

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробних і харчових
виробництв»

_____Цвіркун Л.О.
«_____» _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБСМАЖУВАННЯ
КАВОВИХ ЗЕРЕН»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____Борисенко Михайло Сергійович_____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____доцент, к.пед.н., Цвіркун Л.О._____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна
Ступінь бакалавр
Галузь знань Механічна інженерія
Освітня програма Обладнання переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

З А В Д А Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Борисенко Михайлу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання для обсмажування
кавових зерен»

Керівник роботи к.пед.н., Цвіркун Л.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від
«31» грудня 2025 р. № 85-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи «12» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.
2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.
3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для обсмаження кавових зерен.
3. Удосконалення барабанного обсмажувача для кавових зерен.
4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Обладнання для обсмаження кавових зерен.

Схема удосконаленого барабанного обсмажувача для кавових зерен.

Дослідження рівнів обсмаження кави.

6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для обсмаження кавових зерен	16.02.2026-10.03.2026
3	Удосконалення барабанного обсмажувача для кавових зерен	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Борисенко М.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цвіркун Л.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 7 таблиць, 9 рисунків. Список використаних джерел складається з 25 найменувань.

Об'єкт роботи – барабанний обсмажувач.

Предмет роботи – процес обсмаження кавових зерен.

Мета роботи – удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен.

У роботі зазначено, що процес обсмаження кави є важливим етапом у її виробничому ланцюжку, що забезпечує відповідні рівні обсмаження та безпосередньо впливає на кінцеву якість сировини. Під час процесу обсмаження зелені кавові зерна піддаються впливу високих температур протягом певного часу, що впливає на розвиток смаку та аромату кавового зерна. Тому тепло має рівномірно проникати в кожне кавове зерно, а постійний рух сировини запобігати утворенню гарячих точок або застійних зон.

Аналіз наукових джерел дав змогу констатувати, що машина для обсмажування кави – це спеціалізоване обладнання, яке передає тепло кавовим зернам потоком гарячого повітря, постійно перемішуючи зерна. Вважається за доцільне для того, щоб тепло рівномірно проникало в кожне кавове зерно застосовувати лопаті протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Для системи контролю швидкості барабана доцільно встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання, що дозволить уникнути пошкоджень кавового зерна та забезпечить рівномірний теплообмін.

Запропоновано удосконалену конструкцію барабанного обсмажувача для кавових зерен із застосуванням ІЧ-випромінювання, яке характеризується однорідністю нагрівання з високою швидкістю теплопередачі, низьким енергоспоживанням та не забруднює навколишнє середовище порівняно з вичерпним паливом. Інфрачервоні випромінювачі будуть встановлені всередині барабана вздовж осі, які діятимуть безпосередньо на зерно, що змішується за допомогою лопатей протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен. Якщо зменшувати потужність, потік енергії падатиме миттєво на відмінну від газових пальників.

Для системи контролю температури доцільно розмістити термопари:

- термopapa має бути занурена в шар кавового зерна в обертовому барабані, оскільки ІЧ-випромінювачі нагрівають поверхню зерна дуже швидко;
- термopapa має бути встановлена у верхній частині барабана щоб не допустити перегрівання повітря навколо барабана;
- термopapa має бути встановлена біля випромінювачів, щоб відстежити та запобігти перегріву самих ламп.

Досліджено рівні обсмаження кавового зерна та визначено за допомогою колориметра кольорові показники сировини в залежності від рівня обсмаження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: барабанний обсмажувач, ІЧ-випромінювання, термopapi, рівні обсмаження, кавове зерно.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБСМАЖЕННЯ КАВОВИХ ЗЕРЕН	7
1.1 Термічна обробка кавових зерен	7
1.2 Системи обсмаження кавових зерен	8
1.3 Температура та час обсмажування	15
1.4 Етапи процесу обсмажування кави	18
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ БАРАБАННОГО ОБСМАЖУВАЧА ДЛЯ КАВОВИХ ЗЕРЕН	23
2.1 Функціональна схема системи обсмаження кави	22
2.2 Оптимізація підсистем барабанного обсмажувача	26
2.3 Контроль процесу обсмаження кави	37
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	40
3.1 Дослідження рівнів обсмаження кави	40
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен				Літ.	Арк.	Аркуші
Розроб.	Борисенко										
Перевір.	Цвіркун									5	1
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Н. Контр.	Омельченко										
Затверд.	Цвіркун										

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що процес обсмаження кави є важливим етапом у її виробничому ланцюжку, що забезпечує відповідні рівні обсмаження та безпосередньо впливає на кінцеву якість сировини. Під час процесу обсмаження зелені кавові зерна піддаються впливу високих температур протягом певного часу, що впливає на розвиток смаку та аромату кавового зерна. Тому тепло має рівномірно проникати в кожне кавове зерно, а постійний рух сировини запобігати утворенню гарячих точок або застійних зон.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен.

Практична та наукова новизна. Аналіз наукових джерел дав змогу констатувати, що машина для обсмажування кави – це спеціалізоване обладнання, яке передає тепло кавовим зернам потоком гарячого повітря, постійно перемішуючи зерна. Вважається за доцільне для того, щоб тепло рівномірно проникало в кожне кавове зерно, а постійний рух запобігав утворенню гарячих точок або застійних зон застосовувати лопаті протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Для системи контролю швидкості барабана доцільно встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання, що дозволить уникнути пошкоджень кавового зерна та забезпечить рівномірний теплообмін.

Запропоновано удосконалити конструкцію барабанного обсмажувача для кавових зерен із застосуванням ІЧ-випромінювання, яке характеризується однорідністю нагрівання з високою швидкістю теплопередачі, низьким енергоспоживанням та не забруднює навколишнє середовище порівняно з вичерпним паливом. Інфрачервоні випромінювачі будуть встановлені всередині барабана вздовж осі, які діятимуть безпосередньо на зерно, що змішується за допомогою лопатей протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен. Якщо зменшувати потужність, потік енергії падатиме миттєво на відмінну від газових пальників.

Для системи контролю температури доцільно розмістити термомпари в наступних точках:

- термомпара має бути занурена в шар кавового зерна в обертовому барабані, оскільки ІЧ-випромінювачі нагрівають поверхню зерна дуже швидко;
- термомпара має бути встановлена у верхній частині барабана щоб не допустити перегрівання повітря навколо барабана;
- термомпара має бути встановлена біля випромінювачів, щоб відстежити та запобігти перегріву самих ламп.

Досліджено рівні обсмаження кавового зерна та визначено за допомогою колориметра кольорові показники сировини в залежності від рівня обсмаження.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Борисенко				Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен	Літ.	Арк.
Перевір.	Цвіркун					6	1
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.	Цвіркун						

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБСМАЖЕННЯ КАВОВИХ ЗЕРЕН

1.1 Термічна обробка кавових зерен

Етап обсмаження кави є фундаментальним у процесі її приготування. Під час процесу обсмаження зелені кавові зерна піддаються впливу високих температур протягом певного часу. У цей проміжок часу кава втрачає вагу в межах від 15% до 20%, головним чином через випаровування води і в меншій мірі через піроліз деяких активних компонентів. Обсмаження кави є життєво важливим етапом у її виробничому ланцюжку. Процес обсмаження зелених кавових зерен полягає в їхньому короткочасному впливі високою температурою протягом якого вони втрачають близько 15-20% ваги, головним чином через випаровування вологи. Кавові зерна збільшуються в об'ємі від 100 до 130% у випадку натуральної кави в залежності від часу обсмажування і від 70 до 80% для обжареної з пікантним присмаком кави. Їхній жовтуватого-зелений колір перетворюється на коричневий, більш чи менш темний, залежно від обраного ступеня обсмаження [3, 4]. Хімічний склад зерен зазнає значних змін як у кількісному так і у якісному відношенні. Цукри, жири, білки, кислоти все зазнає змін через високі температури, яким піддають кавові зерна. Щоб отримати максимальні якісні показники кожного виду кави, обсмаження має бути специфічним для кожного з них. Існує, у будь-якому випадку, чотири дуже відмінні види кави, що вимагають специфічного обсмаження: натуральна арабіка та промита арабіка, натуральна робуста та промита робуста.

Обсмаження кави передбачає підсмажування зерен з метою розвитку характерних смаків та ароматів. Автоматизація цього процесу може мати значні переваги з точки зору ефективності та якості кінцевого продукту. Під час обсмаження більша частина вологи у кавових зернах видаляється, що призводить до низки хімічних реакцій, відомих як піроліз. Реакції викликають зміни у хімічному складі кави та розвиток сполук, пов'язаних зі смаками та ароматами приготовленої кави. Процес є ключовим етапом у виробництві кави, під час якого зелені кавові зерна піддаються контролюваному нагріванню для розвитку їхніх смакових, ароматичних та кольорових характеристик [4]. Під час цього процесу кавові зерна проходять низку хімічних та фізичних перетворень, які суттєво впливають на кінцевий смаковий профіль. Температура та час обсмаження ретельно контролюються для досягнення конкретних результатів, від світлих обсмажень із більш кислими та м'якими смаками до темних обсмажень із більш інтенсивними та гіркими смаками. Невеликі відхилення в процесі можуть істотно вплинути на кінцевий результат кави. Процес смаження є основоположним для створення широкого спектру смакових профілів, що зустрічаються у каві, і є невід'ємною частиною виробництва високоякісної

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		<i>Борисенко</i>			Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен		
Перевір.		<i>Цвіркун</i>					
Н. Контр.		<i>Омельченко</i>					
Затверд.		<i>Цвіркун</i>					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						7	16
					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		

кави.

У процесі обсмажування кави одним із найпоширеніших систем є використання циліндричної обсмажувальної машини, яка постійно обертається. Обертання забезпечує постійний рух зерен і рівномірне їх обсмаження. Кожен тип зерен має оптимальний час і рівень обсмаження, а такі змінні, як відсоток вологості, час і температура обсмаження впливають на остаточний смак кави. Під час процесу обсмаження хімічний склад зерен зазнає значних змін. Вода, присутня у зернах випаровується, а різноманітні хімічні реакції перетворюють цукри та крохмалі на олії, які значною мірою сприяють характерному аромату та смаку кави. Під час обсмажування зерна збільшуються в розмірі приблизно вдвічі, а цукор, що в них міститься карамелізується змінюючи колір зі зеленого на коричневий [4]. Колір і зовнішній вигляд обсмаженого зерна залежать від часу впливу високих температур. Чим довший час обсмаження тим темніше буде зерно. Зазвичай обсмаження кави проводиться протягом 10-20 хвилин при температурах від 180°C до 250°C. Зміна цих умов під час обсмаження впливає на кінцеві характеристики обсмаженої кави. Коротке обсмаження може призвести до кави з горіховим смаком і малою насиченістю, оскільки олії не будуть повністю виділені.

Важливо відзначити, що темнообсмажені зерна містять менше кислоти та кофеїну порівняно зі світлішими зернами. Однак у них також коротший термін зберігання через більшу кількість олії на поверхні. Темнообсмажені зерна мають димний, пронизливий і підпалений смак, який може приховати справжній смак зерна. Світлообсмажені зерна мають більш інтенсивний смак і більшу кислоту порівняно з темними, що дозволяє зберегти присутність характеристик зерна. Світлі обсмаження зазвичай робляться з більш якісних зерен, оскільки в цьому випадку мета полягає у виділенні справжнього смаку зерна. Час та температура обсмаження впливають на колір і кінцевий смак кави. Темнообсмажені зерна містять менше кислоти та кофеїну, тоді як світлообсмажені зберігають характеристики зерна.

1.2 Системи обсмаження кавових зерен

Основною функцією кавових обсмажувальних машин є надання необхідного тепла зеленим зернам, щоб вони зазнали змін у своїй хімічній та фізичній структурі і стали продуктом придатним для споживання людиною. Щоб це забезпечити, машини оснащені системою подачі тепла, системою перемішування, яка гарантує, що тепло доходить однаково до кожного зерна, а також відповідним простором для зберігання кави під час процесу обсмажування. Як правило, обсмажувальні машини мають барабан, який виконує дві функції: утримує та перемішує кавові зерна під час процесу обсмаження [5]. Найпоширенішим є циліндричний барабан, що обертається навколо своєї осі, а кавові зерна рухаються завдяки контакту з циліндром. Існують також інші ємності, відмінні від барабана, такі як тарілки або сфери, які також обертаються для перемішування кави але різниця між ними полягає в тривалості контакту кавового зерна з ємністю та швидкості його руху. Зазвичай

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

тепло подається за допомогою гарячого повітря, оскільки повітря не забруднює зерно, безпечно при нагріванні та не викликає жодної реакції під час хімічних і фізичних змін у каві. У промисловості існують різні типи обсмажувальних машин кожна з яких має свої власні характеристики та специфічні застосування, залежно від потреб користувача.

Машина для обсмажування кави – це спеціалізоване обладнання, яке передає тепло кавовим зернам потоком гарячого повітря, постійно перемішуючи зерна, щоб вони обсмажувалися рівномірно. У сучасній індустрії спеціальної кави використовуються кілька типів обсмажувачів: барабанні, з псевдозрідженим шаром, рециркуляційні [9]. Стратегії контролю, які застосовуються до процесу обсмажування кави, значною мірою залежать від типу використаного обладнання. Машини для обсмажування класифікуються за одним з двох основних типів: безперервної або періодичної дії. Безперервні апарати майже виключно використовуються великими компаніями з обжарювання кави для виробництва стандартизованої кави. Безперервні машини для обсмаження кавових зерен використовуються для швидкого, великого та безперервного виробництва одного типу продукту. Для роботи вони потребують високих температур і великих потоків повітря, оскільки немає такої інтенсивної дії змішування зерен у процесі обсмажування, як у більш традиційних системах з барабаном типом обсмаження [3, 4]. Цю меншу інтенсивність змішування компенсує більший вплив гарячого повітря, що подається через сопла через каву, розташовану в комірках. На першій фазі обсмажування, а саме у момент зневоднення зерна, швидкість повітря нижча, а температура менша, зростаючи до значень близько 300–400°C. Система, будучи безперервною, не має фази регенерації кисню та вологості під час завантаження, тому слід встановити оптимальні значення, які потім підтримуються постійно. Періодичні апарати для обжарювання зазвичай – горизонтальні обертові барабани, які містять спіральні лопаті всередині обертового барабана, що забезпечують осьове перемішування зерен. Барабан обертається на достатньо низьких швидкостях, щоб центробіжні сили не спричиняли прилипання зерен до стінок барабана.

Сучасні кавові обсмажувачі працюють на основі гарячого повітря, який проходить через постійно перемішуванні шари кавових зерен або через потоки зерен, що падають або підвішені в обсмажувальному повітрі [7, 10]. У більшості обладнання повітря для обсмаження нагрівається відкритим полум'ям, а основним джерелом теплопередачі є конвекція від гарячого повітря до зерен. Під час обсмаження срібляста оболонка буде відшаровуватися від кавових зерен (відомих як лушпиння) і відноситися гарячим повітрям, тому гаряче повітря, що виходить із камери обсмаження, зазвичай пропускається через циклон, де лушпиння відокремлюється від повітря. Після відокремлення повітря або викидається в атмосферу, направляється назад до відкритого полум'я для повторного нагрівання.

Обсмажувачі призначений для того, щоб зерна та гарячий газ могли контактувати починаючи процес обсмажування. Апарати можуть використовувати різні технології для нагрівання та перемішування кавових

зерен але на сьогоднішній день процеси з найкращими результатами вимагають трьох основних компонентів [15]:

- камера для утримання;
- пристрій для перемішування, який дозволяє рівномірно передавати тепло всім зернам;
- контроль переданого тепла.

Барабанні обсмажувачі (ростери). Серед різних конструкцій, які доступні для процесу обсмажування кави у сучасній промисловості найбільш поширеними є барабанні обсмажувачі з горизонтальним розташуванням. Технології, що використовуються в цих машинах, численні, але їх можна класифікувати на дві групи: традиційні обсмажувачі та модульні обсмажувачі. Перші є компактними машинами, які прагнуть дотримуватися традиційного дизайну, тобто обсмажування із примусовою конвекцією та теплопровідністю, корпус машини характеризується наявністю пальника для нагрівання обсмажувального повітря, камерою обсмажування, системою охолодження зерен та системою збору органічних відходів від обсмажування [15]. Модульні обсмажувачі, як випливає з самої назви, мають можливість керувати своїм дизайном за «машинними модулями», що, відповідно, збільшує загальні розміри машини але забезпечує відмінну універсальність процесу обробки кави. Універсальність є ключовим словом для цих машин, які є найпопулярнішими серед великої промисловості, саме для того, щоб задовольнити великі обсяги та різноманітність кавових продуктів, які їх характеризують.

Барабанні обсмажувачі – найпоширеніші та традиційні обсмажувачі, де велика частина процесу обжарювання здійснюється за допомогою повітря (конвекційно) але також і через контакт з гарячою поверхнею (провідниково). Використовують обертовий барабан в який поміщаються зерна кави та обсмажуються за допомогою непрямого тепла. Вони дозволяють точно контролювати температуру та час обсмажування, що робить їх ідеальними для обсмажування невеликих або великих партій кави. Система барабанного типу працює протягом 12-18 хвилин під час яких кава обсмажується гарячим повітрям при температурі приблизно 200°C [3, 4]. В системі барабану повітря відносно сухе і має вміст води у вихлопних газах 18 г/м³. З цією системою обсмаження можна досягти високої однорідності зерна, що варіюється від світлого до середнього кольору. Охолодження здійснюється у круглому барабані, перемішуючи каву лопатями при кімнатній температурі. Основа зроблена з перфорованої сталі, а знизу встановлений вентилятор, який всмоктує повітря через зерна (рис. 1.1, рис. 1.2).

Обертовий барабанний обсмажувач сьогодні є одним з найпоширеніших типів обладнання, оскільки він дає змогу обсмажувати каву на повільніших швидкостях. Він складається з горизонтального обсмажувального барабана із спіральними лопатями всередині барабана, які забезпечують осьове перемішування зерен. Усередині камери обсмаження (обертового барабана) тепло передається за допомогою кондукції, оскільки зерна безпосередньо контактують з гарячими металевими поверхнями, та конвекції, коли гаряче повітря проходить через барабан. Коли барабан обертається над відкритим

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

вогнем, це дозволяє кавовим зернам постійно переміщатися під час процесу, ефективно сприяючи більш рівномірному обсмаженню.



Рисуюнок 1.1 – Барабанний
обсмажувач



Рисуюнок 1.2 – Конвекційні
обсмажувачі

Найважливішими перевагами цих машин є те, що завдяки їхній формі та елементам вони можуть використовуватися як для домашнього так і для промислового використання. Головні недоліки машин полягають у складності їх очищення через великі розміри та елементи до яких важко добратися, що призводить до зниження якості обсмажування у міру використання машини. З іншого боку, не до всіх машин можна адаптувати систему керування для автоматизації процесу, що робить процес більш залежним від знань оператора, ніж від роботи машини [10]. Через використані методи змішування (обертові металеві елементи) зерна кави не отримують однорідного обсмаження, що знижує якість кави.

Також недоліком обертового барабанного апарата є високі температури, необхідні для довгого часу обсмажування для ефективного обсмажування зерен. Обсмажування у барабанному обсмажувачі може тривати до 18 хвилин, що може призвести до підгоряння деяких зерен і часто залишає на стінах камери сліди олії та нагару. Через особливості конструкції обсмажувача його важко чистити, що призводить до того, що наступні обсмажування набувають різкого, димного смаку. Обертання барабана є основним параметром у процесі обсмаження [8-9]. Надто низьке значення швидкості може спричинити недостатнє перемішування (зерна ковзають по поверхні барабана). Занадто високе значення швидкості може негативно вплинути на процес обсмажування. Через відцентрову силу зерна прилиптимуть до стінки барабана і не будуть правильно перемішані. Найпоширенішими барабанними обсмажувачами є барабани з непрямым нагрівом, де джерело тепла знаходиться під барабаном. Прямі запальні обсмажувачі – це апарати у яких полум'я контактує з зернами всередині барабана.

Машини з прямим нагрівом можуть використовувати паливо, таке як зріджений газ або природний газ, електричні нагрівачі для нагрівання повітря,

що використовується в процесі обсмаження. Полум'я контактує безпосередньо з зовнішньою стінкою барабана, нагріваючи як його металеві стінки так і повітря всередині. Повітря примусово рухається за допомогою вентиляторів, потрапляє в барабан і проходить через зерна кави, нагріваючи їх за рахунок конвекції. Також присутнє теплове вплив через теплопровідність, оскільки зерна безпосередньо контактують з внутрішніми гарячими стінками обертового барабана. Тепле повітря всередині обсмажувача захоплюється вентилятором, так само як і ароматичні гази, пара та оболонки, що виділяються з зерен. Споживає мало енергії та легкий у використанні. Забезпечує більш чисте середовище для обсмаження, оскільки цей дизайн постійно використовує чисте повітря. Тепле повітря підтримує кондуктивний перенос тепла під час перших хвилин обсмаження, дозволяючи ефективне накопичення тепла всередині барабана. Основним недоліком цього дизайну є можливе перегрівання стінок барабана, що може призвести до підгоряння поверхні зерен кави [15]. Машини з прямим нагрівом забезпечують з циркуляцією гарячого повітря. Принцип роботи той самий, що і в обсмажувачів з прямим нагрівом. Велика різниця полягає в тому, що повітря нагрівається всередині камери згоряння, розташованої поза зоною обсмажування. Барабан не контактує безпосередньо з полум'ям, що зменшує ймовірність підгоряння поверхні кавових зерен під час процесу. Споживання енергії зменшується, якщо проводити кілька обсмажувань протягом дня, можливо підряд, уникаючи тим самим часу на прогрівання машини. Забезпечує чисте середовище для обсмажування, оскільки повітря, що використовується, постійно забирається ззовні, а отже, чисте.

Конвекційні обсмажувачі. Працюють шляхом нагрівання повітря та циркуляції його навколо кавових зерен для їх рівномірного обсмажування. Вони схожі на обсмажувачі з псевдозрідженним шаром але можуть мати різний дизайн. Підходять для обсмажування невеликих або середніх партій кави і популярні серед домашніх обсмажувачів. Система конвекції є варіантом звичайної барабанної системи, де час обсмажування становить від 5 до 6 хвилин. Така зміна часу пояснюється тим, що в цьому типі системи нагрів здійснюється повністю за рахунок конвекції і практично без врахування теплопровідності для того щоб кава була обсмажена потрібно подавати повітря приблизно температурою 550°C [3, 4]. Принцип роботи схожий з барабанною системою. Різниця полягає в тому, що тепло передається повністю за допомогою конвекції і практично без теплопровідності, що дозволяє здійснювати обсмажування швидше, приблизно за 5-6 хвилин. Температура повітря для обсмажування складає приблизно 550°C, змінюючись протягом процесу та регулюючи його кількість у певні моменти. Існують машини цього типу, які можуть обсмажувати каву навіть до 14 хвилин, роблячи певні адаптації в їхньому оригінальному функціонуванні. Кава у цих машинах знаходиться в плаванні і тому зерна не можуть згоріти через контакт із металевими частинами, температура яких вища, ніж температура гарячого повітря.

Обсмажувачі з псевдозрідженним шаром. Робота цього обладнання базується на поєднанні принципів роботи барабанних і конвекційних систем.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Використовують гаряче повітря для обсмажування кавових зерен під час їх руху всередині камери обсмажування (рис. 1.3). Метод обсмажування забезпечує рівномірний розподіл тепла та швидке й послідовне обсмажування. Вони популярні в комерційній індустрії завдяки своїй ефективності та здатності обсмажувати великі обсяги кави. З їх допомогою можна провести процес за 5 або 6 хвилин і дозволяє отримати велику різноманітність видів обсмаження. Кава знаходиться в статичній камері у якій через основу під тиском подається гаряче повітря, що змушує кавові зерна рухатися в підвішеному стані [3, 4]. Кава переміщується сильною течією гарячого повітря, що тече з перфорованого дна, змушуючи каву підніматися по одній стороні, описуючи криву у верхній частині камери і спускатися по протилежному боці. Під час процесу зерна засмоктуються, а лушпиння видаляється і відправляється у циклонічний колектор. Горілка нагріває сировину до температури 600-700°C для забезпечення оптимального згоряння домішок.



Рисунок 1.3 – Обсмажувач з псевдозрідженим шаром



Рисунок 1.4 – Модульні обсмажувачі

Теплопередача, що відбувається в обсмажувачі з псевдозрідженим шаром, майже виключно здійснюється за допомогою конвекції. Великі об'єми повітря, попередньо нагрітого відкритим вогнем надходять у камеру обсмаження знизу, де гаряче повітря одночасно циркулює й нагріває рухомі зерна. Великі об'єми повітря необхідні для того, щоб утримувати зерна в повітрі. Процес обсмаження значно коротший, ніж у барабанному обсмажувачі, завдяки більшому об'єму повітря, що проходить через камеру обсмаження. Обсмажувачі даного типу мають менший ризик пригоряння поверхні зерен завдяки мінімальному або відсутньому контакту з гарячими металевими поверхнями всередині печі, що забезпечує більш однорідну партію обсмажених зерен [10]. Варіантом обсмажувача з псевдозрідженим є апарат із витісненим шаром, де не всі зерна розпушуються однаково, а потоки високошвидкісного повітря піднімають зерна до верхньої частини барабана, після чого вони падають назад у шар зерен. Апарати потребують меншої кількості гарячого повітря але витіснення фактично збільшує теплопередачу. Однак цей метод схильний до утворення неоднорідної партії обсмажених зерен кави.

Модульні обсмажувачі складаються з незалежних і взаємопов'язаних між собою одиниць, залежно від конфігурації установки (рис. 1.4). Апарати для обсмажування можуть використовуватися з одним або двома пальниками (один для нагріву повітря для обсмажування, другий використовується для зменшення димових газів у димоході) залежно від конфігурації установки. Зазвичай конфігурація проектується з рекуперацією тепла [15]. У цьому випадку частина повітря для обсмажування забирається з плівкового апарату і знову спрямовується у камеру згоряння, що дозволяє знизити енергоспоживання пальника.

Автоматизовані обсмажувачі зерна мають на меті контролювати температуру та вологість під час процесу. Обсмажувачі використовують інноваційні технології та можуть адаптуватися до конкретних потреб малих та середніх обсмажувальних підприємств, покращуючи таким чином емпіричний процес обсмаження. Напіваавтоматизація в цьому процесі може підвищити ефективність та якість кінцевого продукту, одночасно прагнучи більшої сталості та зменшення впливу на навколишнє середовище. Останнім часом актуальним є впровадження змішаних джерел енергії, а саме поєднання різних джерел енергії, таких як електрика, сонячна, вітрова, біомаса. Використовуючи комбінацію цих джерел енергії, можна досягти більшої енергоефективності та зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії [4, 8]. Використання змішаних джерел енергії може дозволити інтегрувати відновлювані джерела енергії у цей процес, що могло б призвести до зменшення викидів парникових газів і допомогти зменшити вплив на навколишнє середовище. Можна поєднувати використання електричної енергії з відновлюваних джерел із генерацією теплової енергії з біомаси або сонячних панелей. Порівняльна характеристика обсмажувачів для кавових зерен наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика обсмажувачів

Тип обсмажувача	Характеристика
Барабанні обсмажувачі	Метод обсмажування конвекцією в обертовому барабані відзначається своєю здатністю рівномірно та послідовно обсмажувати каву у великих обсягах. Такі обсмажувальні машини зазвичай мають більшу потужність, ніж інші типи, що робить їх ідеальними для комерційних операцій великого масштабу. Мають перевагу в налаштуванні, що дозволяє контролювати як температуру так і час обсмажування відповідно до конкретних потреб.
Обсмажувачі з псевдозрідженим шаром	Метод обсмаження гарячим повітрям, де повітря циркулює через зерна кави, є широко використовуваною технікою. Однією з основних переваг є можливість регулювати температуру та швидкість повітря, що дозволяє точно контролювати процес обсмаження, що може призвести до більш швидкого та рівномірного обсмаження, хоча важливо зазначити, що досягнення оптимальних результатів може вимагати точних налаштувань.

Конвекційні обсмажувачі	Метод обсмаження гарячим повітряним потоком при якому повітря піднімає та збиває кавові зерна є ефективною технологією, що використовується у багатьох сучасних обсмажувальних машинах. Машини зазвичай мають потужність від середньої до високої, залежно від їхнього конкретного розміру та конструкції. Однією з основних переваг є можливість контролювати як температуру повітря так і швидкість потоку, що забезпечує рівномірне та послідовне обсмаження з гнучкістю регулювання інтенсивності обсмаження. Потребують регулярного обслуговування для очищення компонентів і забезпечення належного потоку повітря, що гарантує оптимальне обсмаження.
----------------------------	--

Обсмажувачу для кавових зерен мають різні специфічні компоненти, щоб виконати кожен етап і таким чином досягти перетворення ефективно та безпечно [4]:

- гвинт використовується в нижній частині барабана для виштовхування або видалення зерен певного продукту. Швидкість гвинта забезпечується редукторним механізмом через шестерні або ремені від двигуна. Він призначений для гранульованих або порошкоподібних продуктів;

- бункер – це важливий компонент, який використовується для утримання та контрольованого подавання матеріалу для обробки. У контексті кавомашини бункер для подачі – це місце, куди поміщають необсмажені зерна кави перед тим, як вони потраплять у процес обсмажування, а конструкція бункера здійснюється відповідно до виробничої потужності;

- обертовий барабан – це основний компонент, який виконує кілька ключових функцій під час процесу обсмаження, таких як: змішування та перемішування зерен і рівномірний розподіл тепла;

- сушильний або охолоджувальний лоток використовується для обробки кавових зерен до або після процесу обсмаження (висихання або рівномірне охолодження);

- шківи та ремені – важливі компоненти, які допомагають передавати рух, регулювати швидкість, синхронізувати рухи та зменшувати вібрації й шум, враховуючи підтримувати належне натягнення ремня для оптимальної роботи та продовження строку служби компонентів.

- підшипники – це компоненти, які забезпечують підтримку, напрямок і плавний рух різних частин механізму. Їхній дизайн і функція допомагають зменшити тертя, знос і шум, тим самим сприяючи ефективній та тривалій роботі обладнання.

1.3 Температура та час обсмажування

Для визначення найважливіших змінних, що впливають на процес обсмаження, необхідно враховувати основні характеристики та умови, що

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

визначають якість обсмаженої кави. Кава є найскладнішим продуктом серед групи харчових продуктів та напоїв. Її склад включає від 700 до 850 сполук, що визначають аромат та смак. Утворення цих сполук залежить від сорту, клімату, ґрунту, живлення та культурних практик виробництва. Сполуки не можна оцінити у зеленій каві, оскільки вони формуються під час обсмаження.

Передача тепла шляхом контакту – це метод, який важко контролювати при обсмажуванні, оскільки неможливо досягти постійної якості, використовуючи цей метод. Конвекція – найефективніший і найдієвіший метод. У цьому випадку зерно кави плаває в потоці гарячого повітря, а обсмаження відбувається швидко і досягається більший набряк зерна, завдяки своїй однорідності виробляється більше напою [2, 4]. Радіація – виконується за допомогою інфрачервоного випромінювання, яке зазвичай призводить до перегрівання поверхні зерна, і оскільки кава є поганим провідником тепла, вона обгорає на зовнішній поверхні і перешкоджає передачі тепла внутрішнім шарам залишаючи їх сирими. Теплопровідність стосується процесу за якого тепло передається через тверде середовище завдяки молекулярній теплопровідності. З іншого боку, конвекція тепла передбачає передачу тепла внаслідок руху рідини. Теплопровідність – це рух через тверде середовище, тоді як конвекція – це рух рідин. Теплова радіація стосується обміну тепловою енергією через електромагнітні хвилі, а масоперенос пов'язаний із транспортуванням хімічних видів.

Основний процес обсмаження кави полягає у передачі тепла до кавового зерна за допомогою гарячого обсмажувального повітря. Цей тепловперенос ініціює підвищення температури зерна, що, у свою чергу, призводить до виникнення кількох хімічних та фізичних змін. Саме під час цих змін відбувається масовий перенос шляхом вивільнення водяної пари, CO_2 та летких речовин, а також відбувається масовий перенос сухої. Під час обсмаження відбуваються екзотермічні реакції, де тепло передається від зерна до навколишнього середовища [4, 6, 10]. Процес обсмаження кави залежить від багатьох різних факторів. Наприклад, якщо на початку процесу обсмаження не передається достатньо тепла (що може залежати від типу використаного обсмажувача або умов обсмажуваного повітря), кавові зерна не висихатимуть достатньо, що дозволить виникненню нерівномірного обсмаження на подальших етапах і оптимальний смак кави не буде досягнутий. Іншим фактором, що може впливати на обсмаження є склад зеленого кавового зерна, який сильно залежить від клімату, в якому воно вирощується, і який має великий вплив на внутрішню структуру зерен, метод обробки, а також на вид та походження зерна.

Зневоднення – при підвищенні внутрішньої температури зерна до близько 100°C вода, що міститься в його тканинах випаровується. З цієї причини випаровування води призводить до втрати ваги, зменшення вмісту вуглеводів та видалення срібної плівки. Втрати води становлять від 13 до 20% ваги кави. Карамелізація – реакція потемніння цукрів нагрітих вище їх точки плавлення за відсутності білків або амінокислот [4]. Після досягнення бажаного рівня обсмажування кавові зерна швидко охолоджують, щоб зупинити процес

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

обсмажування та уникнути їх підгоряння. Це можна досягти шляхом впливу холодного повітря на зерна або за допомогою спеціального охолоджувального обладнання. Швидке охолодження також допомагає зберегти нещодавно розвинуті смаки та аромати обсмажених кавових зерен.

У процесі смаження існують три основні змінні, які мають значний вплив: температура, вологість і час. Температура у процесі обсмаження кави є ключовим фактором і залежить від кількох аспектів, таких як тип використовуваної машини, час обсмаження та інтенсивність бажаного кінцевого кольору. Під час процесу обсмаження можна виділити три різні фази. На першій фазі кава втрачає вологу і хоча цей етап має менший вплив на кінцевий смак він важливий для загального процесу. На другій фазі відбувається розширення зерен кави та починаються реакції, що генерують гази. Третя фаза є найповільнішою та найважливішою, оскільки саме в ній формується головним чином кінцевий смак продукту.

Температура обсмаження залежить від типу машини для обсмаження, часу обсмаження та інтенсивності необхідного кінцевого кольору. Важливо бути обережним із різкими змінами температури під час процесу обсмаження, оскільки вони можуть змінити органолептичні властивості кави. Раптове підвищення температури може прискорити швидкість обсмаження, тоді як зниження температури подовжує час нагрівання, не досягаючи бажаного ступеня обсмаження. Вологість є ще одним ключовим фактором у процесі обсмаження кави [4]. Мова йде про вміст води у співвідношенні до загальної маси зерна, яка виражена у відсотках. При подачі зерен до обсмажувальної машини вони зазвичай містять близько 12% вологи, а після процесу обсмаження це значення може варіюватися від 2% до 5%, залежно від обсмажувача та характеристик кави. Під час обсмаження волога, що присутня на поверхні зерна легко передається у навколишнє повітря. У міру просування процесу вода мігрує зсередини зерна до поверхні, щоб компенсувати втрату вологи, у процесі, відомому як дифузія. Підвищення температури призводить до збільшення тиску водяної пари, яка видаляється за допомогою витяжних систем або систем вентиляції.

Температура та вологість є фундаментальними змінними в процесі обсмажування кави. Температура контролюється на різних етапах обсмажування та впливає на смак і органолептичні властивості кави. Початкова вологість зерен та її втрата під час обсмажування також відіграють ключову роль у якості та кінцевих характеристиках обсмаженої кави. Обидва фактори повинні ретельно контролюватися для досягнення бажаних результатів. На першому етапі висушується волога в каві, і це етап, який найменше впливає на кінцевий смак. На другому етапі відбувається розширення комірок зерна кави та починається утворення газів [3, 4]. Третій етап повинен бути повільнішим, оскільки саме він в основному надає продукту кінцевий смак. Коли досягається бажаний ступінь обсмаження то цей процес повинен бути зупинений або холодним повітрям, або водою. Кількість використаної води є критичною, оскільки кава має тенденцію набирати вагу через поглинання води. Процес обсмаження може тривати від 7 до 30 хвилин залежно від типу обсмажувача.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Під час процесу обсмажування температура зерен кави досягає приблизно 193°C для світлого обсмаження близько 200°C для середнього та близько 218°C для темного обсмаження. Після завершення процесу обсмажування зерна переміщують на піддони для швидкого охолодження, щоб зупинити процес у потрібний момент.

Перші зміни відбуваються при 50°C у верхніх шарах, при 100°C зелений колір кави починає змінюватися на жовтий і в цей момент починається висихання під час якого виділяється водяна пара і починається випаровування, що також розвиває аромат, схожий на «смажений хліб». Приблизно при 120°C-130°C зерно набуває коричневого кольору, який поступово переходить у відтінки бурого, збільшується в об'ємі але аромат ще не є характерним. Приблизно при 180°C аромат починає ставати характерним, і внаслідок піролізу (розкладу великих хімічних структур за допомогою тепла) з'являються газові продукти, такі як водяна пара, CO₂, CO, леткі сполуки внаслідок розкладу вуглеводів, білків і жирів, які є причиною збільшення об'єму зерна, який починає набувати коричневого забарвлення, а цукри карамелізуються.

У цей момент починається фаза розкладу, що характеризується руйнуванням клітинної структури зерен через внутрішній надлишковий тиск, виробленням диму та появою аромату кави. У цей момент ендотермічні реакції досягають свого максимуму. Пізніше починаються екзотермічні реакції через тепло реакції всередині зерна, що призводить до досягнення зерном температур приблизно до 200°C. Після досягнення оптимальної карамелізації цукрів досягається повне обсмаження при якому вміст води знижується до значень від 1,5% до 3,5% за вагою [4, 6]. Зона обсмаження знаходиться між 180°C та 250°C при цьому оптимальна температура становить від 210°C до 230°C вище цієї відбувається передсмаження при якому посилюється виділення диму, зерна чорніють, об'єм більше не збільшується і в найгіршому випадку вони обвуглюються, стають більш крихкими і аромат зникає. Щоб зупинити процес обсмажування кави, необхідно забезпечити швидке та негайне охолодження зерен або за допомогою потоку повітря або зрошенням водою. Температура обсмажування дуже важлива, оскільки вона має сильний вплив на якість кави. Тривалість обсмажування становить приблизно від 5 до 12 хвилин (за даних умов). Цей час змінюється в залежності від обладнання, що використовується, та кількості доданих кавових зерен.

1.4 Етапи процесу обсмажування кави

В загальному випадку увесь процес обсмаження можна розділити на три етапи: сушіння, обсмаження та охолодження. Повільне виділення води та інших летучих речовин відбувається на етапі сушіння. Потім відбуваються реакції обсмаження, що призводить до значних змін хімічних та фізичних властивостей зерна, які необхідні для формування аромату [10]. Коли кава обсмажена до бажаного ступеня то кавові зерна негайно виймають з камери обсмаження і починається останній етап – фаза охолодження. Свіже обсмажена кава швидко охолоджується, щоб запобігти передчасному обсмаженню та завершити

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

екзотермічні реакції, що відбуваються в зернах на пізніх етапах обсмаження. Існують різні методи охолодження, проте найчастіше зерна або обприскують водою перед тим, як вийняти з камери обсмаження або їх виймають з обсмажувача та охолоджують повітрям.

Під час обсмажування відбувається п'ять етапів, які називаються етапами сушіння, пожовтіння, «перший тріск», розвиток обсмаження та «другий тріск». Швидкість з якою досягаються ці етапи під час обсмажування визначається як профіль обсмаження [10]. Цей профіль обсмаження потрібно уважно відстежувати, щоб кожне обсмаження можна було відтворити в межах часу та температури. Криві обсмаження – це конкретні рекомендації, які встановлені для перетворення зеленого кави на смажену каву. Їх визначення та мета полягають у досягненні певної якості та точної послідовності процесу обсмаження кавових зерен. Існують три системи застосування кривих обсмаження: перша передбачає використання трьох рівнів тепла. Вона починається з фази високої температури для висушування вологи, потім настає фаза середньої інтенсивності і фаза меншої інтенсивності для завершення оптимальної розробки продукту [4]. Друга система використовує постійне тепло протягом усього процесу, тоді як третя базується на підході протилежному першому. Серед обсмажувачів найпоширенішим методом є перший, оскільки він більш ефективно використовує енергію та підкреслює властивості продукту. Зазвичай контролюють колір зерна після обсмаження. Однак колір отриманої меленої кави (завжди з однаковою гранулометриєю помелу) зазвичай є більш надійним, оскільки зовнішній відтінок зерна може відрізнятись від внутрішнього.

Процес обсмаження кави можна кількісно охарактеризувати на графіку, який називається кривою обсмаження. Графік показує температуру при якій обсмажується кава, залежно від часу. Вони мають величезне значення у розвитку технологій процесу обсмаження, оскільки на них показано етапи, які проходять зерна кави, і змінюючи їх, можна змінити характеристики самої кави. Зазвичай графіки починають показувати попередній розігрів машини, коли вона порожня, через кілька хвилин спостерігається падіння температури через тепловий обмін шляхом природної конвекції між машиною та навколишнім середовищем, це відбувається, тому що машину відкривають для поміщення кави [5]. Наступний сегмент графіка показує позитивний нахил, що означає, що машина нагрівається з часом до точки відомої як «перший тріск» (за своїм звуком), коли кава починає змінювати свої хімічні характеристики і збільшує обсяг. Далі каву виймають з машини і поміщають у охолоджувач, щоб знизити її температуру і тим самим зупинити процес обсмаження. Важливо зазначити, що час та температура залежать від кави та характеристик, які їй хочуть надати, у випадках, коли потрібно більш обсмажена кава, її доводять до «другого тріску». Етапи обсмаження кавових зерен наведено на рисунку 1.5.

Етап 1 сушіння. Під час процесу обсмаження кавові зерна змінюють колір з світло-зеленого на темно-коричневий. Проте це не може відбутися у присутності води і оскільки сирі кавові зерна зазвичай містять 7-11% вологи, рівномірно розподіленої по густій структурі зерен, вода спочатку повинна

випаруватися. Коли обсмажування починається потрібна велика кількість енергії та тепла, оскільки кавовим зернам потрібен певний час, щоб поглинути достатньо тепла для початку випаровування [10]. Втрата вологи не починається і не закінчується на етапі сушіння, а відбувається постійно протягом усього процесу обсмаження. Це просто основна зміна, яка відбувається на цьому етапі і це важливо для всіх інших змін, які можуть відбуватися під час обсмаження.

Етап 2 пожовтіння. Кавові зерна починають змінювати колір, щойно випарується достатня кількість вологи. Саме на цьому етапі цукри розщеплюються з утворенням кислот, і зерна виділяють аромат, схожий на запах хліба. В міру просування цього етапу кавові зерна починають збільшуватися в об'ємі, що призводить до розтріскування сріблястої оболонки зерен і утворення лузги. Під час процесу обсмаження лузгу необхідно відокремити від зерен, щоб запобігти ризику загоряння, що досягається завдяки потоку повітря через обсмажувальну машину.

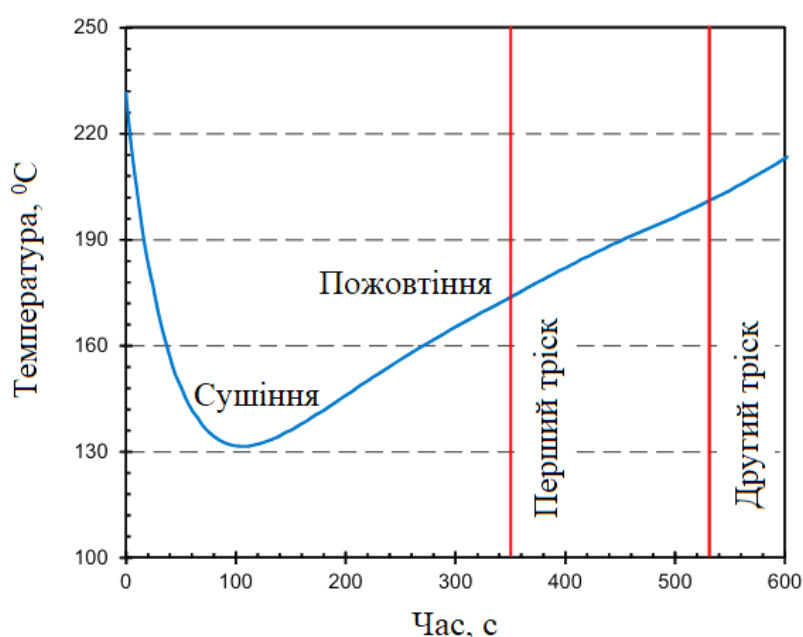


Рисунок 1.5 – Етапи сушіння кавових зерен

Етап 3 «перший тріск». Звуки, які видають зерна є найпростішим показником рівня обсмаження. Вони видають певні шуми під час процесу обсмаження і ці шуми є точним показником рівня обсмаження. Звуки називають «трісками» і існують дві різні тріски, які відбуваються у два різні періоди часу під час обсмаження. Два різні періоди називають «першим тріском» та «другим тріском». Під час обох цих періодів звуки з'являються повільно. Спочатку помітний лише поодинокий «тріск» за яким через кілька секунд слідує інший. Частота цих звуків поступово збільшується і вони стають дедалі швидшими. Після деякого часу прогресія звуків знову сповільнюється і зрештою зовсім стихне [6, 9]. Перший тріск відноситься до конкретного періоду часу, протягом якого будуть чути схожі звуки. Під час цього періоду кавові зерна мають світло-коричневий колір і пар із запахом трави змінюється на м'який, більш сухий дим. Обсмажена кава впливатиме на відмінності у звуках,

гучності та швидкості тріскотіння. У деяких сортах ці два періоди також частково перекриваються, що ускладнює визначення того, коли закінчується «перший тріск», а починається «другий тріск».

Усередині зерна відбувається накопичення газів, яке складається переважно з вуглекислого газу та трохи водяної пари, як тільки колір змінюється більш швидко. Накопичення газів підвищує тиск всередині зерна до такого рівня, що воно стає занадто високим і зерно лопається, що зазвичай відоме як «перший тріск». У цей момент можна почути тріскаючий звук, а зерно розширюється майже вдвічі від свого початкового об'єму. Перший тріск зазвичай відбувається, коли температура обсмаження досягає 175-185°C. Звук тріску починається дуже повільно та тихо, коли тріскають перші кілька зерен, а коли більше зерен досягають цього стану то шум прискорюється поки не досягає точки з якої починає зменшуватися. Може знадобитися до 2 хвилин, щоб «перший тріск» почався і закінчився, проте чим вища температура обсмаження, тим коротшим буде «перший тріск» [10]. Після того, як почуто «перший тріск», обсмаження можна зупинити в будь-який момент, оскільки саме на цьому етапі розвиваються аромати кави. Незважаючи на те, що в обсмажувач додається така ж кількість тепла, швидкість з якою температура кавових зерен підвищується, на цьому етапі суттєво зменшується. Однак, якщо тепла буде недостатньо, кавові зерна припинять обсмажування і почнуть запікатися, що призведе до поганої якості обсмажування.

Етап 4 розвиток обсмаження. Після досягнення першого тріску формується характерний аромат, що приписується каві. Цей етап розвитку визначає ступінь обсмаження і, отже, колір зерен у кінцевому обсмаженні. Тепер майстер-обсмажувач контролює баланс між кислотністю та гіркотою у кінцевому продукті, оскільки у міру розвитку кислотність у зернах швидко знижується, а гіркота зерен починає зростати.

Етап 5 «другий тріск». Після завершення «першого тріску» зазвичай настає період приблизно однієї хвилини перед початком другого тріску. До цього часу зерна мають темний відтінок коричневого. Другий тріск може бути трохи важче почути, оскільки ці звуки тихіші але як тільки людина навчиться відрізняти цей звук, його неможливо сплутати. Це більш приглушений, тонкий звук, ніж перший тріск [9]. Зазвичай, коли другий тріск повністю починається, окремі тріски відбуваються значно частіше, ніж звуки під час першого тріску. Початок другого тріску є показником того, що кава майже готова і смажання слід завершити дуже скоро. Коли «другий тріск» починає слабшати то більшість видів кави знаходяться майже в кінці бажаного смакового профілю, а коли другий тріск припиняється то зерна на межі псування і наближаються до точки займання [10]. Кавові зерна починають тріскати через подальше накопичення CO₂, проте цього разу це м'якіший, більш різкий звук і зазвичай відбувається, коли температура обсмаження досягає значень вище 200°C. На цьому етапі масла вивільняються на поверхні зерна і може спостерігатися, як він вивільняється через пори кавових зерен. Вся кислотність розклалася і в результаті обвуглювання або підгоряння розвинувся універсальний смак обсмаження. Тому, коли досягається «другий тріск» якість кави змінена, а

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

властиві смажені аромати, що розвинулися під час обсмаження, втрачені при цьому кінцевий продукт має високий вміст гіркості.

На основі вище зазначеного можна вважати, що етап обсмаження кави є фундаментальним у процесі її приготування. Під час процесу обсмаження зелені кавові зерна піддаються впливу високих температур протягом певного часу. У цей проміжок часу кава втрачає вагу в межах від 15% до 20%, головним чином через випаровування води і, в меншій мірі, через піроліз деяких активних компонентів. Обсмаження кави є життєво важливим етапом у її виробничому ланцюжку.

Зазначено, що машина для обсмажування кави – це спеціалізоване обладнання, яке передає тепло кавовим зернам потоком гарячого повітря, постійно перемішуючи зерна, щоб вони обсмажувалися рівномірно. У сучасній індустрії спеціальної кави використовуються кілька типів обсмажувачів: барабанні, з псевдозрідженим шаром, рециркуляційні. Барабанні обсмажувачі – найпоширеніші та традиційні обсмажувачі, де велика частина процесу здійснюється за допомогою повітря (конвекційно) але також і через контакт з гарячою поверхнею (провідниково). Використовують обертовий барабан в який поміщаються зерна кави та обсмажуються за допомогою непрямого тепла.

Обсмажувачі з псевдозрідженим шаром поєднують принцип роботи барабанних і конвекційних систем. Використовують гаряче повітря для обсмажування кавових зерен під час їх руху всередині камери обсмажування. Теплопередача, що відбувається в обсмажувачі з псевдозрідженим шаром, майже виключно здійснюється за допомогою конвекції. Великі об'єми повітря, попередньо нагрітого відкритим вогнем надходять у камеру обсмаження знизу, де гаряче повітря одночасно циркулює й нагріває рухомі зерна. Конвекційні обсмажувачі працюють шляхом нагрівання повітря та циркуляції його навколо кавових зерен для їх рівномірного обсмажування. Принцип роботи схожий з барабанною системою, проте різниця полягає в тому, що тепло передається повністю за допомогою конвекції і практично без теплопровідності, що дозволяє здійснювати обсмажування швидше.

Аналіз наукових джерел дав змогу виявити, що у процесі обсмаження кавових зерен існують три основні змінні, які мають значний вплив: температура, вологість і час. Температура у процесі обсмаження кави є ключовим фактором, який залежить від кількох аспектів, таких як тип обладнання, час обсмаження та інтенсивність бажаного кінцевого кольору. Температура та вологість є фундаментальними змінними у процесі обсмажування кави. Температура контролюється на різних етапах обсмажування та впливає на смак і органолептичні властивості кави.

В загальному випадку увесь процес обсмаження можна розділити на три етапи: сушіння, обсмаження та охолодження. Повільне виділення води та інших летучих речовин відбувається на етапі сушіння. Потім відбуваються реакції обсмаження, що призводить до значних змін хімічних та фізичних властивостей зерна, які необхідні для формування аромату. Коли кава обсмажена до бажаного ступеня то кавові зерна виймають з камери обсмаження і починається останній етап – фаза охолодження.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ БАРАБАННОГО ОБСМАЖУВАЧА ДЛЯ КАВОВИХ ЗЕРЕН

2.1 Функціональна схема системи обсмаження кави

Процес обсмаження кави є критичним у промисловому виробництві сировини, оскільки він безпосередньо впливає на кінцеву якість зерна. Мета процесу полягає у зниженні вологості кави до належного рівня для її зберігання та комерціалізації, запобігаючи поширенню плісняви та грибків, які можуть пошкодити продукт. Тому дизайн обладнання має вирішальне значення для процесу обсмажування кавових зерен та повинен виконувати функції [9, 24]:

- нагрівання камери обсмажування до відповідної температури;
- підтримання температури обсмажування протягом встановленого часу;
- обсмажувальна машина повинна бути ергономічною;
- конструкція повинна забезпечувати стабільність обсмажувача;
- машина повинна мати електричну систему керування.

Тому спочатку зробимо аналіз основних характеристик систем обсмаження, які наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики систем обсмаження [15]

Параметр	Тип обсмажувача	Характеристика
Потік продукту	– періодичний; – безперервний	Періодичні машини забезпечують більшу гнучкість процесу та контролю.
Механічний дизайн	– горизонтальний барабан; – вертикальний барабан (з перемішувальними лопатями); – вертикальна обертаюча чаша; – флюїдизоване обладнання	Головне завдання механічного перемішування полягає в досягненні однорідного обсмаження та запобіганні підгорянню зерен. Рух зерен забезпечується як механічним обертанням так і потоком обсмажувального газу.
Передача тепла	– провідність; – конвекція; – випромінювання	Обсмажувачі зазвичай містять усі три типи теплопередачі але їхній відносний внесок у загальний теплоперенос може значно відрізнятися залежно від типу апарату. Конвекція домінує в сучасних промислових процесах.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Борисенко			Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен			Літ.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Цвіркун								23		17	
Н. Контр.		Омельченко						ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					
Затверд.		Цвіркун											

Співвідношенн я повітря/зерно	Значення цього співвідношення варіюється від 1 у типовому конвективному процесі до 150 у системах повністю на псевдозрідженому шарі.	Відношення визначається як кг гарячого повітря поділені на кг зеленого кави. Відношення є характерним параметром у кожному процесі та залежить від ступеня обсмаження.
----------------------------------	--	---

На основі аналізу обрано барабанний обсмажувач для кави, який складається з обертового циліндричного барабана розташованого горизонтально на осі з газовими пальниками, що розташовані під барабаном. Вентилятор всмоктує та видаляє дим та різні побічні продукти обсмаження через компонент, що називається циклоном. Обертання барабана переміщує зерна, поки вони поглинають тепло шляхом теплопровідності від прямого контакту з гарячим барабаном та конвекції від повітря, що проходить через барабан [9]. Після обсмаження зерна охолоджуються у бункері для охолодження. Побічні продукти обсмаження виводяться з барабана для обсмаження через димохід після проходження через циклона, який ловить лушпиння. Система базується на обертовому барабані встановленому на осі, яка передає йому рух. Барабан розташований всередині камери згоряння, де відбувається передача тепла за рахунок циркуляції гарячого повітря від пальників. Камера покрита шаром скловолокна, що запобігає втраті тепла в навколишнє середовище.

Серед різних типів обсмажувальних машин, що використовуються в промисловості найбільш поширеними є ті, що мають горизонтальний повний або перфорований барабан. Перфорований дизайн забезпечує більший теплопередачу за рахунок конвекції порівняно з машинами з повним барабаном. Хоча велика горизонтальна обсмажувальна машина може працювати безперервно через зростаюче різноманіття кавових продуктів існує тенденція до збільшення використання менших барабанних обсмажувальних машин для партійного обсмаження [15]. Обсмажування кавових зерен за допомогою апарата з псевдозріденим шаром базується виключно на передачі тепла конвекційним шляхом. Тут потік гарячого повітря високої швидкості обдуває зерна знизу обсмажувальної машини. Таким чином, гаряче повітря одночасно підвішує та нагріває зерна, дозволяючи здійснити ефективне та рівномірне обсмаження. Процес обсмаження можна легко регулювати, змінюючи температуру та швидкість потоку гарячого повітря.

Спочатку будуть встановлені параметри, які визначатимуть дизайн обсмажувальної машини. Для цього були проаналізовано три різні варіанти дизайну машини, враховуючи обслуговування та зручність використання для операторів, які користуватимуться машиною. Як зазначалося раніше, існує три типи кавових обсмажувальних машин: з суцільним барабаном, з перфорованим барабаном та з псевдозріденим шаром. З цих трьох варіантів було обрано здійснення оптимізації обсмажувальної машини з суцільним барабаном через її

простоту у використанні та обслуговуванні. Параметри барабанного обсмажувача наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри барабанного обсмажувача

Параметр	Значення
Завантажуваність кави, кг	15
Час прожарювання, хв	12
Максимальна температура, °C	220
Система нагрівання	Газові пальники

Функціональна схема системи обсмаження кави наведена на рисунку 2.1. Аналіз основних компонентів барабанного обсмажувача наведено в таблиці 2.3.

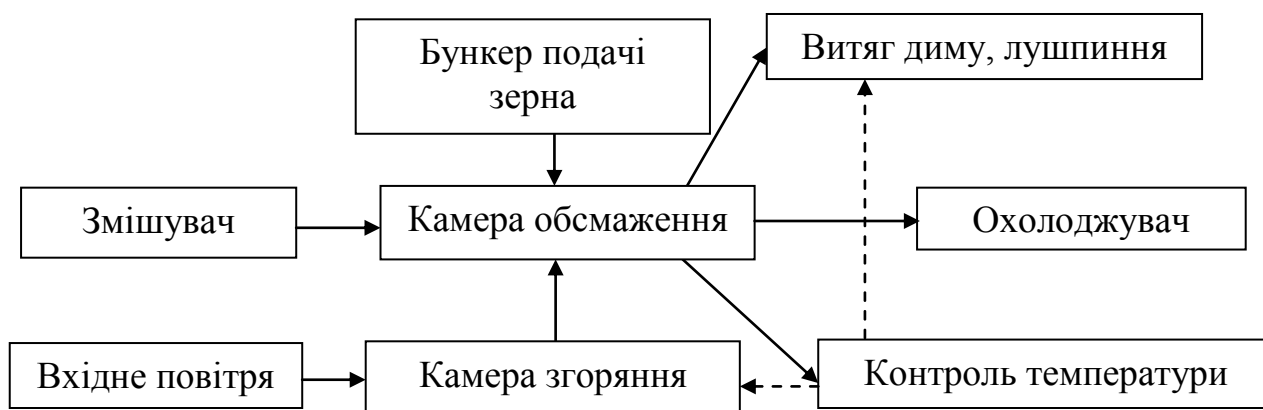


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи обсмаження кави

Таблиця 2.3 – Аналіз основних компонентів барабанного обсмажувача

Компонент системи	Функція
Бункер подачі зерна	Завантажувальний бункер дозволяє каві потрапляти в камеру обсмаження, щоб почати процес обсмаження кави. Має бути ідеально спроектований, щоб забезпечувати постійний потік зерна (легше досягається за допомогою бункерів круглої форми).
Камера обсмаження	Камера обсмаження – це найважливіше місце машини, оскільки саме тут відбувається контакт кави з гарячим барабаном завдяки потоку тепла, що подається атмосферним пальником. Відбувається обсмажування кави шляхом передачі тепла від стінок барабана (кондукція) та потоків гарячого повітря (конвенція).
Камера згоряння	Ізольований відсік, де спалюється паливо для генерації тепла. Її основне завдання перетворити енергію палива на теплову енергію, яка потім передається зерну через стінки барабана та потік повітря.

Атмосферна пальник	Атмосферна пальник відповідає за надання тепла камері згоряння, після цього циліндр обсмажувальної машини нагрівається за допомогою теплопровідності та конвекції, щоб можна було обсмажувати каву. Пальник має здатність збільшувати або зменшувати потік тепла, щоб підтримувати бажану температуру для обсмажування кави.
Змішувачі для кави	Відіграють критичну роль у забезпеченні рівномірного обсмаження кавових зерен. Вони мають постійно перемішувати кавове зерно, щоб тепло рівномірно проникало в кавове зерно, а постійний рух запобігатиме утворенню гарячих точок або застійних зон.
Охолоджувач	Критично важливий вузол, який зупиняє процес обсмаження кавового зерна відразу після вивантаження з барабану. Циліндр охолодження відповідає за постійне обертання протягом 30 хвилин, щоб кава поступово втрачала температуру і після цього могла бути збережена.
Контроль температури	Датчики здійснюють контроль потоку тепла, перевіряють рівні температури відповідно до витраченого часу.

2.2 Оптимізація підсистем барабанного обсмажувача

Після того як кава потрапляє в обертовий барабан для обсмаження приблизно через 5 секунд здійснюється ввімкнення пальника. Пальник подає тепло, щоб барабан досяг приблизно температури 200°C з коливанням $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Процес обсмаження триває 18 хвилин. Після того як барабан підтримується на зазначеній для обсмаження температурі та після закінчення 18 хвилин барабан продовжує обертатися ще 2-3 хвилини, щоб обсмажена кава перемістилася в охолоджувальний барабан [3]. Процес охолодження кави триває приблизно 30 хвилин, далі кава розміщується в охолоджувальному циліндрі та починається обертальний рух, щоб вона поступово втрачала температуру обсмаження і досягала температури, яка варіюється від кімнатної до приблизно 27°C . Після закінчення 48 хвилин процесу обсмаження та охолодження система вимикається і процес завершується. Розглянемо основні компоненти барабанного обсмажувача.

Промислова обсмажувальна машина для кави наведена на рисунку 2.2. Обсмажувальна машина оснащена каналом, через який вся маса газів, що утворюється під час цієї операції, виводиться назовні за допомогою відцентрового вентилятора [22, 25]. Газу є продуктами згоряння дизельного палива, газами самої кави, що виділяються з зерен під час обсмаження та

паровою масою, яка утворюється при видаленні вологи з зерен. Через їхню забруднюючу здатність перед викидом в атмосферу вони спалюються за допомогою пальника, підключеного до димової труби, що називається димовим пальником.

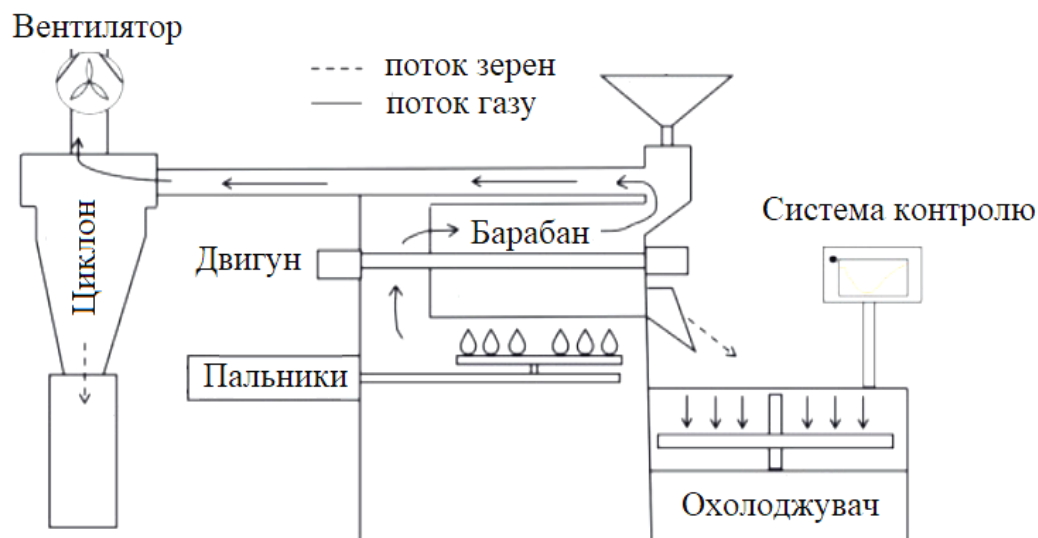


Рисунок 2.2 – Схема промислової обсмажувальної машина для кави

Зерновий бункер для сирової кави – це резервуар конічної форми у якому накопичується продукт для обсмажування. Завантажувальний бункер дозволяє каві потрапляти в камеру обсмаження, щоб почати процес обсмаження кави. У більш автоматизованих машинах зазвичай використовують заслінку з сервоприводом, керовану електропневматичним циліндром автоматично. Зерна потрапляють у барабан для обсмаження через завантажувальний бункер, де подається необхідне для обсмаження тепло [3, 15]. Бункер, а саме вхідний канал і вхідна насадка повинні бути ідеально зібрані та спроектовані так, щоб забезпечувати постійний потік матеріалу, що легше досягається за допомогою бункерів круглої форми, хоча вони дорожчі та складніші у виготовленні, ніж бункери прямокутної форми. Бункер має здатність зберігати 8 кг сухої кави, відомо, що щільність кави може варіюватися між 380 та 450 кг/м³, для розрахунку приймається найгірший випадок 380 кг/м³, тому що коли кава має таку щільність, обсяг 8 кг кави більший.

Об'єм бункера [11]

$$\rho = \frac{m}{V}$$

де ρ – густина, кг/м³;

m – маса, кг;

V – об'єм, м³.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = 21052,63 \text{ cm}^3$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$V = 0,02105 \text{ м}^3$$

Після того як обчислено об'єм, який займає 8 кг кави, Здійснено розрахунок розмірів, бункера, що містить каву [11]

$$V = l^2 \cdot h$$

де l – сторона квадрата, см;

h – висота призми, см;

V – об'єм, см³.

$$h = \frac{V}{l^2}$$

$$h = 33,68 \text{ см}$$

Вважається за доцільне встановити у верхній частині бункера датчик мінімального рівня, який дозволить електронним контролерам перевіряти наявність або відсутність сирової кави, а у його основі встановити клапан, який дозволить здійснювати розвантаження сировини.

Камера обсмаження – це найважливіше місце машини, оскільки саме тут відбувається контакт кави з гарячим барабаном завдяки потоку тепла, що подається атмосферним пальником. Відбувається обсмажування кави шляхом передачі тепла від стінок барабана (кондукція) та потоків гарячого повітря (конвенція). Барабан для обсмаження – це металевий моторизований обертовий барабан із перфорованими або суцільними стінками, призначений для утримання та перемішування кави протягом усього процесу обсмаження. Розміри та характеристики барабана мають бути спроектовані так, щоб забезпечити максимальний теплообмін між зернами кави та гарячим повітрям, що надходить від генератора тепла.

На внутрішніх стінках приварені відповідно орієнтовані лопаті, які перемішують масу кави, підвищуючи ефективність теплопередачі. Вся камера обсмаження ізольована, зводячи до мінімуму розповсюдження тепла за межі машини [15]. Обертовий барабан знаходиться всередині камери обсмажування – це циліндр з нержавіючої сталі, який забезпечує обсяг, час і температуру, встановлені та відповідні для типу машини. Велика частина процесу обсмажування відбувається за допомогою повітря (конвективно), але також через контакт з гарячою поверхнею (провідниково). Розміри камери обсмажування визначаються кількістю продукту, що підлягає обсмажуванню. Для нагрівання продукту гаряче повітря циркулює як через обертовий барабан обсмажування так і навколо нього. Теплова енергія передається шляхом теплопровідності через контакт зерна з барабаном обсмажування (близько 30%) і шляхом конвекції через повітряний потік всередині барабана (близько 70%), що забезпечує [3]:

- обсмажування кави рівномірно шляхом обертання з постійною швидкістю;
- підтримування стабільної температури протягом необхідного часу;

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– отримання належної властивості кави.

Камера обсмажування зберігає тепло, дозволяючи каві обсмажуватися.

Функції камери обсмажування машини:

– генерувати тепло завдяки пальникам;

– зберігати тепло всередині камери, щоб кава обсмажувалася.

Барабан повинен мати циліндричну форму та бути здатним містити 8 кг кави, об'єм кави після обсмаження подвоюється, а вага зменшується наполовину, тому початковий об'єм кави має бути меншим або рівним 40% об'єму циліндра через збільшення після процесу обсмаження, а також через те, що всередину барабана буде введено систему перемішування.

Об'єм циліндричного барабана [11]

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot h$$

де r – радіус циліндра, см;

h – висота циліндра, см;

V – об'єм, см³.

$$h = \frac{V}{r^2 \cdot \pi}$$

$$h = 51,70 \text{ см}$$

Маса порожнього циліндра [16]

$$m = \rho \cdot V$$

де m – маса циліндра;

ρ – щільність;

V – об'єм порожнього барабана.

$$V = \pi \cdot h(R_o^2 - R_i^2)$$

$$V = \pi \cdot (0.6m) \cdot (0.182^2 - 0.18^2)m^2 = 1.3647 \times 10^{-3} m^3$$

$$m = \left(7900 \frac{kg}{m^3}\right) \cdot (1.3647 \times 10^{-3})m^3 = 10.78kg$$

Кутове прискорення отримується шляхом ділення швидкості барабана на час запуску електродвигуна

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$

$$\omega = 40rpm = \frac{4}{3} \cdot \pi \left(rad/s \right)$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Крутний момент [16]

$$\alpha = \frac{\frac{4\pi}{3}}{3} = \frac{4\pi}{9} \text{ rad/s}^2$$

$$\tau = 0.5815 * \frac{4\pi}{9} = 0.811 \text{ N} * \text{m}$$

Смаження кави є головною стадією її промислового процесу. На цьому етапі кавові зерна зазвичай обсмажують при температурах близько 200°C, надаючи каві бажані характеристики смаку, кольору та структурні властивості. Фізико-хімічні зміни, що відбуваються під час смаження є складними і залежать від взаємодій між матеріалами та параметрами процесу. У процесі смаження тепло передається зеленим кавовим зернам за допомогою гарячого повітря, що перебувають у прямому контакті із зернами [15]. Підвищення температури спричиняє випаровування вологи в ендотермічному процесі. При подальшому накопиченні тепла всередині кожного зерна починаються екзотермічні реакції, внаслідок чого утворюються леткі речовини та CO₂. Через ці термічні реакції внутрішній тиск зерна значно зростає, що призводить до його розширення і, відповідно, до тріщини. Зерно збільшує свій об'єм приблизно на 30%, тоді як його маса зменшується приблизно на 15-20% через випаровування води, що його складала.

Процес обсмажування кави починається з висихання вологи із зерна, яка зазвичай становить близько 12%. Після цього зерно починає розширюватися, і, відповідно, розвиваються хімічні реакції. Приблизно за 170°C кава набуває кремового кольору і відбувається перше потріскування або хрускіт, інтенсивність якого варіюється залежно від типу та свіжості кави [4]. Цукри починають карамелізуватися набуваючи більш темного відтінку і шкірка зерна відділяється. Починаючи з 190°C кава знову потріскує і повністю розвиваються її аромати та газу. Кінцева температура, залежно від типу обладнання та бажаного кольору може варіюватися від 200°C до 240°C (ці значення стосуються температури продукту, оскільки температура виходу з пальника може досягати 500°C).

Характеризується підвищенням температури зелених кавових зерен до того моменту, коли вони досягають стану хімічних та фізичних змін через поглинуте тепло. Тепло має рівномірно проникати в кожну зерно, а постійний рух запобігатиме утворенню гарячих точок або застійних зон. Такі фактори, як щільність зерен, вологість і конструкція барабана, також впливають на результати. Наприклад, зерна різного розміру або рівня вологості можуть обсмажуватися нерівномірно, якщо їх не контролювати належним чином [21]. Тепло потрапляє в зерна через провідність (прямий контакт із барабаном) та конвекцію (циркуляція гарячого повітря). Наприклад, якщо провідність домінує, зерна, що торкаються барабана можуть обгоріти, тоді як інші залишаються недорозвиненими. Щоб це досягти рівномірного нагріву кавового

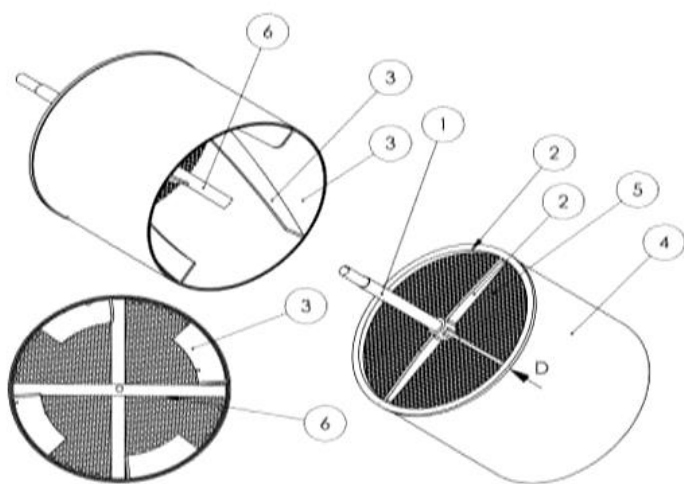
					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

зерна потрібно, щоб усі зерна отримували тепло, тому необхідно мати ефективний спосіб перемішування зерен.

На сьогоднішній день способи обсмаження полягають у застосуванні гарячого повітря до циліндра, який рухається для перемішування зерен. Рухи можуть бути різними, найпоширеніший – це циліндр, що обертається навколо своєї осі але також існують способи перемішування кави за допомогою обертання осей з лопатками або виконання тангенціальних чи відцентрових рухів. Проте методи перемішування кави призводять до того, що зерна не отримують однорідного обсмаження через теплопередачу шляхом проведення внаслідок постійного контакту зерна з контейнером. Через використані методи змішування (обертові металеві елементи) зерна кави не отримують однорідного обсмаження, що знижує якість кави. Основні напрямки модернізації лопатей для рівномірного перемішування кавових зерен у процесі обсмаження наведено в таблиці 2.4, рисунок 2.3.

Таблиця 2.4 – Основні напрямки модернізації лопатей для рівномірного перемішування кавових зерен у процесі обсмаження

Тип	Характеристика
Двосторонній змішувач	Забезпечує рух зерна в двох напрямках: обертанням барабана та від задньої стінки до передньої. Гарантує, що кавове зерно не затримується в «мертвих зонах» і рівномірно отримує тепло.
Спіральний змішувач	Замість паралельних лопатей доцільно використовувати похилі або спіральні лопаті, що сприятиме не лише кращому перемішуванню зерна, а й ефективному вивантаженню.



- 1 – вал циліндра;
- 2 – опорне кільце;
- 3 – внутрішній циліндр з лопотями;
- 4 – зовнішній циліндр;
- 5 – перферована кришка;
- 6 – внутрішні лопаті.

Рисунок 2.3 – Двосторонній змішувач

Вважається за доцільне для того, щоб тепло рівномірно проникало в кожне кавове зерно, а постійний рух запобігав утворенню гарячих точок або застійних зон застосовувати у лопаті протилежного розташування для

рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Конструкція лопатей забезпечить рух зерна в двох напрямках: обертанням барабана та від задньої стінки до передньої. Гарантує, що кавове зерно не затримується в «мертвих зонах» і рівномірно отримує тепло. Також запропоновано, щоб наприкінці обсмажування барабан обертався у зворотному напрямку для вивантаження кави на лоток для охолодження, який увімкнеться синхронно, коли барабан змінює напрямок обертання. Для системи контролю швидкості барабана доцільно встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання, що дозволить уникнути пошкоджень кавового зерна та забезпечить рівномірний теплообмін.

Пальники – це пристрої для промислових теплових установок за допомогою якого в їхню топку вводиться газоподібне або рідке паливо так, щоб воно горіло рівномірно та повністю, максимально використовуючи його теплотворну здатність [3, 15]. Камера згоряння – це термічно ізольована зона обсмажувальної машини в якій відбувається згоряння палива та розвивається полум'я. Зона підтримується під тиском за допомогою електровентильатора. Горілки – це обладнання, де відбувається горіння, тому вони повинні містити три вершини трикутника горіння, тобто забезпечувати змішування палива з повітрям, а також надавати енергію активації. За способом забору повітря для горіння розрізняють два типи пальників: атмосферні та механічні пальники.

Атмосферні пальники використовуються виключно для газоподібного палива. Частина повітря, необхідного для горіння (первинне повітря) подається безпосередньо у сам пальник через струмінь газу, що виходить із форсунки (ефект Вентурі), а залишкове повітря (другорядне повітря) надходить шляхом дифузії навколишнього повітря навколо полум'я [3]. У такого типу пальниках виникають горіння з високими коефіцієнтами надлишку повітря. Енергія активації забезпечується за допомогою полум'я, яке має горіти постійно або автоматичними запалюваннями. Регулювання газу здійснюється шляхом зміни тиску в інжекторі (поступово відкриваючи та закриваючи газовий клапан), що дозволяє регулювати пальник з відносною легкістю. Регулювання повітря (при постійному тиску газу) можна здійснити:

- змінюючи перетин вхідного отвору повітря, перекриваючи отвори, через які він надходить, за допомогою нарізних дисків, рухомого кільця або ковзаючого ковпачка;

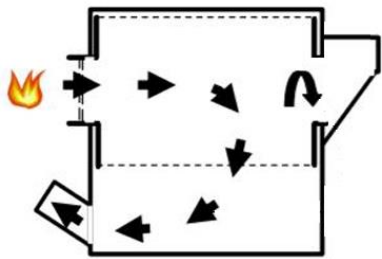
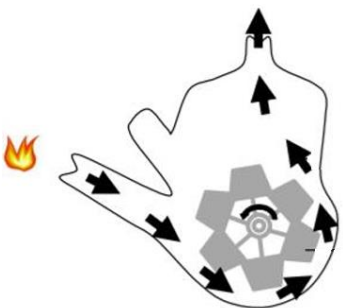
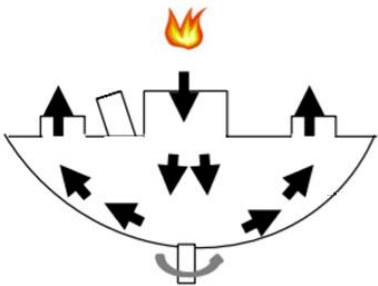
- переміщуючи сопло інжектора.

Газ виходить через інжектор з певною швидкістю і надходить через секцію А конуса впуску горілки. Швидкість з якою рухається рідина, спричиняє зниження статичного тиску (невеликий вакуум) і оскільки повітря, що оточує зону знаходиться під атмосферним тиском то воно буде змушене пройти через конус впуску горілки. Цей ефект посилюється формою горілки, оскільки існує зменшення перерізу, який збільшує швидкість надходження робочої рідини і тим самим ще більше знижує статичний тиск, посилюючи всмоктування повітря через секцію А всмоктувального конуса. Кількість первинного повітря, що вводиться з газом має бути достатньою для правильної роботи згоряння і щоб не виникали проблеми, такі як відрив або повернення полум'я.

Конструкція пальника та форсунки є ключовою для досягнення відповідної попередньої суміші. Після того як первинне повітря та газ проходять через Вентурі, вони повинні тісно змішуватися і цього досягають завдяки конструкції трубки, яка також сприяє правильному розподілу цієї суміші по кожній щілині корони, формуючи таким чином полум'я невеликого розміру. Пальники попередньої суміші дозволяють отримати [3]:

- полум'я синього кольору та невеликого розміру, що робить можливим використання більш компактних камер згоряння;
- дуже високу температуру газів згоряння, що забезпечує високу ефективність;
- дуже чисте згоряння з низьким утворенням сажі (незгорілих часток) та майже нульовим утворенням вуглецю. Системи нагрівання (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Системи нагрівання

Тип	Характеристика	Механічний принцип
Горизонтальний барабанний обсмажувач	Нагрівання відбувається переважно за допомогою конвекції через потік гарячого повітря та за допомогою теплопровідності, використовуючи теплі стінки барабана.	
Вертикальна барабанний обсмажувач	Спосіб нагрівання головним чином конвективний за допомогою потоку гарячого повітря.	
Обсмажувач з обертовою чашею	Спосіб передачі тепла переважно конвективний за допомогою потоку гарячого повітря. Зерна кави потрапляють у центр чаші і переміщуються до периферії завдяки спільній дії центробіжної сили та потоку повітря.	

Атмосферна пальник відповідає за надання тепла камері згоряння, після цього циліндр обсмажувальної машини нагрівається за допомогою теплопровідності та конвекції, щоб можна було обсмажувати каву. Пальник має здатність збільшувати або зменшувати потік тепла, щоб підтримувати бажану температуру для обсмажування кави. Вважається за доцільне, щоб пальник мав вбудований сенсор полум'я, який дозволяє визначити, чи воно горить, щоб

почати процес, бо в іншому випадку процес не починається, щоб уникнути витоку газу та можливих аварій. Також доцільно застосовувати терморегулятор для керування газовими пальниками з метою того, щоб коли температура барабана досягне 250°C припинявся потік газу для запобігання пошкодженню кавомашини внаслідок теплового розширення матеріалів або пошкодження мотор-редуктора.

Витяжний вентилятор – це центробіжний електровентилятор, спеціально призначений для всмоктування викидів з барабана для обсмаження, включаючи домішки, що виділяються продуктом під час обсмажування. З метою правильного регулювання температури та об'ємів повітря всередині обсмажувальної машини, система керування забезпечує модуляцію швидкості роботи через інвертор [15, 16]. Основний засіб, який використовується для маніпулювання потоками тепла через конвекцію. Деякі обсмажувачі розроблені з регулятором на трубі витяжки повітря, який не слід налаштовувати під час обсмажування. Ідея полягає в тому, щоб визначити відповідну настройку і змінювати висоту полум'я для внесення змін у обсмажування. Незалежно від того, як використовується повітряний потік під час обсмажування, варто підкреслити, що регулярне обслуговування та очищення необхідні для підтримання правильного потоку повітря.

Електромеханічна система. Відповідає за забезпечення постійного обертального руху обертового циліндра, щоб кава рівномірно розподілялася по всій машині протягом визначеного часу для забезпечення відповідного обсмаження [3]. Двигун забезпечує необхідний крутний момент для роботи машини. Функції двигуна: приводити вісь у рух, забезпечувати крутний момент для змішування продукту. Двигун відповідає за забезпечення руху ведучого вала за допомогою набору трансмісійних шестерень, які надають необхідну швидкість обертання, щоб кава рівномірно розподілялася і мала гарне обсмаження по всій поверхні циліндра.

Потужність

$$P = \tau * n$$

де τ – крутний момент системи;

n – оберти барабана, об/хв.

$$P = (0.811) * \left(\frac{4}{3} * \pi\right) = 3.397W = 0.003397kW$$

Система охолодження. Після завершення обсмаження кава охолоджується, щоб запобігти подальшому обсмажуванню. Після охолодження зерна піддають очищенню, щоб видалити домішки так само як це роблять перед обсмаженням, коли вони ще зелені. Під час процесу обсмаження в зерні відбувається значна трансформація: цукри карамелізуються, утворюється понад сімсот нових сполук, що сприяють розвитку смаку [4]. Після обсмаження кава містить значну кількість газів. Гази швидко виходять у перші години і поступово зменшуються у процесі, який може тривати до 20 днів. Що стосується втрат то вони варіюються залежно від типу кави (робуста втрачає

більше, ніж арабіка при однаковому процесі та кольорі), вологості зерна, остаточного кольору обсмаження та кінцевої вологості продукту.

Охолоджувач працює за рахунок примусового повітря, через масу зерна. Повітря може подаватися або всмоктуватися вентилятором, спрямовується до маси зерна через розподільчі канали. Ефективність процесу значною мірою обумовлена однорідністю розподілу повітря. Простий феномен аерації зерна можливий через те, що маса зерна є «пористим», а не щільним матеріалом; загальний об'єм, зайнятий зерном, має певний відсоток міжзернових порожнин, через які може циркулювати повітря. Кожен тип зерна характеризується коефіцієнтом пористості, що коливається від 10 до 45%, залежно від природи зерна, форми, вмісту вологи та ущільнення, що більше або менше дозволяє вентилувати масу зерна [3]. Машина для охолодження смаженого зерна кави мають здатність охолоджувати зерна дуже легко та швидко. Завантаження здійснюється безпосередньо з обсмажувача, містить лопаті для обертального перемішування кави протягом кількох хвилин до досягнення кімнатної температури, оснащені повною системою для видалення газів і залишкових плівок. Система працює за рахунок подачі холодного повітря та приводиться в дію обертанням лопатей.

Орієнтовний час процесу охолодження кави після обсмаження становить 4-5 хвилин. Тепло, яке необхідно відібрати від кави після процесу обсмаження, визначається наступним рівнянням.

$$Q = m * C * \Delta T$$

де m – маса кави;

C – теплоємність кави;

ΔT – зміна температури

Об'єм смаженої кави та діаметр піддона для охолодження. Коли досягнуто бажаного рівня обсмаження то кава вивантажується у охолоджувальний піддон, де її охолоджують до кімнатної температури за допомогою обертового лопатевого механізму та вентилятора [3, 16].

$$V = 0.04064m^3$$

$$D = 42cm$$

Площа [16]

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = 1385.44cm^2$$

$$h = \frac{V}{A} = \frac{0.00004064cm^3}{385.44cm^2} \cong 30cm$$

Маси кави, що виходить

Кава втрачає приблизно 20% маси під час процесу обсмаження.

$$15kg * 0.2 = 15 - 3 = 12kg$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$C_p = 1.3556 \frac{kJ}{kg * K}$$

Кількість тепла, яку потрібно видалити

$$Q = (12kg) * \left(1.3556 \frac{kJ}{kg * K}\right) * (152^{\circ}C) = 2472.61kJ$$

$$Q = \frac{2472.61kJ}{300s} = 8.24kW$$

Масовий потік повітря [16]

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{C_p * \Delta T} = \frac{8.24}{1.005 * 152} = 0.0539 kg/s$$

В ході роботи дійшли висновку про доцільність розгляду удосконаленого варіанту барабанного обсмажувача для кавових зерен, а саме застосування ІЧ-випромінювання, що є ефективною технологією. У харчовій промисловості нагрівання є одним із найважливіших теплових процесів і здійснюється за допомогою теплопровідності, конвекції та випромінювання. Нагрівання традиційно проводиться або за допомогою джерела палива або електричного джерела. Тепло передається ззовні на поверхню продукту за допомогою конвекції та теплопровідності, а температура на поверхні продукту підвищується далі, коли тепло передається в продукт через теплопровідність. Температура нагрітої речовини починає змінюватися фізично та хімічно у міру її підвищення [12-14, 23]. Коли енергія випромінювання розсіюється у вигляді тепла, поверхня сировини нагрівається, а глибина проникнення залежить від різних факторів, включаючи товщину, активність води, склад продукту та довжину хвилі інфрачервоного випромінювання. Інфрачервона технологія має низку переваг, включаючи високу енергоефективність, низьке споживання води та екологічну безпечність.

Крім того, ІЧ-випромінювання також характеризується однорідністю нагрівання з високою швидкістю теплопередачі, коротким часом нагріву, низьким енергоспоживанням та покращенням якості продукту і безпеки харчових продуктів. Має низькі витрати енергії, а розмір інфрачервоного обладнання невеликий, а також фактори контролюються з високою точністю і не забруднює навколишнє середовище порівняно з викопним паливом. Технологія інфрачервоного нагрівання покращує обробку та якість сировини, покращуючи теплодифузію, зберігаючи поживні речовини та підтримуючи органолептичні властивості при цьому є енергоефективною та екологічно чистою. Барабанний обсмажувач для кавових зерен з ІЧ-випромінюванням наведено на рисунку 2.4.

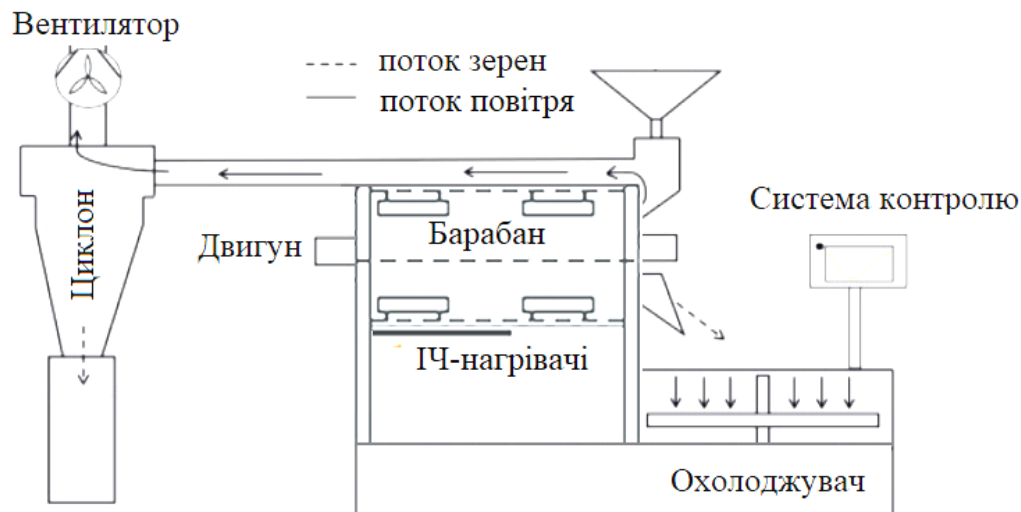


Рисунок 2.4 – Барабанний обсмажувач для кавових зерен з ІЧ-випромінюванням

У барабанних обсмажувачах кавове зерно нагрівається переважно гарячим повітрям (конвекцією) та від стінок барабана (кондукція), а ІЧ-нагрівачі додадуть пряме випромінювання. Хвилі певної довжини проникатимуть в середину кавового зерна глибше, ніж звичайне тепло, забезпечуючи рівномірне обсмаження від центру до поверхні. Інфрачервоні випромінювачі будуть встановлені всередині барабана вздовж осі, які діятимуть безпосередньо на зерно, що змішується за допомогою лопатей протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Якщо зменшувати потужність, потік енергії падатиме миттєво на відмінну від газових пальників.

2.3 Контроль процесу обсмаження кави

При відтворенні кривої обсмажування слід дотримуватися зазначеної температури завантаження, яка вказує кількість енергії всередині барабана на початку обсмажування. Якщо почати з температурою завантаження нижчою або вищою, ніж зазначено на кривій, існує ризик неправильно розпочати обсмажування або втратити контроль пізніше [16]. Вимірювання та моніторинг тепла є ключовими для досягнення ефективного та послідовного обсмаження. Рекомендується переконатися, що термопари/сенсори очищено і вони залишаються чистими та відповідного розміру. Якщо вони занадто товсті, даних може бути недостатньо або вони не будуть точними, якщо вони занадто тонкі то вони можуть бути надто чутливими до фонових шумів.

Датчики температури дозволяють дізнатися температуру середовища в якому знаходиться датчик. Існує багато типів температурних сенсорів з якими інженер може працювати. Найбільш поширеними сенсорами є термопари. Термоелементи — це пристрої, які використовуються для вимірювання температури в різних умовах і застосуваннях. Сенсори перетворюють різницю

температур у електричний сигнал, який можна інтерпретувати та відображати чисельно. Існують різні типи температурних сенсорів, кожен із яких має свої характеристики та специфічні застосування.

Термопара типу J є перетворювачем температури, який будується шляхом поєднання двох різних матеріалів: заліза та константану (сплав міді та нікелю). Цей пристрій характеризується широким діапазоном вимірювань, охоплюючи від 0°C до 760°C. Термопари типу J широко використовуються в промисловості для різноманітних застосувань [17-20]. Універсальний спектр вимірювань термопари типу J робить її функціональним варіантом у багатьох галузях. Універсальність та ефективність термопари типу J роблять її придатною для широкого кола промислових проєктів та застосувань для контролю температури.

Термопара типу K є температурним перетворювачем, який формується шляхом поєднання двох різних сплавів: нікель-хром і нікель-алюмель. Термопара відрізняється широким діапазоном роботи, який охоплює приблизно від -200°C до 1200°C, що робить її універсальним та різнобічним варіантом у багатьох промислових застосуваннях [17-20]. Однією з основних переваг термопари типу K є її висока частка нікелю у складі, що надає їй відмінну стійкість до корозії. Властивість робить її рекомендованим вибором у численних умовах, де присутні агресивні середовища або середовища з високою вологістю. Для вимірювання температури кави всередині циліндра було обрано використання термопари типу K.

Доцільно розмістити термопари в наступних точках:

- термопара має бути занурена в шар кавового зерна в обертовому барабані, оскільки ІЧ-випромінювачі нагрівають поверхню зерна дуже швидко тому необхідно точно знати швидкість підвищення температури;
- термопара має бути встановлена у верхній частині барабана щоб не допустити перегрівання повітря навколо барабана, що критично для стабільного профіля;
- термопара має бути встановлена біля випромінювачів, щоб відстежити та запобігти перегріву самих ламп.

На основі вище зазначеного можна вважати, що процес обсмаження кави є критичним у промисловому виробництві сировини, оскільки він безпосередньо впливає на кінцеву якість зерна. Здійснено аналіз різних типів обсмажувачів для кавових зерен на основі якого обрано барабанний обсмажувач для кави, який складається з обертового циліндричного барабана розташованого горизонтально на осі з газовими пальниками, що розташовані під барабаном. Запропоновано функціональну схему процесу обсмаження кави в барабанному обсмажувачі. Вважається за доцільне встановити у верхній частині бункера датчик мінімального рівня, який дозволить електронним контролерам перевіряти наявність або відсутність сирової кави, а у його основі встановити клапан, який дозволить здійснювати розвантаження сировини.

Визначено одну з важливих проблем, що виникає в барабанному обсмажувачі, а саме те, що існуючі методи перемішування кави призводять до того, що зерна не отримують однорідного обсмаження через теплопередачу

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

шляхом постійного контакту зерен кави з обсмажувальним барабаном. Через використані методи змішування (обертові металеві елементи) тепло не рівномірно проникає в кожне зерно, а постійний рух не запобігає уникнення гарячих точок або застійних зон. Вважається за доцільне для того, щоб тепло рівномірно проникало в кожне кавове зерно, а постійний рух запобігав утворенню гарячих точок або застійних зон застосовувати лопаті протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Конструкція лопатей забезпечить рух зерна в двох напрямках: обертанням барабана та від задньої стінки до передньої. Система лопатей сприятиме тому, що кавове зерно не затримуватиметься в «мертвих зонах» і рівномірно отримуватиме тепло. Для системи контролю швидкості барабана доцільно встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання, що дозволить уникнути пошкоджень кавового зерна та забезпечить рівномірний теплообмін.

Атмосферна пальник відповідає за надання тепла камері згоряння, після цього циліндр обсмажувальної машини нагрівається за допомогою теплопровідності та конвекції. Пальник має здатність збільшувати або зменшувати потік тепла, щоб підтримувати бажану температуру для обсмажування кави. Вважається за доцільне, щоб пальник мав вбудований сенсор полум'я, який дозволяє визначити, чи воно горить, щоб почати процес, бо в іншому випадку процес не починається, щоб уникнути витoku газу та можливих аварій. Також доцільно застосовувати терморегулятор для керування газовими пальниками задля того, що коли температура барабана досягне 250°C припинявся потік газу для запобігання пошкодженню обладнання.

В ході роботи дійшли висновку про доцільність розгляду удосконаленого варіанту барабанного обсмажувача для кавових зерен із застосуванням ІЧ-випромінювання, яке характеризується однорідністю нагрівання з високою швидкістю теплопередачі, низьким енергоспоживанням та не забруднює навколишнє середовище порівняно з викопним паливом. Технологія інфрачервоного нагрівання покращує обробку та якість сировини, покращуючи теплодифузію, зберігаючи поживні речовини та підтримуючи органолептичні властивості при цьому є енергоефективною та екологічно чистою. Інфрачервоні випромінювачі будуть встановлені всередині барабана вздовж осі, які діятимуть безпосередньо на зерно, що змішується за допомогою лопатей протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен. Якщо зменшувати потужність, потік енергії падатиме миттєво на відмінну від газових пальників.

Для системи контролю температури доцільно розмістити термопари в наступних точках:

- термопара має бути занурена в шар кавового зерна в обертовому барабані, оскільки ІЧ-випромінювачі нагрівають поверхню зерна дуже швидко тому необхідно точно знати швидкість підвищення температури;
- термопара має бути встановлена у верхній частині барабана щоб не допустити перегрівання повітря навколо барабана, що критично для стабільного профіля;
- термопара має бути встановлена біля випромінювачів, щоб відстежити та запобігти перегріву самих ламп.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Дослідження рівнів обсмаження кави

Хоча існують різні фактори, які можуть впливати на кінцевий смак кави, від способу обробки зелених зерен до обладнання для обсмажування, найважливішою частиною розвитку смаку кави є процес обсмажування. Навіть найякісніші зелені кавові зерна можуть бути зіпсовані при неправильних процедурах обсмажування. Не існує встановлених правил для виробництва певного ступеня обсмаження кави тому техніки обсмажування різняться [10]. Обжарювання зелених кавових зерен необхідне для розвитку смаків і ароматів. Зазвичай обжарювання здійснюють шляхом впливу на зелені зерна гарячими газами або поверхнями, що дозволяє відбутися реакції обжарювання в результаті якої утворюються сотні хімічних сполук, які впливають на аромат та смак кави.

Процес обсмаження кави залежить від багатьох різних чинників, наприклад, якщо на початку процесу обсмаження не передається достатньо тепла, що може залежати від типу використаного обсмажувача або умов обсмажуваного повітря, кавові зерна не висихатимуть достатньо, що дозволить виникненню нерівномірного обсмаження на подальших етапах і оптимальний смак кави не буде досягнутий. Іншим фактором, що може впливати на обсмаження є склад зеленого кавового зерна, який сильно залежить від клімату, в якому воно вирощується, і який має великий вплив на внутрішню структуру зерен, метод обробки, а також на вид та походження зерна. Тому існують різні типи обсмаження [1, 4]:

Світле обсмажування – тип обсмаження, який характеризується високою кислотністю але світлим і м'яким кольором. Під час цього процесу карамелізація не впливає істотно і більше зберігається оригінальний смак. Під час такого обсмаження зерна досягають внутрішньої температури 180–205°C. Після досягнення цієї температури зерна тріскаються або вибухають і їх розмір збільшується, що відоме як «перший тріск». Іншою важливою характеристикою є те, що при такому обсмаженні кава майже повністю зберігає кофеїн і не має дуже інтенсивного аромату. Світле обсмажування потребує менше часу, ніж два інші, і характеризується тим, що не підкреслює всі характеристики кави.

Середнє обсмаження – тип обсмаження, який має середньо-коричневий колір, ніж кава світлого обсмаження. Застосування такого типу обсмаження підвищує аромат, солодкість та кислотність кави, покращує текстуру. Під час цього процесу зерна досягають внутрішньої температури від 210°C до 220°C, розташовуючись між «першим тріском» і «другим тріском», а вміст кофеїну трохи знижений. На середньому рівні кава підкреслює всі свої характеристики і

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Борисенко			Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен				Літ.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Цвіркун									40		4	
Н. Контр.		Омельченко							ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					
Затверд.		Цвіркун												

саме тому він рекомендований для кави високої якості, а високий рівень досягає «другого тріску», що призводить до того, що деякі характеристики приховуються, тому цей термін використовують для кави низької якості.

Темне обсмажування – це тип обсмаження, який робить зерна блискучими через олії, що виділяються із зерна, і ці зерна відрізняються темно-коричневим, майже чорним кольором. Зерна, обсмажені на цьому рівні підвищують гіркоту через карамелізацію, а рівень кислотності значно знижується. На цьому етапі внутрішня температура досягає 240°C, тому це відбувається після «другого тріску».

Протягом багатьох років численні дослідження були зосереджені на визначенні ступеня обсмаження на основі різних фізичних властивостей обсмаженої кави, тобто розвитку кольору зерна, втрати ваги під час процесу обсмаження, хімічного складу обсмажених зерен та кінцевого вмісту вологи в зерні. Проте було виявлено, що склад зелених кавових зерен сильно залежить від різних чинників, включаючи клімат вирощування, метод обробки, вид і походження зерна, а обсмажені зерна додатково залежать від ступеня обсмаження [10]. Після закінчення обсмажування потрібно оцінити та класифікувати якість обсмаженої кави. Ступінь обсмажування зазвичай визначається за кольором зерен, хоча точний рівень обсмажування, який відповідає кожному ступеню не є загальноприйнятим і може відрізнятися за такими ознаками:

- сенсорна оцінка кави здійснюється з використанням обсмаженої та змеленої кави. Якість кави визначається її органолептичними характеристиками (фізичних властивостей кавового зерна загалом, які можна сприймати органами відчуттів), бажаними такими, як аромат та смак;

- аромат – це органолептична властивість, яка описує загальне враження від летких речовин кави. Якість пов'язана з ароматом, що виділяє продукт: тонкий, приємний і пронизливий аромат є проявом хорошої кави;

- смак – це органолептична властивість, яка описує складне поєднання смакових та запахових характеристик, що сприймаються в напої. Відчуття, загальне і збалансоване враження, характерне для кави, яке відчувається у роті.

Колір є найбільш поширеним методом визначення ступеня обсмаження кавового зерна. Колір кави зазвичай вимірюють фотометром або колориметром, а отримані значення відображають показниками $L^*a^*b^*$ (широко прийнятий міжнародний стандарт визначення кольору). Параметри a^* (від зеленого до червоного) та b^* (від синього до жовтого) є хроматичними компонентами. Значення L^* , яке визначає світлість кольору використовується для визначення ступеня обсмаження. Значення L^* рівне 0 означає чорний колір, тоді як значення 100 означає білий колір [9, 10]. Під час процесу обсмаження зерна проходять низку тонких, а інколи й не дуже тонких змін кольору від свого початкового зеленого кольору до бежевого, а потім через цілий ряд відтінків коричневого – спочатку тьмяного, потім блискучого зі збільшенням темності до темного коричневого, навіть насичено чорного.

Вологість кавових зерен може бути показником ступеня обсмаження, оскільки у процесі обсмаження більшість води випаровується зсередини

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

кавових зерен. Втрата при обсмаженні – це відсоткове зменшення ваги, яке також називають втратою при обсмаженні під час обсмаження може вказувати на те, наскільки добре відбулося обсмаження, і може дати уявлення про розвиток процесу обсмаження. Чим вищий відсоток тим більш розвинене обсмаження, а отже, темніший ступінь обсмаження [9, 10]. Втрату ваги кавових зерен під час процесу обсмаження можна розглядати як показник ступеня обсмаження, проте він може бути лише кінцевим числовим показником, а не безперервним спостереженням під час обсмаження.

Досліджено рівні обсмаження кавового зерна та визначено за допомогою колориметра кольорові показники $L^*a^*b^*$ сировини в залежності від рівня обсмаження (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристики обсмаження кави

Колір	Характеристики	Вигляд	Кольорові показники
Світлий	Низька кислотність, зерна сухі. Обсмаження занадто легке і не дає каві розкрити свій повний потенціал.		L^* +92,5 білизни, a^* – 12 зеленого кольору, b^* +20 жовтого кольору
Середньо-світлий	Кислотність підкреслює смак, а зерна трохи зростають в об'ємі. Зерно все ще сухе.		L^* +85 білизни, a^* – 12 червоного кольору, b^* +25 жовтого кольору
Середньо-коричневий	Кислотність продовжує зростати, а зерно стає більш насиченим. Зерно в основному сухе.		L^* +45 білизни, a^* – 6 червоного кольору, b^* +10 жовтого кольору
Середньо-коричневий	На поверхні з'являються дуже маленькі краплі олії, кислотність поступово зменшується.		L^* +10 білизни, a^* – 6,5 червоного кольору, b^* +8 жовтого кольору
Коричневато-чорний	Зерна мають плями олії або повністю олійні. Смак знижується, тоді як зерно збільшується.		L^* +8 білизни, a^* – 4 червоного кольору, b^* +2 жовтого кольору

Дуже темний	Чорна поверхня, покрита олією. Всі тонкі нюанси зникли, аромат майже відсутній, зерно легке.		L* +3 білизни, a* – 3 червоного кольору, b* + 1,5 жовтого кольору
-------------	--	--	---

Зерна при правильному впливі контрольованого тепла збільшуються в розмірі та змінюють колір. Основні фізичні зміни такі:

- втрата ваги в основному через випаровування води та виділення певних важких газів, таких як CO₂, що спричиняє набухання зерна;
- збільшення його обсягу приблизно на 60%.

Колір змінюється від зеленого до коричневого через карамелізацію цукру та інших вуглеводів та утворення певних пігментованих речовин, що виробляються внаслідок різних хімічних реакцій. Ароматичні якості кави стають помітними лише після того, як зерна піддаються високим температурам під час обсмажування [9]. Лише під час обсмаження зерна набувають характерного аромату та смаку кави. Високі температури спричиняють низку фізичних і хімічних змін у зернах. Конкретні умови обсмаження сильно впливають на ці зміни і, відповідно, впливають на смак напою.

Температури, які використовуються для обсмажування кавових зерен, залежать від типу обсмажувача в визначених зонах обсмажування в межах від 180°C до 250°C, оптимальна температура становить від 210°C до 240°C. Вище цієї температури починається перегорання [9]. Коли температура зерен досягає 130°C то сахароза карамелізується і зерна починають темніти та розбухати. Хімічні зміни на цій початковій фазі відносно невеликі у порівнянні з тими, що відбуваються наприкінці процесу обсмаження. При температурах вище 160°C відбувається ряд реакцій, що сприяють тому, що зерна стають світло-коричневими, а їх об'єм значно збільшується і починається формування аромату. Хімічні реакції, відповідальні за аромат і смак обсмаженої кави запускаються приблизно при 190°C. Процес обсмажування зазвичай триває від 12 до 15 хвилин, а при повільних методах обсмажування це займає близько 25 хвилин. Хоча обсмажування надає каві смак і аромат воно також певним чином змінює кавове зерно.

На основі вище зазначеного можна вважати, що ступінь обсмажування зазвичай визначається за кольором зерен, хоча точний рівень обсмажування, який відповідає кожному ступеню не є загальноприйнятим і може відрізнятися. Світле обсмажування потребує менше часу, ніж середнє та темне, і характеризується тим, що не підкреслює всі характеристики кави. На середньому рівні кава підкреслює всі свої характеристики і саме тому рекомендований для кави високої якості, а високий рівень досягає «другого тріску», що призводить до того, що деякі характеристики приховуються, тому цей термін використовують для кави низької якості.

Досліджено рівні обсмаження кавового зерна та визначено за допомогою колориметра кольорові показники сировини в залежності від рівня обсмаження.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню обладнання для обсмажування кавових зерен. У роботі зазначено, що процес обсмаження кави є важливим етапом у її виробничому ланцюжку, що забезпечує відповідні рівні обсмаження та безпосередньо впливає на кінцеву якість сировини. Під час процесу обсмаження зелені кавові зерна піддаються впливу високих температур протягом певного часу, що впливає на розвиток смаку та аромату кавового зерна. Тому тепло має рівномірно проникати в кожне кавове зерно, а постійний рух сировини запобігати утворенню гарячих точок або застійних зон.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для обсмаження кавових зерен. Зазначено, що машина для обсмажування кави – це спеціалізоване обладнання, яке передає тепло кавовим зернам потоком гарячого повітря, постійно перемішуючи зерна. Застосовується кілька типів обсмажувачів: барабанні, з псевдозрідженим шаром, рециркуляційні. Барабанні обсмажувачі – найпоширеніші та традиційні обсмажувачі, де велика частина процесу здійснюється за допомогою повітря (конвекційно) але також і через контакт з гарячою поверхнею (провідниково). Використовують обертовий барабан в який поміщаються зерна кави та обсмажуються за допомогою непрямого тепла.

Вважається, що обсмажувачі з псевдозрідженим шаром поєднують принцип роботи барабанних і конвекційних систем. Використовують гаряче повітря для обсмажування кавових зерен під час їх руху всередині камери обсмажування. Теплопередача, що відбувається в обсмажувачі з псевдозрідженим шаром, здійснюється за допомогою конвекції. Великі об'єми повітря, попередньо нагрітого надходять у камеру обсмаження, де гаряче повітря одночасно циркулює й нагріває рухомі зерна. Конвекційні обсмажувачі працюють шляхом нагрівання повітря та циркуляції його навколо кавових зерен для їх рівномірного обсмажування. Принцип роботи схожий з барабанною системою, проте різниця полягає в тому, що тепло передається повністю за допомогою конвекції і практично без теплопровідності, що дозволяє здійснювати обсмажування швидше.

Аналіз наукових джерел дав змогу констатувати, що увесь процес обсмаження можна розділити на три етапи: сушіння, обсмаження та охолодження. Повільне виділення води та інших летучих речовин відбувається на етапі сушіння. Потім відбуваються реакції обсмаження, що призводить до значних змін хімічних та фізичних властивостей зерна, які необхідні для формування аромату. Коли кава обсмажена до бажаного ступеня то кавові зерна виймають з камери обсмаження і починається останній етап – фаза охолодження.

Другий розділ присвячено удосконаленню барабанного обсмажувача для кавових зерен. Запропоновано функціональну схему процесу обсмаження кави

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Борисенко			Удосконалення обладнання для обсмажування кавових зерен				Літ.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Цвіркун									44		2	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					
Н. Контр.		Омельченко												
Затверд.		Цвіркун												

в барабанному обсмажувачі. Вважається за доцільне встановити у верхній частині бункера датчик мінімального рівня, який дозволить електронним контролерам перевіряти наявність або відсутність сирової кави, а у його основі встановити клапан, який дозволить здійснювати розвантаження сировини.

Доцільне для того, щоб тепло рівномірно проникало в кожне кавове зерно, а постійний рух запобігав утворенню гарячих точок або застійних зон застосовувати лопаті протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен, а також для виштовхування зерен з барабана під час розвантаження. Конструкція лопатей забезпечить рух зерна в двох напрямках: обертанням барабана та від задньої стінки до передньої. Система лопатей сприятиме тому, що кавове зерно не затримуватиметься в «мертвих зонах» і рівномірно отримуватиме тепло. Для системи контролю швидкості барабана доцільно встановити частотний перетворювач для регулювання швидкості обертання, що дозволить уникнути пошкоджень кавового зерна та забезпечить рівномірний теплообмін.

Атмосферна пальник відповідає за надання тепла камері згоряння, після цього циліндр обсмажувальної машини нагрівається за допомогою теплопровідності та конвекції. Вважається за доцільне, щоб пальник мав вбудований сенсор полум'я, який дозволяє визначити, чи воно горить, щоб почати процес, бо в іншому випадку процес не починається, щоб уникнути витоку газу та можливих аварій. Також доцільно застосовувати терморегулятор для керування газовими пальниками задля того, що коли температура барабана досягне 250°C припинявся потік газу для запобігання пошкодженню обладнання.

В ході роботи дійшли висновку про доцільність розгляду удосконаленого варіанту барабанного обсмажувача для кавових зерен із застосуванням ІЧ-випромінювання, яке характеризується однорідністю нагрівання з високою швидкістю теплопередачі, низьким енергоспоживанням та не забруднює навколишнє середовище порівняно з викопним паливом. Інфрачервоні випромінювачі будуть встановлені всередині барабана вздовж осі, які діятимуть безпосередньо на зерно, що змішується за допомогою лопатей протилежного розташування для рівномірного перемішування зерен. Якщо зменшувати потужність, потік енергії падатиме миттєво на відмінну від газових пальників.

Для системи контролю температури доцільно розмістити термопари в наступних точках:

- термопара має бути занурена в шар кавового зерна в обертовому барабані, оскільки ІЧ-випромінювачі нагрівають поверхню зерна дуже швидко тому необхідно точно знати швидкість підвищення температури;
- термопара має бути встановлена у верхній частині барабана щоб не допустити перегрівання повітря навколо барабана, що критично для стабільного профіля;
- термопара має бути встановлена біля випромінювачів, щоб відстежити та запобігти перегріву самих ламп.

В третьому розділі досліджено рівні обсмаження кавового зерна та визначено за допомогою колориметра кольорові показники сировини в залежності від рівня обсмаження.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ступені обсмаження кави: технологія, типи та їхній вплив на смак. Режим доступу: <https://sunrisecoffee.ua/stupeni-obsmazhennia-kavy/>.
2. Профіль обсмаження кави. Режим доступу: <https://kyivcityroast.com.ua/profil-obsmazhennya-kavy/>.
3. Diseño, simulación, y propuesta de automatización de una máquina de café con capacidad de 25lb, para tostadoenfriado, dirigida a la producción cafetalera. URL: <https://dspace.unl.edu.ec/items/8e9db7e3-6fef-4467-be7e-8e128f33ef31>.
4. Desarrollo de prototipo semiautomático para el tueste de café. URL: <https://repositorio.umariana.edu.co/items/1cc03352-e407-48da-abbb-a793c4056ef1>.
5. Diseño de prototipo a escala de tostadora de café. URL: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/e084365f-ec59-4110-a681-e0a4e7590158>.
6. Основні типи обсмаження кави. Режим доступу: <https://kava.biz.ua/ru/4-typy-obsmazhennia-kavy/>.
7. Які існують типи обсмажувачів кавових зерен? <https://www.coffee-machinery.com/uk/industrial-news/what-are-the-different-types-of-coffee-bean-roasters-/>.
8. Типи ростерів для зернової кави. Режим доступу: <https://saba.kiev.ua/statti/typy-rosteriv-dlya-zernovoyi-kavy/>.
9. Design and modelling of drum type coffee roasting machine using liquefied petroleum gas as a source of energy. URL: https://repository.ju.edu.et/bitstream/handle/123456789/5593/NASIR%20F._Thermal%20Engineer.pdf?sequence=1.
10. Heat and mass transfer model for a coffee roasting process. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/a0753957-2575-4c29-b305-d8bf7810d97e>.
11. Diseño y construcción de una tostadora de café semiautomática con una capacidad de 8 kg. URL: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/6518>.
12. Інфрачервоне випромінювання: суть і застосування. Режим доступу: <https://vkurse.ua/infrachervone-vyprominyuvannya-sut-i-zastosuvannya/#:~:text=>
13. Інфрачервоний обігрів у промисловості. <https://intmax.com.ua/zastosuvannya/infrachervone-obihriv-u-promyslovosti.html>.
14. Потапов В.О., Жила В.І. Теоретичні та практичні аспекти застосування мікрохвильового й інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях: монографія. Харків: ДБТУ, 2024. 136 с.
15. Progettazione meccatronica di una torrefattrice di caffè da laboratorio. URL: <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/306232>.
16. Diseño de una tostadora de café con sistema de control seleccionado dirigido a los pequeños productores del sector cafetero. URL: <https://repositorio.ufps.edu.co/entities/publication/1b0bfb09-2ad2-4889-8557-399db53a270c/full>.
17. Sistema de control de temperatura de una máquina tostadora de café alimentada con gas licuado de petróleo. URL:

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/14669/2/04%20MEC%20500%20TESIS.pdf>.

18. Термопари: будова та принцип роботи. Режим доступу: <https://intmax.com.ua/zastosuvannya/termopara-princip-raboty.html>.

19. Принцип роботи термопар: опис, пристрій, схема. Режим доступу: <https://ukrpublic.com/aktualne/printsip-roboti-termopari-opis-pristrij-skhema.html#:~:text=>

20. Термопара. Режим доступу: <https://promsystem.com.ua/UA/termopara/>.

21. Achieving even roasting in coffee roasters: techniques for consistent results. URL: <https://crownfoodmachine.com/the-uniform-roasting-method-of-the-coffee-roaster/>.

22. Sustitución de combustible diésel por gas licuado de petróleo en un tostador de café. URL: [file:///C:/Users/admin/Downloads/Calle-Dominguez_y_Gandon-Hernandez_RVCTA-V1N2%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/Calle-Dominguez_y_Gandon-Hernandez_RVCTA-V1N2%20(1).pdf).

23. A review on infra red heating application in food processing industries. URL: <https://www.ijert.org/a-review-on-infra-red-heating-application-in-food-processing-industries>.

24. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця Нова книга, 2007. 648 с.

25. Процеси і апарати харчових виробництв / За ред. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2003. 400 с.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		