

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого
Кафедра Технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

Освітня програма «Інжиніринг харчових виробництв»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТОКТП
проф. Микола ЯКИМЧУК

« » 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Тимченко Іван Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження ножової дробарки для переробки ПЕТ-пляшок як вторинної сировини на ПрАТ «Оболонь» продуктивністю 70 кг/год

Керівник проекту (роботи) д.т.н., проф. Якимчук Микола Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» вересня 2025 р. № 712-кс.

2. Строк подання здобувачем роботи 01.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічний паспорт обладнання; креслення обладнання; навчальна, нормативна та спеціальна література

4. Зміст пояснювальної записки Зміст. Вступ. Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування напрямку дослідження. Розробка нового технічного рішення об'єкта дослідження. Розрахункова частина. Принципи управління об'єктом проектування. Технологія машинобудування. Заходи з охорони праці та охорони довкілля. Маркетингове обґрунтування проекту. Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу Апаратурно-технологічна схема. Креслення загального виду дробарки та окремих її елементів. Нове конструктивне рішення. Технологія машинобудування.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 18.09.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|----|--|-------------------------------|----------|
| 1 | Вступ | 18.09.2025 | |
| 2 | Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження, вибір і обґрунтування напрямку дослідження | 19.09.2025 | |
| 3 | Розробка нового технічного рішення об'єкту дослідження | 24.09.2025 | |
| 4 | Дослідна частина та узагальнення результатів | 17.10.2025 | |
| 5 | Розрахункова частина | 24.10.2025 | |
| 6 | Принципи управління об'єктом проектування | 26.10.2025 | |
| 7 | Технологія машинобудування | 31.10.2025 | |
| 8 | Заходи з охорони праці та охорони довкілля | 05.11.2025 | |
| 9 | Маркетингове обґрунтування проекту | 09.11.2025 | |
| 10 | Висновки | 14.11.2025 | |
| 11 | Список використаної літератури | 16.11.2025 | |
| 12 | Підготовка креслень та додатків | 28.11.2025 | |
| 13 | Підготовка презентації | 01.12.2025 | |

Здобувач

(підпис)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Тимченко І.В.

(прізвище та ініціали)

Якимчук М.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

В технологічних схемах виробництва різних продуктів процес подрібнення є одним із ключових. Для здійснення цього процесу застосовуються дробарки. Їх удосконалення є одним із пріоритетних напрямків задля зменшення енерговитрат на процес подрібнення.

Під час виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз різних типів дробарок, що використовуються на підприємствах з виробництва пива, в тому числі і дробарки для подрібнення полімерних відходів. В ході роботи було здійснено розробку та дослідження ножової дробарки для переробки ПЕТ-пляшок продуктивністю 70 кг/год.

Мета роботи: розробка та дослідження ножової дробарки для переробки ПЕТ-пляшок як вторинної сировини на ПрАТ «Оболонь» продуктивністю 70 кг/год.

Об'єкт дослідження: процес розділення ПЕТ-пляшки на частини з різною структурою полімерів перед подальшою переробкою.

Предмет дослідження: дробарка для пластикових пляшок з одночасним відділенням днища та горловини.

Результатами роботи є:

- Розробка ножової дробарки з одночасним відділенням горловини та днища продуктивністю 70 кг/год;
- Розробка серповидних ножів з проколюючою частиною;
- Створення експериментальної установки та проведення випробувань запропонованої конструкції ножів;
- Оформлення конструкторської документації запропонованої дробарки, її основних вузлів та деталей.

Ключові слова: дробарка, ПЕТ-пляшка, ножі, подрібнення, екологія.

| | | | | | | | |
|---|---|---|----------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| <i>Відповідальна організація</i> НУХТ | <i>Технічне узгодження</i> Якимчук М.В. | <i>Вид документа</i> Пояснювальна записка | | <i>Статус документа</i> | | | |
| <i>Власник документа</i> НУХТ | <i>Разробник документа</i> Тимченко І.В. | <i>Назва, додаткова назва</i> Реферат | 240260.KP.04.000 ПЗ | | | | |
| | <i>Документ затверджено</i> Якимчук М.В. | | <i>Інд. змін.</i> | <i>Дата видання</i> | <i>Мова</i> UA | <i>Аркуш</i> 1/2 | |

ABSTRACT

In technological schemes for the production of various products, the crushing process is one of the key ones. Crushers are used to carry out this process. Their improvement is one of the priority areas to reduce energy consumption for the crushing process.

During the qualification work, an analysis was conducted of various types of crushers used at beer production enterprises, including crushers for crushing polymer waste. During the work, a knife crusher for processing PET bottles with a capacity of 70 kg/h was developed and studied.

Purpose of the work: development and study of a knife crusher for processing PET bottles as secondary raw materials at Obolon PJSC with a capacity of 70 kg/h.

Object of the study: the process of separating a PET bottle into parts with different polymer structures before further processing.

Subject of the study: a crusher for plastic bottles with simultaneous separation of the bottom and neck.

The results of the work are:

- Development of a knife crusher with simultaneous separation of the neck and bottom with a capacity of 70 kg/h;
- Development of sickle-shaped knives with a piercing part;
- Creation of an experimental setup and testing of the proposed knife design;
- Preparation of design documentation for the proposed crusher, its main components and parts.

Keywords: crusher, PET bottle, knives, crushing, ecology.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 8 |
| 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНОГО НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ | 10 |
| 1.1. Машинно-апаратна схема виробництва пива на ПрАТ «Оболонь»..... | 10 |
| 1.2. Дробарки для солоду на ПрАТ «Оболонь» | 13 |
| 1.3. Інші типи дробарок для солоду | 15 |
| 1.4. Дробарка для ПЕТ-пляшок на ПрАТ «Оболонь» | 17 |
| 1.5. Класифікація роторно-ножових дробарок для подрібнення полімерних відходів | 19 |
| 1.6. Конструкції ножів для роторно-ножових дробарок та способи їх кріплення | 27 |
| 1.7. Висновок | 30 |
| 2. ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ НАУКОВО- ДОСЛІДНИЦЬКОГО СПРЯМУВАННЯ | 32 |
| 2.1 Математична модель процесу різання ПЕТ-пляшки | 32 |
| 2.2. Експериментальне дослідження процесу розділення ПЕТ-пляшки | 36 |
| 2.3. Конструкція і принцип роботи експериментальної установки | 36 |
| 2.4. Обґрунтування вибору факторів експерименту | 40 |
| 2.5. Порядок проведення експерименту для визначення зусилля різання | 43 |
| 2.6. Опрацювання результатів експерименту..... | 50 |
| 2.7. Висновки до розділу | 63 |

| | | | | | | |
|---|---|---|----------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
| <i>Відповідальна організація</i> НУХТ | <i>Технічне узгодження</i> Якимчук М.В. | <i>Вид документа</i> Пояснювальна записка | <i>Статус документа</i> | | | |
| <i>Власник документа</i> НУХТ | <i>Розробник документа</i> Тимченко І.В. | <i>Назва, додаткова назва</i> Зміст | 240260.KP.04.000 ПЗ | | | |
| | <i>Документ затверджено</i> Якимчук М.В. | | <i>Інд. змін.</i> | <i>Дата видання</i> | <i>Мова</i> UA | <i>Аркулш</i> 1/96 |

| | |
|--|----|
| 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ РОБІТ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО СПРЯМУВАННЯ | 65 |
| 3.1. Проблема нероздільної переробки пластикових відходів | 65 |
| 3.2. Дробарка для роздільної переробки пляшок | 66 |
| 3.3. Принцип роботи дробарки | 70 |
| 3.4. Переваги використання запропонованої дробарки на ПрАТ «Оболонь» | 72 |
| 3.5. Розрахунок швидкісних і геометричних параметрів дробарки | 73 |
| 3.6. Кінематичний розрахунок дробарки | 75 |
| 3.7. Розрахунок продуктивності дробарки | 77 |
| 3.8. Розрахунок потужності електродвигуна дробарки | 77 |
| 3.9. Розрахунок валу дробарки | 78 |
| 3.10. Вибір підшипників | 79 |
| 3.11. Вибір шпонки | 80 |
| 3.12. Технологічний маршрут складання робочого вузла | 82 |
| 4. ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОЛОГІЯ | 88 |
| 4.1. Охорона праці при роботі з дробаркою | 88 |
| 4.2. Органи керування дробаркою | 88 |
| 4.3. Правила безпеки при пуску, експлуатації та вимкненні дробарки.. | 89 |
| 4.4. Вплив пластикових пляшок на екологію | 91 |
| 5. МАРКЕТИНГОВЕ/ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ/ СОЦІАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ | 93 |
| 5.1. Техніко-економічне обґрунтування проекту | 93 |
| 5.2. Маркетингове обґрунтування застосування ножової дробарки | 94 |
| 6. ВИСНОВКИ | 97 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 99 |

ВСТУП

Технологічні лінії виробництва різних продуктів, від борошна та сухих сніданків до пива, включають в себе дробарки. Основна функція цього обладнання – подрібнення продуктів або сировини. Дробарки класифікуються на такі типи: молоткові, валкові, роторні, дискові та ножові. Крім харчових виробництв, дробарки знайшли широке розповсюдження в галузі вторинної переробки використаної упаковки.

Актуальність теми: в Україні, як і в більшості країн світу, галузь вторинної переробки, в тому числі і полімерів, не є комерційно вигідною, і існує завдяки дотаціям. Деякі з найбільш сучасних підприємств впроваджують політику сортування та переробки (або передачі на переробку) відходів виробництва. Так, на ПрАТ «Оболонь» браковані ПЕТ-пляшки та ПЕТ-пляшки з партій, що не пройшли перевірку якості, подрібнюють на дробарці для пластикових відходів, а отриманні пластівці передають на переробку в спеціалізовані компанії. Втім, такий метод переробки хоч і здешевлює логістику перевезення пластику, однак є неприбутковим через низьку якість отриманого вторинного матеріалу.

Об'єкт дослідження: процес розділення ПЕТ-пляшки на частини з різною структурою полімерів перед подальшою переробкою.

Предмет дослідження: дробарка для пластикових пляшок з одночасним відділенням днища та горловини.

Мета роботи: розробка та дослідження нової конструкції дробарки з одночасним відділенням горловини та днища продуктивністю 70 кг/год. Для досягнення зазначеної мети необхідно:

- Проаналізувати існуючі типи дробарок, що застосовуються на виробництвах пива;
- Порівняти характеристики та конструкції існуючого обладнання для подрібнення ПЕТ-пляшок;
- Розробити дробарку для ПЕТ-пляшок з продуктивністю 70 кг/год.

Наукова-практична новизна полягає у розробці конструкторської документації для виготовлення прототипу дробарки, для якої в ході експериментальних досліджень було створено конструкцію ножів та проведено їх випробування для визначення зусилля різання. Конструкторська документація та результати досліджень можуть бути використані для подальших покращень конструкції такого типу дробарок.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНОГО НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Машинно-апаратурна схема виробництва пива на ПрАТ «Оболонь»

Сучасне виробництво пива – це складний технологічний процес з великою кількістю етапів виробництва, де кожна змінна прямо впливає на кінцевий результат і якість готової продукції. Для розуміння основних етапів пивоваріння необхідно розглянути технологічну схему обладнання на ПрАТ «Оболонь».

Машинно-апаратурна схема виробництва пива наведена на рисунку 4. Солод із складу подається у повітряно-ситовий сепаратор 1, після чого шнеком 2 транспортується у збірник очищеного солоду 3. Ячмінь також за допомогою шнека 2 направляють у повітряно-ситовий сепаратор 1, а потім – у збірник ячменю 15. Перед подальшою обробкою солод і ячмінь проходять через магнітний сепаратор 4, після чого їх зважують на автоматичних вагах 5. Подрібнення солоду здійснюють на установці для мокрого подрібнення 6, а ячменю – на валковій дробарці 16.

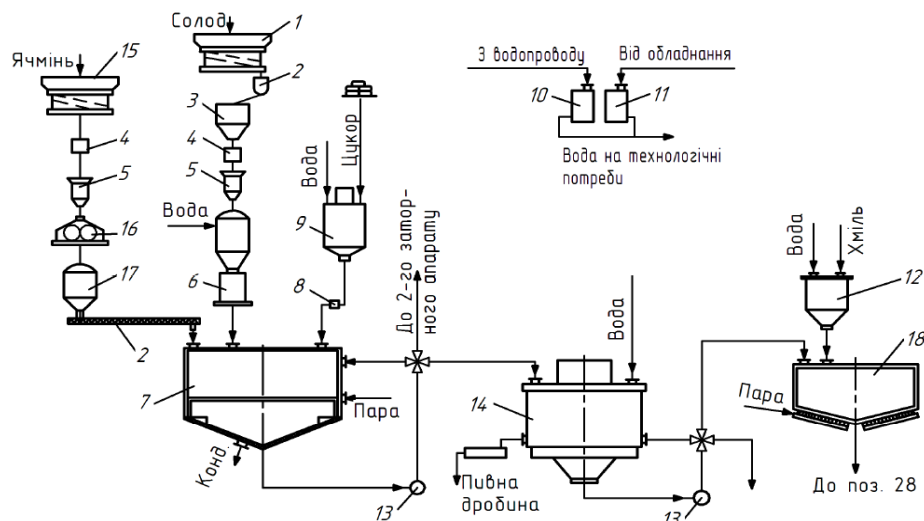


Рис.1.1 Виробництво пивного суслу

Вода для технологічних процесів надходить із збірників 10 і 11. Затирання виконують у заторно-варильному апараті 7, куди подрібнений солод надходить самопливом, а подрібнений ячмінь із збірника 17 — за допомогою шнека 2. Сюди ж подається цукровий розчин, приготований у реакторі 9 та профільтований через вловлювач 8.

Отриманий затор фільтрують у фільтрі 14. Прозоре сусло разом із промивними водами насосом 13 перекачують у сусловарильний апарат 18, де проводиться уварювання до необхідної початкової концентрації. Хміль із складу надходить у збірник 12, звідки заданими порціями через лійку подається у сусловарильний апарат 18. Пивну дробину насосом транспортують у витратний збірник для подальшої реалізації.

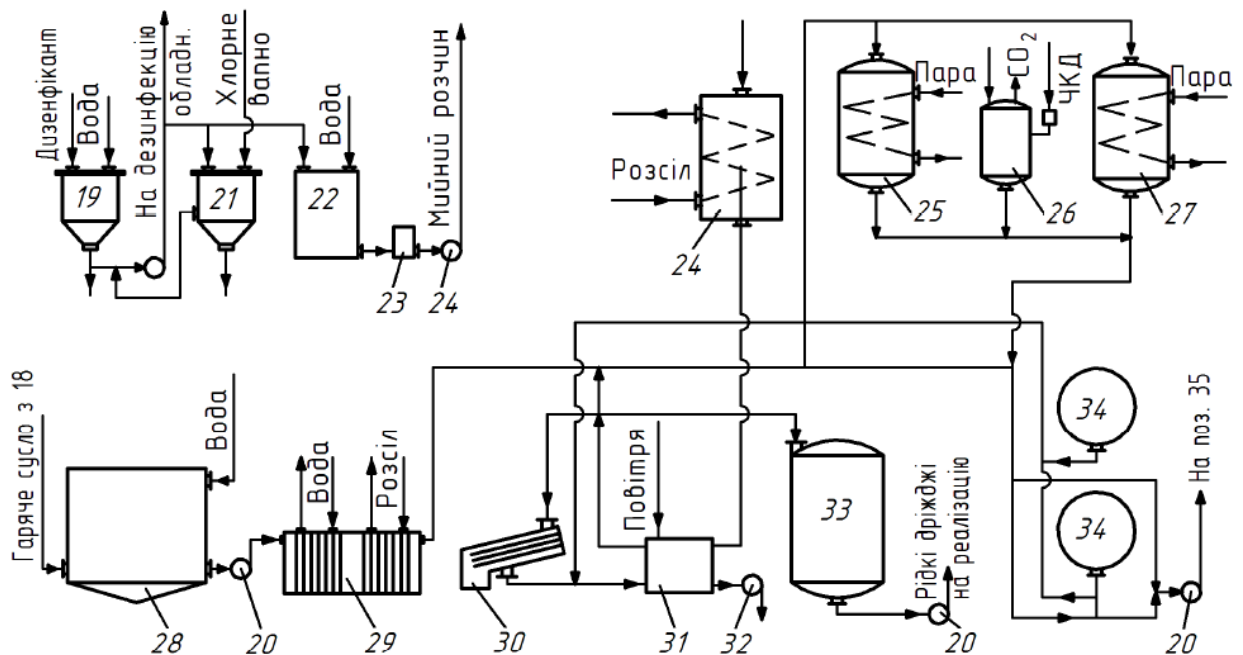


Рис.1.2 Зброжування

Гаряче сусло із сусловарильного апарата 18 самопливом направляється у хмелевідбірний апарат, після чого насосом перекачується у гідроциклонний апарат 28 для освітлення. Освітлене сусло насосом 20 подають у

пластинчастий теплообмінник 29, де воно охолоджується до температури 6 °С, а потім надходить у апарат головного бродіння 34.

Чисту культуру дріжджів готують у системі, що включає стерилізатори суслу 25, 27 і циліндр для зброджування дріжджів 26. Чиста культура дріжджів, що була зброджена, стисненим повітрям вводиться у потік суслу, яке надходить на бродіння. Надлишкові дріжджі з апаратів головного бродіння 34 вакуумом відбирають у вакуум-монжю 31. Насінневі дріжджі повітрям направляються на вібросито 30 для очищення, після чого самопливом надходять у монжю 31 для зберігання. Із монжю 31 вони подаються на виробництво за допомогою вакуум-насоса 32. Воду для заливання дріжджів охолоджують у баку 24. Воду для заливання дріжджів охолоджують у баку 24. Надлишкові дріжджі після проходження монжю 31 стисненим повітрям транспортуються у збірник 33, звідки насосом 20 перекачуються на реалізацію.

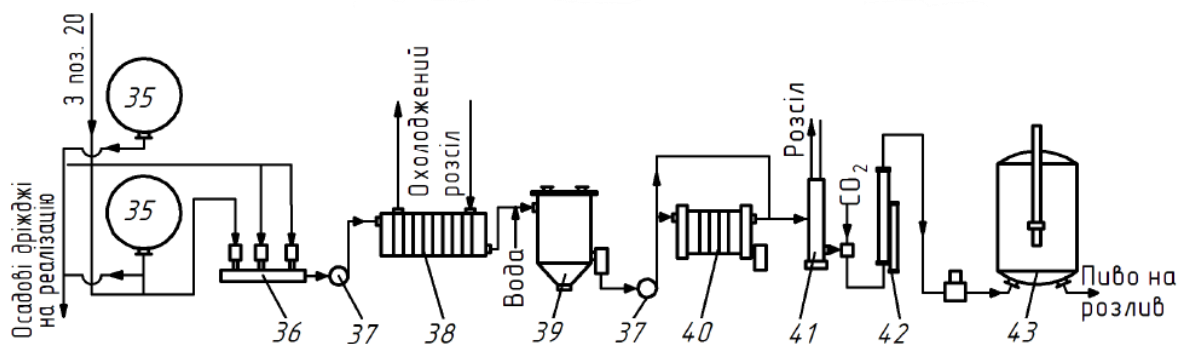


Рис. 1.3 Доброжування та дозрівання пива

Лінія розливу на ПрАТ «Оболонь» (рис. 1.4) зібрана на основі обладнання компанії «Krones». Пристрій подачі преформ 1 направляє преформи по направляючим елементам до видувальної машини Contiform S 2, яка виробляє пляшки. Браковані пляшки автоматично відокремлюються від основного потоку та направляються на подрібнення.

Усі інші пляшки транспортуються повітряним конвеєром 3 через установку СІР 4 та міксерну установку МFS 5 до установки ополіскування Variojet 6. Після ополіскування пляшки подаються на фасувально-закупорювальну машину Mecafill VKP-PEТ 7.

Під час фасування полімерні пробки подаються до машини через механізм подачі пробок 9. Після контролю рівня та закупорювання в пристрої Checkmat 8, пляшки транспортуються конвеєром 10 до етикетувальної машини Contiroll 11, після чого проходять контроль етикетки в пристрої 12.

Пляшки з пивом транспортуються конвеєром 14 до пристрою упаковки пляшок у плівку 13, а потім – на піддон механізмом 15. Після пакування в коробки механізмом 16, готові коробки транспортуються контейнером 17 на склад готової продукції.

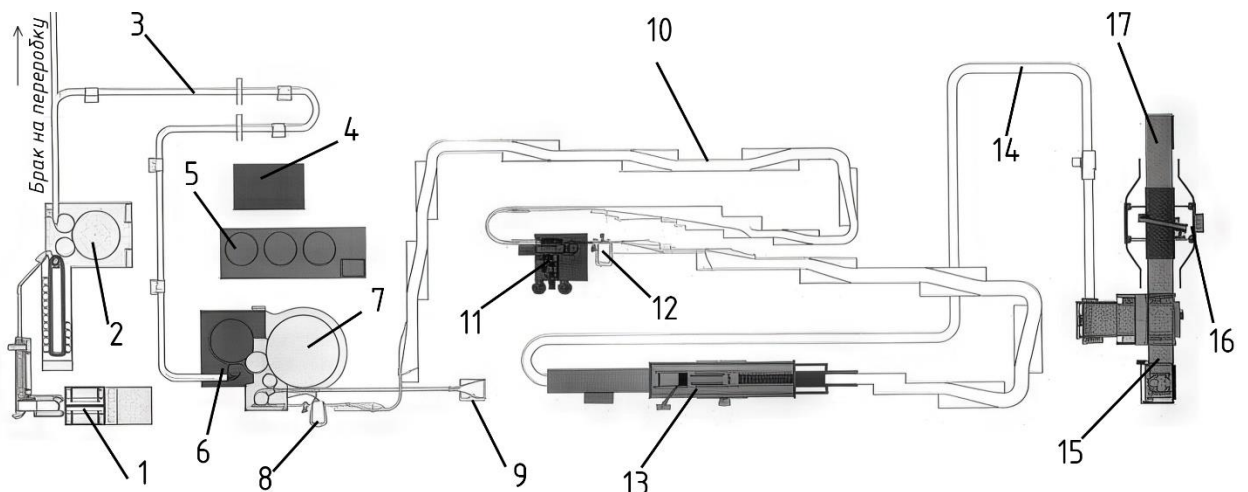


Рис. 1.4. Компонівка лінії розливу та пакування пива продуктивністю 24 тисячі пляшок на годину

1.2. Дробарки для солоду на ПрАТ «Оболонь»

Незважаючи на те, що виробництво пива включає багато етапів – від солоду до дріжджів, від варіння до охолодження – першим і одним з головних технологічним процесом після механічної очистки є дроблення солоду. Якість цього процесу безпосередньо впливає на рівень розмелювання, що визначає

швидкість ферментації, рівень підготовки сусла та, врешті, якість кінцевого продукту.

На ПрАТ «Оболонь» для дробіння солоду застосовуються дробарки Maltomat з 6 валками (рис. 1.5). Розташування двох пар вальців одна над одною обумовлено необхідністю досягти вищої ефективності розділення. При типовому розташуванні вальців один за іншим перше просіювання забезпечує розділення лише 10 % складових помелу, що відповідає недостатньому рівню відділення.

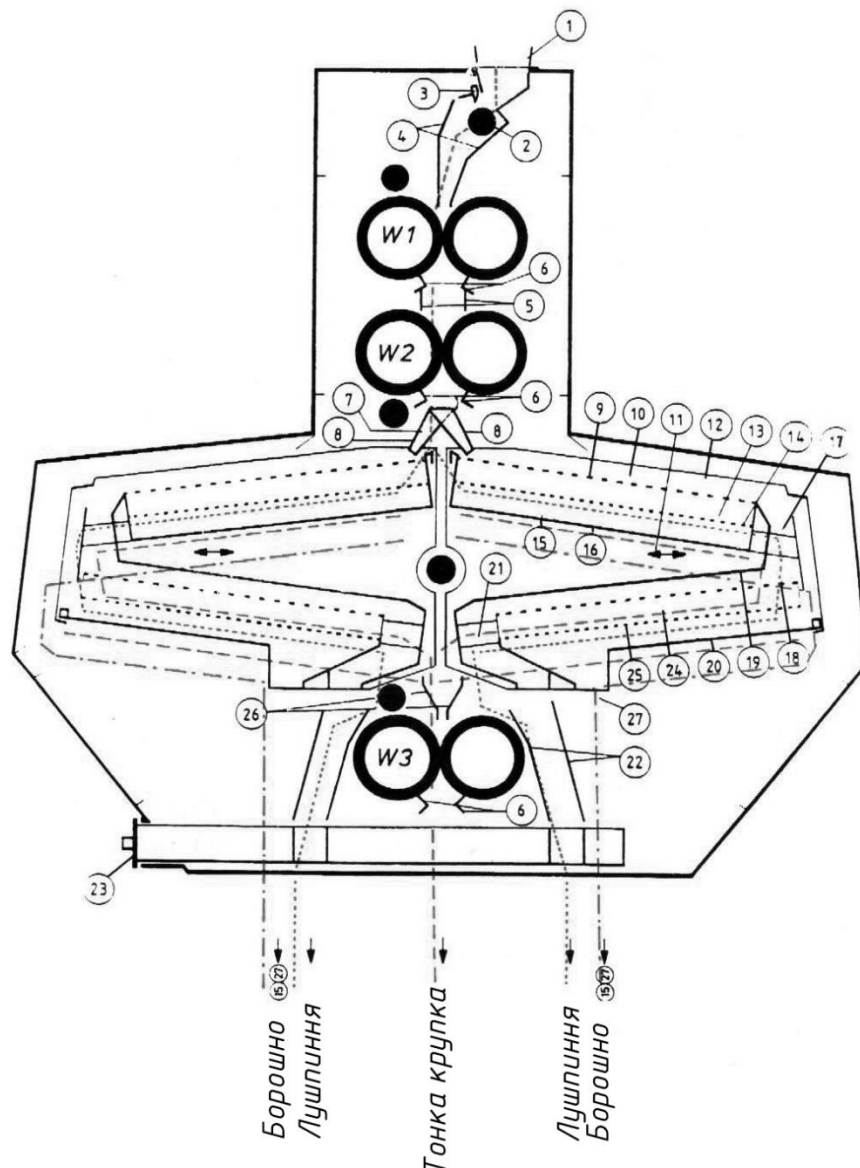


Рис. 1.5 Дробарка для солоду «Maltomat» MDBA-1000-6-S:

W1 – пара валків для попереднього дроблення; W2 – пара валків для відділення м'якінних оболонок; W3 – пара валків для отримання крупки; 1 – подача солоду; 2 - живильний валик; 3 – дозуючий пристрій; 4 – розподільний пристрій; 5 – напрямні листи; 6 – щітка, 7, 8 – розділові пристрої; 9, 14, 18, 24, 25 - сита; 10 – помел; 11, 12 – верхній та нижній кожухи; 13, 24 - крупка; 15, 27 - борошно; 16, 17, 19, 20 - піддони; 21 – накопичувач; 22 – розподільні канали; 23 - пробовідбірна гільза; 26 - регулюючий пристрій; 27 – потік зернопродуктів.

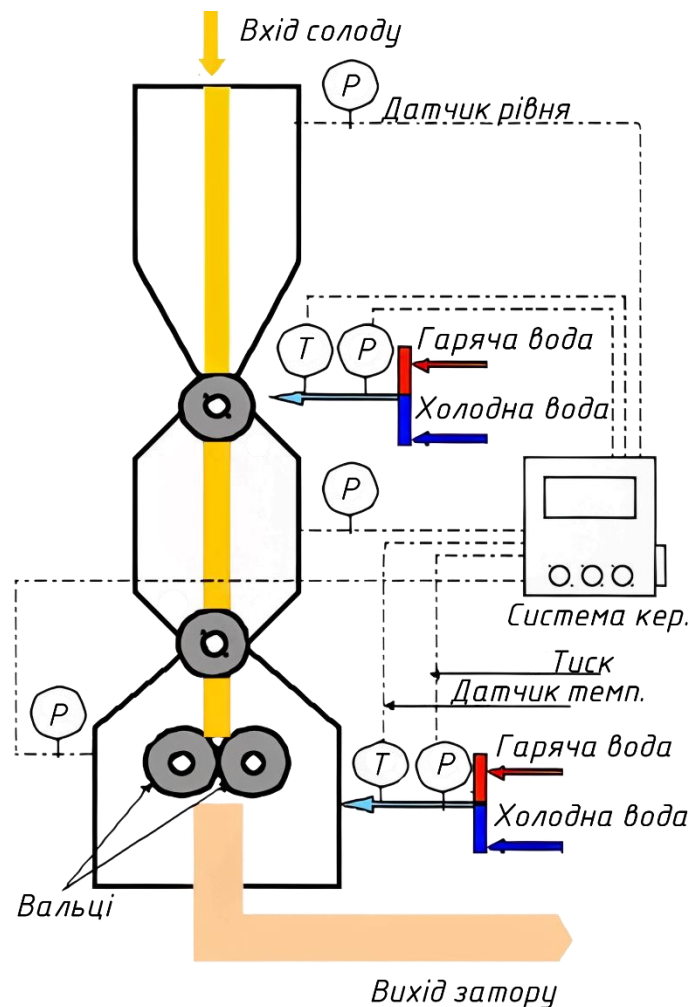


Рис.1.6 Схема мокрого подрібнення солоду

1.3. Інші типи дробарок для солоду

П'ятивалкові (рис. 1.7) та чотирьохвалкові (рис. 1.8) дробарки мають меншу продуктивність та глибшу рівномірність розмелювання порівняно з

шестивалкових. Однак, вони економічні та ефективні для середніх та малих підприємств, де вимоги до якості та обсягу виробництва не вимагають використання шестивалкових пристроїв. Ключовою особливістю є те, що солод проходить через валки двічі (у порівнянні з трьома проходами у шестивалкових), що впливає на загальну гранулометричну характеристику.

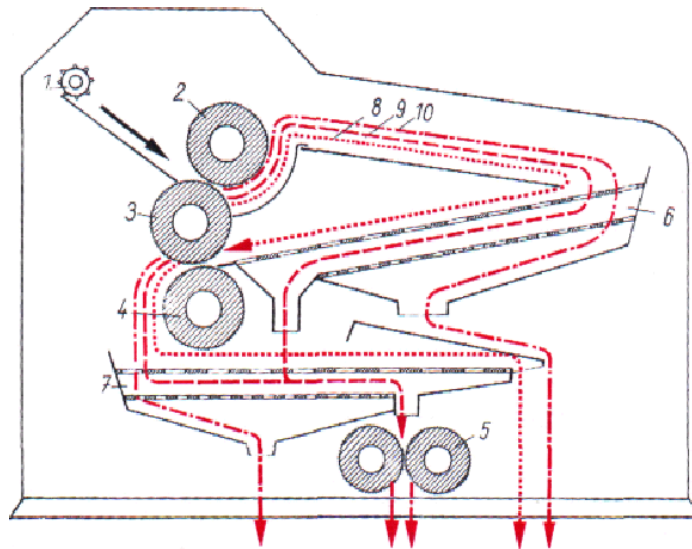


Рис. 1.7 П'ятивалкова дробарка:

- 1 – розподільчий валець; 2 – валець для попереднього дроблення; 3 – валець для попереднього дроблення та відділення м'якісних оболонок; 4 – валець для відділення м'якісних оболонок; 5 – пара вальців для крупки; 6 – верхній набір вібросит; 7 – нижній набір вібросит; 8 – лушпиння з прилиплою крупкою; 9 – крупка; 10 – борошно.

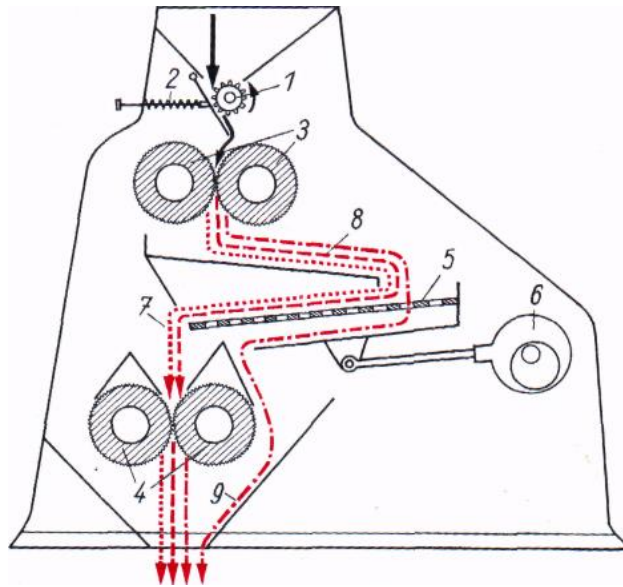


Рис. 1.8 Чотирьохвальцева дробарка:

1 – розподільний валик; 2 – регулююча заслінка надходження; 3 – пара вальців для попереднього дроблення; 4 – пара вальців для оболонок; 5 – вібросито; 6 – ексцентриковий привід; 7 – лущиння з прилиплою крупкою; 8 – помел першого проходу; 9 – борошно

Таблиця 1.1. Порівняння дробарок з різною кількістю валків

| Показник | Maltomat III MDBA-1000-4 | Maltomat III MDBA-1000-5 | Maltomat III MDBA-1000-6-S |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Кількість валків, шт: | 4 | 5 | 6 |
| Довжина валків, мм: | 1000 | 500-1500 | 1000 |
| Продуктивність, т/год | 5-11 | 4-12 | 10-16 |
| Потужність електродвигуна, кВт: | 5.5-18.5 | 7.5-22 | 22-37 |
| Маса (без приводу), кг: | 4000 | 3000-6000 | 6700 |

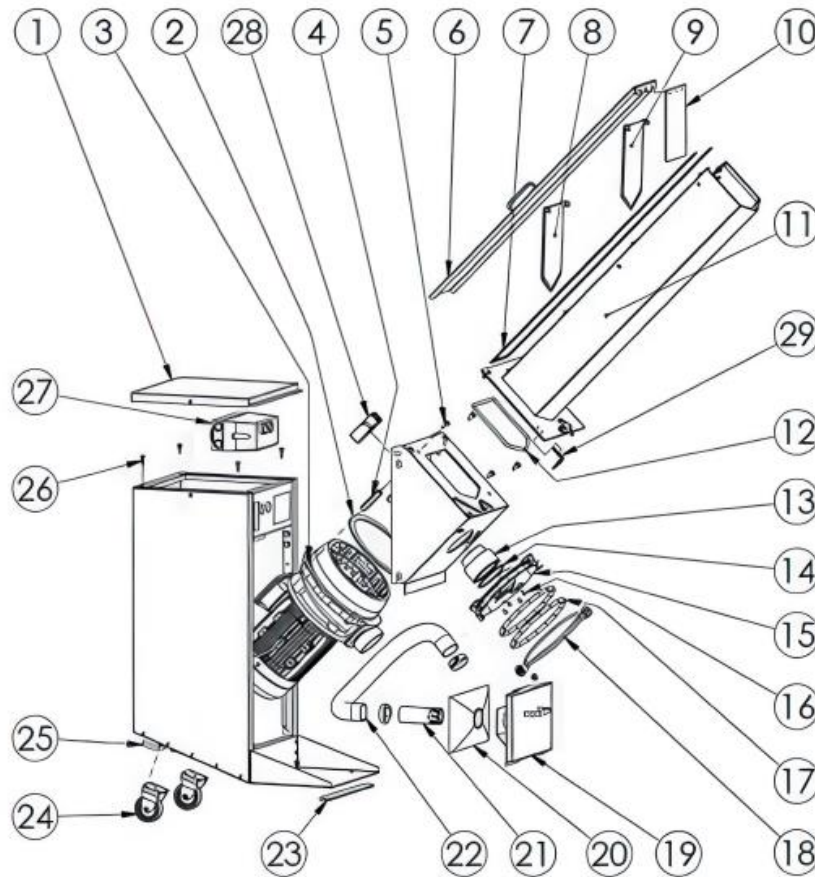
1.4. Дробарка для ПЕТ-пляшок на ПрАТ «Оболонь»

Під час видування пляшок з преформ деякі з них пошкоджуються і не підлягають повторному використанню. На виробництві ПрАТ «Оболонь» такі пляшки, а також пляшки, що не пройшли контроль якості, відправляються на подрібнення безпосередньо на підприємстві. Для оперативного подрібнення тари в цеху встановлено дробарку 550A-GKF від компанії Disperator (рис. 1.9).



Рис. 1.9 Дробарка для ПЕТ-пляшок 550А-GKF

Робочим органом дробарки є жернова, які подрібнюють пластмасу до дрібних пластівців, які в подальшому відправляються на підприємства вторинної переробки. Локалізація процесу подрібнення в межах цеху дозволяє спростити логістику переміщення пляшок та зменшити витрати на транспортування. Крім того, це сприяє ефективності роботи підприємств переробки, оскільки вони отримують вже подрібнений полімер, що зменшує обсяги попередньої обробки.



| | |
|--|--|
| 1. Верхня кришка | 17. Ущільнювальні кільця (2 шт.) для випускного отвору |
| 2. Ущільнення для стаціонарної дробарки | 18. Еластичний шнур для кріплення мішка для збору |
| 3. Гвинт M8x35 та шайба (4 шт.), вид № -25 | 19. Кришка для пилозбірного мішка |
| 4. Розпірка (4 шт.) запасна частина № -25 | 20. Мішок для збору пилу |
| 5. Гвинт M8x16 (4 шт.), запасна частина № -25 | 21. Впускна труба для пилозбірного мішка |
| 6. Кришка вхідної труби для подачі | 22. Трубка відводу пилу |
| 7. Прокладка для кришки вхідної трубки подачі | 23. Гума на підшві |
| 8. Нижня захисна кришка | 24. Колесо (2 шт.), запчастина № -240/12 |
| 9. Верхня захисна кришка | 25. Кабель живлення та кабельний сальник у нижній пластині |
| 10. Гумовий захисний чохол | 26. Демпфер вібрацій (4 шт.) |
| 11. Вхідна трубка для подачі | 27. Пуск/стоп-блок, включаючи контактор та захист двигуна, запасна частина № -38 |
| 12. Ущільнювальне кільце для вхідної трубки подачі | 28. Запобіжний блокувальний вимикач (ключовий вимикач), шт. № -39 |
| 13. Підключення випускного отвору | 29. Ключ для запобіжного блокувального вимикача |
| 14. Ущільнювальне кільце для з'єднання вихід/вихід | |
| 15. Випускний отвір | |
| 16. Гвинт M5x10 (4 шт.) для випускного отвору | |

Рис. 1.10 Дробарка 550A-GKF з позначеними деталями

1.5. Класифікація роторно-ножових дробарок для подрібнення полімерних відходів

Існують і інші типи дробарок для подрібнення пластикових відходів. Для вторинної переробки полімерів найпоширенішими агрегатами для подрібнення є роторно-ножові дробарки та шредери. Ці машини використовуються на промисловому рівні для створення вихідних матеріалів

для подальшого перероблення, наприклад, для виробництва композитів, відновленого пластику або вторинних сировинних компонентів. Вони забезпечують ефективне та однорідне подрібнення, що є ключовим для підтримки якості відновлюваних матеріалів.

У роторно-ножових дробарках подрібнення відбувається за рахунок ударної дії ножів, які жорстко закріплені на роторі, що обертається. Ножі мають різну форму, розмір та кут різання, що дозволяє досягти різноманітних типів різання – від розрізання до роздроблення. Це забезпечує формування частинок різної форми та розміру, що може бути використано в залежності від вимог до вихідного продукту. Різноманітність конструкцій ріжучих органів відповідає різноманітності вимог до розміру, форми та властивостей вихідних частинок, що забезпечує гнучкість у використанні цих агрегатів.

Ключовим фактором, що впливає на розмір частинок, є швидкість обертання ротора, швидкість подачі матеріалу та кількість ножів, встановлених на роторі. Наприклад, збільшення швидкості обертання ротора призводить до збільшення ударної сили та, відповідно, до зменшення розміру частинок. Збільшення кількості ножів або їх встановлення у більш густому порядку також дозволяє досягти більш дрібного розміру частинок. Важливим також є регулювання швидкості подачі матеріалу - зашвидка подача може призвести до перенавантаження агрегату, а занижка - до погіршення якості подрібнення.

Роторно-ножові дробарки можна умовно класифікувати за наступними основними ознаками:

1. За способом подачі матеріалу: розділяють на дробарки з завантаженням через бункер та на дробарки з завантаженням за допомогою направляючих пристроїв.

2. За кількістю роторів: розділяють на однороторні, двухроторні та багатороторні (наприклад, 4-роторні). Багатороторні агрегати дозволяють досягти більшої ефективності та однорідності подрібнення, оскільки кожен

ротор може виконувати різний тип різання або виконувати подрібнення на різних стадіях.

3. За конструктивним виконанням ротора та його ножів: це включає різні типи роторів – наприклад, ротори з кріпленням ножів на різних відстанях, а також різні типи ножів. Конструкція ротора та ножів вибирається залежно від типу оброблюваного матеріалу, його властивостей та вимог до розміру частинок.

4. За розташуванням ротора у просторі: ротори можуть бути встановлені горизонтально, вертикально або у складній конфігурації, що дозволяє адаптувати машину до різних типів виробництв та просторових обмежень.

Крім того, деякі сучасні роторно-ножові дробарки оснащуються системами контролю та регулювання, які дозволяють автоматично встановлювати параметри роботи на основі вимог до вихідного продукту. Це включає системи вимірювання розміру частинок та вимірювання витрати енергії.

Однороторні ножові дробарки є найбільш розповсюдженими серед роторно-ножових дробарок у сфері вторинної переробки полімерних відходів. Це обумовлено їх простотою у використанні, надійністю, економічністю та достатньою ефективністю для подрібнення різноманітних типів полімерів.

Розглянемо типову конструкцію однороторної дробарки на прикладі моделі СМД-75 (рис. 1.1), яка є типовою для середнього та дрібного подрібнення полімерів.

Дробарка типу СМД складається з основних конструктивних елементів: ротора, ножів, корпусу, колодок, приводу та системи завантаження та вивантаження. Ротор, який є основним робочим органом, обертається навколо валу, встановленого в корпусі. На роторі жорстко закріплені ножі, які можуть мати різну форму та кут різання, що дозволяє досягти ефективного подрібнення. Колодки, встановлені в корпусі, мають можливість регулювання зазору за рахунок пружинних механізмів, що фіксуються гайками. Це дозволяє

змінювати відстань між ножами та колодками, що впливає на глибину різання та розмір вихідних частинок.

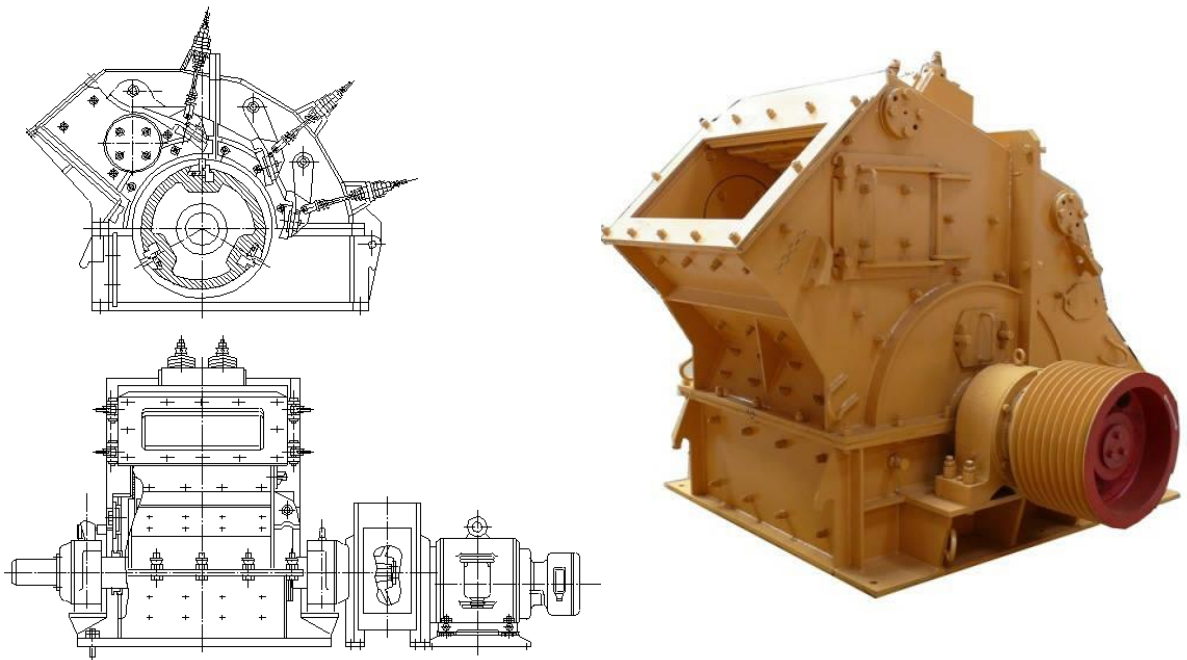


Рис. 1.1. Однороторна ножова дробарка СМД-75

Колодки встановлені таким чином, що їх зазор поступово зменшується відносно ножів ротора. Це забезпечує послідовне різання матеріалу на кілька етапів – від первинного розділення до дрібного подрібнення. Наприклад, на першому етапі ножі ротора розрізають великі частинки, а на наступних – зрізають та роздроблюють їх до більш дрібного розміру. Така конструкція дозволяє досягти однорідності частинок та підвищення ефективності роботи.

Подрібнюваний матеріал подається в камеру подрібнення через завантажувальний бункер, який є частиною системи подачі. Після подрібнення матеріал відводиться через вивантажувальний отвір, який розташований у нижній частині корпусу. Це дозволяє безперебійно вивантажувати продукт із дробарки для подальшої обробки.

Дробарка приводиться в дію електродвигуном, що передає потужність через клинопасову передачу, що забезпечує стабільне та надійне передавання обертання ротору. Частота обертання ротора в даній дробарці становить

550...700 об/хв, що дозволяє досягти високої продуктивності при одночасному забезпеченні достатньої енергетичної щільності для подрібнення.

Дробарка СМД-75 застосовується для середнього та дрібного подрібнення полімерних відходів, включаючи відходи від виробництва, утилізовані пластикові відходи, а також відходи з відновленого пластику.

Двухроторні ножові дробарки, такі як СМД-153, що зображена на рисунку 1.2, є важливим типом агрегатів для подрібнення відходів, особливо при переробці гуми. Вони відповідають вимогам до ефективності та надійності, тому застосовуються для подрібнення гумових відходів, шин, а також інших твердих відходів з високою відновлювальною вартістю.

Таблиця 1.2. Двухроторні ножові дробарки

| Показники | Дробарка | |
|--|----------------|----------------|
| | СМД-153 | СМД-175А |
| Розміри ротора, мм: | 1100 | 1500 |
| - діаметр | 1000 | 1200 |
| - довжина | | |
| Номінальна частота обертання роторів, об/хв: | | |
| першого | 170 | 60 |
| другого | 200 | 60 |
| Продуктивність, т/год | 700 | 225 |
| Потужність електродвигунів, кВт | 30×2 | 150 |
| Габаритні розміри, мм: | 4300×2800×1600 | 5210×6200×2100 |
| Маса дробарки, без двигунів, т | 18 | 37 |

Конструкція дробарки СМД-153 включає два ротори, кожен з яких приводиться в рух окремим електродвигуном через відповідні передачі. Це дозволяє незалежно регулювати швидкість обертання кожного ротора, що дає можливість досягти більш гнучкого та точного керування процесом подрібнення. Кожен ротор має ножі, які жорстко закріплені на валу та обертаються в протилежних напрямках, що забезпечує ефективне різання матеріалу при його потраплянні між роторами.

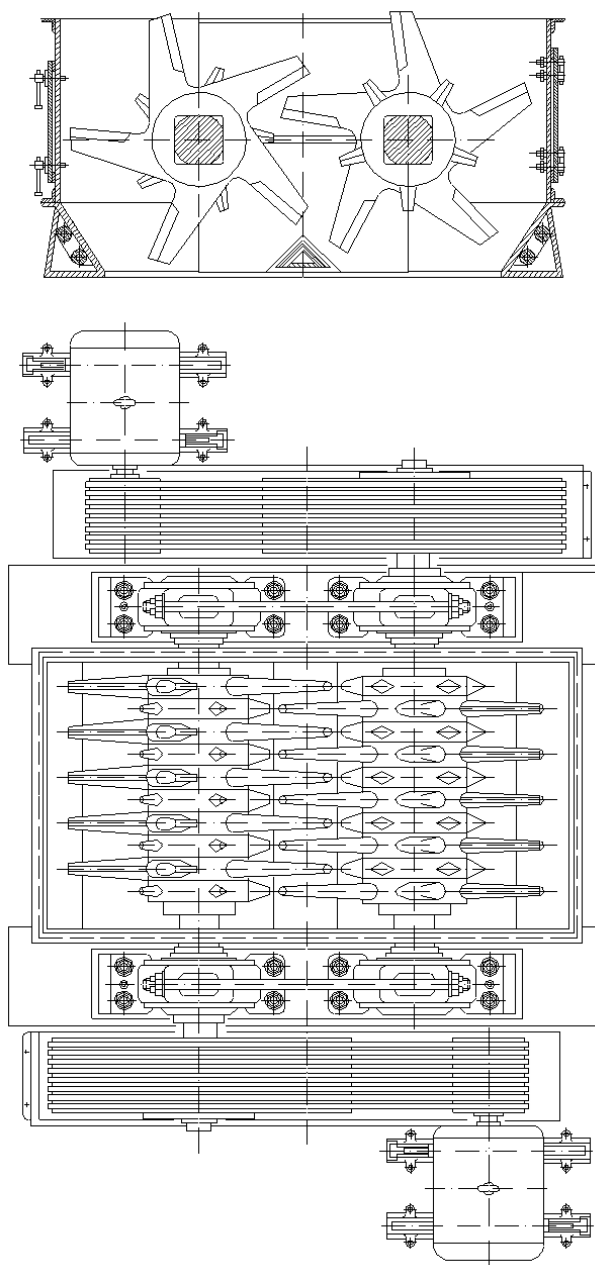


Рис. 1.2. Двухроторна ножова дробарка СМД-153

Подрібнюваний матеріал подається в камеру дробарки через завантажувальний бункер, який розташований у верхній частині корпусу. Це дозволяє зручно та ефективно завантажувати матеріал, особливо при використанні автоматизованих систем подачі. Після потрапляння в міжроторний простір, матеріал піддається дії ножів обох роторів, що забезпечує його розрізання та роздроблення на частинки відповідного розміру.

Використання двох роторів має кілька ключових переваг. Перше – зменшення енергозатрат. Оскільки навантаження розподіляється між двома

роторами, кожен з них несе меншу частку навантаження, що зменшує витрати на подрібнення. Друге – це підвищення ступеня подрібнення. Під час роботи двох роторів матеріал проходить через декілька етапів різання, що дозволяє досягти більш дрібного та однорідного розміру частинок. Третє – це підвищення надійності та тривалості роботи. Оскільки навантаження розподіляється, відбувається менше зношення ножів та інших робочих органів, що збільшує термін служби агрегату.

Двухроторні дробарки типу СМД-153 мають високу продуктивність, що є важливим параметром для виробництв та вторинної переробки. Вони забезпечують стабільну та однорідну роботу, що дозволяє отримувати якісний вихідний продукт для подальшої обробки.

На рисунку 1.3, а, зображено 4х-роторний шредер, що належить до серії WEIMA ZMK 30 – ZMK 50, виробництва Німеччини. Ці агрегати спеціалізовано відповідають вимогам до обробки крупногабаритних полімерних відходів, таких як пластикові бочки, каністри, ящики, профіль та інші відходи, які мають значну масу та розміри. Вони призначені для переробки таких відходів, які не піддаються обробці звичайними дробарками через габарити.

Конструкція шредера ZMK 30-ZMK 50 включає чотири ротори, що обертаються незалежно один від одного, і кожен з яких має встановлені ножі, які виконують різання та роздроблення матеріалу. Кожен ротор приводиться в рух окремим електродвигуном, що забезпечує незалежне керування швидкістю обертання кожного ротора, що дозволяє досягти більш гнучкого та точного керування процесом подрібнення.

Продуктивність шредера залежить від типу матеріалу, що подрібнюється, виду відходів (форми) і розмірів отворів калібруючої сітки. Наприклад, при подрібненні твердих полімерних відходів продуктивність може бути в межах від 300 до 2000 кг/год. Це залежить від властивостей матеріалу, форми відходів та вимог до розміру вихідних частинок. Швидкість

обертання роторів в цих шредерах зазвичай становить близько 25 об/хв, що дозволяє досягти стабільного та однорідного подрібнення без перевантаження агрегату.

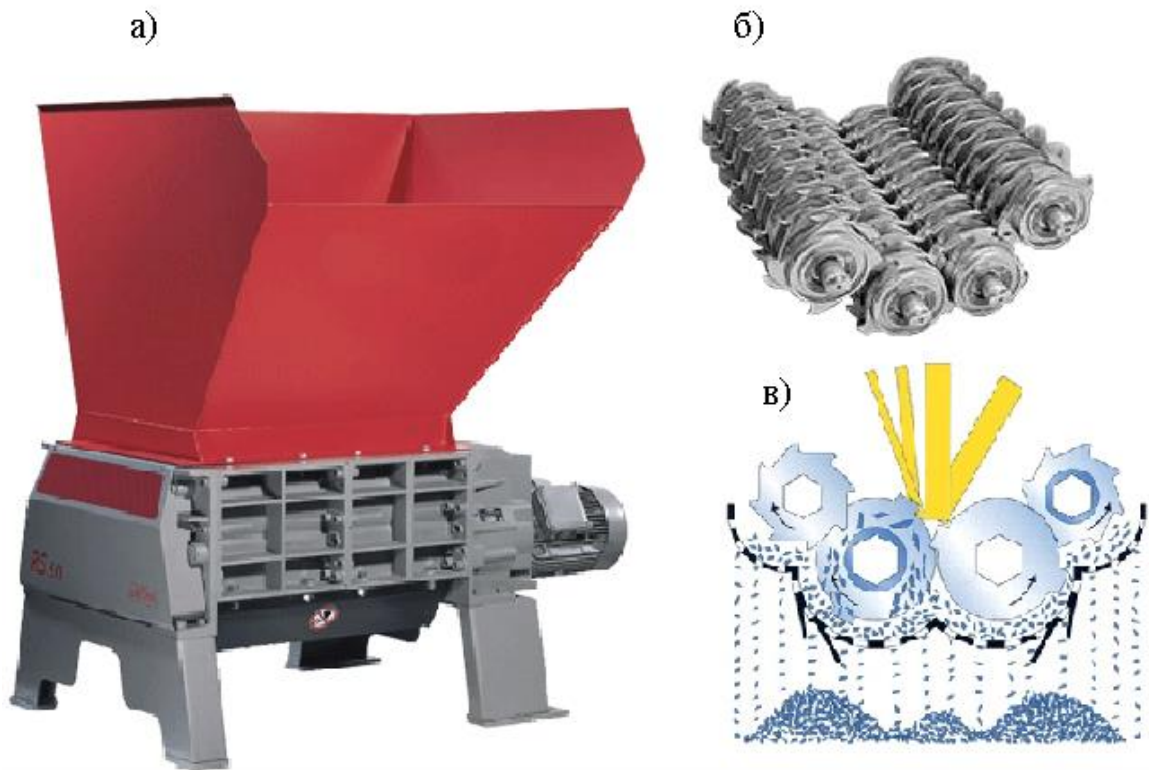


Рис. 1.3. Шредер ZMK (а – загальний вид, б – розташування роторів шредера, в – схема подрібнення)

Шредер оснащений автоматичним пристроєм захисту від перевантаження та реверсом, що забезпечує безперерйну роботу та тривалість експлуатації. Цей пристрій дозволяє автоматично відключати агрегат при перевантаженні або при виникненні неполадок, що зменшує ризик зношення робочих органів та відмови агрегату.

Відходи захвачуються роторами безпосередньо з завантажувального бункера, який розташований зверху корпусу. Після подрібнення відходи виходять через отвори калібруючої сітки, яка може мати розміри отворів від 15 до 80 мм, що дозволяє досягти відділення бажаного розміру частинок.

Ротори шредера, як показано на рисунку 1.3, б, мають складну конструкцію, що включає кілька рядів ножів, які встановлені на роторах з різним кутом різання. Це забезпечує ефективне різання та роздроблення матеріалу, що дозволяє досягти високої якості подрібнення.

Кожен з двигунів шредера має потужність від 5,5 до 18,5 кВт, що забезпечує достатню потужність для обробки крупногабаритних відходів. Двигуни приводять в дію два ротори, і кожен з них має свій незалежний реверс, що дозволяє досягти більш гнучкого та точного керування процесом подрібнення.

1.6. Конструкції ножів для роторно-ножових дробарок та способи їх кріплення

Ножі є робочими органами роторно-ножових дробарок, що використовуються у системах подрібнення полімерних відходів. Вони встановлені на роторах та виконують різання та роздроблення матеріалу за рахунок ударної та зрізувальної дії. Конструкція ножів значно впливає на ефективність, тривалість експлуатації та якість вихідного продукту. Існує кілька типів ножів, кожен з яких має свої конструктивні особливості та переваги, що дозволяє вибрати оптимальний тип для конкретного виробництва або типу оброблюваного матеріалу.

Одним з найпоширеніших типів ножів є ножі з пазами (рис 1.4), що використовуються для роторів ножових дробарок. Ці ножі виготовляються з сталі DS, яка має високу твердість (56–59 HRC) та відмінну відновлювальну вартість. Вони призначені для подрібнення утильного матеріалу, особливо пластмас. Ножі піддаються термічній обробці в спеціальних печах, що забезпечує їх високу твердість та зносостійкість. Головною перевагою ножів з пазами є їх простота у встановленні та швидка заміна, що дозволяє швидко ремонтувати дробарку при їх зношенні.

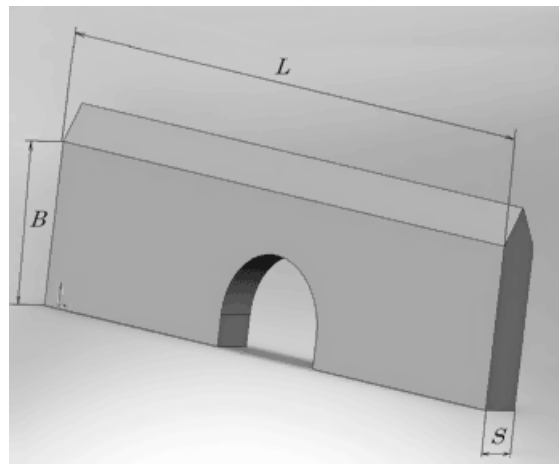


Рис.1.4. Ніж з пазом

Іншим типом ножів є ножі з рифленням (рис 1.5). Рифлення на ножовій заготовці та на ножовому барабані дозволяє спростити установку ножів по висоті, забезпечити надійне закріплення ножів у ножовому барабані та забезпечити стабільність роботи. Схема кріплення ножа з рифленням дозволяє досягти безперебійної роботи, оскільки ножі кріпляться за допомогою спеціальних механізмів, що забезпечують їх незмінне положення та стабільність. Такі ножі мають високу надійність та тривалість експлуатації, що робить їх відмінними для використання у виробництвах з високим обсягом.

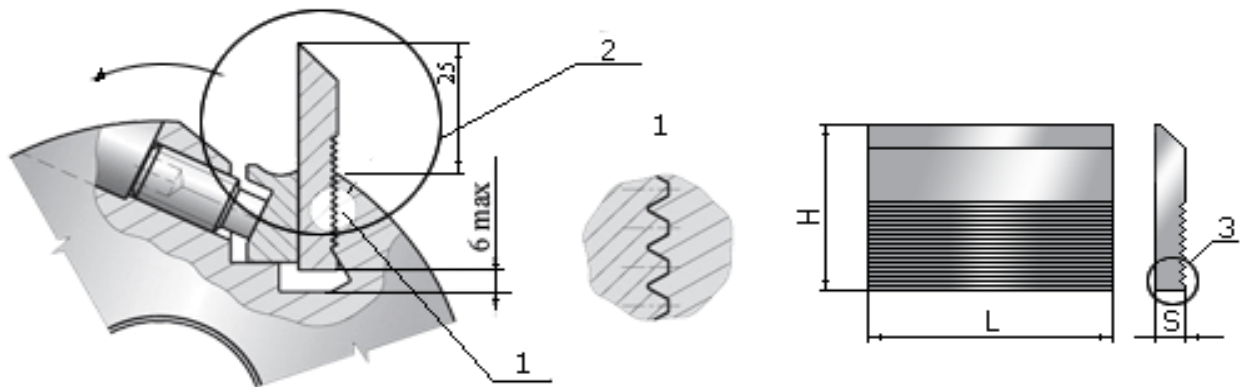


Рис.1.5. Схема кріплення ножа з рифленням

Останнім типом ножів, що набуває поширення, є поворотні ножі. Ці ножі кріпляться на спеціальні V-образні ротори. Ножі кріпляться до посадочних місць, що приварені до ротора, що дозволяє їх легко встановлювати та демонтувати. Схема кріплення поворотних ножів дозволяє їх легко повертати іншою стороною при затуплюванні, що збільшує термін служби ножів та

підвищує економічність виробництва. Такі ножі мають просту конструкцію, що дозволяє їх легко встановлювати та замінювати, а також надійне кріплення, що забезпечує стабільність роботи.

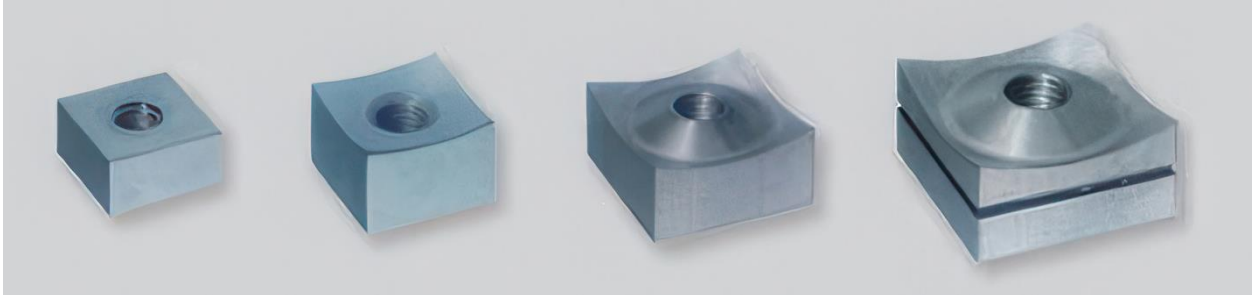


Рис.1.6. Поворотні ножі

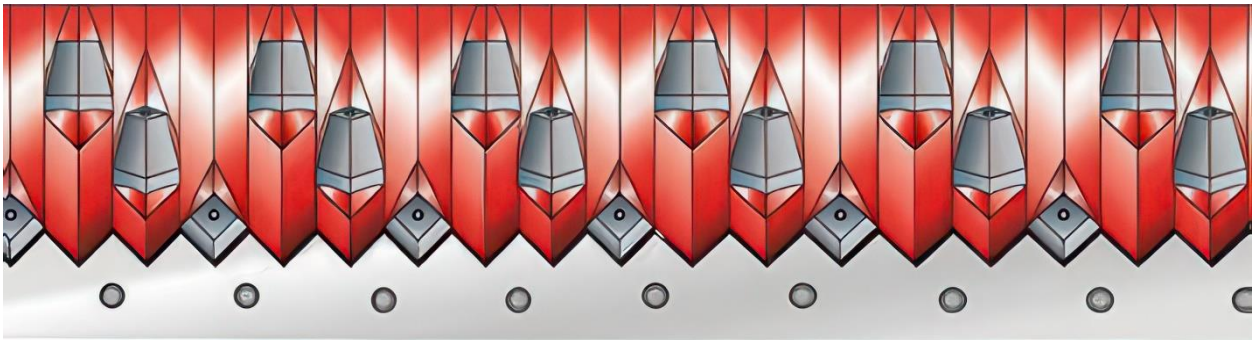


Рис.1.7. Схема кріплення поворотних ножів

Таблиця 1.3. Порівняння різних типів робочих органів дробарок полімерів

| Тип ножа | Ніж з пазом | Рифлений ніж | Поворотний ніж |
|---------------------|---|--|--|
| Форма | Пряма кромка з пазом під кріплення | Прямий з зубцями | Пластинчатий різець ромбовидної форми |
| Метод кріплення | Кріплення болтом в пазі ротора | Притискання, зчеплення з ротором за допомогою зубців | Кріплення гвинтом через центр ножа |
| Матеріал | Сталь ХВГ | Сталь D2 | Стальна підставка з карбідними вставками |
| Для якого матеріалу | Загальні вироби з пластику | Листи, плівки, м'якій полімери | Композити, скловолокно |
| Переваги | Надійне кріплення, позиціонування, низька ціна і легкість заточування | Гарне зачеплення матеріалу, менше проковзування | Швидка заміна/поворот до наступної ріжучої |

| | | | |
|----------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|
| | | | кромки, великий ресурс |
| Недоліки | Концентратори напружень в зоні пазу | Складна заточка | Висока вартість |

1.7. Висновок

У процесі виробництва пива подрібнення солоду є одним із ключових етапів, від якого залежать якість подальшого затирання та стабільність технологічного процесу. Для цієї операції найчастіше застосовуються валкові дробарки, основною конструкційною відмінністю яких є кількість робочих органів – валків. Залежно від кількості валків та їхнього розташування в дробарці змінюються продуктивність, рівномірність і якість подрібнення.

Найбільш розповсюдженими є шестивалкові, п'ятивалкові та чотирихвалкові дробарки. На великих підприємствах, таких як ПрАТ «Оболонь», використовуються шестивалкові дробарки типу Maltomat MDBA-1000-6-S, які забезпечують високу продуктивність і точне регулювання фракційного складу подрібненого солоду. Для середніх виробництв доцільним є використання п'ятивалкових дробарок, що поєднують достатню продуктивність із компактністю. Чотирихвалкові дробарки найкраще підходять для малих пивоварень, де не потрібна значна потужність, але важлива стабільність процесу та простота обслуговування.

Крім солододробарок, які є стандартним обладнанням на лінії виробництва пива, на заводі «Оболонь» використовується дробарка для полімерних відходів виробництва, а саме – бракованих пластикових пляшок та використаних пляшок з тих партій, які не пройшли контроль якості. Одразу після видування, браковані пляшки відділяються та відводяться на подрібнення. Пляшки подрібнюються, а отримані пластикові пластівці відправляють на переробку на сторонні підприємства, які на цьому спеціалізуються.

Дробарки для полімерів, подібно до валкових, класифікуються насамперед за кількістю робочих органів – роторів із ножами. Найпростішим типом є однороторні дробарки (наприклад, СМД-75), які вирізняються

конструкційною простотою, універсальністю та помірною вартістю. Двуроторні дробарки (як-от СМД-153) забезпечують вищу продуктивність і розширений спектр матеріалів для подрібнення, проте мають складнішу конструкцію та більші габарити. Чотирьохроторні дробарки є найбільш потужними, продуктивними та гнучкими у налаштуванні – кожен ротор може мати індивідуальний привід. Додатково встановлювана калібрувальна решітка дозволяє регулювати розмір готової фракції в діапазоні 15–80 мм, що забезпечує стабільну якість грануляції.

Основним робочим елементом таких дробарок є ножі, тип яких визначає придатність обладнання до різних полімерних матеріалів. Ножі з пазом для кріплення є простими у виготовленні, легко заточуються і забезпечують надійне з'єднання з ротором, проте менш ефективні при роботі з тонкостінними або гнучкими виробами. Ножі з рифленням забезпечують краще зчеплення з матеріалом, що подрібнюється, і ефективніші при роботі з тонкими полімерними плівками, хоча й складніші в обслуговуванні. Для обробки високоміцних полімерів і композитів доцільно застосовувати поворотні ножі, які мають чотири робочі кромки, легко замінюються та характеризуються підвищеною довговічністю. Водночас усі типи ножів мають спільний недолік – значний опір під час різання, зумовлений великою площею контакту леза з матеріалом.

В Україні галузь вторинної переробки полімерів перебуває на стадії розвитку та здебільшого залишається дотаційною. Попри це, ПрАТ «Оболонь» демонструє приклад раціонального підходу до поводження з пластиковими відходами, налагодивши пряму співпрацю з підприємствами, що спеціалізуються на переробці. Такий підхід не лише знижує екологічне навантаження, а й створює потенціал для подальшої оптимізації технологічного циклу за рахунок повторного використання сировини.

Таким чином, проведений аналіз конструкційних особливостей дробарок для полімерів дозволяє визначити напрямок їх подальшого вдосконалення .

2. ТЕОРЕТИЧНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ НАУКОВО- ДОСЛІДНИЦЬКОГО СПРЯМУВАННЯ

2.1. Математична модель процесу різання ПЕТ-пляшки

Математичну модель розроблено на основі принципу дії ножового механізму для подрібнення ПЕТ-пляшок методом різання, конструкцію якого попередньо запропоновано.

У процесі математичного моделювання використано ту саму конфігурацію ножа, що й у зазначеному пристрої. За застосування ножів такої конструкції сили різання та сили нормальних реакцій опору спрямовані назустріч одна одній.

На рис. 2.1 подано схему прикладення сил до поверхні ПЕТ-пляшки на початковому етапі процесу різання.

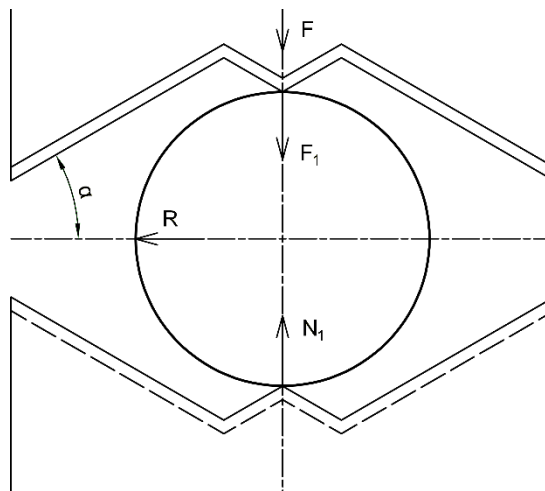


Рис.2.1. Схема прикладення сил до поверхні ПЕТ пляшки на початку процесу різання

У цьому випадку процес різання відбувається в кілька послідовних етапів. Перший етап полягає у деформації ПЕТ-пляшки. До неї підводиться ніж, і під дією сил F_1 відбувається деформація стінки (рис. 2.2).

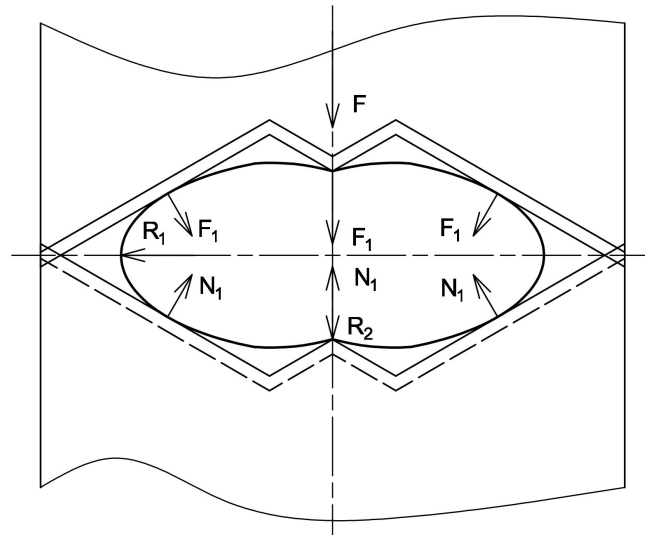


Рис.2.2. Схема сил на першому етапі різання

З боку контрножа на пляшку діють сили нормальної реакції опору, внаслідок чого її форма набуває еліпсоподібного вигляду.

Контакт між ножем і поверхнею пляшки здійснюється не в одній точці, а по певній площині e (рис.2.4.).

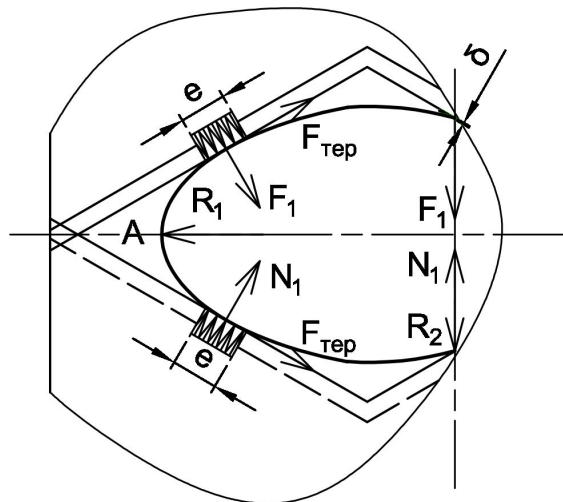


Рис.2.3. Схема сил, що діють на пляшку при її деформації

Процес деформації триватиме доти, доки напруження в точці А не досягне критичного рівня.

Для визначення цього напруження запишемо рівняння:

$$\tau_{зг}^A = \varepsilon \cdot E \leq [\sigma_{зг}],$$

ε – видовження; E – модуль пружності матеріалу.

Видовження матиме значення:

$$\varepsilon = \delta/R,$$

де δ – товщина стінки; R – радіус еліпса.

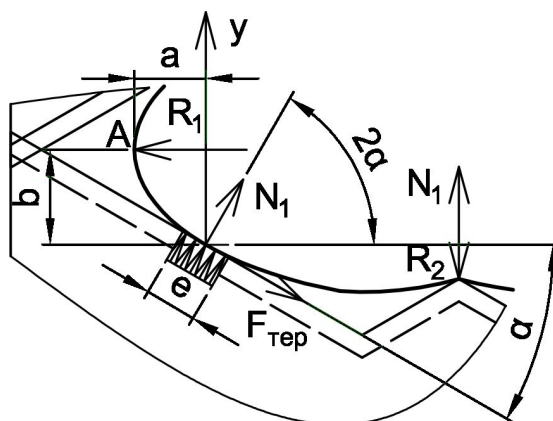


Рис.2.4. Межі зміни напрямку сил різання

Згинаючий момент відносно точки А виражається рівнянням:

$$M_{зг}^A = N \cdot b \cdot \cos 2\alpha + N \cdot a \cdot \sin 2\alpha + F_{тр} \cdot b \cdot \cos \alpha - F_{тр} \cdot \alpha \cdot \sin \alpha$$

Сила тертя ножа по стінці при цьому буде рівна:

$$F_{тр} = N \cdot f ,$$

де f – коефіцієнт тертя ножа і матеріала.

В такому випадку рівняння матиме вигляд:

$$M_{зг}^A = N(b \cdot \cos \alpha (2 \cos \alpha + f) + a \cdot \sin \alpha (2 \cos \alpha - f) - b)$$

Тоді:

$$\tau_{зг} = M_{зг}/W_{зг} ,$$

де $W_{зг}$ – опір поперечного перерізу: в точці А приймемо, що поперечний переріз згину матиме форму прямокутника:

$$W_{зг} = \delta \cdot e/6$$

де δ – товщина стінки; e – довжина контакту леза.

Підставимо в рівняння отримані формули та знайдемо N .

$$N = (\tau_{зг} \cdot \delta \cdot e) / 6(b \cdot \cos \alpha (2 \cos \alpha + f) + a \cdot \sin \alpha (2 \cos \alpha - f) - b)$$

Другий етап – різання пляшки.

Згідно принципу Д'Аламбера:

$$F + G + F_i = 0,$$

де F – сила різання; G – сила адгезії; F_i – сила інерції.

Оскільки в цьому випадку процес різання відбуватиметься під кутом (рис.2.5.), запишемо:

$$(F_1 + G_1 + F_{i1}) \sin \alpha = 0,$$

де $G_1 = C + k_1(dy/dt)$ – коефіцієнт адгезії.

$$F_{i1} = m\ddot{y} = m(d^2y/dt^2),$$

де m – приведена маса ножа та всіх рухомих частин приводу.

З отриманих рівнянь запишемо:

$$(F_1 + (C + k_1(dy/dt)) + m(d^2y/dt^2)) \sin \alpha = 0$$

Розв'яжемо диференціальне рівняння, за умови $\sin \alpha \neq 0$,

тоді:

$$F_1 + (C + k_1(dy/dt)) + m(d^2y/dt^2) = 0$$

$$m(d^2y/dt^2) + k_1(dy/dt) + C + F_1 = 0$$

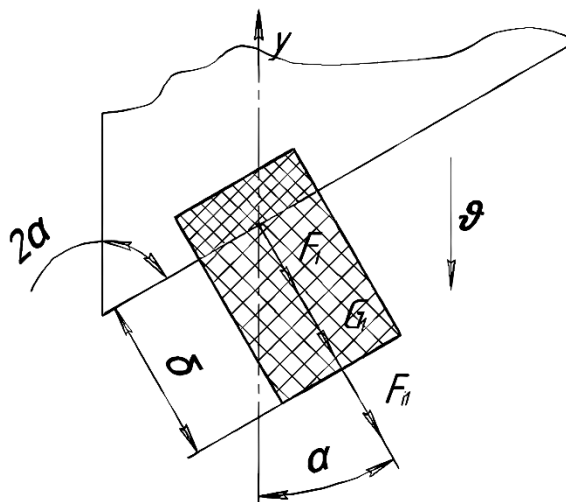


Рис.2.5. Схема сил, які діють на лезо ножа

$dy/dt = V_0$ – швидкість руху леза на етапі заглиблення в матеріал, з початковими умовами $t = 0, y = 0$, (де t – час на момент заглиблення ножа в матеріал, y – глибина заглиблення леза ножа в матеріал).

Розв'язавши рівняння, отримаємо:

$$F = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}} \cdot (C + V_0 k_1) + C}{e^{-\frac{k_1}{m}} - 1},$$

де $dy(t)/dt = (V_{\text{вх}} + V_{\text{вих}})/2$ – швидкість руху леза.

$V_{\text{вх}}$ – швидкість на початку заглиблення леза ножа в матеріал;

$V_{\text{вих}}$ – швидкість на етапі виходу леза ножа з матеріалу.

2.2. Експериментальне дослідження процесу розділення ПЕТ-пляшки

Метою експериментальних досліджень є встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів процесу руйнування поліетилентерифталату (ПЕТ, ПЕТФ) на руйнівне напруження та критичну деформацію до руйнування.

Об'єктом досліджень виступають ПЕТ-пляшки об'ємом 0,5 л – найпоширеніші упаковки, які складають найбільший обсяг відходів цього матеріалу у реальних умовах.

Для визначення чисельних характеристик міцності ПЕТ проведено випробування матеріалу на зріз у залежності від магістрального тиску, товщини стінок пляшки та кута заточки ножа.

Об'єктами випробувань були ПЕТ-пляшки об'ємом 0,5 л виробництва фірм «Росинка», «Моршинська» та «Миргородська».

Дослідження проведено за допомогою експериментальної установки, створеної для вивчення параметрів процесу різання.

2.3. Конструкція і принцип роботи експериментальної установки

Для перевірки адекватності отриманих результатів за математичною моделлю була розроблена схема лабораторної установки (рис. 2.6).

Подачу повітря до експериментальної установки забезпечує компресор, а контроль тиску, що діє на рухомий ніж, – регулятор тиску 1. Система керування рухомих ножем зібрана на основі бістабільного розподільника 5/3, який забезпечує пневматичну подачу повітря для підходу та відходу леза до/від ПЕТ-пляшки. Зусилля (тиск) вимірюється аналоговим датчиком тиску 3, сигнал від якого передається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Переміщення штоку пневмоциліндра вимірюється аналоговим датчиком переміщення 6, сигнал від якого також передається на АЦП. На АЦП відбувається перетворення аналогових сигналів у цифрові, після чого вони передаються на електронно-обчислювальну машину (ЕОМ).

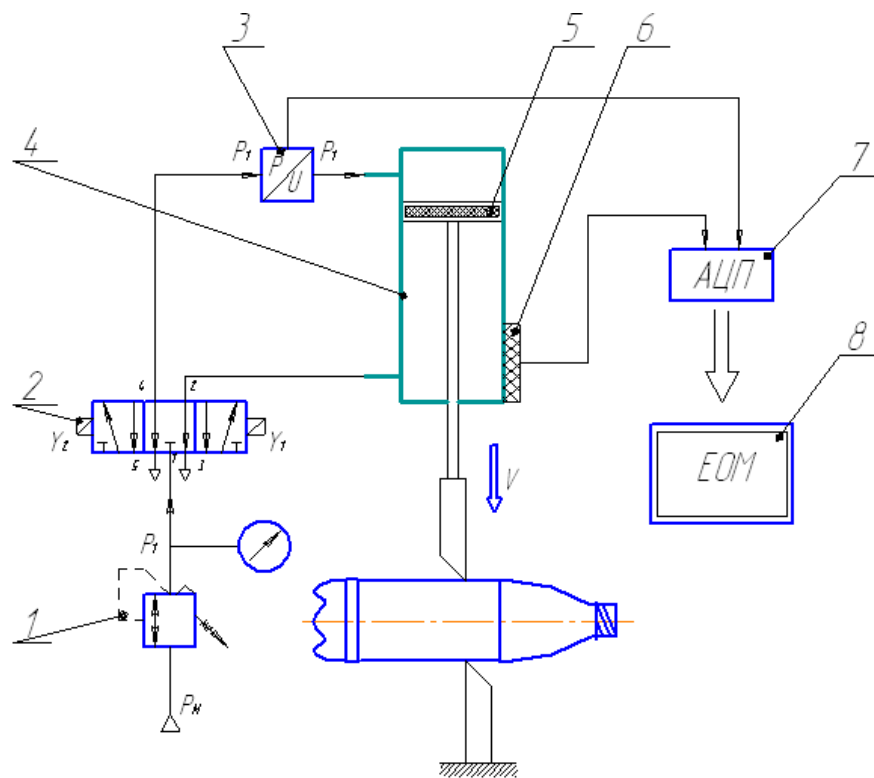


Рис.2.6. Схема дослідної установки для визначення параметрів різання ПЕТ-пляшок:

1 – регулятор тиску; 2 – розподільник 5/3 бістабільний; 3 – аналоговий датчик тиску; 4 – пневмоциліндр двохсторонньої дії з магнітним кільцем 5 на поршні; 6 – датчик переміщення аналоговий; 7 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 8 – електронно-обчислювальна машина (ЕОМ).

За схемою розроблено та виготовлено експериментальну установку (рис. 2.7), яка забезпечує пневматичне керування рухомих ножем та вимірювання ключових параметрів процесу різання. Вузол кріплення рухомого ножа до пневмоциліндра виконаний з використанням направляючих елементів, що забезпечують паралельне переміщення ножа відносно площини різання. Це дозволяє забезпечити рівномірність процесу різання по всій довжині ПЕТ пляшки.

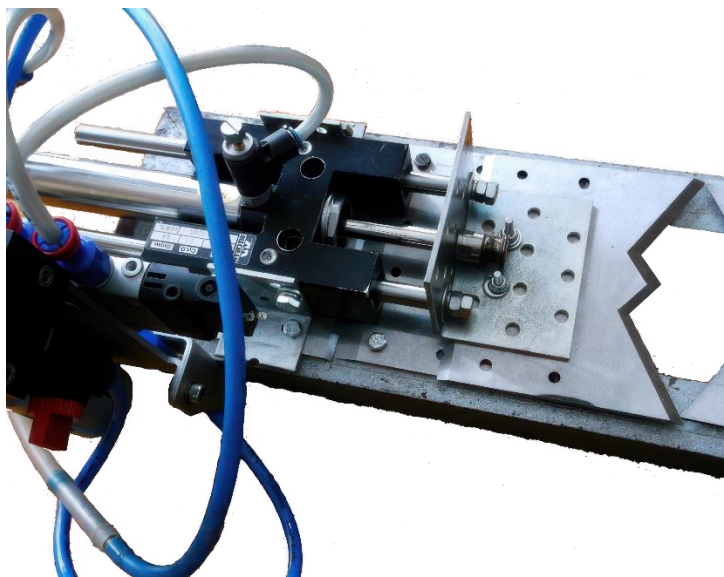


Рис.2.7. Експериментальна установка

Переміщення штока пневмоциліндра контролюється аналоговим датчиком переміщення (рис. 2.8), який генерує вихідний сигнал у діапазоні 0-10 В.



Рис.2.8. Аналоговий датчик переміщення

Тиск, що діє на вході в порожнину пневмоциліндра, вимірюється аналоговим датчиком тиску (рис. 2.9), також з вихідним сигналом 0-10 В. Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП, рис. 2.10) виконує функцію перетворення аналогових сигналів датчиків у цифрову форму для подальшої обробки та аналізу в електронно-обчислювальній машині.



Рис.2.9. Датчик тиску аналоговий



Рис.2.10. Аналогово-цифровий перетворювач

Для вивчення впливу кута заточки ножа на процес різання було спроектовано та виготовлено три пари ножів з кутами заточки 15° , 30° та 45° (рис. 2.11). Конструкція ножів передбачає фіксацію пляшки під час різання, що сприяє стабілізації процесу та покращує якість виконання різання.

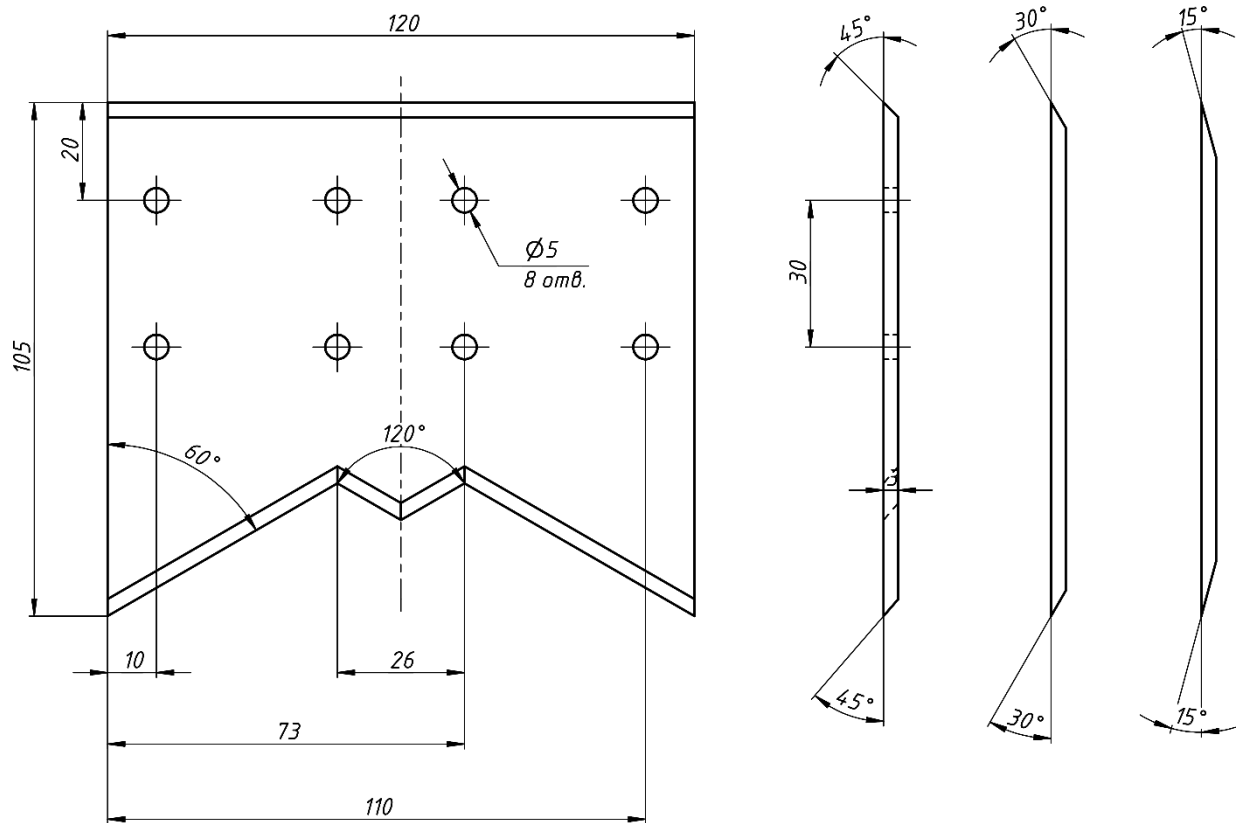


Рис.2.11. а) Конструкція прототипу ножа для установки;
б) кут заточки ножів.

2.4. Обґрунтування вибору факторів експерименту

Після систематичного огляду літературних джерел, присвячених питанням подрібнення полімерних матеріалів, було визначено ключові параметри, які впливають на ефективність та якість процесу різання ПЕТ-пляшок. Для проведення багатофакторного експерименту були вибрані наступні регульовальні фактори, що відповідають технічним та фізико-механічним особливостям оброблюваних матеріалів:

- Магістральний тиск – встановлено в межах 4...6 бар, що забезпечує стабільну роботу пневматичної системи та дозволяє отримувати керовані значення різальної сили при різанні.
- Товщина стінки ПЕТ-пляшки – врахована у різних зонах пляшки, оскільки вона варіюється в залежності від конструкції:

Горловина – 0.30...0.45 мм;

Середина – 0.22...0.30 мм;

Днище – 0.25...0.40 мм.

- Кут заточки ножа – встановлено в діапазоні 15°...45°, що дозволяє охопити широкий спектр геометричних рішень та визначити їх вплив на параметри різання.

Зростання магістрального тиску прямо впливає на величину різальної сили, що діє на ніж під час розділення. Це відомо з принципів пневматичної передачі руху та сили: збільшення тиску в системі призводить до збільшення гідравлічного (або пневматичного) зусилля, яке передається циліндром.

Вибрані межі тиску – 4...6 бар – відповідають рекомендованим стандартам ISO для пневматичних елементів, що забезпечує надійну та безпечно експлуатацію пневматичної системи в умовах експерименту. Більше того, цей діапазон дозволяє отримати вимірювані значення зусиль різання, що є достатньо різними для статистично значущого аналізу.

Оскільки в експериментальній установці використовувався пневмоциліндр з діаметром штока $\varnothing 25$ мм, можна виконати розрахунок зусиль різання за відомою формулою:

$$F = 4 \cdot 10^5 \cdot 3,14 \cdot 0,025^2 / 4 = 196,25 \text{ (Н)}$$

$$F = 6 \cdot 10^5 \cdot 3,14 \cdot 0,025^2 / 4 = 294,37 \text{ (Н)}$$

Одним із ключових параметрів, що впливає на ефективність та енергетичні витрати під час різання, є кут заточки ножа. Відомо, що зменшення кута заточки зумовлює зниження опору руху леза в різанні, оскільки зменшується кут нахилу різальної кромки, що сприяє більш глибокому та рівномірному відсіканню матеріалу. Тому кут заточки був обраний як один з основних факторів дослідження, що дозволяє оцінити його вплив на зусилля різання.

Окрім того, товщина стінки ПЕТ-пляшки є неоднорідним параметром, що значно впливає на зусилля різання. Вона змінюється вздовж довжини пляшки та відрізняється від одного виробника до іншого, залежно від форми

пляшки та вихідної преформи. Для того, щоб визначити реальний діапазон варіювання цього параметра, було проведено серію вимірювань товщини стінок ПЕТ-пляшок різних виробників, що дозволило встановити межі варіювання для подальшого експериментального дослідження.

Заміри товщин стінок ПЕТ-пляшок різних виробників

Для встановлення реального діапазону варіювання товщини стінки ПЕТ-пляшок у досліджуваному варіанті було обрано дві типи пляшки – з об'ємом 0,5 л та 1,5 л. Цей вибір був обґрунтований необхідністю охопити різні габаритні та конструктивні варіанти пляшок.

Вимірювання товщини стінок проводились у відповідності до відміток, які вказані на рисунку 2.12. Результати вимірювань систематично занесені до таблиці 2.1.

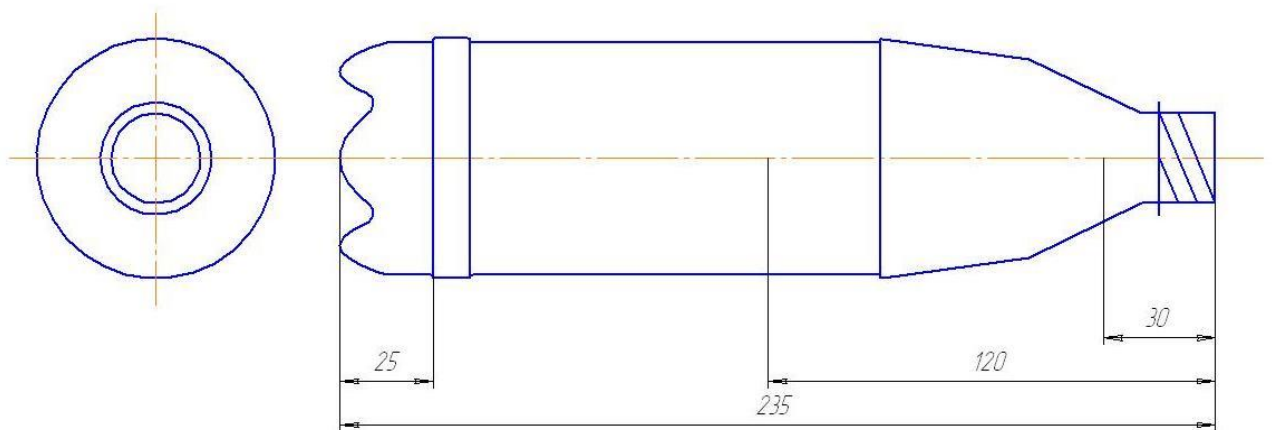


Рис.2.12. ПЕТ-пляшка, місткістю 0,5 л.

Вимірювання товщини стінок пляшки проводились на відстанях, зазначених вище, оскільки ці точки відповідають конструктивним переходам – від горловини до середини та від середини до днища – які були виявлені під час попередніх вимірювань по довжині.

Таблиця 2.1. Товщина стінок ПЕТ-пляшок різних виробників

| Назва бренду | Частина пляшки | Об'єм 0.5 л, мм | Об'єм 1.5 л, мм |
|--------------|----------------|------------------|------------------|
| Росинка | горловина | 0,30-0,32 (0,45) | 0,29-0,32 (0,45) |

| | | | |
|--------------|-----------|------------------|------------------|
| | середина | 0,25 | 0,26 |
| | днище | 0,29-0,31 (0,46) | 0,29-0,32 (0,46) |
| Миргородська | горловина | 0,26-0,30 (0,42) | 0,27-0,31 (0,45) |
| | середина | 0,29-0,30 | 0,25-0,28 |
| | днище | 0,29-0,31 (0,40) | 0,29-0,32 (0,41) |
| Моршинська | горловина | 0,25-0,26 (0,35) | 0,25-0,25 (0,39) |
| | середина | 0,22-0,23 | 0,25-0,27 |
| | днище | 0,25-0,26 (0,34) | 0,29-0,30 (0,38) |

2.5. Порядок проведення експерименту для визначення зусилля різання

Перед проведенням експерименту була створена матриця експерименту (табл. 2.2.).

Таблиця.2.2. Матриця проведення експерименту

| № | Z ₀ | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₁ Z ₂ | Z ₁ Z ₃ | Z ₂ Z ₃ | Z ₁ Z ₂ Z ₃ | №. ранд. |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|----------|
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | 1 |
| 2 | + | - | + | + | - | - | + | - | 8 |
| 3 | + | - | - | + | + | - | - | + | 7 |
| 4 | + | - | + | - | - | + | - | + | 2 |
| 5 | + | + | - | - | - | - | + | + | 3 |
| 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | 6 |
| 7 | + | + | - | + | + | + | - | - | 5 |
| 8 | + | + | + | - | - | - | - | - | 4 |

Експериментальні дослідження з визначення зусиль різання ПЕТ-пляшок проводились окремо для трьох конструктивних зон – горловини, середини та днища – за аналогічною методикою для кожного варіанта.

Процедура включала наступні кроки:

1. На установку монтували ножі з попередньо вибраним кутом заточки;
2. Після вмикання компресора тиск в магістралі встановлювався за допомогою регулятора в діапазоні 4-6 бар;
3. На кожній пляшці відмічали точку різання на однаковій відстані від верхньої кромки;
4. Пляшку розміщували між ножами так, щоб різання відбувалося точно на відміченій позиції;
5. При натисканні на кнопку запуску розподільник відкривався, тиск подавався у порожнину пневмоциліндра, що викликало висування штока і, відповідно, різання пляшки;
6. Зусилля, що виникали під час різання, вимірювалися датчиком тиску, сигнал якого конвертувався в цифровий за допомогою АЦП і передавався на електронний обчислювальний пристрій (ЕОМ);
7. Переміщення штока вимірювалися датчиком переміщення, також з аналоговим сигналом, який оброблявся АЦП і передавався на ЕОМ;
8. Результати експерименту відображалися у вигляді динамічних графіків, отриманих в реальному часі;
9. З графіків визначалися критичні значення тиску, при яких починається процес різання, і ці дані заносилися до таблиці для подальшого аналізу.

На рис. 2.13 показана установка в роботі.

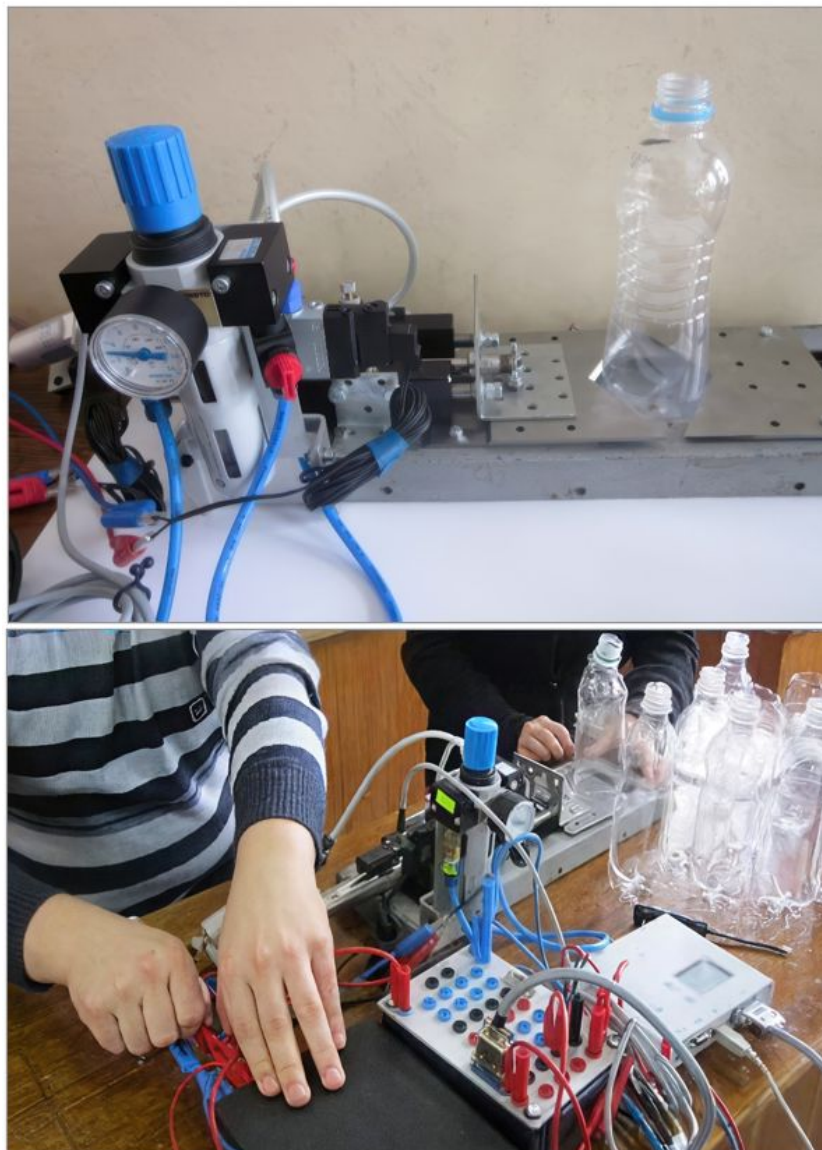


Рис.2.13. Робота дослідної установки.

Для визначення зусиль різання використовувалися динамічні графіки, отримані в реальному часі: верхня лінія відображала переміщення штока пневмоциліндра, а нижня – тиск, при якому відбувалося різання.

Значення тиску, виміряні датчиком, множили на площу поперечного перерізу порожнини пневмоциліндра, що дозволило обчислити результуючі зусилля різання.



Рис.2.14. Зусилля різання горловини ПЕТ-пляшки.

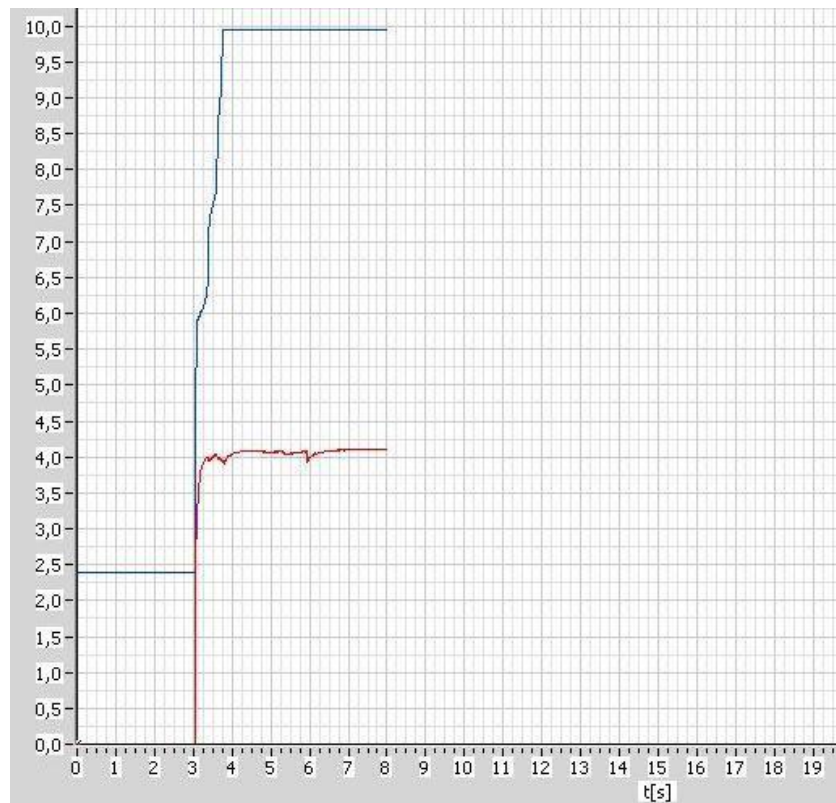


Рис.2.14. Зусилля різання середини ПЕТ-пляшки.

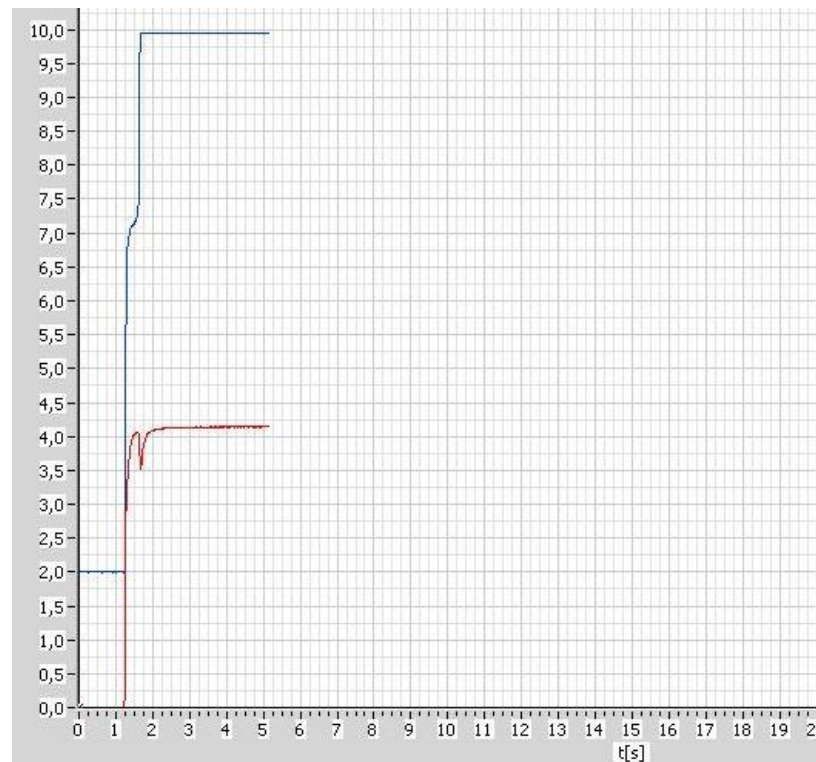


Рис.2.15. Зусилля різання днища ПЕТ-пляшки.

Таблиця 2.3. Результати експерименту

| Горловина ПЕТ-пляшки | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| № | Y ₁ . бар | Y ₂ . бар | Y ₃ . бар | Y _{сер.} бар | F ₁ . Н | F ₂ . Н | F ₃ . Н | F _{сер.} Н |
| 1 | 3.66 | 3.69 | 3.85 | 3.73 | 179.69 | 180.92 | 188.65 | 183.08 |
| 2 | 3.45 | 3.55 | 3.60 | 3.53 | 169.27 | 174.17 | 176.63 | 173.35 |
| 3 | 3.75 | 3.95 | 3.95 | 3.88 | 183.98 | 193.80 | 193.80 | 190.52 |
| 4 | 3.85 | 3.98 | 3.91 | 3.91 | 188.89 | 195.02 | 191.96 | 191.96 |
| 5 | 5.40 | 5.13 | 5.47 | 5.33 | 264.94 | 251.45 | 268.13 | 261.50 |
| 6 | 5.40 | 5.25 | 5.30 | 5.32 | 264.69 | 257.58 | 260.03 | 260.77 |
| 7 | 5.90 | 5.93 | 5.60 | 5.81 | 289.47 | 290.70 | 274.75 | 284.97 |
| 8 | 5.53 | 5.28 | 4.96 | 5.25 | 271.07 | 258.80 | 243.35 | 257.74 |
| Середина ПЕТ-пляшки | | | | | | | | |
| № | Y ₁ . бар | Y ₂ . бар | Y ₃ . бар | Y _{сер.} бар | F ₁ . Н | F ₂ . Н | F ₃ . Н | F _{сер.} Н |
| 1 | 2.60 | 2.85 | 3.53 | 2.99 | 127.56 | 139.83 | 172.95 | 146.78 |
| 2 | 3.65 | 3.70 | 3.78 | 3.71 | 179.08 | 181.53 | 185.21 | 181.94 |
| 3 | 3.49 | 3.48 | 3.45 | 3.47 | 171.11 | 170.49 | 169.27 | 170.29 |

| 4 | 3.65 | 3.44 | 3.65 | 3.58 | 179.08 | 168.78 | 179.08 | 175.64 |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 5 | 5.18 | 5.25 | 5.28 | 5.23 | 253.90 | 257.33 | 258.80 | 256.68 |
| 6 | 5.00 | 4.60 | 5.20 | 4.93 | 245.31 | 225.69 | 255.13 | 242.04 |
| 7 | 5.30 | 5.14 | 5.18 | 5.21 | 259.79 | 252.18 | 254.14 | 255.37 |
| 8 | 5.33 | 5.28 | 5.35 | 5.32 | 261.26 | 258.80 | 262.48 | 260.85 |
| Днище ПЕТ-пляшки | | | | | | | | |
| № | Y ₁ . бар | Y ₂ . бар | Y ₃ . бар | Y _{сеп.} бар | F ₁ . Н | F ₂ . Н | F ₃ . Н | F _{сеп.} Н |
| 1 | 3.65 | 3.50 | 3.58 | 3.58 | 179.08 | 171.72 | 175.64 | 175.48 |
| 2 | 3.75 | 3.78 | 3.90 | 3.81 | 183.98 | 185.46 | 191.34 | 186.93 |
| 3 | 3.52 | 3.73 | 3.60 | 3.61 | 172.45 | 182.76 | 176.63 | 177.28 |
| 4 | 3.45 | 3.59 | 3.53 | 3.52 | 169.27 | 175.89 | 172.95 | 172.70 |
| 5 | 5.18 | 5.25 | 5.23 | 5.22 | 253.90 | 257.58 | 256.35 | 255.94 |
| 6 | 5.28 | 5.43 | 5.35 | 5.35 | 258.80 | 266.16 | 262.24 | 262.40 |
| 7 | 5.30 | 5.40 | 5.13 | 5.28 | 260.03 | 264.94 | 251.45 | 258.80 |
| 8 | 5.35 | 5.35 | 5.44 | 5.38 | 262.36 | 262.48 | 266.78 | 263.87 |

Для визначення оптимальної кількості повторів (дублів) майбутнього експерименту попередньо проводяться пілотні випробування, метою яких є оцінка розсіювання результатів – тобто визначення дисперсії вимірювань.

Мінімальна кількість вимірів для горловини, середньої частини та днища ПЕТ-пляшки визначається за наступною методикою:

$$3\sigma = \Delta a_i$$

$$\Delta a_i = a \cdot \varepsilon$$

$a = 183$ – середнє значення зусилля, (Н).

$$\varepsilon \approx \Delta a_i \cdot a = 0.02 \cdot 183 = 3.66,$$

де ε - довірча оцінка точності;

$$\sigma = \frac{3.66}{3} = 1.22,$$

де σ – середньоквадратичне відхилення;

$$n_{min} \geq [t(P) / \varepsilon]^2 \cdot \sigma^2$$

$$t(P) = 4,11$$

де $t(P)$ – коефіцієнт Стюдента, що вибирається по таблиці, залежно від P ($P=0,98$ – надійність)

$$n_{min} \geq [4,11 / 3,66]^2 \cdot 1,22^2 = 1,8767 \approx 2$$

Кількість вимірів в експерименті приймаємо $n=3$.

Результати розрахунків експерименту заносимо до таблицю 2.4.

Таблиця 2.4. Результати розрахунків експерименту

| Частина пляшки | $a_c, \text{Н}$ | P_c | $\delta, \%$ | m_a | D | σ_a | σ_0 | μ_{ct} | $a_i = \tilde{a} \pm \mu_{ct}$ |
|----------------|-----------------|-------|--------------|--------|-------|------------|------------|------------|--------------------------------|
| Горловина | 183,08 | 3,71 | 2,026 | 538,28 | 15,72 | 3,96 | 1,15 | 4,73 | 183±4,73 |
| Середина | 170,29 | 0,34 | 0,2 | 500,68 | 0,58 | 0,76 | 0,5 | 2,05 | 170±2,05 |
| Днище | 172,70 | 2,29 | 1,33 | 507,74 | 7,33 | 2,71 | 0,95 | 3,9 | 173±3,9 |

де a_c – середньоарифметична величина виміру;

P_c – середньоарифметична величина відхилень;

δ – відносна похибка, %;

m_a – математичне очікування;

D – дисперсія;

σ_a – середньоквадратичне відхилення;

σ_0 – «середня помилка»;

μ_{ct} – довірчий інтервал Стюдента;

$a_i = \tilde{a} \pm \mu_{ct}$ – прийнятні значення випадкової величини для малої вибірки.

При проведенні постановочних експериментів було встановлено, що дисперсія розсіювання результатів вимірювань відповідає критерію

Ст'юдента за умови відтворення експерименту при мінімальній кількості паралельних дослідів, що дорівнює 2. Виходячи з цього, було прийнято рішення про проведення випробувань у 3-кратному повторі, що забезпечує достатню статистичну надійність результатів та підвищує точність оцінки середнього значення.

2.6. Опрацювання результатів експерименту

Для опису процесу подрібнення пляшок із ПЕТ-матеріалу методом різання та визначення взаємодії вхідних технологічних параметрів (факторів) утворюється емпірична математична модель. Така модель будується за допомогою методу ідентифікації, при якому основні залежності визначаються шляхом безпосередніх експериментальних вимірювань. Відповідно, при аналізі та інтерпретації отриманої моделі використовується апарат теорії ймовірностей та математичної статистики.

Очікуваний вигляд емпіричної математичної моделі – це лінійний поліном першого степеня:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3$$

b – очікуваний коефіцієнт математичної моделі.

Визначення кількості експериментів повного 3х-факторного експерименту:

$$N = 2^m = 2^3 = 8$$

$m=8$ – плануємо проведення трьох дублюючих експериментів.

Нормалізуємо початкове рівняння (1) за допомогою такого відношення:

$$z_i = (x_i - x_{oi}) / \Delta x_i$$

z_i – нормалізоване значення і-фактора, приймає значення ± 1 ;

i – символ натуральної змінної;

x_{oi} – числове значення і-змінної на її 0-рівні;

Δx_i - крок варіювання і-змінної.

Отримуємо рівняння у кодованій формі:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1z_1 + \beta_2z_2 + \beta_3z_3 + \beta_4z_1z_2 + \beta_5z_1z_3 + \beta_6z_2z_3 + \beta_7z_1z_2z_3$$

План проведення експерименту

| Горловина ПЕТ-пляшки | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|----------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| № | Z ₀ | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₁ Z ₂ | Z ₁ Z ₃ | Z ₂ Z ₃ | Z ₁ Z ₂ Z ₃ | №. ранд. | Y ₁ , бар | Y ₂ , бар | Y ₃ , бар | Y _{ср.} , бар | F ₁ , Н | F ₂ , Н | F ₃ , Н | F _{ср.} , Н |
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | 1 | 3.66 | 3.69 | 3.85 | 3.73 | 179.69 | 180.92 | 188.65 | 183.08 |
| 2 | + | - | + | + | - | - | + | - | 8 | 3.45 | 3.55 | 3.60 | 3.53 | 169.27 | 174.17 | 176.63 | 173.35 |
| 3 | + | - | - | + | + | - | - | + | 7 | 3.75 | 3.95 | 3.95 | 3.88 | 183.98 | 193.80 | 193.80 | 190.52 |
| 4 | + | - | + | - | - | + | - | + | 2 | 3.85 | 3.98 | 3.91 | 3.91 | 188.89 | 195.02 | 191.96 | 191.96 |
| 5 | + | + | - | - | - | + | + | + | 3 | 5.40 | 5.13 | 5.47 | 5.33 | 264.94 | 251.45 | 268.13 | 261.50 |
| 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | 6 | 5.40 | 5.25 | 5.30 | 5.32 | 264.69 | 257.58 | 260.03 | 260.77 |
| 7 | + | + | - | + | + | + | - | - | 5 | 5.90 | 5.93 | 5.60 | 5.81 | 289.47 | 290.70 | 274.75 | 284.97 |
| 8 | + | + | + | - | - | - | - | - | 4 | 5.53 | 5.28 | 4.96 | 5.25 | 271.07 | 258.80 | 243.35 | 257.74 |
| Середина ПЕТ-пляшки | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| № | Z ₀ | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₁ Z ₂ | Z ₁ Z ₃ | Z ₂ Z ₃ | Z ₁ Z ₂ Z ₃ | №. ранд. | Y ₁ , бар | Y ₂ , бар | Y ₃ , бар | Y _{ср.} , бар | F ₁ , Н | F ₂ , Н | F ₃ , Н | F _{ср.} , Н |
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | 1 | 2.60 | 2.85 | 3.53 | 2.99 | 127.56 | 139.83 | 172.95 | 146.78 |
| 2 | + | - | + | + | - | - | + | - | 8 | 3.65 | 3.70 | 3.78 | 3.71 | 179.08 | 181.53 | 185.21 | 181.94 |
| 3 | + | - | - | + | + | - | - | + | 7 | 3.49 | 3.48 | 3.45 | 3.47 | 171.11 | 170.49 | 169.27 | 170.29 |
| 4 | + | - | + | - | - | + | - | + | 2 | 3.65 | 3.44 | 3.65 | 3.58 | 179.08 | 168.78 | 179.08 | 175.64 |
| 5 | + | + | - | - | - | - | + | + | 3 | 5.18 | 5.25 | 5.28 | 5.23 | 253.90 | 257.33 | 258.80 | 256.68 |
| 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | 6 | 5.00 | 4.60 | 5.20 | 4.93 | 245.31 | 225.69 | 255.13 | 242.04 |
| 7 | + | + | - | + | + | + | - | - | 5 | 5.30 | 5.14 | 5.18 | 5.21 | 259.79 | 252.18 | 254.14 | 255.37 |
| 8 | + | + | + | - | - | - | - | - | 4 | 5.33 | 5.28 | 5.35 | 5.32 | 261.26 | 258.80 | 262.48 | 260.85 |
| Днище ПЕТ-пляшки | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| № | Z ₀ | Z ₁ | Z ₂ | Z ₃ | Z ₁ Z ₂ | Z ₁ Z ₃ | Z ₂ Z ₃ | Z ₁ Z ₂ Z ₃ | №. ранд. | Y ₁ , бар | Y ₂ , бар | Y ₃ , бар | Y _{ср.} , бар | F ₁ , Н | F ₂ , Н | F ₃ , Н | F _{ср.} , Н |
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - | 1 | 3.65 | 3.50 | 3.58 | 3.58 | 179.08 | 171.72 | 175.64 | 175.48 |
| 2 | + | - | + | + | - | - | + | - | 8 | 3.75 | 3.78 | 3.90 | 3.81 | 183.98 | 185.46 | 191.34 | 186.93 |
| 3 | + | - | - | + | + | - | - | + | 7 | 3.52 | 3.73 | 3.60 | 3.61 | 172.45 | 182.76 | 176.63 | 177.28 |
| 4 | + | - | + | - | - | + | - | + | 2 | 3.45 | 3.59 | 3.53 | 3.52 | 169.27 | 175.89 | 172.95 | 172.70 |
| 5 | + | + | - | - | - | - | + | + | 3 | 5.18 | 5.25 | 5.23 | 5.22 | 253.90 | 257.58 | 256.35 | 255.94 |
| 6 | + | + | + | + | + | + | + | + | 6 | 5.28 | 5.43 | 5.35 | 5.35 | 258.80 | 266.16 | 262.24 | 262.40 |
| 7 | + | + | - | + | + | + | - | - | 5 | 5.30 | 5.40 | 5.13 | 5.28 | 260.03 | 264.94 | 251.45 | 258.80 |
| 8 | + | + | + | - | - | - | - | - | 4 | 5.35 | 5.35 | 5.44 | 5.38 | 262.36 | 262.48 | 266.78 | 263.87 |

Таблиця 2.5. Фактори і їх рівні варіювання

| Фактори | | | |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Горловина | | | |
| Рівні варіювання | X ₁ (Р. бар) | X ₂ (δ.мм) | X ₃ (α.°) |
| +(верхній рівень) | 6 | 0.45 (Росинка) | 45 |
| 0(нуль-рівень) | 5 | 0.375 | 30 |
| -(нижній рівень) | 4 | 0.30 (Моршинська) | 15 |
| Крок варіювання | 1 | 0.075 | 15 |
| Середина | | | |
| Рівні варіювання | X ₁ (Р. бар) | X ₂ (δ.мм) | X ₃ (α.°) |
| +(верхній рівень) | 6 | 0.30 (Миргородська) | 45 |
| 0(нуль-рівень) | 5 | 0.26 | 30 |
| -(нижній рівень) | 4 | 0.22 (Моршинська) | 15 |
| Крок варіювання | 1 | 0.04 | 15 |
| Днище | | | |
| Рівні варіювання | X ₁ (Р. бар) | X ₂ (δ.мм) | X ₃ (α.°) |
| +(верхній рівень) | 6 | 0.45 (Росинка) | 45 |
| 0(нуль-рівень) | 5 | 0.35 | 30 |
| -(нижній рівень) | 4 | 0.25 (Моршинська) | 15 |
| Крок варіювання | 1 | 0.10 | 15 |

У подальшому розрахунки будуть проводитися окремо для різних частин ПЕТ-пляшки.

Горловина ПЕТ-пляшки:

Для оцінки статистичних характеристик випадкових величин, що моделюють процес подрібнення, застосовуються наступні вибіркові оцінки дисперсій:

$$S_{ej}^2 = (m-1)^{-1} \cdot \sum (y_{ej} - y_{jсер})^2$$

$$S_{1j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((179.69 - 183.08)^2 + (180.92 - 183.08)^2 + (188.65 - 183.08)^2 \right) = 23.56$$

$$S_{2j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((169.27 - 173.35)^2 + (174.17 - 173.35)^2 + (176.63 - 173.35)^2 \right) = 14.04$$

$$S_{3j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((183.98 - 190.52)^2 + (193.80 - 190.52)^2 + (193.80 - 190.52)^2 \right) = 32.10$$

$$S_{4j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((188.89 - 191.96)^2 + (195.02 - 191.96)^2 + (191.96 - 191.96)^2 \right) = 9.40$$

$$S_{5j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((264.94 - 261.50)^2 + (251.45 - 261.50)^2 + (268.13 - 261.50)^2 \right) = 78.41$$

$$S_{6j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((264.69 - 260.77)^2 + (257.58 - 260.77)^2 + (260.03 - 260.77)^2 \right) = 13.06$$

$$S_{7j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((289.47 - 284.97)^2 + (290.70 - 284.97)^2 + (274.75 - 284.97)^2 \right) = 78.73$$

$$S_{8j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((271.07 - 257.74)^2 + (258.80 - 257.74)^2 + (243.35 - 257.74)^2 \right) = 192.95$$

$$S_{ej \max}^2 = S_{3j}^2 = 192.95$$

$$\sum S_{ej}^2 = 23.56 + 14.04 + 32.10 + 9.40 + 78.41 + 13.06 + 78.73 + 192.95 = 442.26$$

Проводимо розрахунок G-критерію Кохрена:

$$G_p = S_{ej \max}^2 / \sum S_{ej}^2 = 192.95 / 442.26 = 0.44$$

$$G_{кр} = f(\alpha; f_1; f_2) = 0.81$$

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$f_2 = N = 8$$

$(G_p = 0.44) < (G_{кр} = 0.81)$ – припущення є вірним.

Визначаємо загальну дисперсію:

$$S_0^2 = \sum S_{ej}^2 / N = 442.26 / 8 = 55.28$$

Обчислюємо значення оцінок коефіцієнтів:

$$b_i = \sum (z_{ji} \cdot y_{j \text{ сеп}}) / N$$

$$b_0 = (183.08 + 173.35 + 190.52 + 191.96 + 261.50 + 260.77 + 284.97 + 257.74) / 8 = 225.49$$

$$b_1 = (-183.08 - 173.35 - 190.52 - 191.96 + 261.50 + 260.77 + 284.97 + 257.74) / 8 = 40.76$$

$$b_2 = (-183.08 + 173.35 - 190.52 + 191.96 - 261.50 + 260.77 - 284.97 + 257.74) / 8 = -4.53$$

$$b_3 = (-183.08 + 173.35 + 190.52 - 191.96 - 261.50 + 260.77 + 284.97 - 257.74) / 8 = 1.92$$

$$b_4 = (183.08 - 173.35 + 190.52 - 191.96 - 261.50 + 260.77 + 284.97 - 257.74) / 8 = 4.35$$

$$b_5 = (183.08 - 173.35 - 190.52 + 191.96 - 261.50 + 260.77 + 284.97 - 257.74) / 8 = 4.71$$

$$b_6 = (183.08 + 173.35 - 190.52 - 191.96 + 261.50 + 260.77 - 284.97 - 257.74) / 8 = -5.81$$

$$b_7 = (-183.08 - 173.35 + 190.52 + 191.96 + 261.50 + 260.77 - 284.97 - 257.74) / 8 = 0.70$$

Перевіряємо нульову гіпотезу стосовно значимості розрахункових коефіцієнтів.

Розраховуємо дисперсію:

$$S_{\beta_j}^2 = S_0^2 / N = 55.28 / 8 = 6.91$$

Визначаємо середньоквадратичне відхилення:

$$S_{\beta} = 0.63$$

Обчислюємо розрахункові коефіцієнти Стьюдента:

$$t_p = |b_i| / S_{\beta}$$

$$t_{p0} = |225.49| / 0.63 = 357.92$$

$$t_{p1} = |40.76| / 0.63 = 64.69$$

$$t_{p2} = |-4.53| / 0.63 = 7.20$$

$$t_{p3} = |1.92| / 0.63 = 3.04$$

$$t_{p4} = |4.35| / 0.63 = 6.90$$

$$t_{p5} = |4.71| / 0.63 = 7.47$$

$$t_{p6} = |-5.81| / 0.63 = 9.22$$

$$t_{p7} = |0.70| / 0.63 = 1.11$$

Тоді значення критичного критерію Стьюдента складатиме:

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = N(m-1)$$

$$t_{кр} = 2.12$$

Якщо $t_p > t_{кр}$ – коефіцієнти значимі.

Перепишемо рівняння в нормованому вигляді:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_1 z_2 + \beta_5 z_1 z_3 + \beta_6 z_2 z_3 + \beta_7 z_1 z_2 z_3$$

$$\hat{y} = 225.49 + 40.76 z_1 - 4.53 z_2 + 1.92 z_3 + 4.35 z_1 z_2 + 4.71 z_1 z_3 - 5.81 z_2 z_3 + 0.70 z_1 z_2 z_3$$

$$\hat{y}_1 = (+1)225.49 + (-1)40.76 - (-1)4.53 + (-1)1.92 + (+1)4.35 + (+1)4.71 - (+1)5.81 + (-1)0.70 = 179.67$$

$$\hat{y}_2 = (+1)225.49 + (-1)40.76 - (+1)4.53 + (+1)1.92 + (-1)4.35 + (-1)4.71 - (+1)5.81 + (-1)0.70 = 170.23$$

$$\hat{y}_3 = (+1)225.49 + (-1)40.76 - (-1)4.53 + (+1)1.92 + (+1)4.35 + (-1)4.71 - (-1)5.81 + (+1)0.70 = 188.09$$

$$\hat{y}_4 = (+1)225.49 + (-1)40.76 - (+1)4.53 + (-1)1.92 + (-1)4.35 + (+1)4.71 - (-1)5.81 + (+1)0.70 = 190.54$$

$$\hat{y}_5 = (+1)225.49 + (+1)40.76 - (-1)4.53 + (-1)1.92 + (-1)4.35 + (-1)4.71 - (+1)5.81 + (+1)0.70 = 260.44$$

$$\hat{y}_6 = (+1)225.49 + (+1)40.76 - (+1)4.53 + (+1)1.92 + (+1)4.35 + (+1)4.71 - (+1)5.81 + (+1)0.70 = 259.41$$

$$\hat{y}_7 = (+1)225.49 + (+1)40.76 - (-1)4.53 + (+1)1.92 + (+1)4.35 + (+1)4.71 - (-1)5.81 + (-1)0.70 = 280.03$$

$$\hat{y}_8 = (+1)225.49 + (+1)40.76 - (+1)4.53 + (-1)1.92 + (-1)4.35 + (-1)4.71 - (-1)5.81 + (-1)0.70 = 256.49$$

Проведемо перевірку адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера:

$$F = S_{ao}^2 / S_0^2$$

$$S_{ao}^2 = \sum (\hat{y}_j - y_{j\text{сеп}})^2 / (N - d) d = 3$$

$$N = 8$$

| № дослід | Усеп | \hat{y} | $ y_{\text{сеп}} - \hat{y} $ | $(y_{\text{сеп}} - \hat{y})^2$ |
|----------|--------|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 183.08 | 179.67 | 3.41 | 11.66 |
| 2 | 173.35 | 170.23 | 3.12 | 9.76 |
| 3 | 190.52 | 188.09 | 2.44 | 5.93 |
| 4 | 191.96 | 190.54 | 1.42 | 2.01 |
| 5 | 261.50 | 260.44 | 1.06 | 1.13 |
| 6 | 260.77 | 259.41 | 1.36 | 1.84 |
| 7 | 284.97 | 280.03 | 4.94 | 24.42 |
| 8 | 257.74 | 256.49 | 1.25 | 1.57 |
| Всього | | | | 58.32 |

$$S_{ao}^2 = 58.32 / (8 - 3) = 11.66$$

$$F = 11.66 / 55.28 = 0.21$$

$$F_{кр} = 2.85$$

$F < F_{кр}$ – гіпотеза є вірною.

Замінюємо в отриманому рівнянні регресії кодовані змінні на натуральні:

$$z_i = (x_i - x_{oi}) / \Delta x_i$$

$$z_1 = (P - 5) / 1$$

$$z_2 = (\delta - 0.375) / 0.075$$

$$z_3 = (\alpha - 30) / 15$$

$$\hat{y} = 225.49 + 40.76z_1 - 4.53z_2 + 1.92z_3 + 4.35z_1z_2 + 4.71z_1z_3 - 5.81z_2z_3 + 0.70z_1z_2z_3$$

Отримана адекватна лінійна модель має вигляд поліному першого ступеня, де коефіцієнти є частковими похідними функції відгуку за відповідними факторами. Їх геометричний зміст полягає у відповідності до тангенсів кутів нахилу гіперповерхні відгуку до відповідних координатних осей. Таким чином, абсолютна величина коефіцієнта відображає ступінь впливу відповідного фактора: чим більша абсолютна величина, тим більшою є кутова амплітуда нахилу, тобто тим сильніше зміна параметра оптимізації відносно зміни цього фактора.

Знак коефіцієнта визначає характер залежності: додатний знак вказує на прямий вплив – зростання фактора призводить до зростання параметра оптимізації, в той час як від’ємний знак свідчить про обернений вплив – зростання фактора призводить до його зменшення.

Для впровадження отриманої емпіричної моделі у практику необхідно провести зворотне перетворення, щоб отримати рівняння регресії, виражене в термінах натуральних змінних.

$$F = 225.49 + 40.76(P - 5) - 4.53(\delta - 0.375) / 0.075 + 1.92(\alpha - 30) / 15 + 4.35(P - 5)(\delta - 0.375) / 0.075 + 4.71(P - 5)(\alpha - 30) / 15 - 5.81 \cdot (\delta - 0.375)(\alpha - 30) / 15 - 0.075 + 0.70(P - 5)(\delta - 0.375)(\alpha - 30) / 15 - 0.075$$

$$F = 168,4 + 8,8P - 102,6\delta - 1,6\alpha + 39,4P\delta + 0,08P\alpha - 8,3\delta\alpha + 0,6P\delta\alpha$$

Середина ПЕТ-пляшки:

Вибіркові оцінки дисперсій змінних:

$$S_{ej}^2 = (m - 1)^{-1} \cdot \sum (y_{ej} - y_{j\text{сеп}})^2$$

$$S_{1j}^2 = (3 - 1)^{-1} \cdot \left((127.56 - 146.78)^2 + (139.83 - 146.78)^2 + (172.95 - 146.78)^2 \right) = 551.13$$

$$S_{2j}^2 = (3 - 1)^{-1} \cdot \left((179.08 - 181.94)^2 + (181.53 - 181.94)^2 + (185.21 - 181.94)^2 \right) = 9.53$$

$$S_{3j}^2 = (3 - 1)^{-1} \cdot \left((171.11 - 170.29)^2 + (170.49 - 170.29)^2 + (169.27 - 170.29)^2 \right) = 0.88$$

$$S_{4j}^2 = (3 - 1)^{-1} \cdot \left((179.08 - 175.64)^2 + (168.78 - 175.64)^2 + (179.08 - 175.64)^2 \right) = 35.38$$

$$S_{5j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((253.90 - 256.68)^2 + (257.33 - 256.68)^2 + (258.80 - 256.68)^2 \right) = 6.34$$

$$S_{6j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((245.31 - 242.04)^2 + (225.69 - 242.04)^2 + (255.13 - 242.04)^2 \right) = 224.67$$

$$S_{7j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((259.79 - 255.37)^2 + (252.18 - 255.37)^2 + (254.14 - 255.37)^2 \right) = 15.59$$

$$S_{8j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot \left((261.26 - 260.85)^2 + (258.80 - 260.85)^2 + (262.48 - 260.85)^2 \right) = 3.51$$

$$S_{ej \max}^2 = S_{3j}^2 = 551.13$$

$$\sum S_{ej}^2 = 551.13 + 9.53 + 0.88 + 35.38 + 6.34 + 224.67 + 15.59 + 3.51 = 847.02$$

Тоді критерій Кохрена:

$$G_p = S_{ej \max}^2 / \sum S_{ej}^2 = 551.13 / 847.02 = 0.65$$

$$G_{кр} = f(\alpha; f_1; f_2) = 0.81$$

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$f_2 = N = 8$$

$(G_p = 0.65) < (G_{кр} = 0.81)$ – гіпотеза є вірною

Розраховуємо загальну дисперсію:

$$S_0^2 = \sum S_{ej}^2 / N = 847.02 / 8 = 105.88$$

Визначаємо оцінки коефіцієнтів:

$$b_i = \sum (z_{ji} \cdot y_{j \text{ сеп}}) / N$$

$$b_0 = (146.78 + 181.94 + 170.29 + 175.64 + 256.68 + 242.04 + 255.37 + 260.85) / 8 = 211.20$$

$$b_1 = (-146.78 - 181.94 - 170.29 - 175.64 + 256.68 + 242.04 + 255.37 + 260.85) / 8 = 42.54$$

$$b_2 = (-146.78 + 181.94 - 170.29 + 175.64 - 256.68 + 242.04 - 255.37 + 260.85) / 8 = 3.92$$

$$b_3 = (-146.78 + 181.94 + 170.29 - 175.64 - 256.68 + 242.04 + 255.37 - 260.85) / 8 = 1.21$$

$$b_4 = (146.78 - 181.94 + 170.29 - 175.64 - 256.68 + 242.04 + 255.37 - 260.85) / 8 = -7.58$$

$$b_5 = (146.78 - 181.94 - 170.29 + 175.64 - 256.68 + 242.04 + 255.37 - 260.85) / 8 = -6.24$$

$$b_6 = (146.78 + 181.94 - 170.29 - 175.64 + 256.68 + 242.04 - 255.37 - 260.85) / 8 = -4.34$$

$$b_7 = (-146.78 - 181.94 + 170.29 + 175.64 + 256.68 + 242.04 - 255.37 - 260.85) / 8 = -0.04$$

Перевіряємо нульову гіпотезу стосовно значимості розрахункових коефіцієнтів.

Розраховуємо дисперсію:

$$S_{\beta j}^2 = S_0^2 / N = 105.88 / 8 = 13.23$$

Тоді середньоквадратичне відхилення:

$$S_{\beta} = 0.64$$

Звідки обраховуємо розрахункові коефіцієнти Стьюдента:

$$t_p = |b_i| / S_{\beta}$$

$$t_{p0} = |211.20| / 0.64 = 330.00$$

$$t_{p1} = |42.54| / 0.64 = 66.46$$

$$t_{p2} = |3.92| / 0.64 = 6.12$$

$$t_{p3} = |1.21| / 0.64 = 2.89$$

$$t_{p4} = |-7.58| / 0.64 = 11.84$$

$$t_{p5} = |-6.24| / 0.64 = 9.75$$

$$t_{p6} = |-4.34| / 0.64 = 6.78$$

$$t_{p7} = |-0.04| / 0.64 = 2.16$$

Відповідно критичний критерій Стьюдента:

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = N(m-1)$$

$$t_{кр} = 2.12$$

Якщо $t_p > t_{кр}$ – коефіцієнти значимі.

Перепишемо нормоване рівняння:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_1 z_2 + \beta_5 z_1 z_3 + \beta_6 z_2 z_3 + \beta_7 z_1 z_2 z_3$$

$$\hat{y} = 211.20 + 42.54 z_1 + 3.92 z_2 + 1.21 z_3 - 7.58 z_1 z_2 - 6.24 z_1 z_3 - 4.34 z_2 z_3 - 0.04 z_1 z_2 z_3$$

$$\hat{y}_1 = (+1)211.20 + (-1)42.54 + (-1)3.92 + (-1)1.21 - (+1)7.58 - (+1)6.24 - (+1)4.34 - (-1)0.04 = 179.67$$

$$\hat{y}_2 = (+1)211.20 + (-1)42.54 + (+1)3.92 + (+1)1.21 - (-1)7.58 - (-1)6.24 - (+1)4.34 - (-1)0.04 = 170.23$$

$$\hat{y}_3 = (+1)211.20 + (-1)42.54 + (-1)3.92 + (+1)1.21 - (+1)7.58 - (-1)6.24 - (-1)4.34 - (+1)0.04 = 188.09$$

$$\hat{y}_4 = (+1)211.20 + (-1)42.54 + (+1)3.92 + (-1)1.21 - (-1)7.58 - (+1)6.24 - (-1)4.34 - (+1)0.04 = 190.54$$

$$\hat{y}_5 = (+1)211.20 + (+1)42.54 + (-1)3.92 + (-1)1.21 - (-1)7.58 - (-1)6.24 - (+1)4.34 - (+1)0.04 = 260.44$$

$$\hat{y}_6 = (+1)211.20 + (+1)42.54 + (+1)3.92 + (+1)1.21 - (+1)7.58 - (+1)6.24 - (+1)4.34 - (+1)0.04 = 259.41$$

$$\hat{y}_7 = (+1)211.20 + (+1)42.54 + (-1)3.92 + (+1)1.21 - (+1)7.58 - (+1)6.24 - (-1)4.34 - (-1)0.04 = 280.03$$

$$\hat{y}_8 = (+1)211.20 + (+1)42.54 + (+1)3.92 + (-1)1.21 - (-1)7.58 - (-1)6.24 - (-1)4.34 + (-1)0.04 = 256.49$$

Перевірка адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера:

$$F = S_{ad}^2 / S_0^2$$

$$S_{ad}^2 = \sum (\hat{y}_j - y_{j\text{сеп}})^2 / (N - d)$$

$$N = 8$$

d=3

| Номер досліду | Усеп | \hat{y} | $ y_{\text{сеп}} - \hat{y} $ | $(y_{\text{сеп}} - \hat{y})^2$ |
|---------------|--------|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 146.78 | 150.07 | -3.29 | 10.83 |
| 2 | 181.94 | 180.12 | 1.82 | 3.31 |
| 3 | 170.29 | 169.76 | 0.53 | 0.28 |
| 4 | 175.64 | 174.05 | 1.59 | 2.54 |
| 5 | 256.68 | 250.45 | 6.23 | 38.80 |
| 6 | 242.04 | 241.23 | 0.81 | 0.66 |
| 7 | 255.37 | 254.07 | 1.30 | 1.69 |
| 8 | 260.85 | 259.83 | 1.02 | 1.04 |
| Всього | | | | 59.15 |

$$S_{\text{ад}}^2 = 59.15 / (8 - 3) = 11.83$$

$$F = 11.83 / 105.88 = 0.11$$

$$F_{\text{кр}} = 2.85$$

$F < F_{\text{кр}}$ – гіпотеза є правильною.

Замінюємо в отриманому рівнянні регресії кодовані змінні на натуральні:

$$z_i = (x_i - x_{oi}) / \Delta x_i$$

$$z_1 = (P - 5) / 1$$

$$z_2 = (\delta - 0.26) / 0.04$$

$$z_3 = (\alpha - 30) / 15$$

$$\hat{y} = 211.20 + 42.54z_1 + 3.92z_2 + 1.21z_3 - 7.58z_1z_2 - 6.24z_1z_3 - 4.34z_2z_3 - 0.04z_1z_2z_3$$

Як і раніше, переписуємо рівняння регресії для натуральних змінних для можливості його подальшого застосування.

$$F = 211.20 + 42.54(P - 5) + 3.92(\delta - 0.26) / 0.04 + 1.21(\alpha - 30) / 15 - 7.58 \cdot (P - 5)(\delta - 0.26) / 0.04 - 6.24(P - 5)(\alpha - 30) / 15 - 4.34(\delta - 0.26)(\alpha - 30) / 15 \cdot 0.04 - 0.04(P - 5)(\delta - 0.26)(\alpha - 30) / 15 \cdot 0.04$$

$$F = -391,9 + 103,7P + 1252,3\delta + 3,9\alpha - 187,5P\delta - 416P\alpha - 6,9\delta\alpha + 0,1P\delta\alpha$$

Днище ПЕТ-пляшки:

Вибіркові оцінки дисперсій змінних:

$$S_{ej}^2 = (m-1)^{-1} \cdot \sum (y_{ej} - y_{j\text{сеп}})^2$$

$$S_{1j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((179.08-175.48)^2 + (171.72-175.48)^2 + (175.64-175.48)^2) = 13.56$$

$$S_{2j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((183.98-186.93)^2 + (185.46-186.93)^2 + (191.34-186.93)^2) = 15.16$$

$$S_{3j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((172.45-177.28)^2 + (182.76-177.28)^2 + (176.63-177.28)^2) = 26.86$$

$$S_{4j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((169.27-172.70)^2 + (175.89-172.70)^2 + (172.95-172.70)^2) = 11.01$$

$$S_{5j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((253.90-255.94)^2 + (257.58-255.94)^2 + (256.35-255.94)^2) = 3.51$$

$$S_{6j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((258.80-262.40)^2 + (266.16-262.40)^2 + (262.24-262.40)^2) = 13.56$$

$$S_{7j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((260.03-258.80)^2 + (264.94-258.80)^2 + (251.45-258.80)^2) = 46.64$$

$$S_{8j}^2 = (3-1)^{-1} \cdot ((262.36-263.87)^2 + (262.48-263.87)^2 + (266.78-263.87)^2) = 6.32$$

$$S_{ej\text{ max}}^2 = S_{3j}^2 = 46.64$$

$$\sum S_{ej}^2 = 13.56 + 15.16 + 26.86 + 11.01 + 3.51 + 13.56 + 46.64 + 6.32 = 136.63$$

Розраховуємо критерій Кохрена:

$$G_p = S_{ej\text{ max}}^2 / \sum S_{ej}^2 = 46.64 / 136.63 = 0.34$$

$$G_{кр} = f(\alpha; f_1; f_2) = 0.81$$

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$f_2 = N = 8$$

$(G_p = 0.34) < (G_{кр} = 0.81)$ – припущення вірне

Визначаємо загальну дисперсію:

$$S_0^2 = \sum S_{ej}^2 / N = 136.63 / 8 = 17.08$$

Визначаємо оцінки коефіцієнтів:

$$b_i = \sum (z_{ji} \cdot y_{j\text{ сеп}}) / N$$

$$b_0 = (175.48 + 186.93 + 177.28 + 172.70 + 255.94 + 262.40 + 258.80 + 263.87) / 8 = 219.18$$

$$b_1 = (-175.48 - 186.93 - 177.28 - 172.70 + 255.94 + 262.40 + 258.80 + 263.87) / 8 = 41.08$$

$$b_2 = (-175.48 + 186.93 - 177.28 + 172.70 - 255.94 + 262.40 - 258.80 + 263.87) / 8 = 2.30$$

$$b_3 = (-175.48 + 186.93 + 177.28 - 172.70 - 255.94 + 262.40 + 258.80 - 263.87) / 8 = 2.18$$

$$b_4 = (175.48 - 186.93 + 177.28 - 172.70 - 255.94 + 262.40 + 258.80 - 263.87) / 8 = -0.68$$

$$b_5 = (175.48 - 186.93 - 177.28 + 172.70 - 255.94 + 262.40 + 258.80 - 263.87) / 8 = -1.83$$

$$b_6 = (175.48 + 186.93 - 177.28 - 172.70 + 255.94 + 262.40 - 258.80 - 263.87) / 8 = 1.01$$

$$b_7 = (-175.48 - 186.93 + 177.28 + 172.70 + 255.94 + 262.40 - 258.80 - 263.87) / 8 = -2.10$$

Перевіряємо нульову гіпотезу стосовно значимості розрахункових коефіцієнтів.

Визначаємо дисперсію:

$$S_{\beta_j}^2 = S_0^2 / N = 17.08 / 8 = 2.13$$

Обраховуємо середньоквадратичне відхилення:

$$S_{\beta} = 0.46$$

Визначаємо розрахункові коефіцієнти Стюдента:

$$t_p = |b_i| / S_{\beta}$$

$$t_{p0} = |219.18| / 0.46 = 476.47$$

$$t_{p1} = |41.08| / 0.46 = 89.30$$

$$t_{p2} = |2.30| / 0.46 = 5.00$$

$$t_{p3} = |2.18| / 0.46 = 4.73$$

$$t_{p4} = |-0.68| / 0.46 = 2.49$$

$$t_{p5} = |-1.83| / 0.46 = 3.98$$

$$t_{p6} = |1.01| / 0.46 = 2.20$$

$$t_{p7} = |-2.10| / 0.46 = 4.56$$

Критичний критерій Стюдента:

$$\alpha = 0.05$$

$$f_1 = N(m-1)$$

$$t_{кр} = 2.12$$

Якщо $t_p > t_{кр}$ – коефіцієнти значимі.

Тоді нормоване рівняння:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_4 z_1 z_2 + \beta_5 z_1 z_3 + \beta_6 z_2 z_3 + \beta_7 z_1 z_2 z_3$$

$$\hat{y} = 219.18 + 41.08 z_1 + 2.30 z_2 + 2.18 z_3 - 0.68 z_1 z_2 - 1.83 z_1 z_3 + 1.01 z_2 z_3 - 2.10 z_1 z_2 z_3$$

$$\begin{aligned}
 y_1 &= (+1)219.18 + (-1)41.08 + (-1)2.30 + (-1)2.18 - (+1)0.68 - (+1)1.83 + (+1)1.01 - (-1)2.10 = 179.67 \\
 y_2 &= (+1)219.18 + (-1)41.08 + (+1)2.30 + (+1)2.18 - (-1)0.68 - (-1)1.83 + (+1)1.01 - (-1)2.10 = 170.23 \\
 y_3 &= (+1)219.18 + (-1)41.08 + (-1)2.30 + (+1)2.18 - (+1)0.68 - (-1)1.83 + (-1)1.01 - (+1)2.10 = 188.09 \\
 \overline{y_4} &= (+1)219.18 + (-1)41.08 + (+1)2.30 + (-1)2.18 - (-1)0.68 - (+1)1.83 + (-1)1.01 - (+1)2.10 = 190.54 \\
 \overline{y_5} &= (+1)219.18 + (+1)41.08 + (-1)2.30 + (-1)2.18 - (-1)0.68 - (-1)1.83 + (+1)1.01 - (+1)2.10 = 260.44 \\
 \overline{y_6} &= (+1)219.18 + (+1)41.08 + (+1)2.30 + (+1)2.18 - (+1)0.68 - (+1)1.83 + (+1)1.01 - (+1)2.10 = 259.41 \\
 \overline{y_7} &= (+1)219.18 + (+1)41.08 + (-1)2.30 + (+1)2.18 - (+1)0.68 - (+1)1.83 + (-1)1.01 - (-1)2.10 = 280.03 \\
 \overline{y_8} &= (+1)219.18 + (+1)41.08 + (+1)2.30 + (-1)2.18 - (-1)0.68 - (-1)1.83 + (-1)1.01 - (-1)2.10 = 256.49
 \end{aligned}$$

Перевіримо адекватність рівняння регресії за критерієм Фішера:

$$\begin{aligned}
 F &= S_{ao}^2 / S_0^2 \\
 S_{ao}^2 &= \sum (\hat{y}_j - y_{j\text{сер}})^2 / (N - d) d = 3 \\
 N &= 8
 \end{aligned}$$

| Номер досліду | у _{сер} | \hat{y} | $ y_{\text{сер}} - \hat{y} $ | $(y_{\text{сер}} - \hat{y})^2$ |
|---------------|------------------|-----------|------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 175.48 | 176.69 | 1.21 | 1.46 |
| 2 | 186.93 | 185.34 | 1.59 | 2.52 |
| 3 | 177.28 | 178.04 | 0.76 | 0.58 |
| 4 | 172.70 | 174.56 | 1.86 | 3.46 |
| 5 | 255.94 | 255.04 | 0.90 | 0.81 |
| 6 | 262.40 | 261.45 | 0.95 | 0.91 |
| 7 | 258.80 | 256.54 | 2.26 | 5.13 |
| 8 | 263.87 | 260.56 | 3.31 | 10.99 |
| Всього | | | | 25.86 |

$$S_{ao}^2 = 25.86 / (8 - 3) = 5.17$$

$$F = 5.17 / 17.08 = 0.30$$

$$F_{кр} = 2.85$$

$F < F_{кр}$ – гіпотеза є коректною.

Як і раніше, проводимо заміну в отриманому рівнянні регресії кодованих змінних на натуральні:

$$z_i = (x_i - x_{oi}) / \Delta x_i$$

$$z_1 = (P - 5) / 1$$

$$z_2 = (\delta - 0.35) / 0.10$$

$$z_3 = (\alpha - 30) / 15$$

$$\hat{y} = 219.18 + 41.08z_1 + 2.30z_2 + 2.18z_3 - 0.68z_1z_2 - 1.83z_1z_3 + 1.01z_2z_3 - 2.10z_1z_2z_3$$

Рівняння регресії для натуральних змінних:

$$F = 219.18 + 41.08(P-5) + 2.30(\delta-0.35)/0.10 + 2.18(\alpha-30)/15 - 0.68(P-5)(\delta-0.35)/0.10 - 1.83(P-5)(\alpha-30)/15 + 1.01 \cdot (\delta-0.35)(\alpha-30)/15 \cdot 0.10 - 2.10(P-5)(\delta-0.35)(\alpha-30)/15 \cdot 0.10$$

$$F = 55,05 + 32,4P - 173,1\delta - 2\alpha + 35,2P\delta + 0,4P\alpha + 7,7\alpha - 1,4P\delta\alpha$$

2.7. Висновки до розділу

У ході експериментального дослідження процесу розділення пластикових пляшок методом різання було отримано набір емпіричних математичних моделей, які описують залежність вихідної сили різання від ключових параметрів: магістрального тиску, товщини стінки пляшки та куту заточки ножа. Важливим обмеженням, яке виникло при формуванні моделей, є структурна неоднорідність матеріалу – вона значно впливає на його поведінку під дією різального навантаження.

Тому, щоб врахувати цю особливість, моделі були розроблені окремо для різних зон пляшки – горловини, середини та днища – що дозволило отримати більш точні та адаптивні описи процесу різання.

Отримані моделі мають наступний вигляд:

➤ для горловини пляшки:

$$F = 168.4 + 8.8P - 102.6\delta - 1.6\alpha + 39.4P\delta + 0.08P\alpha - 8.3\delta\alpha + 0.6P\delta\alpha$$

➤ для середини пляшки:

$$F = -391.9 + 103.7P + 1252.3\delta + 3.9\alpha - 187.5P\delta - 416P\alpha - 6.9\delta\alpha + 0.1P\delta\alpha$$

➤ для днища пляшки:

$$F = 55.05 + 32.4P - 173.1\delta - 2\alpha + 32.5P\delta + 0.4P\alpha + 7.7\delta\alpha - 1.4P\delta\alpha$$

Серед факторів, що найбільше впливають на процес подрібнення ПЕТ-пляшок, виокремлюються три ключові параметри: магістральний тиск, товщина стінки та кут заточки ножа. Незважаючи на мінімальні відмінності вхідних значень – особливо в товщині стінки – різниця у коефіцієнтах регресійних рівнянь, отриманих для різних зон пляшки, має статистично значущий характер. Це обумовлено структурною неоднорідністю матеріалу вздовж довжини пляшки.

Так, горловина та днище пляшки мають аморфну структуру, що відповідає характеру їхнього руйнування при різанні. В той же час, середина пляшки характеризується орієнтованою структурою, що впливає на відповідність її поведінки до моделей, отриманих для аморфних зон. Ця структурна неоднорідність є ключовою причиною відмінностей у механічному поведінку матеріалу та, відповідно, у вихідних моделях різання.

3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ РОБІТ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО СПРЯМУВАННЯ

3.1. Проблема нероздільної переробки пластикових відходів

Переробка пластикових пляшок в її класичному вигляді передбачає подрібнення пляшки на дрібні пластівці з подальшою їх переплавою та повторним використанням. Однак такий метод не є ефективним з точки зору якості вторинного матеріалу. Для розуміння причин треба детальніше розглянути процес виробництва пластикових пляшок (рис. 3.1).

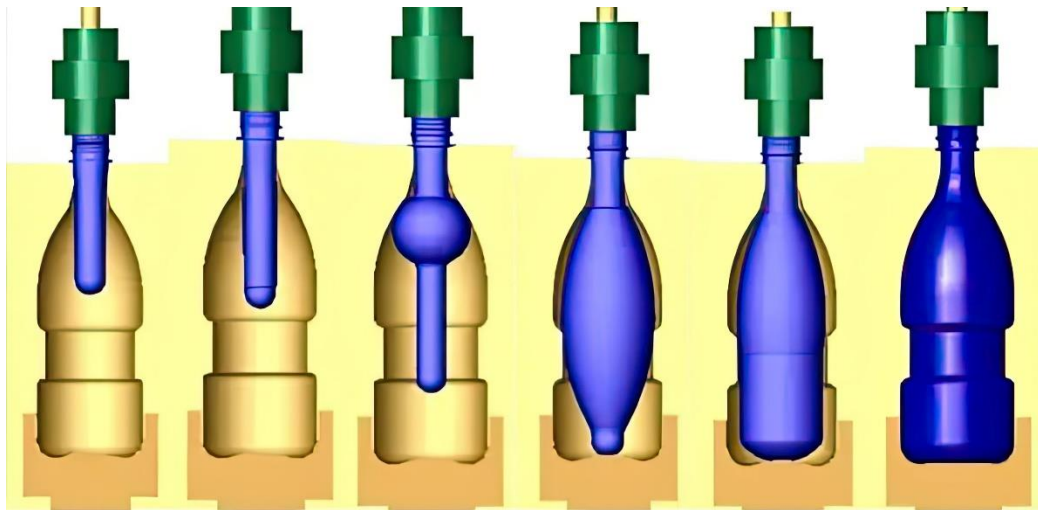


Рис.3.1 Видування пластикових пляшок

Як можна побачити на рисунку, під час видування можна виділити три основні зони виробу: горловину пляшки, яка майже не змінює своєї форми; середню частину, яка зазнає найбільших змін; та днище, яке змінює розміри та форму, однак менше аніж середня частина. До видування, преформа має аморфну структуру, яка легко піддається формуванню. Відповідно, після формування ті частини, що зазнали найменших змін, зберігають цю структуру, а середня частина набуває кристалічної (орієнтованої) структури.

Різницю в будові структур можна побачити на рисунку 3.2.

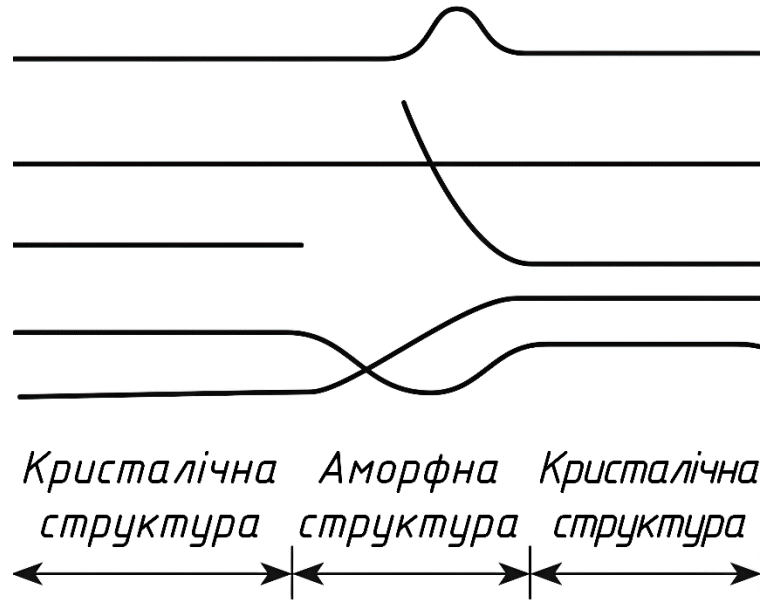


Рис. 3.2. Типи структур полімерів

Як видно на рисунку, структура кристалічного типу має напрямлений вигляд і складніше піддається переробці та повторному використанню, в той час як аморфна зберігає свої властивості та може бути більш легко використана повторно.

Відповідно, нероздільна переробка погіршує якість переробленої сировини через змішування полімерів з різними структурами, що в свою чергу впливає на якість продукції яка виробляється з використанням переробленого пластику. Вирішенням цієї проблеми може стати роздільна переробка частин пляшок.

3.2. Дробарка для роздільної переробки пляшок

Технічним рішенням вищезгаданої проблеми є ножова дробарка, що одночасно розділяє пластикову пляшку на три частини: горловину, середню частину та днище. Після розділення, горловина та днище потрапляють в один контейнер, а середина – в інший.

Зображення запропонованої конструкції дробарки наведено на рисунку 3.3.

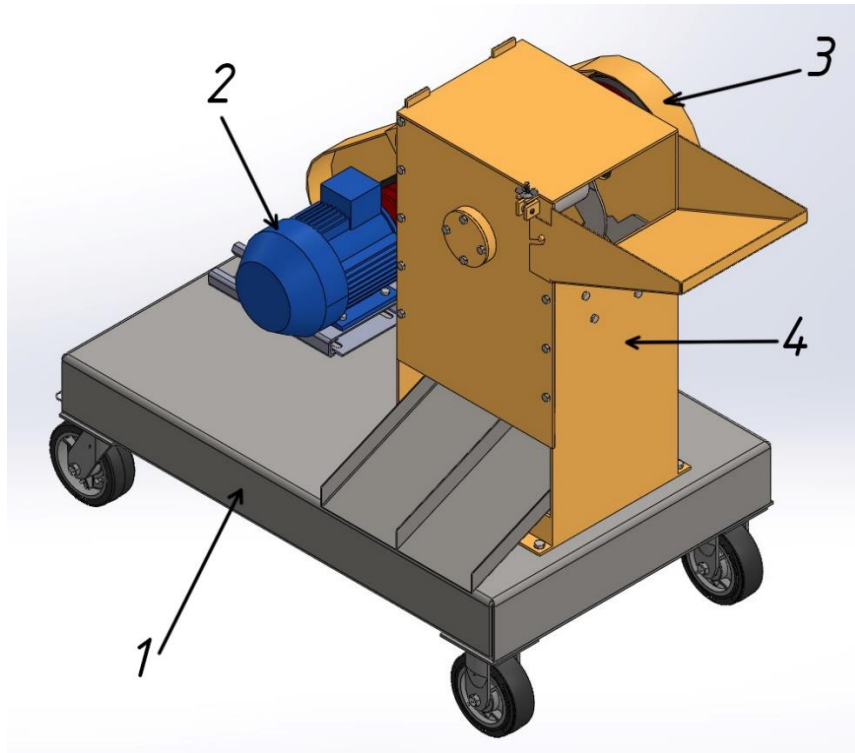


Рис. 3.3. Ножова дробарка з одночасним відділенням горловини та днища:
1 – станина, 2 – привід, 3 – захисний кожух приводу, 4 – робочий вузол.

Вона складається з наступних основних частин: станини з колісами для більш зручного переміщення 1, приводу дробарки 2, захисного кожуху приводу 3 та робочого вузла дробарки 4.

Детальніше розглянемо привід дробарки (рис. 3.4). Привід клинопасовий, складається з салазки електродвигуна для регулювання натягу ремня 1, приводного електродвигуна 2, двох клинових ременів 3, шківи 4 та колеса 5. Використання конструкції з двома ременями дозволяє забезпечити кращу передачу крутного моменту.

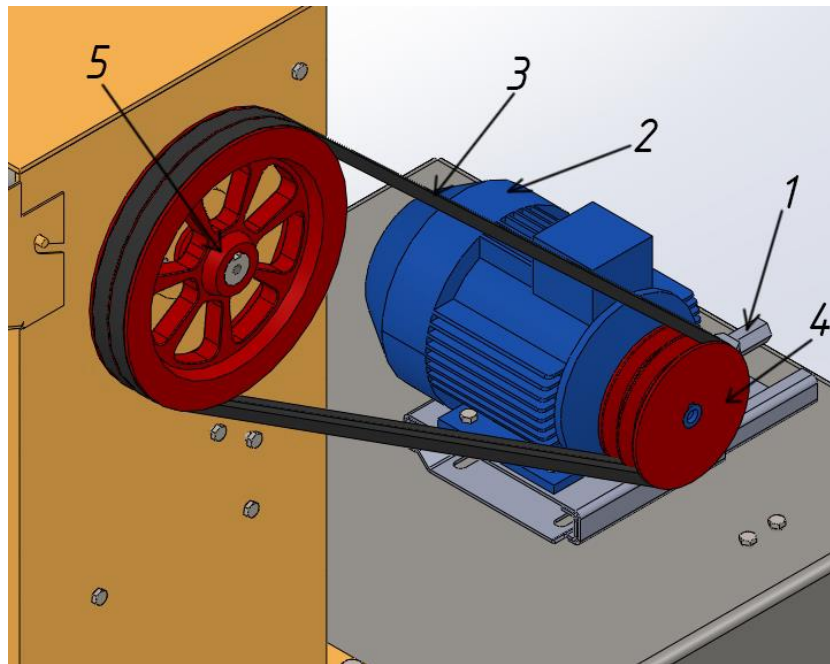


Рис. 3.4. Привід дробарки:

1 – салазка електродвигуна, 2 – електродвигун, 3 – клиновий ремін, 4 – шків, 5 – колесо.

Робочий вузол дробарки є її ключовою частиною. Його зображення наведено на рисунку 3.5. На корпусі з кришкою 1 на швидкознімному кріпленні встановлено лоток для завантаження пляшок 2, через який і відбувається подача пляшок на подрібнення. Всередині корпусу встановлено вал з підшипниками та ножами 3 та контрножі 4. Під контрножами розташовується жолоб для відводу середин пляшок 5, ще нижче встановлений жолоб для відводу розділених частин пляшки 6.

Зборка валу (рис. 3.5) складається з валу 1 який встановлюється на підшипниках 2 в корпус дробарки. На валу за допомогою притискних пластин 4 встановлено дві пари серповидних ножів з проколюючою частиною 3.

Вал дробарки має збільшений діаметр в центральній частині для кріплення серповидних ножів з проколюючим елементом. Також збільшена за рахунок цього маса надає валу більшу інерцію під час роботи, що знижує вірогідність заклинювання під час розрізання.

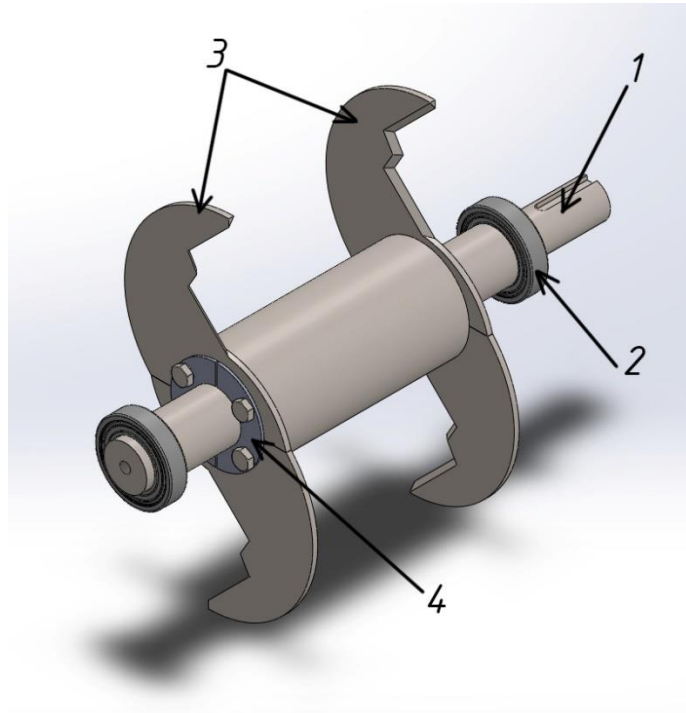


Рис. 3.5. Вал в зборці:

1 – вал, 2 – радіальний підшипник, 3 – серповидні ножі, 4 – притискна пластина.

Ножі дробарки (рис. 3.6) мають спеціальну конструкцію. За серповидною формою вони схожі на ножі кутера, однак на ріжучій кромці мають проколюючий елемент. Його наявність зумовлена тим, що процес різання пластикових пляшок можна умовно розділити на два етапи: первинне прорізання та розділення. Первинне розрізання є найбільш енергозатратним, оскільки структура пластику непошкоджена і замість розділення деформується під впливом тиску. Проколюючий елемент за рахунок концентрації зусилля в одній точці контакту швидко робить первинне прорізання, за рахунок чого подальше розділення відбувається з меншим зусиллям різання і енергозатратами.

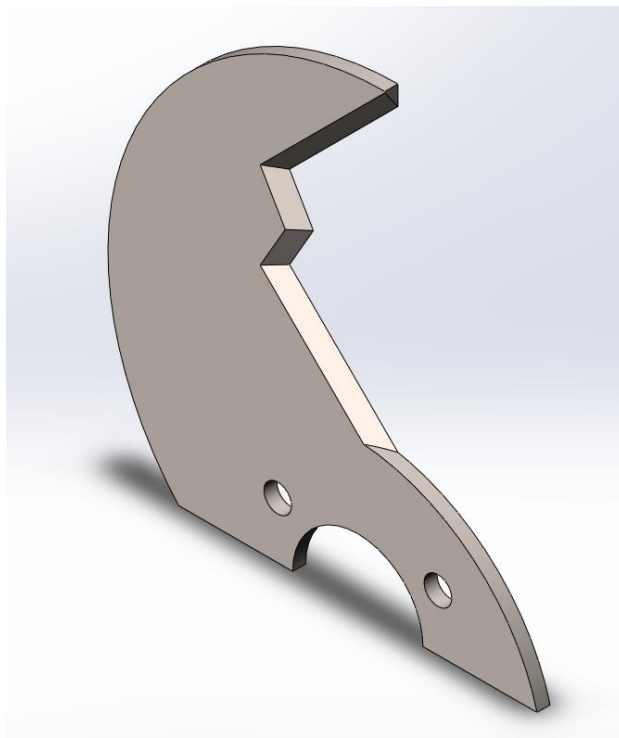


Рис. 3.6. Серповидний ніж з проколюючим елементом.

3.3. Принцип роботи дробарки

Принцип роботи дробарки (рис. 3.7) полягає в наступному: пластикова пляшка 1 завантажується через жолоб для завантаження 2 і скочується по ньому до валу з ножами.

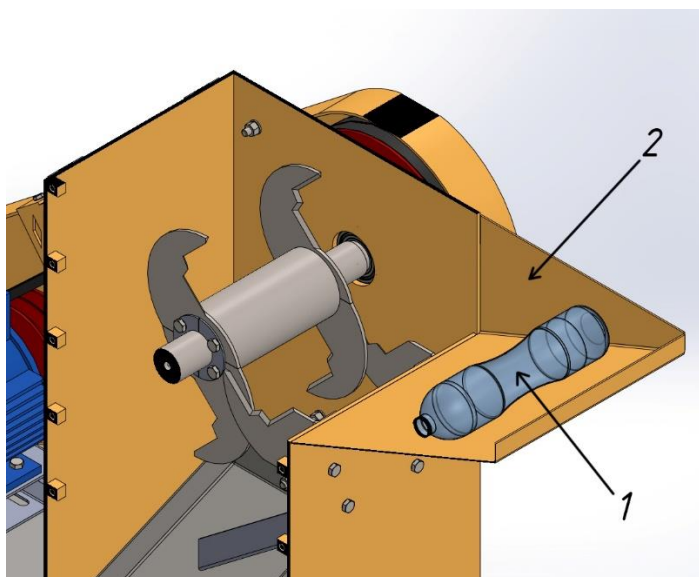


Рис. 3.7. Завантажена в дробарку пляшка:
1 – пляшка, 2 – жолоб для завантаження.

Після жолобу вона потрапляє на контрножі з проколюючим елементом 3. Вал з серповидними ножами 4 робить оберт і розрізає пляшку. Процес різання, як згадувалось вище, проходить у два етапи: проколювання спеціальною проколюючою частиною ножа та безпосередньо саме розрізання.

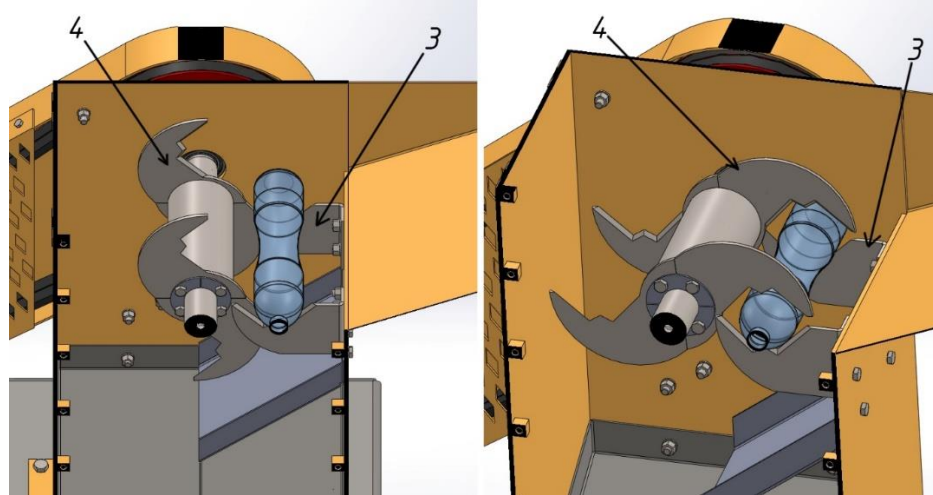


Рис. 3.8. Розрізання пляшки:

3 – контрножі, 4 – вал з серповидними ножами.

Пляшка розділюється на три частини: середню частину 1, горловину 2 і днище 3, які під дією сили тяжіння рухаються вниз, причому середня частина відводиться жолобом 4 вбік, а горловина та днище падають вертикально, і по жолобу з розділювачем 5 відводяться з дробарки.

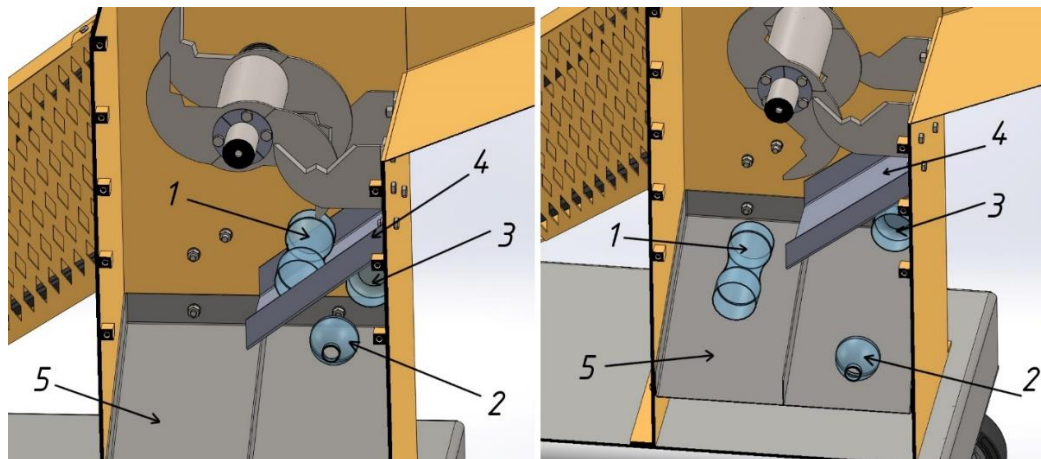


Рис. 3.9. Рух розділених частин пляшки в дробарці:

1 – середня частина пляшки, 2 – горловина пляшки, 3 – днище пляшки, 4 – жолоб відводу середніх частин пляшки, 5 – жолоб відводу розділених частин пляшки з дробарки.

3.4. Переваги використання запропонованої дробарки на ПрАТ «Оболонь»

Як вже згадувалось вище, переробка пластикових пляшок не відбувається безпосередньо на підприємстві «Оболонь», а виконується сторонніми організаціями що спеціалізуються на вторинній переробці матеріалів. Втім, питання логістики переміщення пустих пляшок все ще лишається актуальним, оскільки пластикові пляшки мають відносно невелику масу, однак можуть займати великий об'єм при транспортуванні.

Нинішній підхід – використання дробарки дрібного розділення – не є оптимальним, оскільки подрібнений матеріал є сумішшю двох типів полімерів. Пластівці середньої частини пляшки з орієнтованою структурою та більш складним процесом вторинної змішуються з аморфними за своєю структурою пластівцями днища та горловини. Через таке змішування у вторинного матеріалу знижується якість та звужується потенційна сфера застосування, а також зменшується його ціна, за якою «Оболонь» могла б їх продати на переробку.

У випадку використання запропонованої дробарки, розділені частини пляшки автоматично відсортовані за типом полімеру, що автоматично підвищує їх вартість, оскільки організація що перероблятиме їх, не витрачатиме час та ресурси на їх сортування та миття. Крім цього, переваги такого методу подрібнення наступні:

- Окремі частини пляшок вже не мають тої структурної міцності, як у цілої пляшки, а відповідно краще піддаються стисканню і займають менший об'єм при транспортуванні.
- Середні частини та днище з горловиною можна продавати окремо, оскільки ті мають різну структуру полімерів, що також збільшить їх вартість.

- Енергозатрати на розрізання пляшки є меншими за енергозатрати на її повне подрібнення до стану пластівців.
- Конструкція дробарки та її ножів є простішими за типові роторні дробарки, що здешевлює її обслуговування та ремонт.
- З точки зору екології, подібна переробка позитивно впливає на довкілля, оскільки вироби з використанням вторинного матеріалу стають дешевшими у виробництві за рахунок економії ресурсів на сортуванні та якіснішими завдяки використанню більш структурно однорідних вторинних полімерів.

В підсумку можна зазначити, що крім більшого об'єму подрібнених пляшок при транспортуванні відносно існуючого методу подрібнення до пластівців, запропонований метод є більш енергоефективним та економічно вигідним.

Далі проведемо розрахунок дробарки.

3.5. Розрахунок швидкісних і геометричних параметрів дробарки

Чим вища частота обертання ротору, тим більша колова швидкість руху ножів і більша кількість енергії що передається матеріалу при ударі. Втім, висока частота обертання стає причиною втрат потужності та ефективності дробарка – пляшка не встигає повістю потрапити в зону різання і відбувається її відкидання ударом ножа по дотичній.

Відомо, що для дробарок оптимальною частотою обертання ротору є $n = 600 \text{ об/хв}$.

Визначимо лінійну швидкість ножа, що необхідна для руйнування матеріалу пляшки:

$$V_p = 7.7 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\sigma_p}{\gamma_0 \cdot d_n}\right)^2} = 7.7 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{5 \cdot 10^6}{1455 \cdot 0.05}\right)^2} = 1259 \text{ м/с}$$

де σ_p - межа міцності матеріалу (для ПЕТ $\sigma_p = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$);

γ_0 - питома вага матеріалу, для ПЕТ - $\gamma_0 = 1455 \text{ Н/м}^3$;

d_n - діаметр пляшки, $d_n = 0.052 \text{ м}$.

Визначаємо мінімальний габарит корпусу (діаметральний):

$$d_k = \frac{60 \cdot V_p}{\pi \cdot n \cdot (1 + K_1)} = \frac{60 \cdot 1259}{3.14 \cdot 600 \cdot (1 + 0.4)} = 0.28 \text{ м}$$

Відповідно, найменший допустимий діаметр корпусу рівний 280 мм, звідки випливає що габаритні розміри ножів мають таке ж значення.

Прийmemo такі розміри робочої зони:

- ширина $w = 290 \text{ мм}$,
- висота $h = 300 \text{ мм}$,
- глибина $l = 360 \text{ мм}$, оскільки необхідний запас місця під контрножі.

Розрахуємо лінійну швидкість матеріалу після розділення:

$$V_m = \frac{3600 \cdot K_m}{V_p \cdot K_z \cdot n} = \frac{3600 \cdot 5.03}{1259 \cdot 2 \cdot 600} = 0.11 \text{ м/с}$$

де K_m - коефіцієнт міцності, для ПЕТ рівний 5.03;

K_z - кількість зон активного впливу на матеріал, що подрібнюється (так як в дробарці два ножа, прийmemo $K_z = 2$);

3.6. Кінематичний розрахунок дробарки

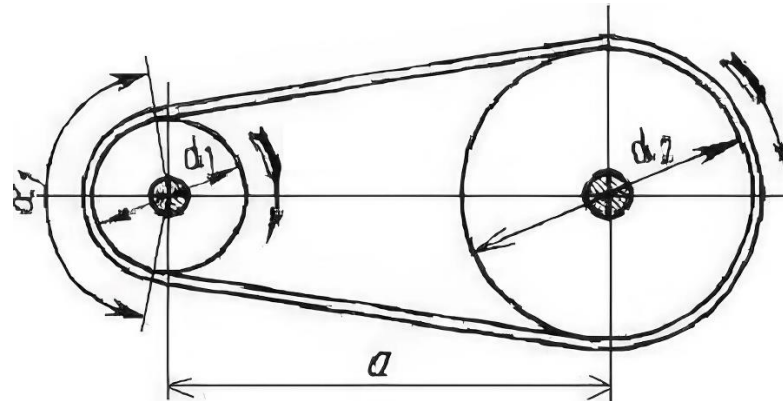


Рис. 3.10. Схема клинопасової передачі

Попередньо приймаємо частоту обертів електродвигуна. З ряду стандартних значень обираємо частоту 1200 об/хв. Тип приводу дробарки – клинопасовий.

Передаточне число приводу:

$$U = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1200}{600} = 2$$

де n_1 - частота обертання шківів, n_2 - частота обертання колеса.

Діаметр приводного шківів беремо з ряду стандартних значень. Приймаємо діаметр $d_1 = 125$ мм.

Діаметр колеса d_2 розраховуємо за формулою:

$$d_2 = U \cdot d_1 \cdot (1 - \zeta) = 2 \cdot 125 \cdot (1 - 0.01) = 247.5 \text{ мм}$$

де ζ - коефіцієнт пружного ковзання (для клинових ременів $\zeta = 0.01$).

Приймаємо значення діаметра з ряду стандартних значень $d_2 = 250$ мм.

Знаходимо кут охоплення пасом меншого шківів α° :

$$\alpha^\circ = 180 - \frac{d_2 - d_1}{a} \cdot 57^\circ = 180 - \frac{0.25 - 0.125}{0.677} \cdot 57 = 169.5^\circ$$

де a – міжосьова відстань шківів.

Для клинопасової передачі значення $\alpha^\circ > 120^\circ$, відповідно умова дотримується.

Визначимо довжину ременя передачі l :

$$l = 2a + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a} =$$

$$= 2 \cdot 677 + \frac{3.14}{2} \cdot (125 + 250) + \frac{(125 + 250)^2}{4 \cdot 677} = 1.99 \text{ м} \approx 2 \text{ м}$$

Звідси швидкість ременя:

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \cdot 1000} = \frac{3.14 \cdot 125 \cdot 1200}{60 \cdot 1000} = 7.85 \text{ м/с}$$

Визначимо розрахункову потужність, що передається одним ременем:

$$P_p = P_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L \cdot \frac{C_u}{C_p} = 1.65 \cdot 0.98 \cdot 0.89 \cdot \frac{1.125}{1.6} = 1.1 \text{ кВт}$$

де P_0 - номінальна потужність що передається одним ременем (обирається з таблиці, в даному випадку при довжині ременя $l = 2 \text{ м}$, профілю ременя Б та швидкості ременя $v = 7.85 \text{ м/с}$ значення становить 1.65 кВт);

C_α - поправочний коефіцієнт кута охоплення меншого шківів ременем, $C_\alpha = 0.98$ при $\alpha^\circ = 169.5^\circ$;

C_L - коефіцієнт відношення фактичної довжини ременя до базової табличної, $C_L = \frac{l}{L_0} = \frac{2}{2.24} = 0.89$;

C_u - коефіцієнт передаточного числа передачі, при $u = 2$ становить 1.125.

C_p - коефіцієнт режиму навантаження, для ударного режиму дробарки становить 1.5-1.7.

Кількість ременів передачі:

$$Z = \frac{P_1}{P_p \cdot C_Z} = \frac{2.2}{1.1 \cdot 0.95} = 2.05 \approx 2$$

де P_1 - потужність, що передається приводом, кВт

C_z - коефіцієнт кількості ременів, діапазон попередньо обирається з таблиці – якщо результат розрахунку не потрапляє в діапазон, розрахунок проводиться повторно. Для діапазону у 2-3 ремені $C_z = 0.95$.

Отримане значення знаходиться в попередньо обраному діапазоні, а значить приймаємо кількість ременів $Z = 2$.

3.7. Розрахунок продуктивності дробарки

Типові формули для розрахунку продуктивності дробарок не доцільно застосувати в цьому випадку, оскільки вони розраховані на постійну подачу певного об'єму сипкого матеріалу. У випадку з дробаркою для пластикових пляшок, подача пляшок йде поштучно, і продуктивність залежить виключно від частоти завантаження пляшок.

Тоді продуктивність по пляшках складатиме:

$$Q_n = n_n \cdot 3600 = 1 \cdot 3600 = 3600 \text{ шт/год}$$

де n_n - кількість пляшок, що завантажуються за секунду. Враховуючи ручну подачу, приймемо значення у 1 пляшку за секунду.

Середня вага однієї пластикової пляшки складає $m = 19 \text{ г} = 0.019 \text{ кг}$.

Виходячи з цього, продуктивність по вазі становитиме:

$$Q_m = m \cdot Q_n = 0.019 \cdot 3600 \approx 70 \text{ кг/год}$$

3.8. Розрахунок потужності електродвигуна дробарки

Відомо, що питома енергоємність подрібнення поліетилентерефталату становить $E = 21.5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$.

Виходячи з продуктивності дробарки $Q_m = 70 \text{ кг/год} = 0.07 \text{ т/год}$, розрахуємо потужність, необхідну для подрібнення:

$$P_n = Q_m \cdot E = 0.07 \cdot 21.5 = 1.505 \text{ кВт}$$

Тоді, з урахуванням втрат, потужність на валу дробарки має складати:

$$P_{\epsilon} = \frac{P_n}{\eta_{\text{втр}}} = \frac{1.505}{0.9} = 1.672 \text{ кВт}$$

Звідси визначаємо необхідну потужність двигуна привода:

$$P_{\delta} = \frac{P_{\epsilon}}{\eta} = \frac{1.672}{0.95} = 1.76 \text{ кВт}$$

Приймаємо запас потужності в 1.25:

$$P_{\delta} = 1.76 \cdot 1.25 = 2.2 \text{ кВт}$$

Обираємо електродвигун АІР90L4 з потужністю 2.2 кВт та частотою обертання 1500 об/хв, підключений через частотний перетворювач для можливості регулювання частоти обертів.

3.9. Розрахунок валу дробарки

Для розрахунку валу необхідно визначити крутний момент на валу електродвигуна і приводному валу за відомими формулами.

Вал електродвигуна:

$$T_1 = \frac{30 \cdot P_{\text{дв.тр.}} \cdot 10^3}{\pi \cdot n_1} = \frac{30 \cdot 2.2 \cdot 10^3}{3.14 \cdot 1200} = 17.51 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приводний вал:

$$T_2 = T_1 \cdot u \cdot \eta_{\text{м}} = 17.51 \cdot 2 \cdot 0.99 = 34.67 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Найменший діаметр приводного валу має складати:

$$d'_6 \geq \sqrt[3]{\frac{T_2}{0.2 \cdot [\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{34669}{0.2 \cdot 15}} = 28.21 \text{ мм}$$

З ряду стандартних діаметрів обираємо найближче більше значення.

Приймаємо найменший діаметр $d'_6 = 30 \text{ мм}$.

Далі, згідно табличних даних підбираємо діаметри під підшипники. Для валів діаметром 30...40 мм розмір переходу t складає 2.5 мм.

Звідси діаметр посадкової частини для підшипників d_n :

$$d_n = 30 + (2.5 \cdot 2) = 35 \text{ мм}$$

Діаметр частини валу під посадку ножів:

$$d_n = 35 + (2.5 \cdot 2) = 40 \text{ мм}$$

Втім, такий метод неможливо застосувати для вибору діаметра середньої частини валу через конструктивну особливість способу кріплення ножів до валу – схема кріплення нагадує ножі кутера для м'яса, різьбове з'єднання зі збільшеною частиною валу. Для забезпечення достатнього зазору для зручного та надійного кріплення, середню частину валу приймаємо діаметром $d_c = 80 \text{ мм}$. Загальна компоновка валу наведена на рисунку 3.11.

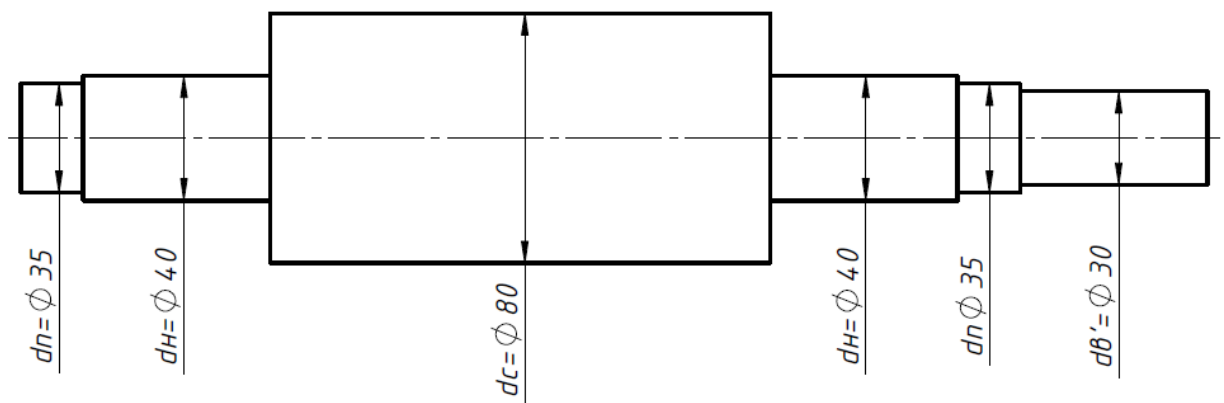


Рис. 3.11. Загальна компоновка валу

3.10. Вибір підшипників

Так як в дробарці на вал діє тільки осьове навантаження, обираємо радіальний тип підшипників.

Параметри підшипника оберемо з подібних до підшипників що застосовуються у схожих конструкціях дробарок.

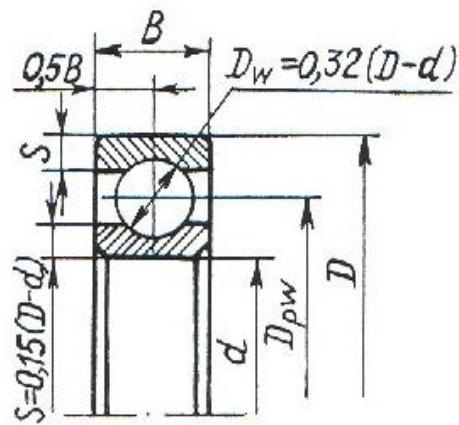


Рис. 3.12. Схема розмірів підшипника

Обираємо підшипник з такими розмірами:

$$B = 14 \text{ мм}, D = 62 \text{ мм}, d = 35 \text{ мм}.$$

3.11. Вибір шпонки

За табличними даними і діаметром валу обираємо шпонку з наступними розмірами:

$$b = 8 \text{ мм}, h = 7 \text{ мм}, t_1 = 4 \text{ мм}, t_2 = 3.3 \text{ мм}, l = 45 \text{ мм}, l_p = 40 \text{ мм}.$$

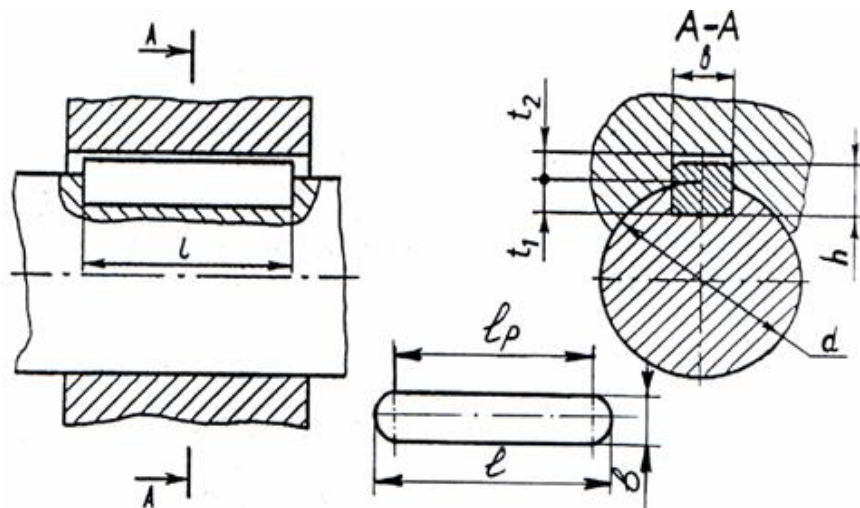


Рис. 3.13. Схема розмірів шпонкового з'єднання

Проведемо перевірку шпонки на міцність. Обрана шпонка має відповідати умові міцності $\sigma_{зм} \leq [\sigma_{зм}]$, де $[\sigma_{зм}] = 80 \text{ МПа}$; $\sigma_{зм}$ - розрахункове напруження зминання, яке розраховується по формулі:

$$\sigma_{см} = \frac{2 \cdot T_2}{d \cdot (h - t_1) \cdot l_p} = \frac{2 \cdot 34669}{30 \cdot (7 - 4) \cdot 40} = 19.2 \text{ МПа}$$

За умовою,

$$\sigma_{3M} \leq [\sigma_{3M}] = 19.2 < 80$$

Відповідно, шпонка відповідає вимогам і має запас міцності.

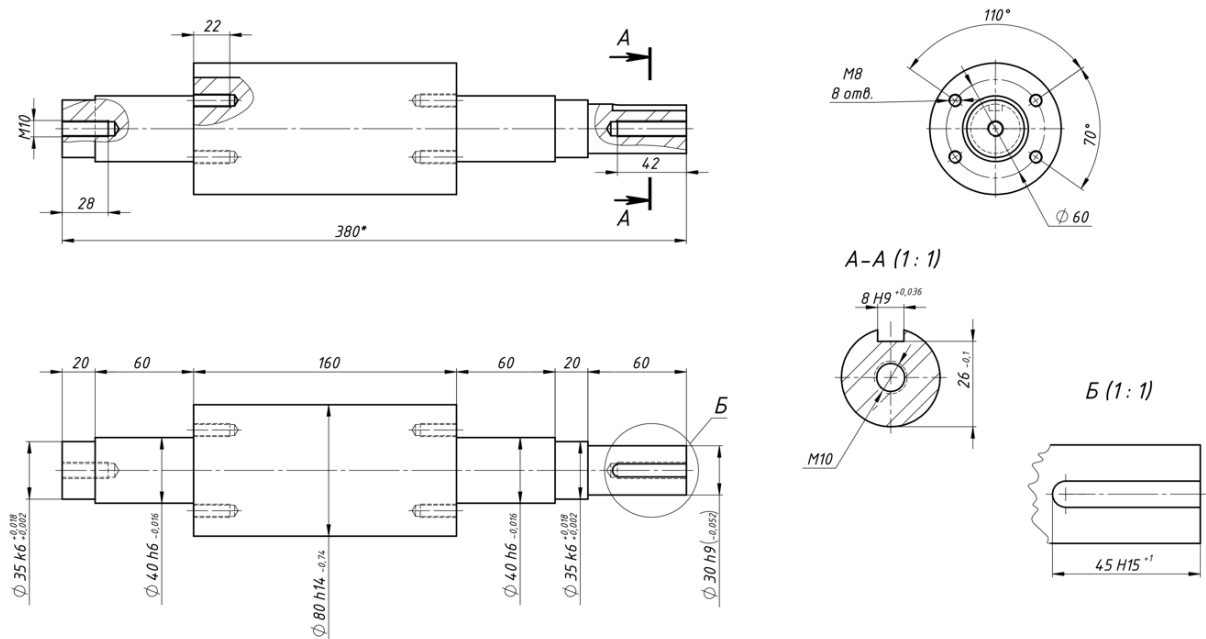


Рис. 3.14. Креслення валу дробарки

3.12. Технологічний маршрут складання робочого вузла

Робочий вузол дробарки є її ключовою частиною. В ньому відбувається подрібнення і сортування частин розділених ПЕТ-пляшок. Вал з ножами приводиться в рух клинопасовою передачею. Далі наведена послідовність складальних операцій для зборки робочого вузла.

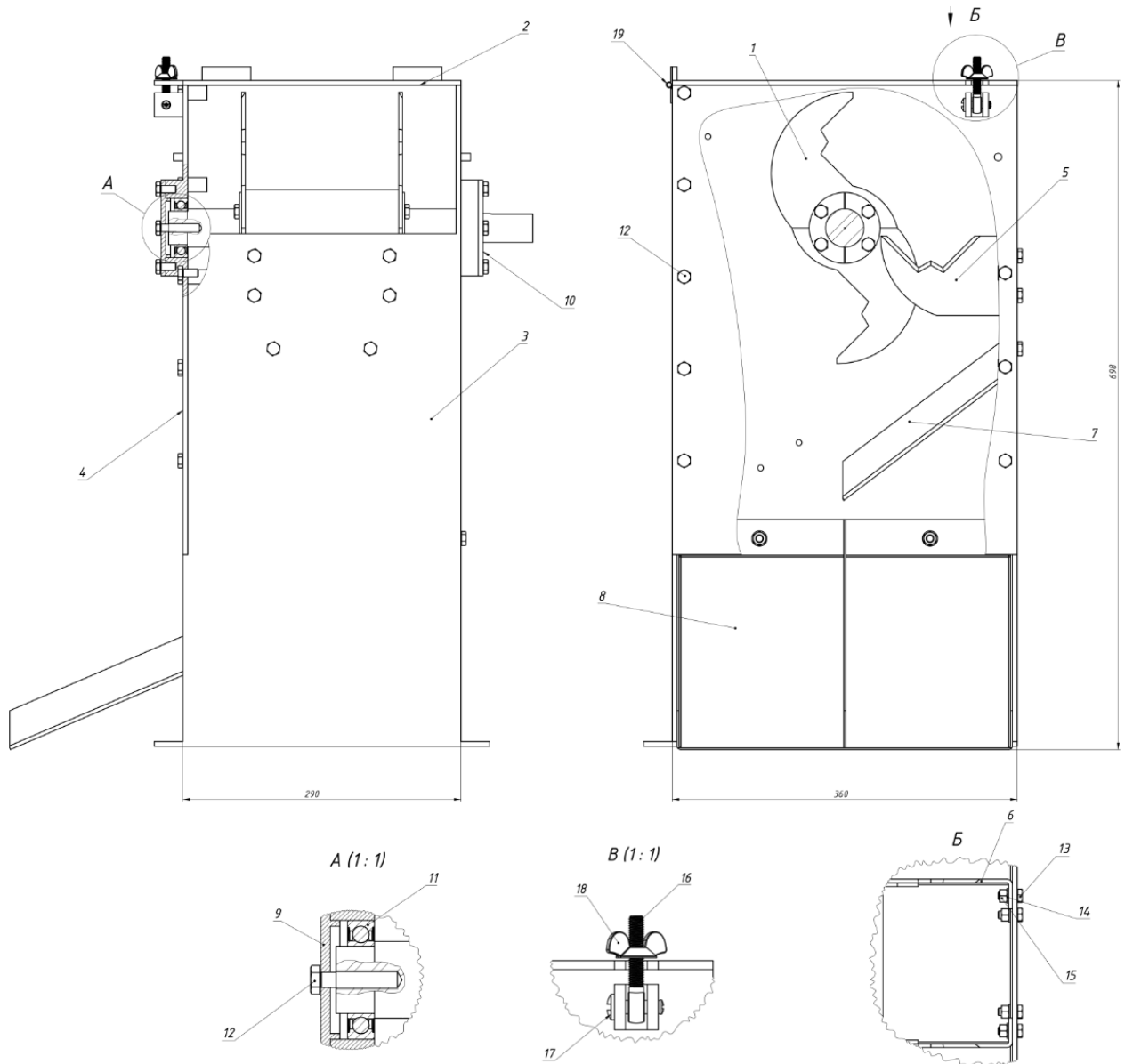


Рис. 3.15. Робочий вузол дробарки

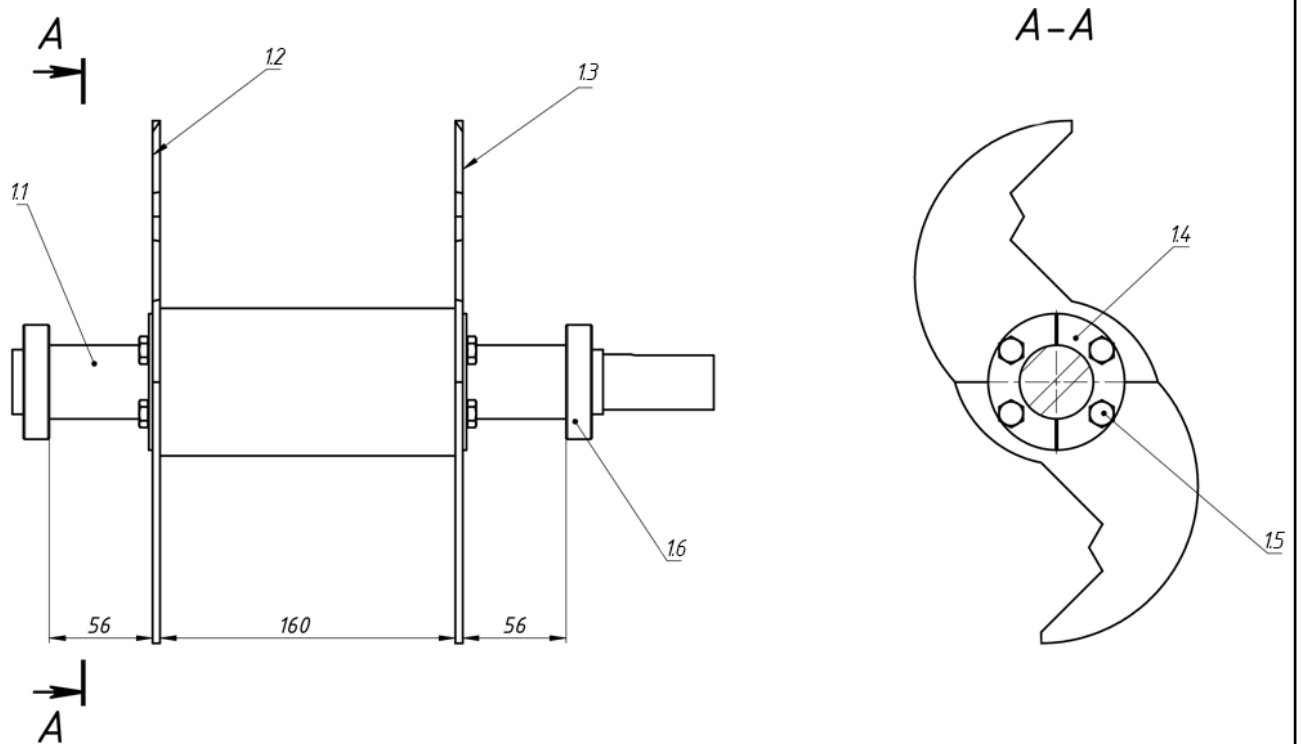


Рис. 3.16. Збірка валу

Перелік деталей, з яких складається робочий вузол, наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Детальний склад робочого вузла дробарки

| Номер позиції деталі | Назва | Кількість деталей |
|----------------------|--------------------|-------------------|
| 1 | Збірка валу | 1 |
| 1.1 | Вал | 1 |
| 1.2 | Лівий ніж | 2 |
| 1.3 | Правий ніж | 2 |
| 1.4 | Притискна пластина | 4 |
| 1.5 | Гвинт М8х20 | 8 |
| 1.6 | Підшипник | 2 |
| 2 | Верхня кришка | 1 |
| 3 | Корпус | 1 |
| 4 | Бокова кришка | 1 |
| 5 | Контрніж 1 | 1 |
| 6 | Контрніж 2 | 1 |

| | | |
|----|---------------------|----|
| 7 | Жолоб 1 | 1 |
| 8 | Жолоб 2 | 1 |
| 9 | Кришка підшипника 1 | 1 |
| 10 | Кришка підшипника 2 | 1 |
| 11 | Підшипник | 2 |
| 12 | Гвинт М8х16 | 16 |
| 13 | Болт М8х20 | 16 |
| 14 | Шайба М8 | 8 |
| 15 | Гайка М8 | 8 |
| 16 | Відкидний болт | 1 |
| 17 | Стяжний гвинт | 1 |
| 18 | Гайка-барашек | 1 |
| 19 | Приварна петля | 2 |

Згідно проведеному технологічному аналізу складального креслення та конструкції, в зборці присутні складальна одиниця першого порядку. Це корпус 3 та складові, що входять в складальну одиницю СК1. Вона ж є і базовою одиницею. Усі інші деталі є загальними складовими виробу. В СК2 базовою деталлю є вал 1.1. Після з'єднання СК2 та СК1, всі інші деталі приєднуються до загальної зборки, не групуються в складальні одиниці та не мають базових деталей.

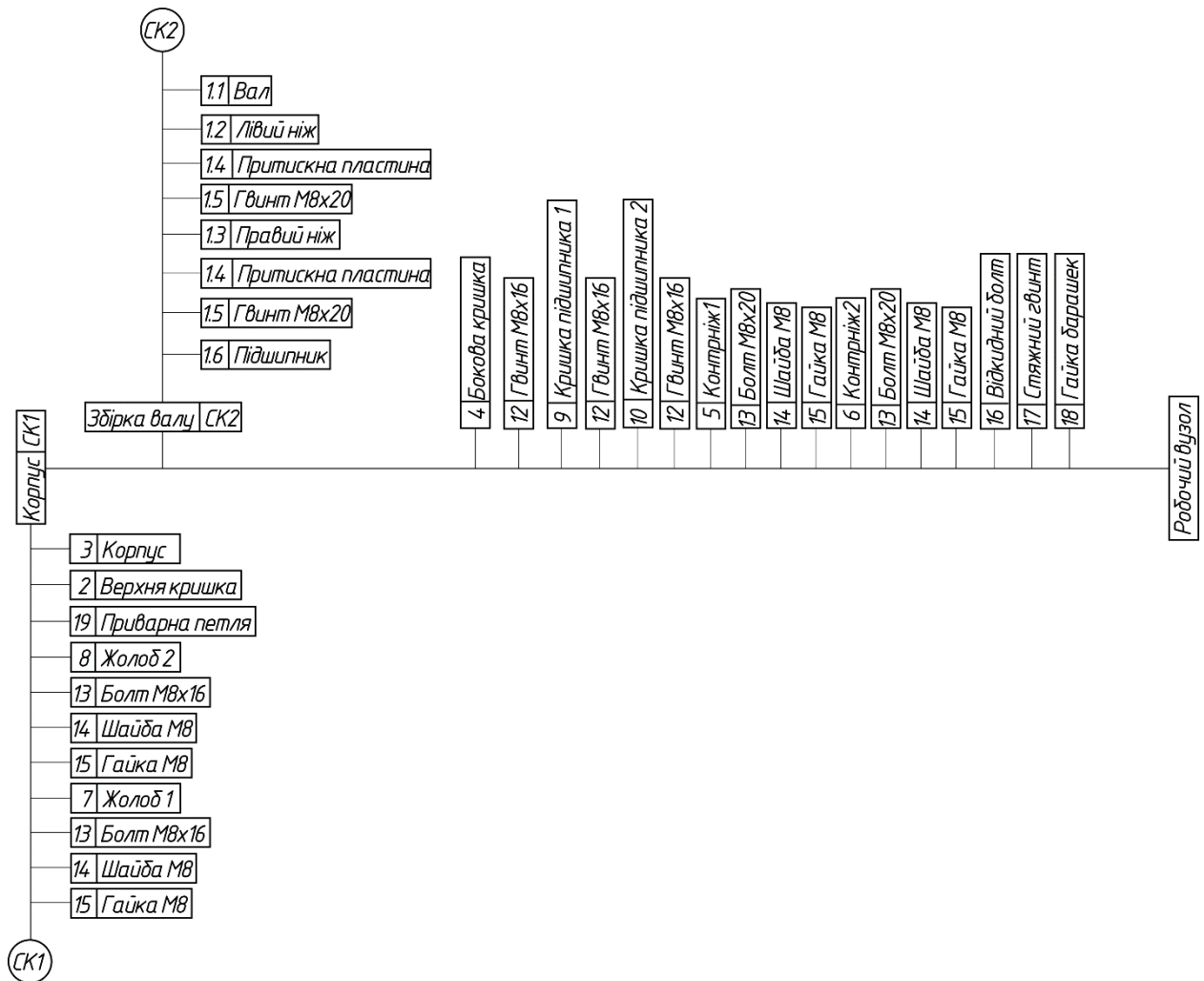


Рис. 3.17. Схема складання робочого вузла

Таблиця 1.2. Технологічний маршрут складання робочого вузла

| Номер операції | Номер переходу і його зміст |
|---------------------------------|---|
| 10. Складання корпусу (СК1) | 10.1 Встановити корпус на верстат 10.2 Встановити верхню кришку 10.3 Приварити петлі кришки 10.4 Встановити жолоб 2 10.5, 10.6, 10.7 – закріпити жолоб за допомогою болта, шайби та гайки 10.8 Встановити жолоб 1 10.9, 10.10, 10.11 – закріпити жолоб за допомогою болта, шайби та гайки |
| 20. Складання збірки валу (СК2) | 20.1 Очистити вал від стружки |

| | |
|---------------------|--|
| | <p>20.2 Встановити два лівих ножа</p> <p>20.3 Притиснути ножі двома притискними пластинами</p> <p>20.4 Закріпити ножі через пластини гвинтами</p> <p>20.5 Встановити два правих ножа</p> <p>20.6 Притиснути ножі двома притискними пластинами</p> <p>20.7 Закріпити ножі через пластини гвинтами</p> <p>20.8 Встановити підшипники</p> |
| 30. Загальна збірка | <p>30.1 Закріпити СК2 «Збірка валу» в СК1 «Корпус»</p> <p>30.2 Встановити бокову кришку</p> <p>30.3 Закріпити кришку гвинтами</p> <p>30.4 Встановити кришку підшипника 1</p> <p>30.5 Закріпити кришку гвинтами</p> <p>30.6 Встановити кришку підшипника 1</p> <p>30.7 Закріпити кришку гвинтами</p> <p>30.8 Встановити контрніж 1</p> <p>30.9, 30.10, 30.11 – закріпити контрніж 1 за допомогою болта, шайби та гайки</p> <p>30.12 Встановити контрніж 2</p> <p>30.13, 30.14, 30.15 – закріпити контрніж 2 за допомогою болта, шайби та гайки</p> <p>30.16 Встановити відкидний болт</p> <p>30.17 Закріпити відкидний болт стяжним гвинтом</p> <p>30.18 Встановити на відкидний болт гайку-барашек</p> |
| 40. Контрольна | 40.1 Проконтролювати коректну роботу пристрою при максимальних обертах двигуна |

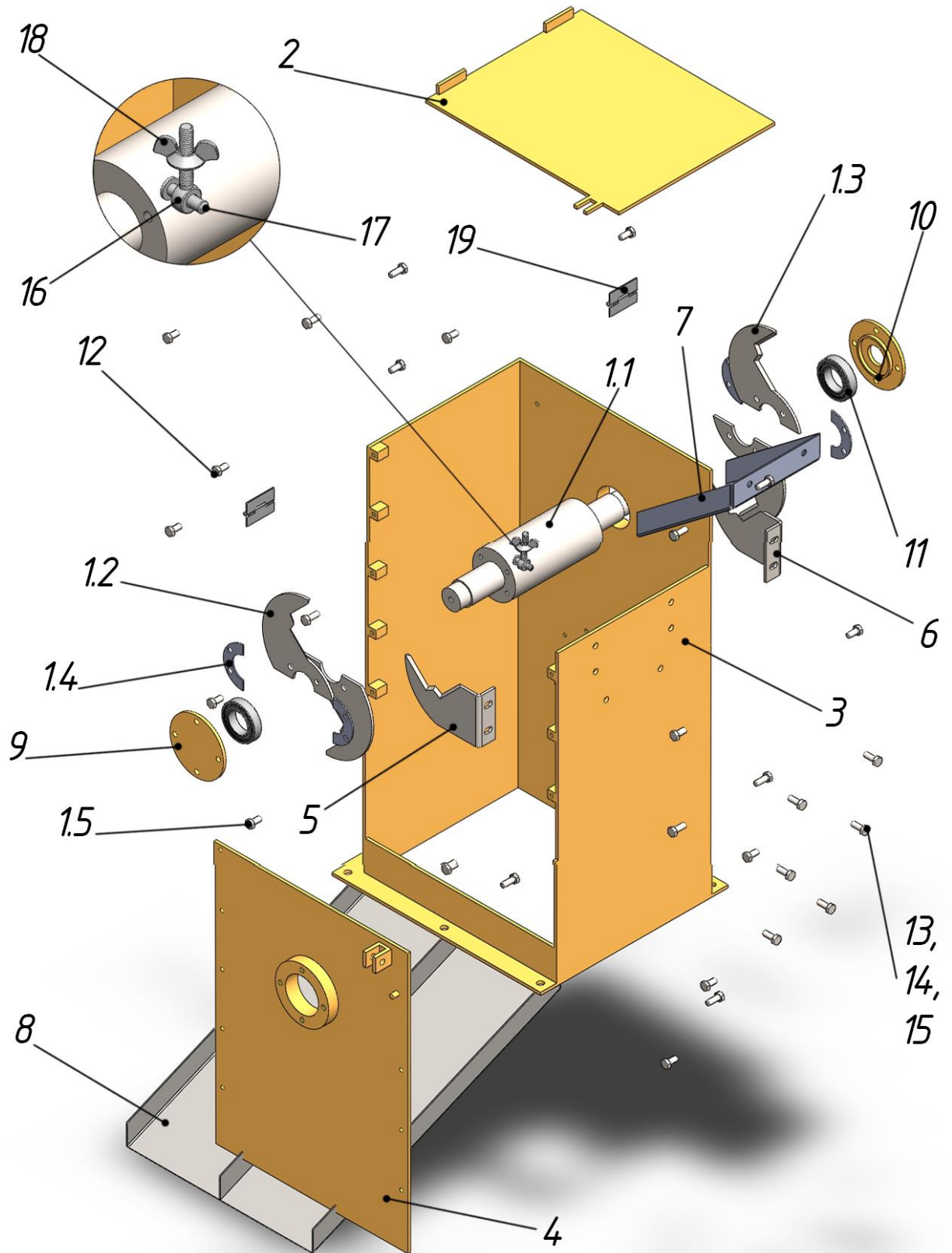


Рис. 3.18. Вид робочого вузла з рознесеними частинами

4. ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОЛОГІЯ

4.1. Охорона праці при роботі з дробаркою

Ножова дробарка для пластикових пляшок – обладнання, яке вимагає дотримання суворих правил безпеки. Висока швидкість обертання валу, наявність гострих ножів та контрножів становлять небезпеку для здоров'я оператора при недотриманні правил техніки безпеки.

Основними вимогами до безпеки при роботі з ножовою дробаркою є:

- Дотримання вимог правил технічної експлуатації та інструкцій виробника;
- Наявність та дотримання інструкції з безпеки, яка надається з обладнанням;
- Забезпечення відповідного рівня освіченості та кваліфікації персоналу, який працює з дробаркою;
- Встановлення та дотримання зон обмеження доступу до робочих частин дробарки;
- Правильне використання захисного обладнання (захисні рукавиці, окуляри, спецодяг).

4.2. Органи керування дробаркою

Керування дробаркою виконується за допомогою панелі (рис. 4.1), що встановлена під жолобом завантаження. На панелі присутні три елементи керування: кнопка «ПУСК» зеленого кольору з вбудованою підсвіткою що включається під час роботи дробарки, кнопка «СТОП» червоного кольору та регулятор частоти обертів двигуна через частотний перетворювач.

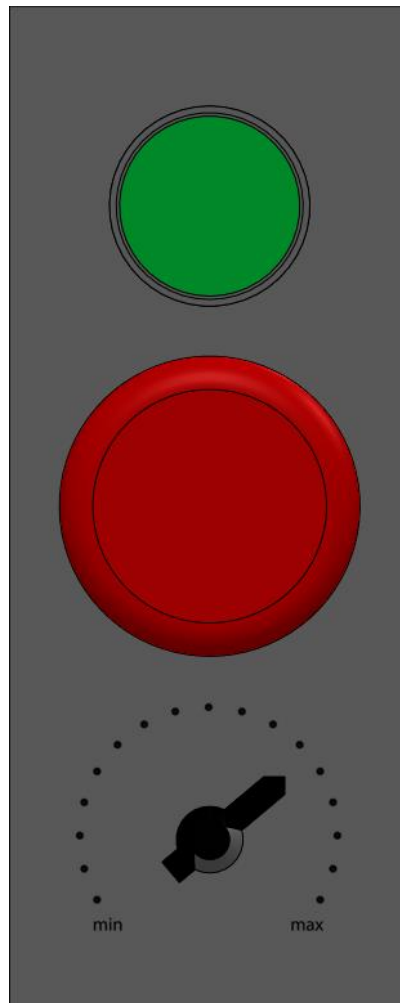


Рис.4.1 Панель керування дробаркою

4.3. Правила безпеки при пуску, експлуатації та вимкненні дробарки

Перед початком роботи з дробаркою: необхідно уважно її оглянути на присутність механічних ушкоджень, пошкоджених кабелів живлення та перевірити чи поставлені на гальма транспортні колеса.

Відкрутивши гайку-барашек, підняти верхню кришку дробарки і прибрати жолоб для завантаження для більш зручного доступу до робочого вузла. Слід перевірити чи щільно ножі прилягають до валу. Якщо між ножами та валом є зазор, необхідно зняти ніж, очистити торцеву поверхню валу від можливого забруднення або уламків пластику і змонтувати ніж на місце. Також слід перевірити гостроту кромки ножа та відсутність її пошкоджень,

оскільки недостатня гострота може стати причиною заклинювання дробарки під час подрібнення. Далі необхідно вручну повернути вал так, що ножі пройшли повз контрножі, для забезпечення достатнього зазору між ними. Це дуже важливий крок перевірки, оскільки контрножі кріпляться через пази, які дають можливість підлаштувати їх розташування відносно ножів, але при неправильному розташуванні ножі можуть заклинити і пошкодитись через замалий зазор між ними. Конструкція і розміщення контрножів спроектована так, що контрніж неможливо встановити в положення, при якому відбувся прямий удар ножа по контрножу, однак перевірка зазору все ще є важливим кроком. Закінчивши налаштування і перевірки, слід закрити верхню кришку та встановити жолоб для завантаження.

Після перевірки технічного стану дробарки, необхідно встановити біля її випускного жолобу контейнер чи мішок, в який будуть збиратись розділені частини пляшки.

Робота з дробаркою: експлуатація дробарки має відбуватись проінструктованим оператором, з обов'язковим використанням захисних окулярів та рукавичок. Заздалегідь підготовані пляшки, що мають бути подрібнені, слід розташувати поруч з дробаркою для більшої продуктивності. Регулятор встановити на мінімальну швидкість і натиснути кнопку «ПУСК». Дати попрацювати дробарці в холостому режимі, перевірити чи немає брязкоту чи вібрацій. Якщо вібрації є, слід негайно спинити дробарку кнопкою «СТОП» і перевірити міцність усіх кріплень. У випадку відсутності вібрацій, встановити регулятор на режим ~80% від максимального. Це є базовим налаштуванням, однак його можна змінювати в залежності від товщини стінок пляшок, що подрібнюються.

Оператор має взяти пляшку і покласти її у верхню частину жолоба завантаження. Під дією сили тяжіння вона скотиться вниз і буде розділена на три частини, які виведуться з дробарки через жолоб в лівій стінці дробарки.

При завантаженні однієї пляшки на секунду, годинна продуктивність складатиме 70 кг пластику.

Вимкнення дробарки: після закінчення роботи з дробаркою, необхідно натиснути кнопку «СТОП» та прибрати ємність, в яку збирались частини пляшок від випускного жолоба. Слід перевірити наявність залишків пляшок всередині дробарки, у разі їх виявлення їх необхідно прибрати, після чого відключити дробарку від мережі. В разі необхідності, її можна перекотити в місце зберігання, попередньо знявши з гальм транспортні колеса.

Робота з ножовою дробаркою може бути небезпечною у випадку недостатньої інструктованості оператора. Знання основних принципів роботи дробарки, правил безпеки, послідовності огляду до та після експлуатації є важливим фактором безпечного використання даного обладнання на виробництві.

4.4. Вплив пластикових пляшок на екологію

Пластикові пляшки, переважно виготовлені з поліетилентерефталату (ПЕТ), є одним із найбільш поширених видів одноразової пластикової тари. Масове застосування ПЕТ-пляшок у харчовій промисловості, логістиці й побуті зумовило значне збільшення обсягів пластикових відходів, що створює суттєве екологічне навантаження на довкілля.

Основною проблемою є те, що ПЕТ не піддається біологічному розкладанню природними мікроорганізмами. У природних умовах пластикова пляшка може розкладатися понад 300-500 років, причому в процесі деградації вона не зникає повністю, а розпадається на дрібні фрагменти – мікропластик (розмір частинок менше 5 мм) і нанопластик (розмір частинок від 1 до 1000 нм).

Значна частина пластикових пляшок потрапляє в річки, моря та океани, де вони становлять небезпеку для водних організмів. Птахи, риби та морські ссавці часто плутають фрагменти пластику з їжею, що призводить до травм, отруєнь та смерті. Такі відходи змінюють структуру водних екосистем,

перешкоджають проникненню світла та кисню в товщу води, а під впливом сонячного випромінювання можуть виділяти шкідливі хімічні сполуки. Накопичення мікропластику у водоймах стає глобальною проблемою, оскільки ці частинки легко переносяться на великі відстані та навіть потрапляють у питну воду.

Ще однією важливою екологічною проблемою є великий вуглецевий слід, який залишає ПЕТ-пляшка протягом свого життєвого циклу. Видобуток нафти, виробництво полімерної сировини, транспортування готової продукції та утилізація відходів призводять до значних викидів парникових газів. Це робить пластикові пляшки суттєвим фактором антропогенної зміни клімату.

У сукупності ці фактори свідчать про те, що пластикові пляшки становлять одну з найбільших екологічних загроз сучасності. Вирішення проблеми вимагає комплексного підходу: удосконалення системи сортування та збору відходів, підвищення рівня переробки, зменшення обсягів одноразового пластику, а також розробка технологій переробки, таких як подрібнення та повторне використання матеріалу в промислових циклах. Саме переробка ПЕТ-пляшок дозволяє зменшити кількість пластикових відходів, зменшити навантаження на сміттєзвалища та зменшити використання первинних полімерних ресурсів, що робить її одним з найефективніших способів мінімізації впливу пластикової упаковки на навколишнє середовище.

5. МАРКЕТИНГОВЕ/ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ/ СОЦІАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

5.1. Техніко-економічне обґрунтування проекту

На ПрАТ «Оболонь», як і на будь-якому іншому підприємстві з виробництва напоїв з власною лінією видування пластикових пляшок, під час їх виготовлення час від часу трапляється брак. Коли лінію налагоджують на інший тип пляшок – браку стає більше. Також іноді з тих чи інших причин списуються цілі партії готової продукції, тару з-під яких неможливо використати повторно. Більшість виробництв вирішують цю проблему продажом цих пляшок на підприємства з вторинної переробки. Однак це накладає додаткові витрати та логістичні ускладнення, оскільки пляшки займають великий об'єм при невеликій масі, що є негативним фактором коли пляшки продають за ваговим методом.

Для вирішення цієї проблеми на ПрАТ «Оболонь» застосовують дробарку для подрібнення пластикових пляшок. Однак вона має недоліки: подрібнення хоч і забезпечує високу щільність кінцевого матеріалу, втім процес відбувається доволі довго. Також отримані пластикові пластівці є не найкращою сировиною для повторного використання. Як вже згадувалось, причиною є різниця у структурі полімерів в різних частинах пляшки, які при змішуванні дають полімер низької якості.

Тому виникає потреба в інноваційному технічному рішенні, яке б дозволило не просто подрібнювати пляшки, а розділяти їх на частини, що мають різну структуру, і, таким чином, переробляти їх окремо. Запропонована дробарка не подрібнює пляшку, а розділяє її на три частини: горловину, середину та днище що дозволяє підтримувати структурну чистоту вторинного матеріалу.

5.2. Маркетингове обґрунтування застосування ножової дробарки

Сучасний ринок вторинної переробки пластиків, зокрема ПЕТ-пляшок, характеризується високим рівнем відходів та низькою ефективністю переробки. Більша частина ПЕТ-пляшок відправляється на переробку у вигляді цілих пляшок, що спричиняє зниження якості структури вторинного полімеру та низьку ефективність використання ресурсів. Впровадження таких дробарок для використання на підприємствах з власними лініями виготовлення пляшок та підприємствах вторинної переробки мають обґрунтування в основних маркетингових аспектах, що наведені нижче:

1. Технологічна відмінність від типових дробарок

Сучасні роторні дробарки, які використовуються на підприємствах переробки, мають єдину основну функцію – подрібнення відходів на пластівці. Таке подрібнення перетворює їх на однорідну масу, що піддається переробці, але з втратою якості вторинного полімеру.

Запропонована дробарка – інший тип обладнання, яке не подрібнює, а розділяє пляшки.

- В ході розділення пляшка не зменшується до пластівців – вона залишається у вигляді трьох окремих частин:
- Розділення відбувається за рахунок механічного розрізу, який виконується за рахунок серповидних ножів з проколюючим елементом, що забезпечує точність розрізу та зниження витрат енергії на розділення у порівнянні з типовими дробарками.

2. Технічна відповідність існуючим рішенням

Технологія, що в основі конструкції дробарки, відповідає існуючим технічним рішенням, але змінює їх функцію. Роторні дробарки з пасовою передачею є стандартним виконанням даного типу обладнання. Серповидні ножі використовуються у кутерах для м'яса, та мають доказану надійність. Дана дробарка є поєднанням існуючих

технічних рішень з доповненнями, що є позитивним аспектом з точки зору випробувань та стандартизації.

3. Екологічні переваги

Покращення екологічної ефективності – одна з головних переваг дробарки.

- Частини мають різну структуру полімерів, і їх розділення дозволяє переробляти їх окремо;
- Роздільна переробка дозволяє підвищити якість вторинного полімеру, оскільки більше не відбувається змішування пластику з різною структурою;
- Розділені пляшки мають менший об'єм, відповідно логістика перевезень їх на підприємства вторинної переробки спрощується та стає дешевшою;
- Менше використання автотранспорту призводить до зниження викидів в атмосферу.

4. Економічна вигода

- Продаж на вторинну переробку частин за різною ціною в залежності від типу полімерів сприяє збільшенню доходів для підприємства, що їх продає. Так, аморфні складові матимуть вищу ціну, оскільки легше піддаються переробці і мають характеристики, близькі до вихідної сировини.
- Отримані частини фактично готові до переплавки одразу після придбання, оскільки вже відсортовані за типом полімеру та мають невеликий розмір, що зменшує витрати підприємств з переробки;
- Більша якість вторинного полімеру дозволяє використовувати його у більшому відсотковому значенні при виробництві нових виробів, що робить виробництво дешевшим.

5. Маркетингові можливості

- Інноваційність методу розділення пляшок перед переробкою дозволяє позиціонувати дробарку як «першу на ринку» та таку, що має «інноваційну технологію».
- Покращення іміджу ПрАТ «Оболонь» за рахунок впровадження новітніх технологій та підкреслювання турботи про навкілля.
- Дробарка не має аналогів та конкурентів, а відповідно має можливість повністю зайняти нішу в ринку вторинної переробки полімерів.

Висновок: запропонована дробарка є перспективним проектом, який може підвищити якість вторинного полімеру, покращити економічну ефективність ПрАТ «Оболонь», має позитивний вплив на екологію та покращує імідж підприємства.

6. ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було здійснено розробку та дослідження дробарки для ПЕТ-пляшок продуктивністю 70 кг/год для ПрАТ «Оболонь».

Запропонована дробарка відрізняється від типових дробарок для пластикових відходів тим, що замість подрібнення ПЕТ-пляшок до пластівців дрібної фракції, вона розділяє пляшку на три частини з різними структурами полімерів: горловину та днище з аморфною структурою та середину пляшки з орієнтованою структурою. Після розділення частини пляшки відводяться з дробарки в два окремих контейнера в залежності від структури. Такий тип подрібнення дозволяє попередньо відсортувати пластикові відходи перед їх подальшою переробкою. Так як аморфні полімери піддаються переробці легше, ніж орієнтовані, більш однорідний за структурою вторинний полімер має кращі фізичні характеристики і більший спектр можливого застосування.

На основі магістерської роботи можна зробити такі висновки:

- Були проаналізовані типи дробарок, що застосовуються на виробництві пива для подрібнення солоду та пластикових пляшок. В ході аналізу виявлено, що існуюча на заводі «Оболонь» схема подрібнення є неприбутковою через низьку якість отриманого вторинного матеріалу. Для вирішення цієї проблеми була спроектована ножова дробарка з одночасним відділенням горловини та днища;
- Були проаналізовані типи ножів, що застосовуються в дробарках для полімерів, а саме: ножі з пазами, ножі з рифленням та поворотні ножі. Виявлено, що головним недоліком існуючих конструкцій ножів є високе зусилля різання через велику площу контакту ножів з пляшкою, що подрібнюється. Задля вирішення цієї проблеми були створені спеціальні серповидні ножі з проколюючим елементом;

- Для перевірки ефективності різання запропонованими ножами була розроблена та зібрана експериментальна установка, та проведені експерименти дослідження зусилля різання пластикових пляшок в трьох зонах: горловини, середини та днища. Результатами проведених експериментів стали емпіричні математичні моделі, які описують залежність вихідної сили різання від ключових параметрів процесу: тиску стисненого повітря, товщини стінки пляшки та кута заточки ножа.
- На основі проведених досліджень була створена конструкторська документація нової дробарки для її подальшого виготовлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.І. Теличкун, О.М. Гавва, Ю.С. Теличкун, О.О. Губеня, М.Г. Десик, О.М. Чепелюк. Технологічні комплекси харчових виробництв: Навчальний посібник / Київ: Видавництво «Сталь», 2017. 456 с.
2. Кошова, А.М. Куц, Р.М. Мукоїд. Технологія солоду, пива і безалкогольних напоїв [Електронний ресурс]: метод. рекомендації до вивчення дисципліни та виконання лабораторного практикуму для студентів напряму підготовки 6.051701 «Харчові технології та інженерія» денної і заочної форм навчання / В.М. Київ: НУХТ, 2016. 108 с.
3. Солод пивоварний ячмінний. Загальні технічні умови: ДСТУ 4282:2018. /Київ: Держспоживстандарт України, 2018. -14с.- (Національний стандарт України).
4. Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О. В., Ялпачик Ф. Ю, Гвоздев В. О. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: Навч. посібник /; Вінниця: Нова Книга, 2015. 488 с
5. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості : навч. посібник / В.Г. Мирончук, Л.О. Орлов, А.І. Українець та ін.; Вінниця, НУХТ: Нова книга, 2004. 288 с.
6. Перцевий Ф.В. Технологія продукції харчових виробництв: Навч. посібник / Ф.В. Перцевий, Н.В. Камсуліна // Харків - ХДУХТ, 2016. – 214 с.
7. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zkh/terretory/stan-sferypovodzhennya-z-pobutovymy-vi/> (дата звернення: 25.11.2025).
8. Бутко А.Е. Український ринок утилізації полімерних відходів і основні тенденції його розвитку. «Young Scientist», № 2 (17), 2017. 139-142 с.
9. Гаврилишин І.М. Використання пластику. Проблеми забруднення відходами. Київ, 2016. Випуск. 12. 65 с.
10. Звіт про розширену відповідальність виробника товарів у поводженні з побутовими відходами. URL: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/prorozshirenu-vidpovidalnist-virobnika-tovarnoyi-produktsiyi-u-povodzhenni-z-pobutovimi-vidhodami-roz-yasnennya-minregionu>.

- 11.Кіселева Т.В., Михайлов В.Г. Методи оцінки і управління екологоекономічними ризиками як механізм забезпечення стійкого розвитку екологоекономічної системи: Системи управління та інформаційні технології, 2018. № 2. 69-74 с.
- 12.Самойлюк А.О. Способи використання матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія, Видавництво «Політехніка». 2009. 265 с.
- 13.Михайлюк В.М. Механізм і кінетичні закономірності процесу переробки твердих органічних відходів методом високотемпературного піролізу. Автореф. дис. к.т.н. 05.17.08 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Ч: 2017. 18с.
- 14.Сироль С.Р. Ефективність промислового виробництва з використанням вторинних ресурсів. Автореф. дисерт. к.е.н., 2014. 19 с
- 15.Суберляк О.В., П. І. Баштаник. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів: підруч. для студентів ВНЗ; М. освіти і науки України. 2-ге вид. Львів: Растр-7, 2016. 456 с.
- 16.Кошова В.М., Куц А.М., Лубяной М.О. Чисте довкілля – додатковий прибуток. Харчова промисловість. 2014, № 14. С. 72-77.
- 17.Нільсен Л. Механічні властивості полімерів і полімерних композицій. — Marcel Dekker, INC, 2014. — 313 p.
- 18.D. Zhygunov, M. Mardar, S. Sots, Yu. Barkovskaya, G. Zhyhunova. Research of technological properties of wheat and spelt grain as raw materials for flour and groats manufacturing. Scientific Works of NUFT 2018. Volume 24, Issue 5, 2018.
- 19.Maltomat III Grist Mill | Brewing | Bühler Group. Bühler Group | Innovations for a better world. URL: https://www.buhlergroup.com/global/en/products/maltomat_iii_gristmill.html
- 20.Recycling of plastic waste: Screening for brominated flame retardants (BFRs) / K. Pivnenko [et al.] // Waste Management. — 2017. — Vol. 69. — P. 101–109. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.038>.
- 21.Pellow D. N., Park L. S.-H. Garbage Wars: The Struggle for Environmental Justice in Chicago. Cambridge, MIT Press, 2004. 256 p.
- 22.Knoblauch J. A. The environmental toll of plastics. Environmental Health News, 2018.
- 23.Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing. — Hansler Publishers, 2011. - 161 p.

24. Dave H. K., Davim J. P. Fused Deposition Modeling Based 3D printing. — Springer, 2017. - 517 p. - ISBN 9783030680237.
25. Krevelen D. W. V., Nijenhuis K. T. Properties of Polymers. — Elsevier, 2019. - 1031 p. - ISBN 9780080548197.
26. Benyatiar, P.; Kumar, P.; Carpenter, G.; Brace, J.; Mishra, D.K. Bottle-to-bottle processing of polyethylene terephthalate (PET) for beverage production: a review. *Polymers* 2022, 14, 2366. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Koshti, R.; Mehta, L.; Samart, N. Biological processing of polyethylene terephthalate: a mini-review. *J. Polym. Environment*. 2018, 26, 3520–3529. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Fox, G.P. et al. (2023) — "Variation in quality of grains used in malting and brewing" у журналі *Frontiers in Plant Science*
29. Reddy S., Raju T. Design and Development of mini plastic shredder machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 455. P. 012119.
30. Design of the crusher for plastic and rubber waste produced in automotive industry / J. Melicherčík et al. *FME Transactions*. 2021. Vol. 49, no. 3. P. 734–739.
31. Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs. *Proceedings of Tavria state agrotechnological university*. 2023. Vol. 1, no. 23. P. 41–62.
32. The Impact of Enzyme Type, Temperature, and Grinding Roller Interval on Barley Malt-Based Beverages / M. Iranmanesh et al. *Journal of Human Environment and Health Promotion*. 2024. Vol. 10, no. 4. P. 238–247.