу грошового потоку протягом терміну дії інвестиційного проекту.

14.2. Грошовий потік

Ефективність використання нового засобу виробництва оцінюється за допомогою системи показників, враховуючи при цьому грошовий потік, який обумовлений експлуатацією даного засобу виробництва. Крім того не слід забувати, що будь-яке вкладення коштів у нову техніку представляє собою інвестування в реальні активи. З цієї причини ефективність таких вкладень повинна оцінюватись з використанням показників, які застосовуються при визначенні доцільності інвестування в реальні активи. До них відносяться, так звані, критеріальні показники, що використовуються в міжнародній практиці оцінки ефективності реальних інвестицій: чиста теперішня вартість, індекс

рентабельності, внутрішня норма рентабельності, термін окупності.

Грошовий потік, що генерує експлуатація того чи іншого засобу виробництва, в традиційному розумінні представляє собою дисконтовану суму чистого доходу та амортизаційних відрахувань за досліджуваний період

$$CF = \frac{CF_1}{(1+K_д)^1} + \frac{CF_2}{(1+K_д)^2} + ... + \frac{CF_n}{(1+K_д)^n}, \quad (349)$$

де CF - дисконтований грошовий потік за період експлуатації придбаного нового засобу виробництва, грн;

n - строк служби придбаного засобу виробництва, років.

Дисконт - знижка в ціні товарів, зумовлена часовим фактором.

В свою чергу грошовий потік розраховується за формулою

$$CF_t = (B_t - C_t) + A_t, \quad (350)$$

де CF_t - грошовий потік t-го року, грн.;

B_t - вигоди від експлуатації придбаного засобу виробництва (всі види надходжень) t-го року, грн;

C_t - витрати, що зумовлені експлуатацією нового засобу виробництва t-го року, грн;

A_t - амортизаційні відрахування t-го року по придбаному засобу виробництва, грн.

14.3. Регулярний грошовий потік

Значення сучасних величин доходів і інвестицій розраховують за допомогою дисконтного множника: v_i

$$v_i = 1 + g, \quad (351)$$

де g - ставка порівняння (норматив рентабельності, процентна ставка дисконтування).

Якщо величина грошових потоків по роках однакова, то дійсну вартість грошових потоків по інвестиційному проекті можна розрахувати по формулі

(352)

$$CF_н = \sum_{j=1}^{n} CF_j \cdot (1+g)^{-j},$$

де n - тривалість дії інвестиційного проекту, рік;

CF_j - величина річної майбутньої вартості.

Якщо значення CF_j постійні по роках, то

$$CF_н = CF_j \cdot \sum_{j=1}^{n} (1+i)^{-j}. \quad (353)$$

Визначимо суму дисконтних множників. Її можна розглянути як геометричну прогресію

$$\sum_{j=1}^{n} (1+g)^{-j} = (1+g)^{-1} + (1+g)^{-2} + ... + (1+g)^{-n}. \quad (354)$$

У геометричній прогресії n-й член дорівнює

$$U_n = a \cdot q^{n-1}, \quad (355)$$

де a - перший член прогресії;

q - знаменник прогресії.

У нашому випадку

$$a = \frac{1}{1+g},$$

$$q = \frac{1}{1+g}.$$

та сума перших членів

$$S = \frac{a \cdot \left[q^n - 1\right]}{q-1} = -\frac{[1+g]^{-n} - 1}{g}. \quad (356)$$

тоді

$$CF_н = CF_0 \cdot S = -CF_0 \cdot \frac{[1+g]^{-n} - 1}{g}. \quad (357)$$

Приклад 2. Розрахувати дійсну вартість інвестиційному проекту. Ставка дисконтування *i* =10%. Вихідні дані приведені в табл. 14.1.

Таблиця 14. 1.

Розрахунок дійсної вартості чистого грошового потоку по інвестиційному проекті

Рік	**Майбутня вартість, тис. грн.**	**Дисконтний множник**	**Теперішня вартість, тис. грн.**
1	100	0,909	90,9
2	100	0,826	82,6
3	100	0,751	75,1
Разом	**300**	**2,486**	**248,6**

Аналогічний результат можна одержати, застосувавши формулу (358).

$$CF_н = CF0_j \cdot S = -CF_0 \cdot \frac{[1+g]^{-n} - 1}{g} = -100{,}00 \cdot \frac{[1+0{,}1]^{-3} - 1}{0{,}1} = 248{,}6\ (тис.грн.) \quad (358)$$

14.4. Ставка дисконтування

Ставка дисконтування – це відсоткова ставка, яка використовується для перерахунку майбутніх потоків доходів в єдину величину поточної вартості. Вона використовується для оцінки ефективності інвестицій. З економічної точки зору, **ставка дисконтування** – це норма прибутковості на вкладений капітал, що вимагається інвестором. Тому від значення ставки дисконтування залежить прийняття ключових рішень.

Як показує практика, найчастіше в процесі оцінки бізнесу при визначенні ставки дисконтування застосовується метод кумулятивного побудови, який найкращим чином враховує всі

види ризиків інвестиційних вкладень, пов'язані як з факторами загального для галузі (виду економічної діяльності) і економіки в цілому характеру, так і зі специфікою оцінюваного підприємства. Даний метод можна застосовувати у випадках, коли фондовий ринок недостатньо розвинений або акції компанії не виставляються на ринку, а підприємство-аналог знайти складно (що характерно для сучасного етапу розвитку України). Метод заснований на експертній оцінці ризиків, пов'язаних з вкладенням коштів в оцінюваний бізнес.

Модель кумулятивного побудови ставки дисконтування дозволяє врахувати специфіку діяльності конкретного підприємства, оцінюючи тільки ті ризики, які насправді значимі для даного підприємства. До достоїнств кумулятивного методу слід віднести ідентифікацію та облік широкого спектра факторів, що впливають на ризик інвестування. Недоліком є суб'єктивність оцінки, що підвищує вимоги до кваліфікації інвестиційного експерта-аналітика.

Згідно зазначеного методу, ставка дисконтування розраховується шляхом додавання до безризикової ставки доходу премії за різні види ризику, пов'язані зі специфікою конкретного інвестування в дане підприємство. Загальна посилка така: чим більше ризик, тим вище очікувана ставка віддачі на вкладений капітал (премія за ризик). При цьому премія за кожен вид ризику визначається в інтервалі від 0 до 5 % (табл. 14.2).

Згідно досліджень вітчизняних вчених як безризикову найбільш доцільно використовувати ставку по короткотермінових депозитних вкладах, деномінованих у ВКВ [16].

Таблиця 14. 2

Види ризиків та премії за ризики

Вид ризику	Премія за ризик, %
Розмір компанії	0-3
Фінансова структура	0-5
Виробнича і територіальна диверсифікація	0-3
Диверсифікація клієнтури	0-4
Рентабельність підприємства та прогнозованість його доходів	0-4
Якість управління	0-5
Інші власні ризики	0-5

Після визначення безризикової ставки дисконтування можна розрахувати ставку дисконтування з урахуванням інвестиційних ризиків (g):

$$g = R_F + \sum_{l=1}^{k} Rp_l \,, \qquad (359)$$

де R_F - безризикова ставка доходу;

Rp_l – премія за l-й вид ризику.

14.5. Чистий приведений дохід (чиста теперішня вартість (NPV)

Чиста теперішня вартість *(NPV)* є абсолютним показником, за яким визначають доцільність вкладення коштів у той чи інший засіб виробництва. Він показує на скільки надходження від експлуатації того чи іншого знаряддя праці перевищують витрати на його придбання та експлуатацію. Розраховується чиста теперішня вартість за формулою

$$NPV = \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \ldots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} - I = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I, \qquad (360)$$

де I - вартість придбання, транспортування та монтажу придбаного засобу виробництва, грн;

i - ставка відсотку (дисконту).

Вартість придбання, транспортування та монтажу придбаного засобу виробництва становить

$$I = Ц_д + ТВ + МВ. \quad (361)$$

В тому випадку, якщо *NPV* має від'ємне значення, то вкладати кошти в придбання даного виду нової техніки недоцільно, оскільки таке вкладення буде збитковим. При додатних значеннях *NPV*, при необхідності вибору одного із кількох альтернативних варіантів придбання, перевагу слід надати тому варіанту, при якому *NPV* має найбільше значення.

Чистий приведений дохід дозволяє отримати найбільш узагальнену характеристику результату інвестування, тобто його кінцевий ефект в абсолютній сумі. Під чистим приведеним доходом розуміється різниця між приведеними до нбастоящей вартості сумою чистого грошового потоку за період експлуатації інвестиційного проекту і сумою інвестиційних витрат на його реалізацію. Розрахунок цього показника здійснюється по формулі:

$$ЧПД = ЧДП - ИЗ,$$

де *ЧПД* – сума чистого приведеного доходу за інвестиційним проектом;

ЧДП – сума чистого грошового потоку за весь період експлуатації інвестиційного проекту (якщо повний період експлуатації проекту визначити складно, його приймають в розрахунках у розмірі 5 років);

ИЗ – сума інвестиційних витрат на реалізацію інвестиційного проекту.

Приклад: *Підприємство має в своєму розпорядженні два альтернативні варіанти інвестиційних проектів – проект «А» і проектом «Б». Для оцінки ефективності цих проектів необхідно визначити очікувану суму чистого приведеного доходу ним. Дані, що характеризують ці проекти, приведені в табл. 14.3.*

Таблиця 14. 3

Дані інвестиційних проектів, необхідні для розрахунку показника чистого приведеного доходу

Показники	Інвестиційні проекти	
	«А»	«Б»
1.Обьем інвестиційних засобів, долл. США	7000	6700
2.Період експлуатації інвестиційного проекту, років	2	4
3.Сума чистого грошового потоку всього, дол. США, в.т.ч.	10000	11000
1-й рік	6000	2000
2-й рік	4000	3000
3-й рік	-	3000
4-й рік	-	3000

Для дисконтування сум грошового потоку проекту «А» ставу відсотка прийнята у розмірі 10 %, а проекту «Б» - 12% (у зв'язку з тривалішим терміном його реалізації). Результати дисконтування грошового потоку приведені в табл. 2.

З урахуванням розрахованої справжньої вартості чистих грошових потоків визначимо чистий приведений дохід. За першим інвестиційним проектом він складе: 8758 – 7000=1758 дол. США. За інвестиційним проектом він складе: 8221-6700=1521 дол. США.

Таким чином порівняння показників чистого приведеного доходу за даними інвестиційними проектами показує, що проект "А" є ефективнішим, ніж проект "Б"(хоча за проектом "А " сума коштів, що інвестуються, більша, а їх віддача у вигляді майбутнього грошового потоку менша, ніж за проектом "Б").

Таблиця 14. 4.

Розрахунок дійсної вартості чистих грошових потоків по інвестиційних проектах

Роки	Інвестиційні проекти					
	А			Б		
	Майбутня вартість	Дисконтний множник	Сучасна вартість	Майбутня вартість	Дисконтний множник	Сучасна вартість
1-й рік	6000	0,909	5454	2000	0,893	1780
2-й рік	4000	0,826	3304	3000	0,797	2391
3-й рік	-	-	-	3000	0,712	2135
4-й рік	-	-	-	3000	0,636	1908
Разом	10000	-	8758	11000	-	8221

Характеризуючи показник «чистий приведений дохід» слід зазначити, що він може бути використаний не тільки для порівняльної оцінки ефективності реальних інвестиційних проектів, але і як критерій доцільності їх реалізації. Інвестиційний проект, по якому показник чистого приведеного доходу є негативним величиною або рівний нулю, повинен бути знехтуваний, оскільки він не принесе підприємству додатковий дохід на вкладений капітал. Інвестиційні проекти з позитивним значенням показника чистого приведеного доходу дозволяють збільшити капітал підприємства і його ринкову вартість.

14.6. Індекс прибутковості

При розрахунку ***індексу рентабельності (PI)*** оперують тими ж змінними величинами, що й при розрахунку *NPV,* але комбінують їх по іншому. Власне кажучи, метод розрахунку індексу рентабельності є продовженням методу чистої теперішньої

вартості. Це відносний показник, який характеризує рівень доходів на одиницю затрат, тобто ефективність вкладень (чим більше значення цього показника, тим вищий рівень віддачі від вкладених коштів). Індекс рентабельності *(PI)* розраховується за формулою

$$PI = \frac{\sum_t \frac{CF_t}{(1+g)^t}}{I}, \qquad (362)$$

Вкладення коштів у придбання нової техніки буде ефективним, якщо індекс рентабельності буде більшим одиниці *(PI >1*), а коли *PI < 1,* таке придбання збиткове.

Індекс (коефіцієнт) прибутковості (*PI*) також дозволяє співвіднести об'єм інвестиційних витрат із майбутнім чистим грошовим потоком по проекту. Розрахунок такого показника здійснюється по формулі

$$PI = \frac{ЧГП}{ІЗ}. \qquad (363)$$

Якщо відомі значення чистого приведеного доходу та інвестицій, то його можна визначити наступним чином.

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+g)^t} - I. \qquad (364)$$

Тоді дисконтована сума грошового потоку становить

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+g)^t} = NPV + I. \qquad (365)$$

Після підстановки в рівняння (14) отримаємо рівняння для визначення індексу прибутковості

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+g)^t}}{I} = \frac{NPV + I}{I} = 1 + \frac{NPV}{I}. \qquad (366)$$

Приклад 4. Використовуючи дані по розглянутим раніше двох інвестиційних проектах (див. приклад 1), визначити індекс прибутковості. По проекту "А" індекс прибутковості складе

$PI_A = USD8758/USD7000 = 1{,}25$.

По проекту "Б" індекс прибутковості складе:

$PI_Б$ = *USD*8221/ *USD*6700 = 1,23.

Порівняння інвестиційних, проектів по показнику "індекс прибутковості" показує, що проект "А" є більш ефективним.

Показник індекс прибутковості також може бути використаний не тільки для порівняльної оцінки, але й у якості критеріального при ухваленні інвестиційного рішення про можливості реалізації проекту. Якщо значення індексу прибутковості менше одиниці або дорівнює їй, інвестиційний проект повинний бути відкинутим (у зв'язку з тим, що він не принесе додатковий доход на величину інвестицій). Іншими словами, *для реалізації можуть бути прийняті реальні інвестиційні проекти тільки зі значенням показника індексу прибутковості вище 1,2.*

14.7. Внутрішня норма рентабельності

Сутність розрахунку ***внутрішньої норми рентабельності (IRR)*** при аналізі ефективності вкладень полягає в наступному: *IRR* показує очікувану дохідність інвестування, а, значить, і максимально допустимий рівень витрат, які можуть бути асоційовані з даним придбанням. Наприклад, якщо придбання нової техніки повністю фінансується за рахунок кредиту банку, то значення *IRR* показує верхню межу допустимого рівня банківської ставки відсотку, перевищення якої робить придбання збитковим.

Розрахунок *IRR* проводиться методом послідовних наближень величини *NPV* до нуля при різних ставках дисконту. На практиці визначення *IRR* проводиться за формулою

$$IRR = A + \frac{a \cdot (B - A)}{(a - b)}, \qquad (367)$$

де *A* - ставка дисконту, при якій *NPV* позитивна;

B - ставка дисконту, при якій *NPV* - від'ємна,

a - величина позитивної *NPV* при ставці дисконту *A;*

b - величина від'ємної *NPV* при ставці дисконту *B*.

Якщо значення *IRR* варіанту придбання нової техніки більше за існуючу ставку рефінансування банків і більше за *IRR* альтернативних пропозицій, то аналізований варіант придбання нової техніки є ефективним.

Найчастіше часто за кордоном при оцінці ефективності інвестицій, особливо великих, прибігають до внутрішньої норми прибутковості (internal rate of return, *IRR*). Якщо ця характеристика визначається на основі потоку надходжень, то її називають нормою прибутковості дисконтованого потоку. ***Під внутрішньою нормою прибутковості (ВНП) розуміють ту розрахункову ставку відсотків, при якій капіталізація регулярно одержуваного доходу дає суму, рівну інвестиціям, і, отже, капіталовкладення є операцією, що окупається***. Чим вище ця ставка (позначимо її як *IRR*), тим більше ефективність капіталовкладень. Величина *IRR* при несприятливих умовах може позначитися нульовою і, навіть, негативною. Якщо вкладення здійснюються за рахунок позичених коштів, причому кредит видається під ставку відсотків рівну g, то різниця $IRR - g$ показує ефект інвестиційної діяльності. При $IRR = g$ доход тільки окупає інвестиції (інвестиції безприбуткові), при $IRR < g$ інвестиції збиткові.

За кордоном розрахунок ВНД часто застосовують як перший крок кількісного аналізу капіталовкладень. Для подальшого аналізу відбирають ті інвестиційні проекти, ВНД яких оцінюється величиною не нижче 15…20%. Методика визначення *IRR*, як і інших показників ефективності, залежить від конкретних особливостей розподіл доходів інвестиції і самих інвестицій. У загальному випадку, коли інвестиції і віддача від них задаються у виді потоку платежів, *IRR* визначається на основі рішення рівняння

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{CF_i}{(1+IRR)^i} - I = 0. \qquad (368)$$

Зазначене рівняння розв'язується будь-яким ітераційним методом. Розглянемо використання двох способів: ітераційного та Ньютона. Перший метод використовується грошовий потік регулярний. Метод Ньютона – якщо грошовий потік не регулярний.

Ітераційний метод або метод послідовних наближень.

Суть методу полягає у заміні початкового рівняння

$$f(x) = 0 \tag{369}$$

еквівалентним йому рівнянням

$$x = \varphi(x). \tag{370}$$

Постановка задачі.

Нехай задано рівняння

$f(x) = 0$,

де *f(x)* – неперервна нелінійна функція. Потрібно визначити корінь ξ цього рівняння, який знаходиться на відрізку [*a*, *b*] з заданою похибкою ε.

Виберемо довільним способом $x_0 \in [a, b]$ і підставимо його у праву частину рівняння (369); тоді отримаємо $x_1 = \varphi(x_0)$. Потім це значення x_1 підставимо знову у праву частину рівняння (370) і отримаємо $x_2=\varphi(x_1)$ (рис. 83 а, б). Повторюючи цей процес, отримаємо послідовність чисел $x_n=\varphi(x_{n-1})$. При цьому можливі два випадки:

- Послідовність x_0, x_1, x_2, .., .., x_n, .. збігається, тобто має границю, і тоді ця границя буде коренем рівняння (370).
- Послідовність x_0, x_1, x_2, .., .., x_n, .. розбігається, тобто не має границі.

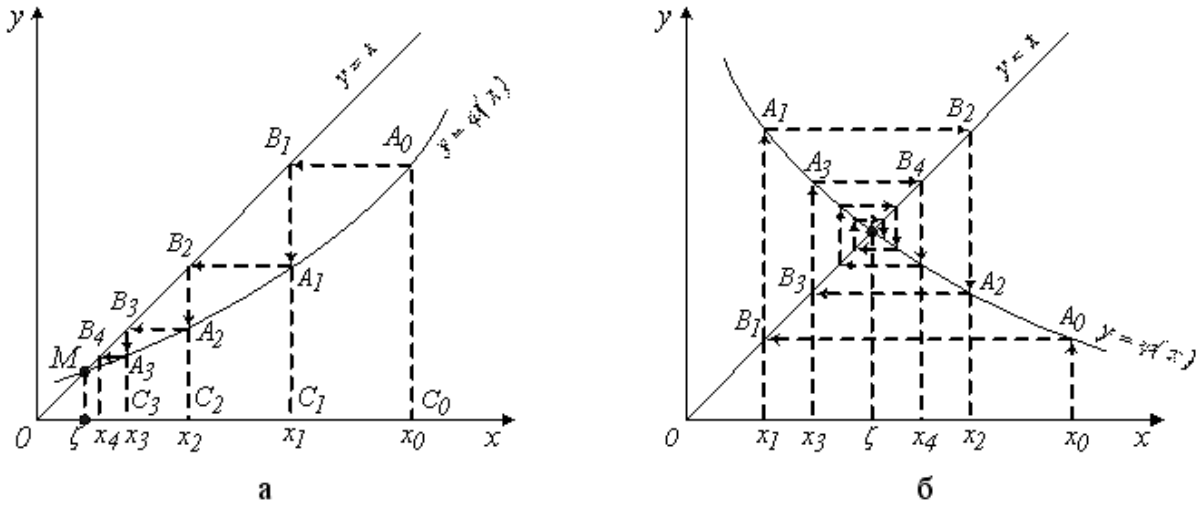

Рисунок 83. Геометрична інтерпретація методу ітерацій

Приклад 1. Очікується, що вкладення *UAH* 1,0 млн у поліпшення технології приведе до щорічної економії в сумі *UAH250* тис. протягом 10 років. Ефективність цього заходу у виді внутрішньої норми прибутковості знаходимо по співвідношенню (14), умовно прийнявши, що економія здійснюється до року. За умовою задачі *V/R* =1000 : 250 = 4, у такий спосіб $a_{10;ів}$ = 4. Відкіля знаходимо *ів* = 21,64 %. Допустимо, що дані інвестиції здійснюються за рахунок кредиту, за котрий банк бере 8 %, тоді реальна ефективність від інвестиції складе: 21,64 - 8 = 13,64 %.

Приклад визначення *IRR* числовим методом.

Внутрішня норма прибутковості *IRR* визначається з виразу

$$\frac{1-(1+IRR)^{-n1}}{IRR}=\frac{V}{R}. \qquad (371)$$

Корінь даного нелінійного рівняння визначається методом ітерацій. Загальний вид виразу для виконання ітераційного процесу

$$IRR_{k+1}=\frac{R}{V}\cdot\left[1-(1+IRR_k)^{-n1}\right], \qquad (371)$$

де *k* - номер ітерації.

Обчислення виконуються з точністю 3 %. За початкове наближення приймаємо

$$IRR_0 = \frac{R}{V} = \frac{220,0}{862,0} = 0,255. \qquad (371)$$

Перша ітерація

$$IRR_1 = \frac{220,0}{862,0} \cdot \left[1 - (1 + 0,255)^{-10}\right] = 0,229. \qquad (372)$$

Відносна похибка

$$\varepsilon = \frac{\left|IRR_{k+1} - IRR_k\right|}{IRR_{k+1}} \cdot 100\% = \frac{|0,229 - 0,255|}{0,229} \cdot 100\% = 11,4\% > 3\% \qquad (373)$$

Друга ітерація

$$IRR_2 = \frac{220,0}{862,0} \cdot \left[1 - (1 + 0,229)^{-10}\right] = 0,223. \qquad (374)$$

Відносна похибка таким чином *IRR* = 22,3 %.

Метод Ньютона або метод дотичних.

$$\varepsilon = \frac{\left|IRR_{k+1} - IRR_k\right|}{IRR_{k+1}} \cdot 100\% = \frac{|0,223 - 0,229|}{0,223} \cdot 100\% = 2,8\% < 3\% \qquad (375)$$

Метод послідовних наближень, розроблений Ньютоном, дуже широко використовується при побудові ітераційних алгоритмів. Його популярність обумовлена тим, що в методі Ньютона здійснюється екстраполяція за допомогою дотичної до кривої в одній точці.

Постановка задачі

Нехай корінь рівняння *f(x)=0* відокремлений на відрізку [*a*, *b*], на якому нелінійна функція *f(x)* монотонна і має різні знаки на

кінцях відрізку, причому похідні *f'(x)* та *f''(x)* неперервні та зберігають постійні знаки на всьому відрізку [*a*, *b*]. Потрібно знайти наближене значення кореня ξ з заданою похибкою ε.

Геометричний сенс метода Ньютона полягає в тому, що дуга кривої *y= f(x)* на відрізку [*a*, *b*] замінюється дотичною до цієї кривої, а наближене значення кореня визначається як точка перетину дотичної з віссю *Ox,* проведеної з одного з кінців досліджуваного відрізку. Рівняння дотичної має вигляд:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \tag{376}$$

Геометрична інтерпретація представлена на рис. 84.

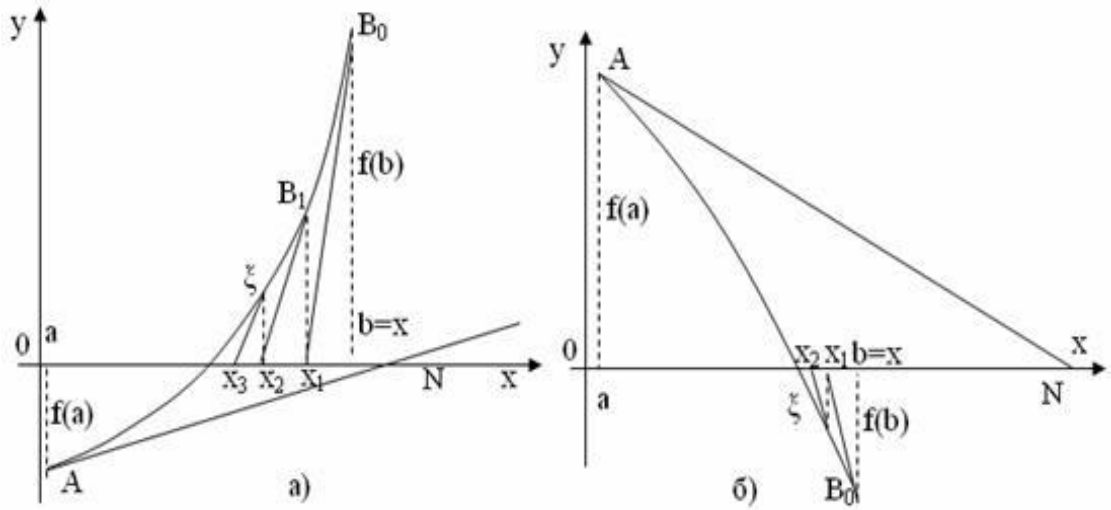

Рисунок 84. Геометрична інтерпретація методу Ньютона

Для визначення внутрішньої норми рентабельності введемо змінну *r* = 1 + *IRR*. Тоді рівняння для визначення шуканої величини приймає вид

$$\sum_{i=1}^{n}\left(CF_i \cdot r^{-i}\right) - I = 0 \tag{377}$$

Або

$$f(r) = \sum_{i=1}^{n}\left(CF_i \cdot r^{-i}\right) - I = 0 \tag{378}$$

Для використання методу Ньютона знайдемо похідну зазначеного рівняння

$$f'(r) = \frac{df(r)}{dr} = \sum_{i=1}^{n}\left((-i)\cdot CF_i \cdot r^{-i-1}\right) = \sum_{i=1}^{n}\left((-i)\cdot CF_i \cdot r^{-(i+1)}\right) \qquad (379)$$

Після визначення початкового наближення будь-яким методом, уточнюємо значення кореня за формулою

$$r_{j+1} = r_j - \frac{f(r_j)}{f'(r_j)} = r_j - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(CF_i \cdot r_j^{-i}\right) - I}{\sum_{i=1}^{n}\left((-i)\cdot CF_i \cdot r_j^{-(i+1)}\right)} \qquad (380)$$

Після визначення кореня рівняння визначаємо внутрішню норму доходності

$$IRR = r - 1 \qquad (381)$$

Приклад 2.

Визначити *IRR* за наступних вихідних даних:

- Величина інвестицій – I = 30 тис. у.о.;
- Річний економічний ефект – R = 10 тис. у.о.;
- Термін існування проекту – n – 5 років.

Порівняти результати, що отримуються двома методами: метод ітерацій та метод Ньютона.

Метод ітерацій.

Результати розрахунків занесемо в табл. 14.5.

Таблиця 14. 5

Метод ітерацій

i	IRR	Похибка, %
0	0,333	
1	0,254	31,114
2	0,226	12,523
3	0,213	6,095
4	0,206	3,188
5	0,203	1,725

Внутрішня норма доходності становить *IRR* = 0,203 = 20,3 %.

Метод Ньютона.

Функція, корінь якої потрібно визначити

$$f(r)=\sum_{i=1}^{n}\left(CF_i\cdot r^{-i}\right)-I=CF_1\cdot r^{-1}+CF_2\cdot r^{-2}+CF_3\cdot r^{-3}+CF_4\cdot r^{-4}+CF_5\cdot r^{-5}-I=0 \quad (382)$$

Або

$$f(r)=10\cdot r^{-1}+10\cdot r^{-2}+10\cdot r^{-3}+10\cdot r^{-4}+0\cdot r^{-5}-30=0. \quad (383)$$

Перша похідна

$$f'(r)=\sum_{i=1}^{n}\left((-i)\cdot CF_i\cdot r^{-(i+1)}\right)=-CF_1\cdot r^{-2}-2\cdot CF_2\cdot r^{-3}-3\cdot CF_3\cdot r^{-4}-$$
$$-4\cdot CF_4\cdot r^{-5}--5\cdot CF_5\cdot r^{-6} \quad (384)$$

Приймаємо початкове наближення (рис. 85).

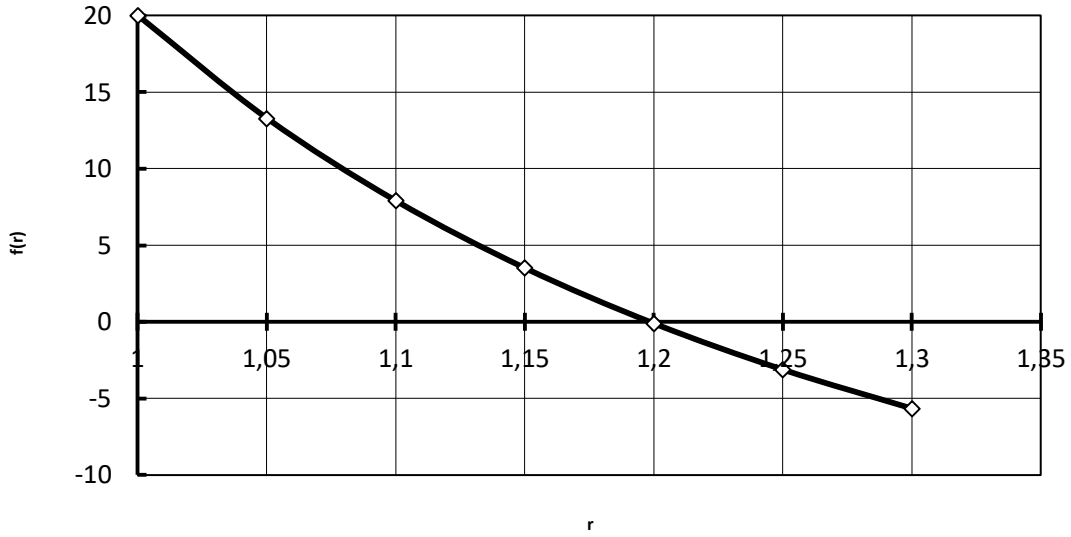

Рисунок 85. Виділення кореня рівняння

Результати розрахунків занесемо в табл.14.6.

Таблиця 14. 6

Метод Ньютона

i	r	*f(r)*	*f'(r)*	Похибка, %
0	1,25	-3,1072	-55,1424	
1	1,1937	0,3288	-67,3497	4,7207
2	1,1985	0,0029	-66,1586	0,4073
3	1,1986			0,0037

Таким чином, внутрішня норма рентабельності

$$IRR = r - 1 = 1{,}1986 - 1 = 0{,}1986 \text{ або } 19{,}86\ \% \qquad (385)$$

Таким чином, різниця двох методів становить 2,12 %.

Приклад 3. Є варіант інвестиційного проекту А, що характеризується потоком платежів

А	-100	-150	50	150	200	200

Визначити *IRR*. Для наявного потоку надходжень напишемо наступне степеневе рівняння, у якому для скороченого запису приймемо $r = 1 + i$.

$$f(r) = -100 \cdot r^{-1} - 150r^{-2} + 50r^{-3} + 150r^{-4} + 200r^{-5} + 200r^{-6} = 0. \qquad 386$$

Приймемо в якості вихідні оцінки $r_0 = 1{,}1$ й $r_1 = 1{,}15$, тоді .$f(1{,}1) = 164{,}4$ та $f(1{,}15) = 104{,}2$. Далі на основі методу дотичних (Ньютона) [7,9]послідовно знаходимо:

$$r_i = r_{i-1} - \frac{(r_{i-1} - r_{i-2}) \cdot f(r_{i-1})}{f(r_{i-1}) - f(r_{i-2})}. \qquad (387)$$

$$r_2 = 1{,}15 - \frac{(1{,}15 - 1{,}1) \cdot 104{,}2}{104{,}2 - 164{,}4} = 1{,}24. \qquad (379)$$

$$r_3 = 1{,}24 - \frac{(1{,}24 - 1{,}15) \cdot 34{,}7}{34{,}7 - 104{,}2} = 1{,}285. \qquad (380)$$

$$r_4 = 1{,}285 - \frac{(1{,}285 - 1{,}24) \cdot 11{,}42}{11{,}42 - 34{,}7} = 1{,}3. \qquad (381)$$

Використовуючи останню оцінку, одержимо $f(1{,}3) = 0{,}05$, тобто f практично близька до нуля.

$$\varepsilon = \frac{|r_4 - r_3|}{r_3} \cdot 100\% = \frac{|1{,}3 - 1{,}285|}{1{,}285} \cdot 100\% = 1{,}17\%. \qquad (382)$$

$$f(r) = -100r^{-1} - 150r^{-2} + 50r^{-3} + 150r^{-4} + 200r^{-5} + 200r^{-6} = 0. \qquad (383)$$

Таким чином, *IRR* дорівнює *IRR* = 30 %.

Нехай процеси вкладень і віддачі суворо послідовні, причому процес віддачі дотримується якої-небудь закономірності, то інвестиції можуть бути представлені у виді однієї величини. Тоді задача оцінки *IRR* технічно дещо спрощується та зводиться до визначення коефіцієнта приведення відповідної ренти, а далі - до розрахунку шуканої ставки по величині цього коефіцієнта. Допустимо, доходу від інвестиції постійні**,** надходять наприкінці року або *p* раз у році наприкінці кожного періоду, тоді коефіцієнти приведення ренти [9].

$$a_{n;ів} = \frac{V}{R}, \qquad (384)$$

або

$$a_{n;ів}^{(p)} = \frac{V}{R}. \qquad (385)$$

де *V* - вартість інвестиції на початок періоду віддачі,

R— річна віддача від інвестицій.

Величина *ів* залежить не тільки від співвідношення доходів і інвестицій, але значною мірою і від їхніх розподілів.

14.8. Термін окупності інвестицій

Термін, протягом якого споживач може відшкодувати початкові заграти, забезпечивши при цьому бажаний рівень доходності, називається **терміном окупності вкладень *(PP)***. Це один із досить простих та доступних в користуванні показників. Він дає можливість отримати додаткову інформацію про вкладення та визначити той термін, за який кумулятивна сума грошових

чистих надходжень дорівнюватиме сумі затрачених коштів на придбання нової техніки. Загальна формула для розрахунку *PP* має такий вигляд

$$PP = \frac{I}{CF_t^{(S)}}, \qquad (386)$$

де *PP* - термін окупності (роки);

$CF_t^{(S)}$ - річна сума грошових надходжень від експлуатації придбаного виду техніки.

Індекс *(s)* при знаменникові CF_t свідчить про можливість двоякого підходу до визначення величини CF_t. Перший підхід можливий у випадку рівномірних однакових по величині щорічних грошових надходжень. Тоді обсяг вкладень ділиться на величину річних надходжень. Другий підхід має місце, коли грошові надходження від експлуатації придбаного засобу виробництва суттєво відрізняються по роках. В такому разі *PP* розраховується прямим підрахунком років, протягом яких вкладення коштів буде відшкодоване кумулятивним доходом (наростаючим підсумком). Досить часто при розрахунку *PP* враховується дробова частина року, що робить його більш точним.

Врахування фактору часу при розрахунку терміну окупності вимагає дисконтування грошових потоків по відповідній ставці дисконту, а формула для розрахунку дисконтованого терміну окупності *(DPP)* має вигляд

$$DPP = \frac{I}{\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} / n\right)}. \qquad (387)$$

Очевидно, що в разі дисконтування термін окупності збільшується, тобто завжди *PP* < *DPP*.

Такі показники ефективності, як строк окупності, рентабельність можуть бути визначені з урахуванням фактору часу, тобто на основі дисконтування потоку платежів. У цьому випадку вони по своєму змісту істотно відрізняються від широко

застосовуваних у практиці однойменних показників, отриманих за допомогою спрощених методів.

Без урахування фактору часу, тобто коли рівні суми доходу, одержувані в різний час, розглядаються як рівноцінні, показник строку окупності визначається як

$$n = V/R, \tag{388}$$

де n — спрощений показник строку окупності;

V - розмір інвестицій;

R - щорічний чистий доход.

Розглянемо два випадку визначення терміну окупності: для регулярного та нерегулярного грошового потоку.

Для регулярного грошового потоку розглянемо рівняння

$$NPV = CF_0 \frac{1-(1+g)^{-PBP}}{g} - I = 0. \tag{389}$$

Виконаємо його перетворення

$$1-(1+g)^{-PBP} = g\frac{I}{CF_0}. \tag{390}$$

Приймемо, що $R = CF_0$.

Далі

$$1 - g\frac{I}{CF_0} = (1+g)^{-PBP}. \tag{391}$$

Виконаємо логарифмування

$$\ln\left(1 - g \cdot \frac{I}{CF_0}\right) = -PBP \cdot \ln(1+g). \tag{392}$$

Тоді термін окупності становитиме

$$PBP = -\frac{\ln\left(1 - g\frac{I}{CF_0}\right)}{\ln(1+g)}. \tag{393}$$

Розглянемо випадок нерегулярного грошового потоку.

По-перше, розраховують поточні значення чистого приведеного доходу та будують графічну залежність (рис. 86)

$$NPV = f(n). \tag{394}$$

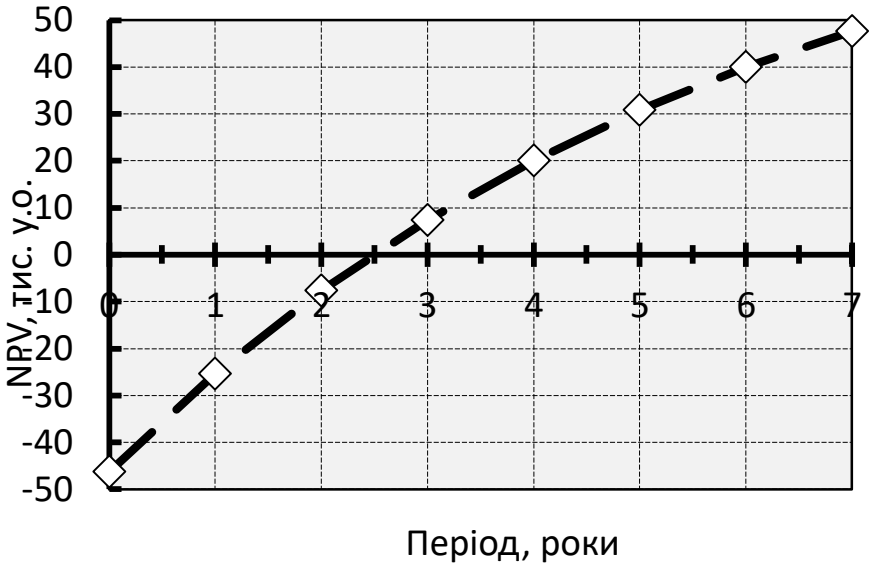

Рисунок 86. Графічний метод визначення строку окупності

По-друге, графічним методом відокремлюють корінь рівняння (рис. 87).

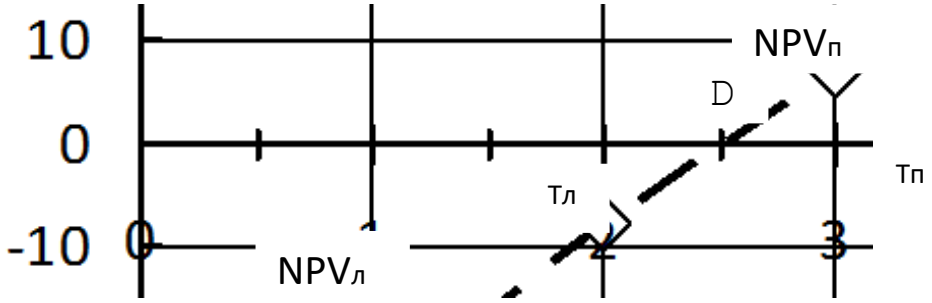

Рисунок 87. Відокремлення кореня рівняння

Тоді шукане значення строку окупності становитиме

$$PBP = T_л + \Delta = T_л + \frac{NPV_п}{NPV_п + NPV_л}. \qquad 395$$

Якщо чистий доход надходить нерівномірно, то строк окупності визначається послідовним підсумовуванням надходжень і підрахунком часу доти, поки сума доходу не виявиться рівній сумі інвестицій. За кордоном показник *п* застосовують в основному дрібні фірми.

З фінансових позицій більш обґрунтованим є інший метод визначення строку окупності. У цьому випадку під строком

окупності *(PP)* розуміють тривалість періоду, протягом якого сума чистого доходу, дисконтованих на момент завершення інвестицій, дорівнює сумі інвестицій. Тоді по визначенню сучасних величин доходів термін *PP* повинен бути рівним сумі накопичених інвестиційних витрат.

Якщо інвестиційний процес представлений у виді нерегулярного потоку платежів, то строк окупності визначається сумуванням послідовних членів ряду доходів, дисконтованих по ставці *i*, доти, поки не буде отримана сума, рівна об'єму інвестицій. Наприклад, якщо доход надходить наприкінці року, то визначається сума

$$A_m = \sum_{t=1}^{m} R_t v^t, \qquad (396)$$

причому $A_m < V < A_{m+1}$. Строк окупності дорівнює *m* плюс якась дата року, що приблизно дорівнює $(V - A_m) \cdot R_{m+1} \cdot v^{m+1}$.

Приклад 7. Припустимо, необхідно порівняти терміни окупності двох варіантів інвестицій

А	-100	-150	50	150	200	
Б	-200	-50	50	50	100	200

Одержимо наступні спрощені характеристики окупності: варіанта *А* - $PP_у$ = 2,25 роки, для варіанта *Б* - $PP_у$ = 3,5 роки. Параметри $PP_у$, як бачимо, не враховують ніяких інших факторів крім доходів і суми інвестицій. Для оцінки знайдемо суму інвестицій з відсотками по ставці *i* = 10%. варіанта *А* - 260 тис. грн, для *Б* - 270 тис. грн. За перші два роки теперішня величина доходу складе 169,4 тис. грн. (тобто менше 260 тис. грн), а за три роки дорівнює 319,7 тис. грн. (більше, ніж вартість інвестицій). Звідси строк окупності (за умови, що доход може виплачуватися і за частину року) складе *PP* = 2 + (260-169,4) : 150,2 = 2,6 роки, де величина 150,2 отримана як $200 \cdot 1{,}1^3$. Аналогічним шляхом одержимо для варіанта Б: *PP*.= 4+(270-230,2):124,2=4,32 роки.

Якщо доходи надходять у виді упорядкованої послідовності платежів, то розрахунок строку окупності зводиться до визначення терміну відповідних рент, у яких теперішня величина ренти заміняється вартістю інвестицій на початок періоду віддачі.

Приклад 8. Визначимо строк окупності для даних прикладу 6. Для цього скористаємося формулою

$$PP = -\frac{\ln\left(1 - \frac{V}{R} i\right)}{\ln(1+i)}. \qquad (397)$$

Використовуємо величину *V/R* = 4. Прийнявши ставку порівняння на рівні *i* = 10%, одержимо

$$PP = -\frac{\ln(1 - 4 \cdot 0{,}1)}{\ln(1 + 0{,}1)} = 5{,}36\ (\textit{року}). \qquad (398)$$

Спрощений строк окупності дорівнює 4 рокам.

Контрольні питання

1. Основні економічні показники інвестиційного проекту.
2. Грошовий потік.
3. Регулярний грошовий потік.
4. Ставка дисконтування.
5. Чистий приведений потік.
6. Індекс прибутковості.
7. Внутрішня норма рентабельності. Визначення, якщо грошовий потік регулярний.
8. Внутрішня норма рентабельності. Визначення, якщо грошовий потік не регулярний.
9. Термін окупності: простий та дисконтований.

Рекомендована література

1. Agricultural land: crop production or photovoltaic power plants / V. Havrysh et al. *Sustainability*. 2022. URL: https://doi.org/10.3390/su14095099.
2. Agricultural residue management for sustainable power generation: the poland case study / V. Havrysh et al. *Applied Sciences*. 2021. URL: https://doi.org/10.3390/app11135907.
3. Bazaluk O., Havrysh V., Nitsenko V. Energy and environmental assessment of straw production for power generation. *E3S web conf*. 2021. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122801010.
4. Comparative analysis of options indicators of submersible electromechanical systems's three-phase group transformer. / O. Sadovoy et al. *IEEE problems of automated electrodrive. theory and practice (PAEP), kremenchuk, ukraine,*. 2020. P. 1–4. URL: https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240782.
5. Goncharuk A., Havrysh V., Nitsenko V. National features for alternative motor fuels market. *International journal of energy technology and policy*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 226–249. URL: https://doi.org/10.1504/IJETP.2018.10010075.
6. Ground-Mounted photovoltaic and crop cultivation: a comparative analysis / S. Sacchelli et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. URL: https://doi.org/10.3390/su14148607.
7. Hybrid power supply with variable speed drive for automatically move irrigation equipment: margin of feasibility / V. Havrysh et al. *International conference on modern electrical and energy systems*. 2021. P. 1–4. URL: https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598589.
8. Kalinichenko A., Havrysh V. Environmentally friendly fuel usage: economic margin of feasibility. *Ecological chemistry and engineering*. 2019. Vol. 26, no. 2. P. 241–254. URL: https://doi.org/10.1515/eces-2019-0030.
9. Kalinichenko A., Havrysh V., Atamanyuk I. The acceptable alternative vehicle fuel price. *Energies*. 2019. Vol. 12. URL: https://doi.org/10.3390/en12203889.
10. Kalinichenko A., Havrysh V., Nitsenko V. Alternative vehicle fuel management: impact on energy security indicators. *Infrastructure*

and environment. 2019. P. 367–374. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16542-0_45.
11. Kalinichenko A., Havrysh V., Perebyynis V. Sensitivity analysis in investment project of biogas plant. *Applied ecology and environmental research*. 2017. Vol. 15, no. 4. P. 969–985. URL: https://doi.org/10.15666/aeer/1504_969985.
12. Komatsu M. Learning through esports in innovation practice on electrical technology. *Procedia computer science*. 2021. Vol. 192, no. 11. P. 2550–2557.
13. Local green power supply plants based on alcohol regenerative gas turbines / O. Cherednichenko et al. *Economic and environmental aspects. energies*. 2020. URL: https://doi.org/doi:10.3390/en13092156.
14. Methods for organising conferences for electrical engineering specialists via distance learning / I. Batsurovska et al. *International conference on modern electrical and energy systems*. 2021. P. 1–6. URL: https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598718.
15. Perlow S. The poem electric: technology and the american lyric. University of Minnesota Press. 2018. 296 p. URL: https://www.jstor.org/stable/10.5749/j.ctv7vct3w.
16. Schröder A., Hegelund A., Baylin-Stern A. Frontier electric technologies in industry. *IEA world energy outlook*. 2019. Paris. 2019. 661 p. URL: https://www.iea.org/commentaries/frontier-electric-technologies-in-industry
17. Smith K. Seth Perlow, the poem electric: technology and the american lyric. *Somatechnics*. 2021. Vol. 11, no. 2. P. 305–311.
18. Soro A. Electric technologies applied to probiotic and prebiotic food. *Probiotics and prebiotics in foods*. 2021. P. 283–292.
19. Sun X. On the application and research of electronic and electrical technology in power system. *The 2020 international conference on machine learning and big data analytics for iot security and privacy*. 2021. P. 777–781.
20. Utilization of crop residue for power generation: the case of ukraine. / Y. Jiang et al. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, no. 24. URL: https://doi.org/doi:10.3390/su11247004.
21. Електричне освітлення та опромінення : навч.посіб. для студентів вищ. навч. закл. / Р. Кушлик та ін. Харків : ТОВ «Планета-прінт», 2016. 332 с.

22. Електротехнології в АПК : навчальний посібник. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с.
23. Електротехнологічні комплекси і процеси в галузі: методичні вказівки до практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” / Ю. Стьопін та ін. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 100 с.
24. Кушлик Р., Кушлик Р. Практикум з дисципліни “Електричне освітлення та опромінення”. Мелітополь : ФОП Ландар С.М., 2021. 90 с.
25. Кушлик Р., Назаренко І., Кушлик Р. Практикум з навчальної дисципліни “Електротехнології і теплові процеси”. Мелітополь : ФОП Ландар С.М., 2021. 113 с.
26. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни “Електротехнології в АПК” для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В. Гулевський та ін. Мелітополь : ФОП Белень В.В., 2021. 48 с.
27. Матвійчук В., Рубаненко О., Стаднійчук І. Електротехнології в АПК. Вінниця : ТВОРИ, 2020. 272 с.
28. Орел О. Теплові процеси в переробній галузі: методичні вказівки до практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 133 – “Галузеве машинобудування”. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. 100 с.
29. Стьопін Ю., Гулевський В., Перова Н. Енергозбереження і використання поновлювальних джерел енергії: методичні вказівки до лабораторних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 30 с.
30. Ялпачик В., Стручаєв М. Лабораторний практикум з холодильного устаткування: навч. посібник. Мелітополь : Вид. будинок ММД, 2017. 203 с.

Предметний покажчик

Аерозоль, 223
Акустичні трансформатори, 244
Аргонодугове зварювання, 133
Визначення ефективності використання альтернативних видів палив, 292
Грошовий потік, 299
Діелектрики, 27
Електроакустичні перетворювачі, 241
Електродуговий нагрів, 43
Електрозабарвлення, 226
Електроозброєність праці, 269
Енергетична віддача інвестицій, 278
Енергоефективність фактична, 271
Індекс (коефіцієнт) прибутковості, 307
Індуктор, 96
Індуктори багаторазового використання, 168
Індуктори одноразового використання, 168
Індукційний нагрів, 43, 95
Індукційний спосіб, 163
Іонна зарядка, 210
Ітераційний метод або метод послідовних наближень, 310
К.К.Д. індукційного нагріву, 100
Коефіцієнт зворотного сіткового зв'язку, 116
Коефіцієнт потужності індуктора, 102
Контактне зварювання, 139
Корисна потужність нагрівачів, 72
Коронний барабанний сепаратор, 216
Коронний розряд, 206
Коронний транспортерний сепаратор, 220
Лампові генератори, 150
Магнетрони, 152
Магнітне очищення кормів, 253
Магнітно-імпульсна обробка матеріалів, 170
Магнітно-імпульсні технології, 167
Магнітострикційні перетворювачі, 241
Метод Ньютона або метод дотичних, 312
Нагрівання методом опору, 42
Напівпровідники, 28
Непрямі витрати енергетичних ресурсів, 259
Опір провідника, 58
Основні елементи регулятора, 200
Основні ефекти ультразвуку, 239

Основні параметри ультразвуку, 238
Питома поверхнева потужність, 99
Потенційна енергоефективність, 270
Потенційна енергоозброєність робочої сили, 268
Потужність установок, 147
Природа ультразвуку, 238
Провідники, 27
Прямі витрати енергетичних ресурсів, 259
Розрахунок індукторів, 107
Ставка дисконтування, 301
Стикове зварювання, 141
ТЕН, 78
Теплова потужність, 68
Термін окупності вкладень, 317
Термоелектричний нагрів, 43
Токи високої частоти, 143
Трубчасті нагрівальні елементи, 78
Ультразвукова пайка, 247
Ультразвукове зварювання, 247
Умовне паливо, 263
Фактичне співвідношення потужності до кількості робочої сили, 268
Чиста теперішня вартість, 303
Чистий приведений дохід, 304

Навчальне видання

Автори:
ШЕБАНІН В’ячеслав Сергійович
БАЦУРОВСЬКА Ілона Вікторівна
ГАВРИШ Валерій Іванович
ГРУБАНЬ Василь Анатолійович

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Навчальний посібник

Технічний редактор: В. Грубань

Формат 60х84 1/16. Ум.друк. арк.20,4.
Тираж 300 прим. Зам №_____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету
54008, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК №4490
від 20.02.2013 р.