

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

Обґрунтування параметрів обладнання для заготівлі сінажу

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Омельченко Дмитро Анатолійович

Керівник: _____ Дудін Володимир Юрійович

Рецензент: _____ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Рівень вищої освіти: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Омельченко Дмитру Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів обладнання для заготівлі сінажу

керівник роботи: Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від
« 24 » жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз стану питання процесів та обладнання для заготівлі сінажу. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан питання і завдання дослідження. 2. Теоретичні дослідження. 3. Експериментальні дослідження. 4. Охорона праці. 5. Економічне порівняння технологій заготівлі сінажу. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (2 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (4 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (4 аркуші, А4). 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Дудін В.Ю., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 24.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2025 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2025 р.	
3	Експериментальний	до 09.11. 2025 р.	
4	Охорона праці	до 19.11. 2025 р.	
5	Економічний	до 26.11. 2025 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11. 2025 р.	

Студент

(підпис)

Омельченко Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дудін В.Ю.

(прізвище та ініціали)

Омельченко Д.А. Обґрунтування параметрів обладнання для заготівлі сінажу/Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Мета роботи - теоретично обґрунтувати, розробити та експериментально перевірити технологію і технічний засіб ін'єкції CO₂ у рулон сінажу під час пакування з метою прискореного формування анаеробних умов, зниження біохімічних втрат і підвищення поживної цінності корму.

Запропоновано конструктивно-технологічну схему ін'єкції CO₂ у напівобгорнутий рулон із подальшим дообмотуванням; обґрунтовано параметри інжектора (пневмоциліндр, шток-ігла, пружина) та розраховано об'єм газозаміщення як функцію вологості та щільності пресування. Створено лабораторну установку й дослідний інжектор; проведено багатофакторні експерименти за планом Бокса–Бенкіна; побудовано адекватні регресійні моделі, що зв'язують p , q , Q , V_0 з Y_1 , Y_2 , Y_3 . Встановлено оптимальні діапазони: $p \approx 290\text{--}330$ кг/м³; $q \approx 0,40\text{--}0,50$ м³/кг; $V_0 \approx 0,50\text{--}0,60$ м³/год. За цих умов температура саморозігріву не перевищує фонові значення, а збереження протеїну і кормових одиниць істотно покращується порівняно з базовою технологією рідкого/біологічного консерванта.

Економічне порівняння показало зниження повної собівартості заготівлі орієнтовно на 255 грн/т свіжої маси (за базових припущень щодо вологості, доз і цін), що масштабовано забезпечує сезонний ефект у сотні тисяч-понад мільйон грн залежно від обсягів. Розроблено вимоги безпеки та проект інструкції з охорони праці (герметизація, контроль концентрацій CO₂, вентиляція, ЛОТО-процедури), що забезпечують безпечну експлуатацію вузла ін'єкції у виробничих умовах.

Ключові слова: сінаж; рулонний сінаж; ін'єкція CO₂; газове консервування; газозаміщення; щільність пресування; температура саморозігріву; поживна цінність; протеїн; кормові одиниці; економічна ефективність.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Технології та технічні засоби консервування сінажу	10
1.1.1 Огляд технологій консервування сінажу	10
1.1.2 Технічні засоби для консервування сінажу	17
1.2 Зоотехнічні вимоги до технології консервування сінажу	22
1.3 Висновки	26
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	28
2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми	28
2.2 Моделювання конструктивних параметрів робочого елемента	29
2.3 Інжектор для внесення вуглекислого газу в сінажну масу	32
2.4 Визначення об'єму газозаміщення всередині сінажної маси	35
2.5 Висновки	39
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	40
3.1 Програма експериментальних досліджень	40
3.2 Лабораторна установка для обробки сінажу вуглекислим газом	40
3.3 Дослідний зразок пристрою для обробки сінажу вуглекислим газом	42
3.4 Результати експериментальних досліджень впливу обробки сінажу вуглекислим газом на поживний склад	43
3.5 Висновки	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	50
4.1 Загальні вимоги охорони праці при заготівлі стеблових кормів	50

4.2	Оцінка з точки зору охорони праці преса-пакувальника сінажу з розробленою системою внесення консерванту	51
4.3	Проект інструкції з охорони праці при роботі з пресом-пакувальником сінажу	53
4.4	Висновки	54
5	ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАГОТІВЛІ СІНАЖУ	56
5.1	Вихідні дані	56
5.2	Результати розрахунків	57
5.3	Висновки	59
	Загальні висновки	60
	Бібліографія	62
	Додатки	64

ВСТУП

Актуальність теми. Сінажування в рулонах з індивідуальною герметизацією стало одним із базових рішень забезпечення стабільної кормової бази у молочному та м'ясному скотарстві. Водночас класичні схеми консервування з використанням рідких або біологічних препаратів мають низку технологічних обмежень: залежність від погоди та тривалості аеробної фази, неоднорідність розподілу добавок, корозійний вплив на обладнання, варіабельність результату через епіфітну мікрофлору. Це породжує втрати сухої речовини, протеїну та енергії, що безпосередньо підвищує собівартість літра молока/кг приросту. Перспективним шляхом підвищення стабільності якості сінажу є контрольована газова консервація - цілеспрямоване заміщення повітря CO₂ у товщі рулона до завершення герметизації. Створення швидких і стійких анаеробних умов пригнічує небажану мікрофлору, знижує температуру саморозігріву та втрати поживних речовин, а також зменшує чутливість процесу до погодних факторів і операційних коливань.

Зв'язок роботи з науковими програмами та практикою. Дослідження виконано в руслі завдань ресурсозбереження й підвищення стійкості тваринницьких технологій, відповідає сучасним тенденціям механізації та автоматизації процесів заготівлі об'ємних кормів і спрямоване на зниження ризиків якості корму за рахунок керованої газової консервації.

Мета роботи - теоретично обґрунтувати, розробити та експериментально перевірити технологію і технічний засіб ін'єкції CO₂ у рулон сінажу в процесі пакування, оцінити вплив параметрів процесу на показники якості корму та обґрунтувати економічну доцільність застосування.

Завдання дослідження:

1. Провести огляд технологій і технічних засобів консервування сінажу; сформулювати зоотехнічні вимоги до результату.
2. Обґрунтувати конструктивно-технологічну схему пристрою для ін'єкції CO₂; змодельовати робочий орган (інжектор) і визначити його раціональні параметри.

3. Розрахувати об'єм газозаміщення всередині маси сінажу з урахуванням вологості та щільності пресування; встановити аналітичні залежності для вибору дози CO₂.

4. Створити лабораторну установку та дослідний зразок інжектора; розробити програму багатофакторних експериментів.

5. Отримати регресійні моделі впливу керованих факторів (p , q , Q , V_0) на температуру саморозігріву, вміст протеїну та кормові одиниці; визначити оптимальні діапазони.

6. Виконати економічне порівняння базової технології (рідкий/біо консервант) і розробленої схеми (ін'єкція CO₂) на 1 т СМ і для сезонних обсягів; оцінити окупність.

7. Сформувати вимоги з охорони праці та безпеки при роботі з вузлом ін'єкції CO₂; розробити проект інструкції.

Об'єкт дослідження - процес консервування сінажу у рулонах з індивідуальною герметизацією.

Предмет дослідження - параметри й режими газового консервування CO₂ (доза, витрата, зона обробки, щільність пресування) та їх вплив на температуру саморозігріву, втрати сухої речовини, вміст протеїну і кормові одиниці.

Методи дослідження. Аналітичний огляд; інженерні розрахунки й математичне моделювання процесів газозаміщення та роботи інжектора; лабораторні дослідження із застосуванням плану Бокса–Бенкіна; статистична обробка (оцінка адекватності моделей, аналіз залишків, чутливісний аналіз); техніко-економічне порівняння варіантів; методи охорони праці та ризик-орієнтований підхід.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Технології та технічні засоби консервування сінажу

1.1.1 Огляд технологій консервування сінажу

Ключовим чинником під час заготівлі сінажу є строки скошування трав. Молоді рослини містять максимальну кількість поживних речовин - сирого протеїну, каротину, мінеральних елементів і обмінної енергії (ОЕ), а також мають низьку частку клітковини. Такий корм краще відповідає потребам тварин. Із пізнішими строками скошування зростає вміст клітковини, погіршується перетравність поживних речовин і знижується якість заготованого корму (див. рисунок 1.1).

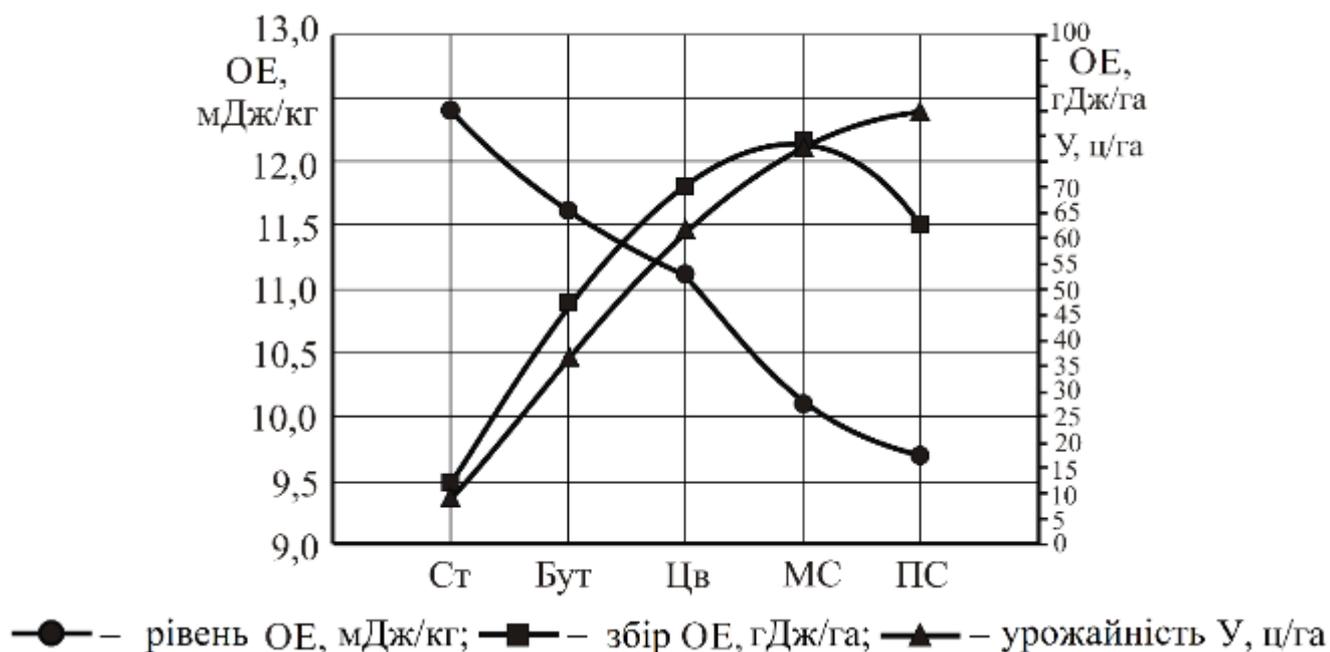


Рисунок 1.1 – Динаміка якості та кількості обмінної енергії в рослинах залежно від фази розвитку: Ст – фаза стеблуння; Бут – фаза бутонізації; Цв – фаза цвітіння; МС – фаза молочної стиглості насіння; ПС – фаза повної стиглості насіння.

У північних умовах затримка зі збиранням підвищує ризики погіршення погоди. Скошування у вологу, дощову пору ускладнює збирання через вилягання травостою. Таку масу важче косити та пров'ялювати, а отриманий корм містить менше поживних речовин і схильний до псування внаслідок саморозігрівання та розвитку пліснявих грибів і іншої мікрофлори.

Щоб отримати високоякісний сінаж, дотримуються таких правил: бобові скошують від фази бутонізації до початку цвітіння; злакові - від виходу в трубку до колосіння; у злаково-бобових сумішах орієнтуються на домінуючий компонент.

Типова технологічна схема заготівлі сінажу

- скошування;
- плющення;
- пров'ялювання і згортання у валки;
- підбирання валків;
- закладання на зберігання з герметизацією.

Більш детально процес заготівлі сінажу у траншеї наведено на рисунку 1.2.

Скошування виконують косарками різних типів. Використання косарок-плющилок є доцільнішим: воно в 2...3 рази прискорює пров'ялювання та забезпечує рівномірніше сушіння маси. Наприклад, застосовують косарку КС-2,1 у агрегаті з плющилкою ПТП-2,0. Обидві машини агрегуються з тракторами тягового класу 0,6 і 1,4 (ДТ-20, Т-25, Т-40), продуктивність комплексу - 0,8...1,0 га/год. Якщо працюють багатобрусними косарками (КПД-4,0, КНУ-6), плющення виконують відразу після скошування. Існує спеціалізована косарка-плющилка КПВ-3; також практикували переобладнання зернових жаток ЖВН-6 на знижений зріз для скошування трав.

Застосовують три основні схеми скошування:

- а) скошування з укладанням у прокіс;
- б) скошування з плющенням і укладанням у прокіс;
- в) скошування з плющенням і формуванням валка.

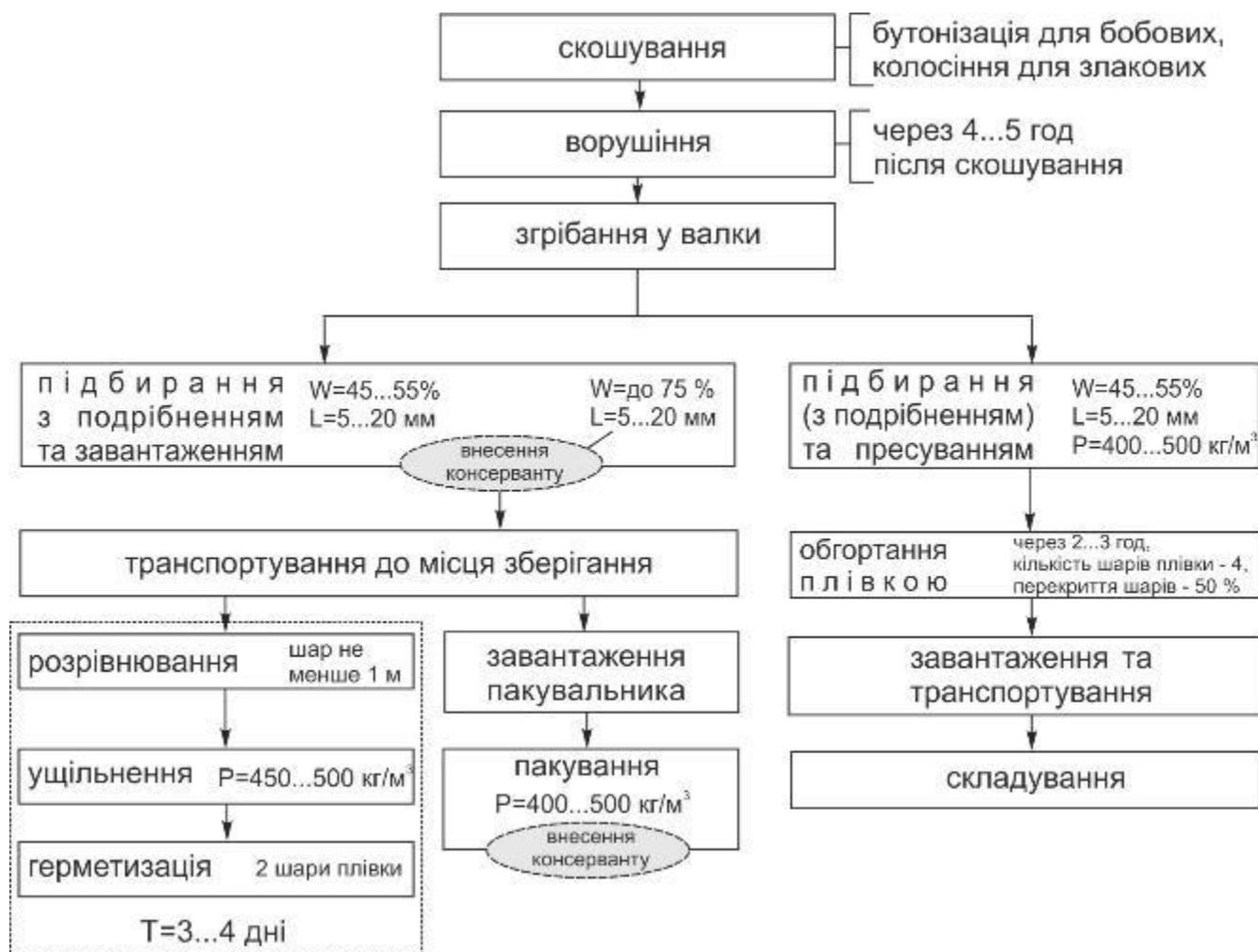


Рисунок 1.2 – Етапи заготівлі сінажу

Висота зрізу залежить від виду трав і укосу: 4,0...4,5 см - на природних сінокосах; 5...6 см - на заплавах луках і на посівах однорічних/багаторічних трав першого укосу; 6...7 см - для другого укосу. Допустиме відхилення - $\pm 1,0$ см.

Скошувати доцільніше зранку. За сприятливої погоди протягом 2...6 годин плющені конюшина чи люцерна у прокосах пров'ялюються до 50...55% вологості.

Плющення підвищує швидкість віддачі вологи з листків і стебел, зменшує втрати сухої речовини. Пров'ялювання плющених трав з періодичним ворошінням до 60% відбувається на ~2 години швидше, ніж без нього.

Для прискорення сушіння рекомендовано одразу зі скошуванням проводити підпушування валків. За потреби виконують суцільне ворошіння прокосів кожні 2...4 години. Використовують колісно-пальцеві граблі та граблі-ворошилки, що

формують рівномірні, пухкі валки. В умовах спеки траву бажано збирати у валки відразу після скошування; можливе агрегування косарки з секцією граблів ГВК-6,0 на тракторі ДТ-20.

Критично важливо контролювати пров'ялювання до оптимальної вологості 50...55%. За вологості понад 55% консервування відбувається вже за типом силосування; нижче 50% зростають польові втрати, підвищується пружність стебел і погіршується ущільнення при закладанні в сховище.

Вологість визначають стаціонарними (ВЧ, ВЗМ) або переносними (ВЛК-0,1) вологомірами. Також використовують портативний вологомір Чижової або візуально-тактильну оцінку з точністю до 5...6%.

- ~50%: маса помірно пружна, м'яка; листки не обламуються; сік при скручуванні не виділяється.

- 55...60%: у злаків стебло пружне, листки гнучкі й трохи в'ялі; у бобових стебло в'яле, листки ще гнучкі.

- 40...45%: у злаків стебло ще пружне, листки підсушені, гнучкі, не кришаться; у бобових більшість нижніх листків сухі, черешки ламаються.

За зниження вологості до ~45% втрати сухої речовини можуть перевищувати 20%; підвищується ризик інтенсивного саморозігрівання під час закладання і вибірки, що різко погіршує перетравність білка та прискорює втрати каротину.

Підбирання валків виконують за вологості маси близько 60%, щоб основний обсяг заготовити в інтервалі 50...55%. Подальше зберігання здійснюють двома шляхами:

- у траншеях і баштах;

- з використанням полімерної упаковки.

Для якісного сінажу необхідні анаеробні умови під час закладання.

Досвід господарств показує, що сінаж добре зберігається у звичайних цегляних чи кам'яних силосних баштах із внутрішнім цементуванням (щоб обмежити доступ повітря). Після заповнення зверху укладають шар дрібно подрібненої, непросушеної трави товщиною 80...100 см. У баштах із верхнім розвантаженням масу укривають полімерною плівкою суцільним полотнищем;

рулонну плівку кладуть унахльост (не менше 20 см), краї заправляють між стінкою та масою щонайменше на 15 см.

Разом із баштами широко застосовують траншеї. Рекомендовані розміри облицьованих траншей: довжина ~25 м, ширина ~6 м, висота ~2,5 м, місткість 150...190 т корма. В 1,0 м³ вміщується 400...500 кг сінажу. Якщо є можливість працювати високими темпами, траншеї можна збільшувати.

У траншеї масу, як правило, закладають подрібненою; не подрібнену допускають лише за відсутності підбирачів-подрібнювачів. Спеціальних машин для подачі не потрібно - масу скидають із автомобілів або тракторних причепів, заїжджаючи в траншею чи з її торця. Несамоскидні причепа розвантажують брусом і тросом.

Заповнення починають із середини або ближче до торця, обов'язково ретельно ущільнюють колісними або гусеничними тракторами. Для трамбування не подрібненої маси можливе застосування трактора С-100. Завершують закладання, коли ущільнена маса піднята над бортами приблизно на 1,0 м. Зверху доцільно додати 20...30 см свіжоскошеної дрібно подрібненої маси (див. рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд укладання сінажу в траншею

Добре утрамбовану поверхню вирівнюють і накривають полотнищами поліетиленової плівки; краї заправляють між стінкою траншеї та масою на глибину не менше 50 см. Орієнтовна витрата - близько 1,0 м² плівки на 1,0 т сінажу. Зверху насипають солому або землю шаром 15...20 см. Вибірку ведуть поступово, з одного торця, зрізаючи вертикальними шарами на всю ширину і висоту, не менше 0,5 м за добу, і згодуюють того ж дня. Відкриту площину знову накривають плівкою, не допускаючи саморозігрівання. Процес сінажування вважають завершеним на 20...30-ту добу після герметизації.

Недоліки траншейно-баштового способу:

- значні капіталовкладення;
- великі разові обсяги маси, які слід швидко закласти;
- складність вибірки під час згодювання.

Альтернативи: полімерна упаковка

Перспективною є заготівля пров'яленої маси з використанням полімерної тари. Розрізняють три основні варіанти (рисунки 1.4–1.6):

- пресування у рулони/тюки з індивідуальною обмоткою самоклеючою плівкою;
- пресування у рулони/тюки з подальшим пакуванням у полімерні «рукави» (чулки) довжиною до ~70 м;
- ущільнення подрібненої маси у полімерний мішок діаметром ~1,95...3,6 м і довжиною до ~70 м спеціалізованим прес-пакувальником.

Усі три способи повністю механізовані й мають технологічні та економічні переваги:

- слабка залежність від погоди;
- відсутність потреби у спеціальних сховищах - достатньо рівного майданчика;
- мінімальні втрати поживних речовин при зберіганні;
- вищу стабільність якості порівняно з традиційними підходами.

Водночас перші два варіанти мають обмеження: потрібні спеціальні агрегати, які у стислі строки (поки вологість 50...55%) формують рулони/тюки, доставляють

їх на майданчик і протягом 2...3 годин після пресування обгортають плівкою товщиною близько 0,025 мм (або пакують у рукав). Такі вимоги до логістики та вартість плівки знижують привабливість цих рішень.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд заготівлі рулонного сінажу в полімерному рукаві



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд заготівлі сінажу в рулонах з індивідуальною упаковкою



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд заготівлі сінажу в полімерному мішку

Найбільш технологічно простим є пакування подрібненої маси у полімерний мішок. Пров'ялену траву підбирають прямим комбайнуванням із одночасним подрібненням і транспортуванням до місця закладання. Прес-пакувальник подає масу в мішок із щільністю близько 250 кг/м^3 . Для цього потрібна лише одна спеціальна машина (замість трьох у попередніх варіантах), полімерний мішок можна використовувати багаторазово (на відміну від одноразової плівки), а час і трудомісткість закладання суттєво скорочуються.

1.1.2 Технічні засоби для консервування сінажу

Якісні та кількісні втрати сінажу виникають майже на всіх етапах заготівлі; сумарно вони можуть перевищувати 20...25% від закладеної маси. Частину втрат можна запобігти обробкою сінажної маси консервантами - для цього промисловість пропонує відповідні технології та машини.

Існує кілька базових схем внесення консервантів у кормову масу. Для кожної розроблено власні пристрої та технічні засоби, що мають свої переваги й недоліки:

Обприскування рослин на корені перед скошуванням.

Обробка зеленої маси консервантом під час скошування або підбирання з подрібненням.

Внесення консервантів під час транспортування рослинної маси.

Обробка консервантами безпосередньо перед закладанням на зберігання.

Внесення під час закладання у сховище (силосну яму, баштове сховище).

Обробка рослин на корені вважається найменш досконалою: відсутні спеціальні машини для рівномірної обробки травостою; значні втрати препарату через випаровування та попадання в ґрунт; неможливість роботи за вітряної чи дощової погоди; додаткові екологічні ризики.

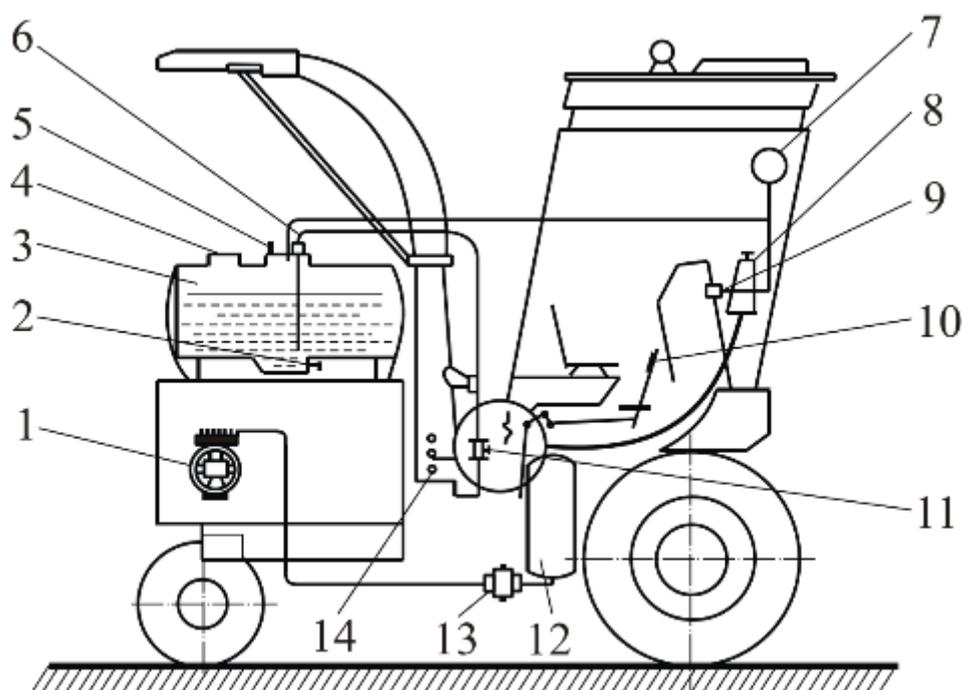


Рисунок 1.7 – Схема установки для обробки рідкими консервантами подрібнюваної рослинної маси на комбайні Е-280:

1 - компресор; 2 - зливний кран; 3 - ємність; 4 - заливна горловина; 5 - розвантажувальний клапан; 6 - трубопровід з консервантом; 7 - манометр; 8 - газовий редуктор; 9 - з'єднання; 10 - важіль; 11 - регулювальний вентиль; 12 - ресивер; 13 - кран; 14 - форсунка.

Внесення рідких консервантів під час скошування/підбирання (дозатори-аплікатори на кормозбиральних комбайнах) поширене в багатьох країнах. Приклади: фінські дозатори НР-7, НР-20; вітчизняні УВК-Ф-1, АВК-Ф-2 тощо. Недоліки: ускладнюються умови роботи механізатора, потрібні засоби індивідуального захисту при обслуговуванні; втрати рідкого консерванту через здування потоком повітря можуть перевищувати 50%.

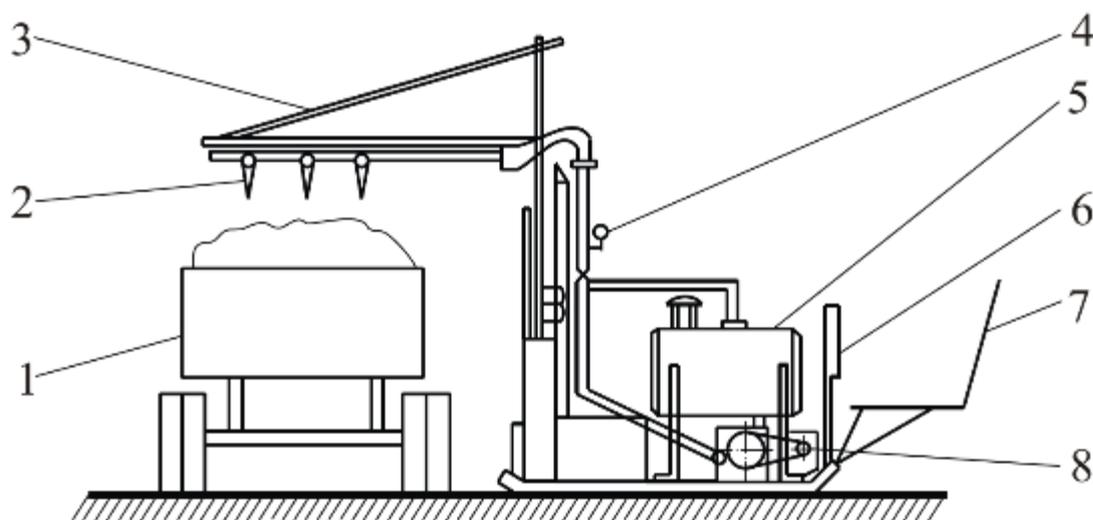


Рисунок 1.8 – Схема установки для обробки рідкими консервантами подрібненої кормової маси в кузові транспортного засобу:

1 - транспортний засіб; 2 - форсунки; 3 - рухома каретка; 4 - манометр; 5 - ємність із консервантом; 6 - пульт керування; 7 - місце оператора; 8 - насос.

Внесення на стаціонарних пунктах у кузові транспортного засобу дає змогу уникнути частини недоліків попередньої схеми. Існує багато варіантів установок за мобільністю: стаціонарні, стаціонарно-пересувні та мобільні. Схема дозволяє забезпечити контроль дозування й рівномірність внесення.

Внесення під час завантаження у сховище на стаціонарній лінії (агрегат-змішувач + вивантажувальний транспортер) концентрує техніку й персонал в одному місці та гарантує дозування, однак не є енергоощадною: вся маса від комбайнів додатково проходить через змішувально-транспортне обладнання, що збільшує енерговитрати й капітальні витрати (у т.ч. на під'їзні шляхи тощо).

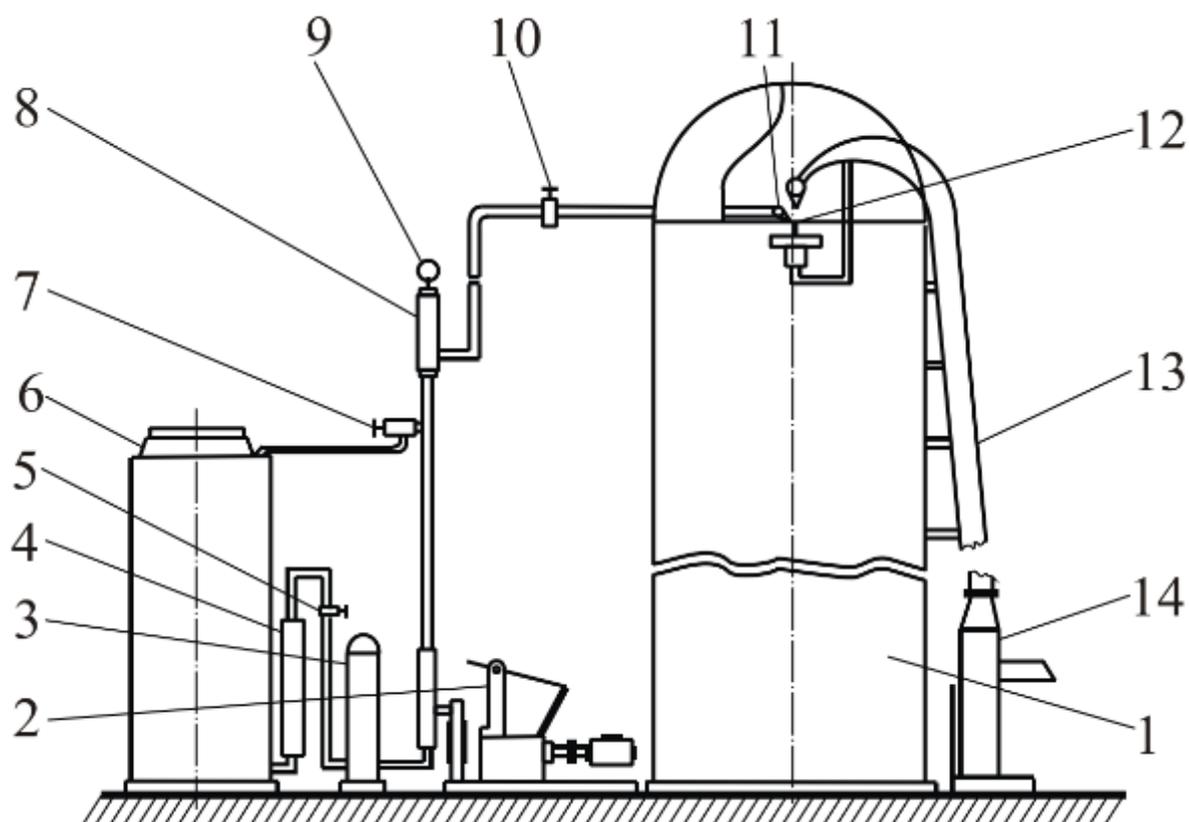


Рисунок 1.9 – Схема стаціонарної установки для обробки хімічними консервантами подрібнюваної рослинної маси під час завантаження її до сховища:

1 - башта; 2 - насос; 3 і 8 - компенсатори; 4 - ротаметр; 5, 7 і 10 - вентиля; 6 - ємність із консервантом; 9 - манометр; 11 - форсунка; 12 - розподільник; 13 і 14 - пневморозвантажувач.

Внесення безпосередньо у силососховище під час розрівнювання і трамбування уникає зайвих перевантажень маси та застосування енергоємних механізмів. Для цього використовують різні розбризкувальні пристрої, встановлені біля сховища або навішені на трактор, який ущільнює масу; також можливе застосування обладнання штангових обприскувачів. Підвищити рівномірність пошарового розподілу допомагає подальше перемішування шару грабельними розрівнювачами чи розпушувальними зубами.

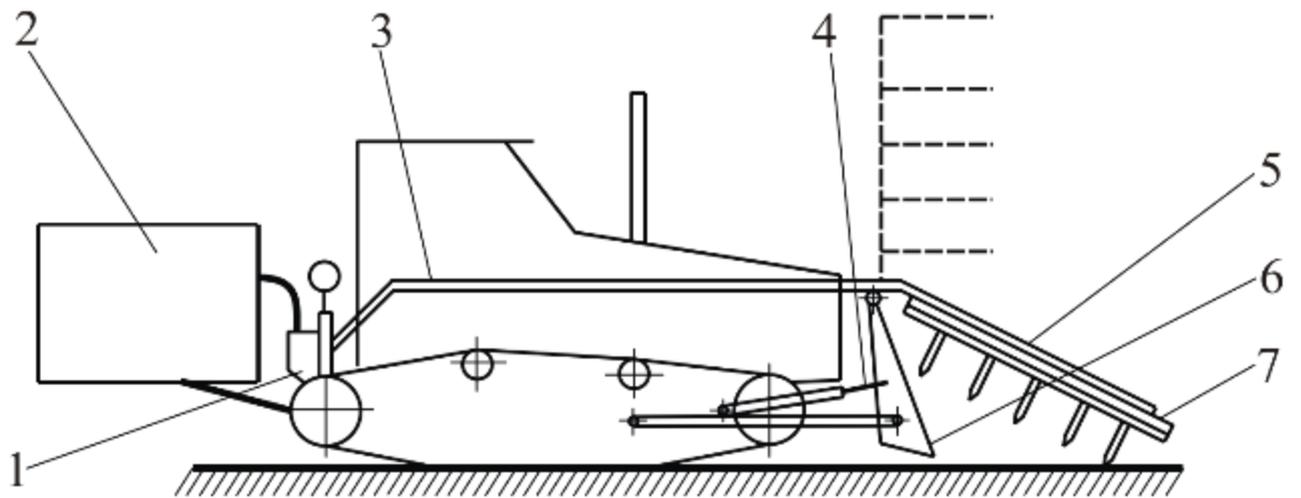


Рисунок 1.10 – Схема навісної установки до бульдозера для обробки хімічними консервантами кормової маси:

1 - насос; 2 - ємність із консервантом; 3 - напірний трубопровід; 4 - гідроциліндр підйому рамки; 5 - рамка; 6 - відвал бульдозера; 7 - форсунки.

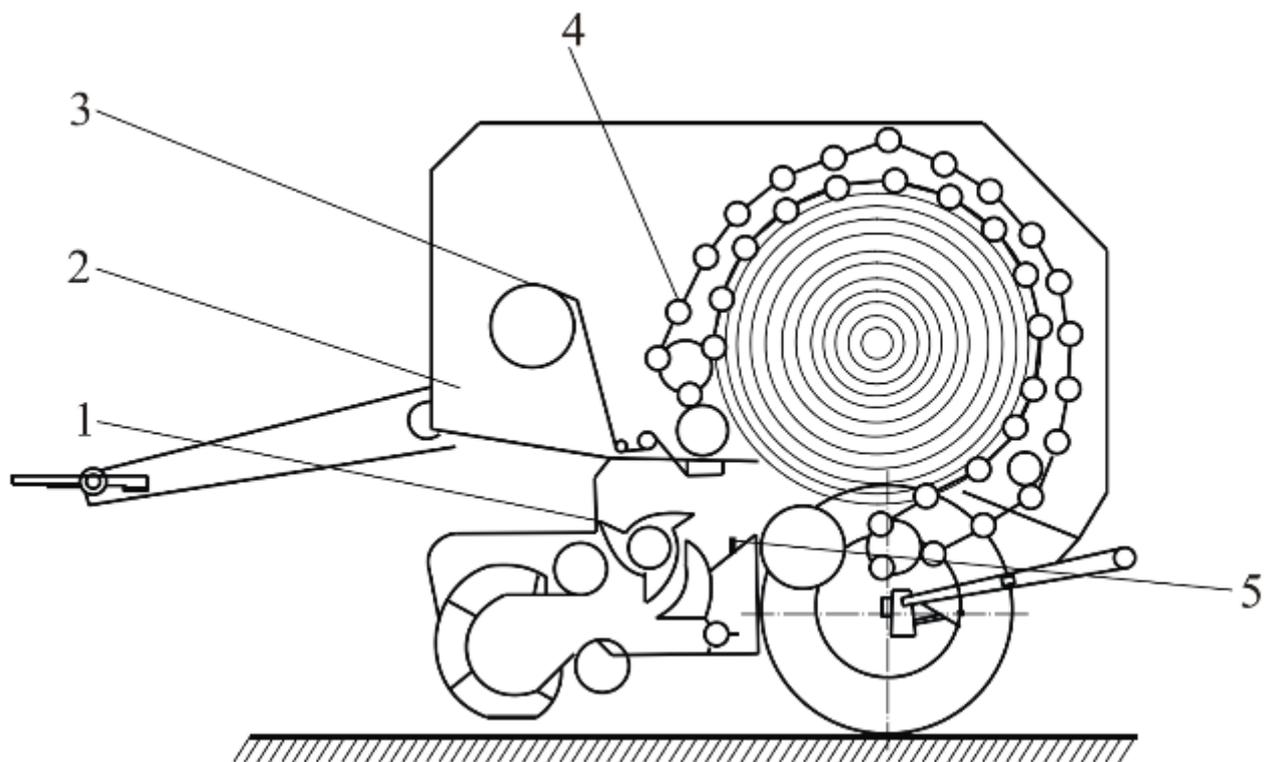


Рисунок 1.11 – Схема установки рулонного прес-підбирача для обробки хімічними консервантами кормової маси:

1 - ріжучий апарат; 2 - корпус; 3 - механізм натягу; 4 - механізм загортання; 5 - форсунки.

Для внесення консервантів під час формування рулонів широко застосовують насос-дозатор НВУ-6. Установка призначена для заготівлі сіна (за вологості до ~30%) із використанням пропіонової кислоти, а також сінажу - із застосуванням хімічних або біологічних препаратів з подальшою герметизацією поліетиленовою плівкою. Конструкція забезпечує відносно рівномірний розподіл консерванту по масі, але реагенти безпосередньо контактують із металевими вузлами прес-підбирача, що негативно впливає на довговічність агрегату.

1.2 Зоотехнічні вимоги до технології консервування сінажу

Згідно з визначенням стандарту ДСТУ 55452-2013, сінаж - це корм із трав із вологістю 40...60%, законсервований в анаеробних умовах. Якщо в силосі збереження досягається завдяки утворенню комплексу органічних кислот і зниженню рН, а в сіні - через недоступність води для мікроорганізмів, то в сінажі ці фактори поєднуються. Вологість близько 50% підвищує осмотичний тиск у клітинах, зменшуючи доступність води та розчинених поживних речовин для бактерій; паралельно інтенсивно накопичуються CO₂ і невеликі кількості органічних кислот.

Таблиця 1.1 – Втрати поживних речовин за видами заготовлюваних кормів

Вид корму	Загальні втрати від СР, %	У т.ч. незібрані/нез'їдені рештки, %
Зелена маса	10...15	5...10
Сіно	50	20...30
Силос	35...45	15...20
Сінаж	25...30	10...15
Сінаж у упаковці	3...9	3...5

Добре заготовлений і збережений сінаж має приємний запах і є високоякісним кормом, особливо для лактуючих корів. За рахунок кращої збереженості поживних речовин тварини отримують із сінажу більше обмінної

енергії, ніж із силосу чи сіна з тих самих культур. Сінаж може повністю замінювати силос у раціоні (покращується смак молока) і частково - сіно. Він також є джерелом каротину, важливого для регуляції фізіологічних і біохімічних процесів.

За поїданням: телятам від 2 міс. згодовують 2...4 кг/добу, від 6 міс. - 6...10 кг, після 12 міс. - 10...12 кг; доросла велика рогата худоба споживає 20...30 кг/добу.

Для підвищення якості та поживності сінажу трави збирають у ранні фази розвитку: бобові - у фазі бутонізації, злакові - на початку викидання волоті/колосіння. Важливо враховувати не лише вихід маси, а й вміст поживних речовин: зі старінням трав знижується частка протеїну, легкокорозчинних цукрів, жиру, фосфору, мікроелементів і вітамінів. У названі фази вміст сирого протеїну сягає 18...21% у бобових і до 18% у злакових.

Контроль вологості критичний:

- >55% - перебіг консервування за типом силосування; з несилосованих культур (люцерна, конюшина, еспарцет другого укосу з протеїном >20%) отримати якісний корм важко.
- <50% - зростають польові втрати й пружність маси, що ускладнює ущільнення при закладанні.

Особливо це важливо для бобових: їх важко силосувати, і вони зазнають значних механічних втрат (оббивання листків і суцвіть - найцінніших за поживністю частин).

Світова практика підтверджує доцільність пров'ялювання у валках: так менші втрати листків і дрібних пагонів, ніж у прокосах. Однорічні трави слід пров'ялювати лише у валках - це знижує забруднення ґрунтом.

Найважливіший прийом забезпечення якості - герметичність зберігання та швидке заповнення сховища. Потрапляння повітря активує бактерії, дріжджі, плісняву і спричиняє нагрівання. Температура близько 35 °С протягом кількох днів веде до реакцій зв'язування білків із вуглеводами (утворення «зв'язаного протеїну», що не перетравлюється). Якщо >12% загального протеїну у зв'язаній формі - це ознака надмірного зігрівання сінажу.

Показник	Силос	Сінаж	Сіно	Сінаж (рулон, інд. обмотка)	Сінаж (рулон, лінійна упаковка)
Втрати сухої речовини, %	40	30	50	5	5
ОЕ, МДж/кг СР	9,8	9,5	8,9	10,2	10,2
Прямі витрати, руб./га	7 995	5 525	4 467	9 497	6 822
Збір СР з урахуванням втрат, т/га	2,4	2,8	2,0	3,8	3,8
Вартість 1 т СР, грн./т	3 331	1 973	2 234	2 499	1 795
Вартість 1 МДж енергії, грн./МДж	0,34	0,21	0,25	0,25	0,18

Примітка: валютні показники наведено за вихідними даними; вони ілюструють відносні відмінності між технологіями.

За даними експериментів, сінаж швидше «дозріває» при 19...37 °С; висока температура (~60 °С) різко гальмує підкислення. За підвищених температур білки утворюють складні сполуки з вуглеводами (меланоїдини), що не засвоюються, тож поживність падає.

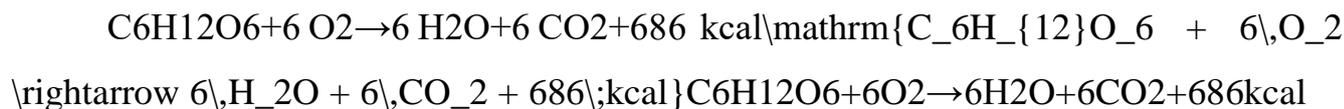
У раціонах: для дійних корів доцільно замінювати до 50% силосу сінажем; для молодняку й на відгодівлі оптимальний рівень може сягати ~75% сінажу. За даними виробничих випробувань, згодовування сінажу підвищує молочну продуктивність на ≈10...11%, знижує витрати поживних речовин на одиницю продукції на ≈3...9% і може підвищувати рентабельність виробництва молока до ≈37...39%.

Епіфітна мікрофлора, що погіршує якість, представлена переважно гнильною та маслянокислою мікрофлорою, групою кишкової палички, дріжджами та пліснявими грибами; частка молочнокислих бактерій спочатку невелика. Ґрунтові

мікроорганізми потрапляють через засмічення землею на етапах косіння, пров'ялювання, підбирання й ущільнення. Їх активність залежить від умов усередині маси. Процеси умовно ділять на три фази:

- 1) Аеробна фаза

За наявності O_2 швидко розмножується змішана мікрофлора. Живі клітини рослин та аеробні мікроорганізми споживають кисень і вуглеводи, виділяючи тепло, воду і CO_2 . Схема реакції дихання:



Запаси O_2 зазвичай вичерпуються за 4...5 год, CO_2 накопичується до ≈ 48 год. Температура маси може підніматися до $\approx 29...32$ °C протягом до 15 діб, після чого поступово знижується - створюються анаеробні умови.

- 2) Анаеробна фаза

Основне бродіння відбувається без доступу кисню з активним розвитком молочнокислих бактерій і підкисленням (рН $\approx 4,2...4,0$). Після повного використання кисню зростає чисельність анаеробних бактерій (кислотоутворювальних і протеолітичних); гнильна, маслянокисла та пліснява мікрофлора пригнічується, однак дріжджі можуть зберігати активність. За умови швидкої закладки, надійного ущільнення й укриття відбувається:

- ферментація легкозброджувальних вуглеводів із утворенням переважно молочної кислоти (та невеликих кількостей інших кислот/спирту за гомоферментативного типу);
- частковий розпад білків до амінокислот, амінів, амідів та аміаку;
- досягнення такої кислотності, за якої мікроорганізми гинуть і процес консервування завершується (цільовий вміст молочної кислоти 4...10% СР).

- 3) Стабільна фаза

Процеси стабілізуються за рН $\approx 4,2$ (для маси з вищою СР - за дещо вищого рН). На фінальному етапі молочнокислі бактерії поступово відмирають під дією власних метаболітів (органічних кислот). У «правильній» спонтанній ферментації гнильна й маслянокисла мікрофлора замінюється молочнокислою, яка знижує рН

до $\approx 4,2 \dots 4,0$ і блокує розвиток небажаних мікроорганізмів. Загальна тривалість фаз зазвичай 15...21 день (залежно від виду сировини).

Ключова мета заготівлі сінажу - швидко досягти стабільної фази. Тут важливу роль відіграють консерванти:

- хімічні (кислоти) пригнічують небажану мікрофлору;
- біологічні препарати стимулюють розвиток молочнокислих бактерій і накопичення молочної кислоти, що також зменшує активність гнильних/маслянокислих бактерій та плісняви.
- Про втрати під час заготівлі та зберігання

Дотримання кожного елементу технології прямо впливає на якість, поживність і масштаби втрат. Порухення умов заготівлі та зберігання спричиняє псування корму й великі втрати перетравних поживних речовин - до 45...50% від біологічної врожайності. До половини цих втрат формуються внаслідок біохімічних процесів у перші 3...4 тижні зберігання. Навіть за дотримання технології так званий «угар» становить $\approx 15-25\%$ (залежно від сировини). Використання консервантів/добавок дозволяє зменшити біохімічні втрати у 1,5...2 рази і зберегти $\approx 90-95\%$ поживних речовин від їх вмісту у вихідній масі.

1.3 Висновки

На підставі огляду технологій і технічних засобів консервування сінажу, зоотехнічних вимог до технології та аналізу застосовуваних консервантів, теоретичних праць і результатів патентного пошуку поставлено такі завдання:

1. Обґрунтувати конструктивно-технологічну схему пристрою для ін'єкції CO_2 ; змоделювати робочий орган (інжектор) і визначити його раціональні параметри.

2. Розрахувати об'єм газозаміщення всередині маси сінажу з урахуванням вологості та щільності пресування; встановити аналітичні залежності для вибору дози CO_2 .

3. Створити лабораторну установку та дослідний зразок інжектора; розробити програму багатофакторних експериментів.

4. Отримати регресійні моделі впливу керованих факторів (p , q , Q , V_0) на температуру саморозігріву, вміст протеїну та кормові одиниці; визначити оптимальні діапазони.

5. Виконати економічне порівняння базової технології (рідкий/біо консервант) і розробленої схеми (ін'єкція CO_2) на 1 т СМ і для сезонних обсягів; оцінити окупність.

6. Сформувати вимоги з охорони праці та безпеки при роботі з вузлом ін'єкції CO_2 ; розробити проєкт інструкції.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Наявні рішення внесення консервантів під час формування рулону (орієнтовані переважно на рідкі препарати) не придатні для газоподібних консервантів, для яких критичною є герметичність середовища, що оточує оброблювану масу.

З урахуванням поставлених завдань та аналізу джерел розроблено конструктивно-технологічну схему пристрою для обробки сінажу газоподібним консервантом (див. рисунок 2.1). Сутність рішення: цільнозварний балон з CO_2 із редуктором і витратоміром, з'єднаний гнучким рукавом із робочим елементом внесення (ін'єктором) у сінажну масу.

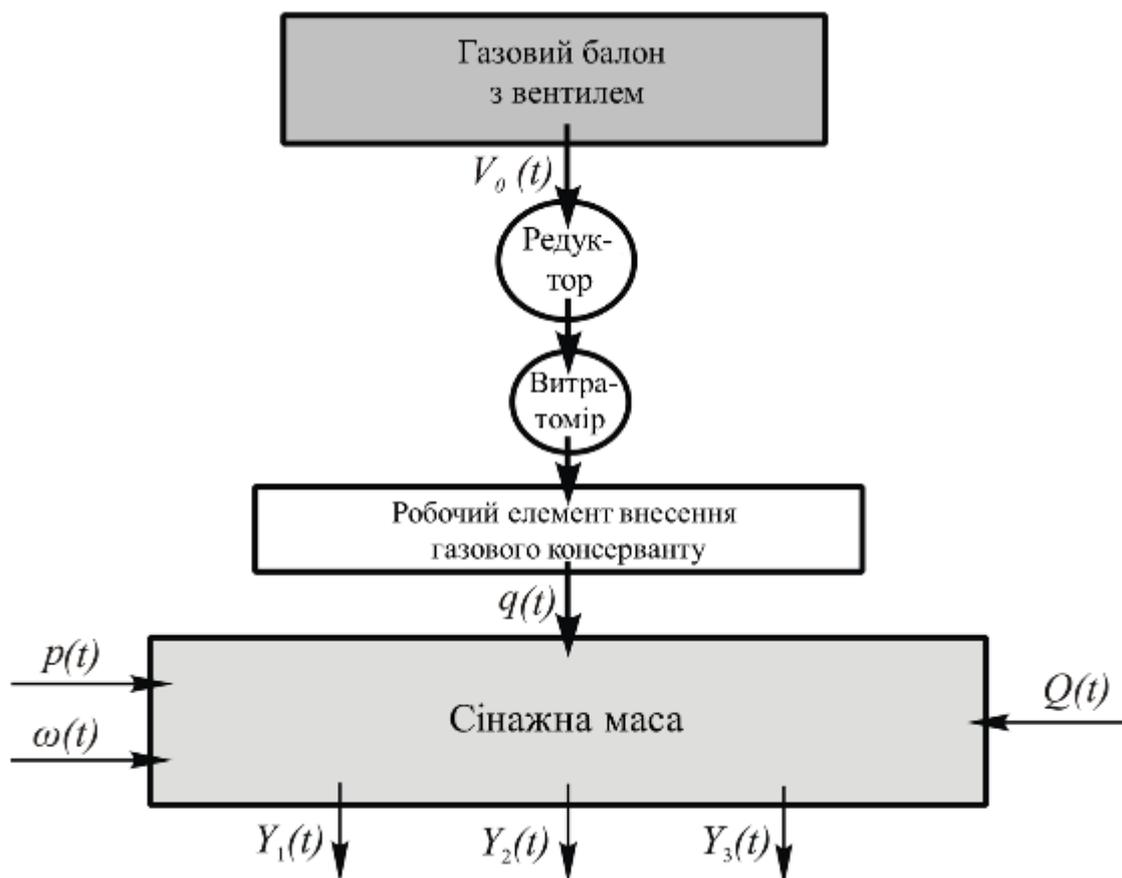


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологічна схема пристрою обробки сінажу газоподібним консервантом

Послідовність процесу:

1. ввести ін'єктор у товщу сінажної маси;
2. після повного занурення відкрити запірний клапан балона і подати CO_2 ;
3. після введення розрахункової дози закрити клапан і витягти голку ін'єктора;
4. рулон герметизувати полімерною плівкою.

Керувальні (вхідні) дії: витрата газу $V_0(t)$ та доза внесення $q(t)$, що визначають періодичність операції та забезпечують витіснення повітря з об'єму рулону.

Параметри процесу в масі сінажу: вологість $\omega(t)$, щільність пресування $p(t)$, локальний об'єм $Q(t)$ у зоні роботи одного ін'єктора.

Вихідні (контрольовані) показники якості:

$Y_1(t)$ - температура саморозігрівання;

$Y_2(t)$ - вміст сирого протеїну;

$Y_3(t)$ - вміст кормових одиниць.

Як простий робочий орган може застосовуватися штанга-наконечник із розпилювачем. Для повної механізації обґрунтовуються параметри ін'єктора пневмоциліндрного типу: пневмоциліндр, поршень із голкою, зворотна пружина.

Щоб визначити дозу $q(t)$, потрібно встановити загальний об'єм повітря, що підлягає заміщенню, як функцію $\omega(t)$ та $p(t)$, і аналітично описати швидкість масообміну $v(t)$ між CO_2 та наявним у порах повітрям.

2.2 Моделювання конструктивних параметрів робочого елемента

Технологія заготівлі рулонного сінажу з індивідуальною обмоткою формує окремі тюки масою $\approx 250 \dots 300$ кг, зручні для годівлі ВРХ. Запропоновано схему пристрою для обробки рулону CO_2 під час заготівлі з індивідуальною упаковкою (рисунок 2.2).

Алгоритм обробки рулону CO_2 :

1. Рулон 4, сформований за стандартною технологією, укладають завантажувачем на обмотувач 2;

2. Виконують обмотку полімерною плівкою 3 до покриття $\approx 85\dots 90\%$ поверхні; непокрита ділянка - зверху;
3. Ін'єктор 1 вводять у нижню частину зафіксованого рулону;
4. Після повного занурення голки подають CO_2 ;
5. Після внесення дози голку витягують і довиконують обмотку до повної герметизації.

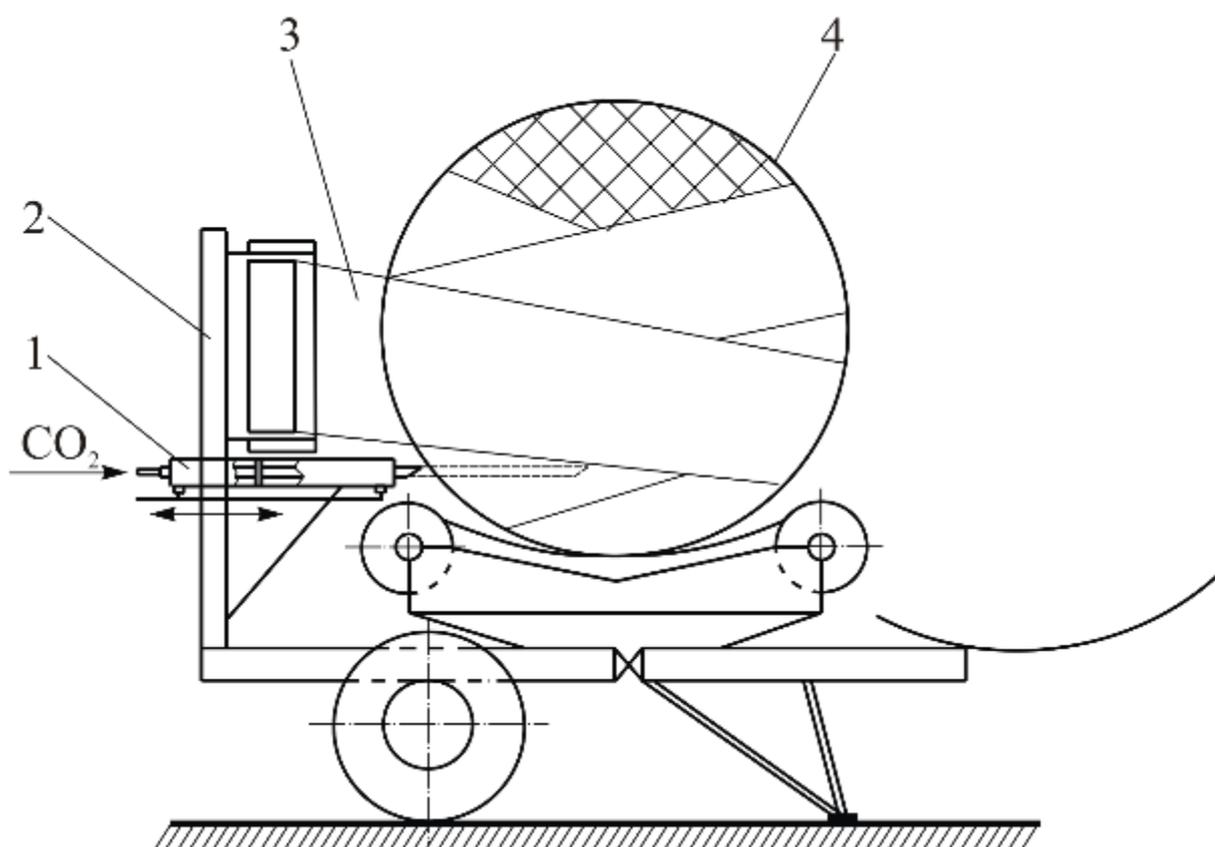


Рисунок 2.2 - Схема пристрою для обробки рулону сінажу CO_2 з індивідуальною упаковкою: 1 - ін'єктор; 2 - обмотувач рулонів; 3 - полімерна плівка; 4 - рулон сінажу.

Принцип дії ін'єктора: занурення голки в масу рулону відбувається за рахунок тиску CO_2 на поршень пневмоциліндра, який переміщує голку.

Для подальшого проєктування розглянуто відомий прототип ін'єктора для рідких консервантів (рисунок 2.3) - голка з отворами по гвинтовій лінії, поршень із зворотним клапаном, циліндр із гільзою та гвинтовим пазом. Виявлені недоліки прототипу щодо газового внесення:

- ручний режим введення голки;
- неможливість роботи з газовим консервантом;
- доза залежить від тертя ін'єктора об рослинну масу (низька точність);
- численні отвори на голці за високої щільності можуть випускати консервант у повітря через незаглиблені отвори.

Тому запропоновано механізований ін'єктор (рисунок 2.4), основні вузли: пневмоциліндр (1), поршень (2), голка (3), зворотна пружина (4), випускний отвір на голці (5), газопровід (6), вентиль (7).

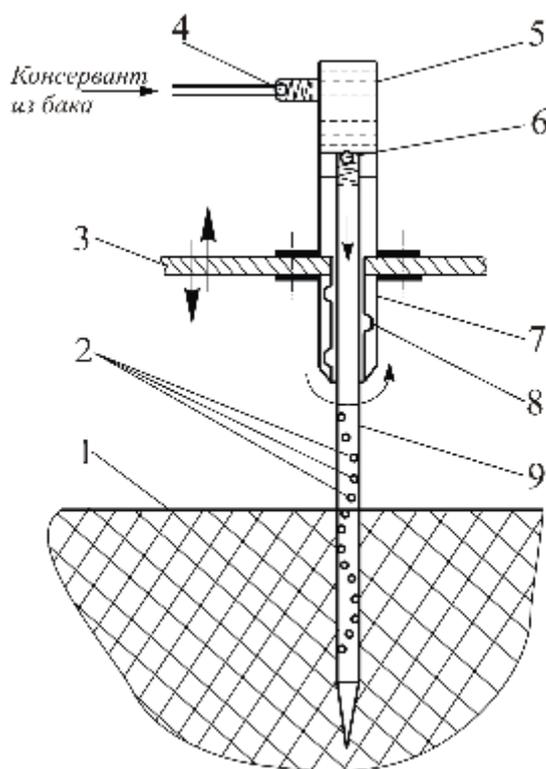


Рисунок 2.3 - Схема ін'єктора для обробки трав'яної маси рідкими консервантами: 1 - трав'яна маса; 2 - отвори-сопла; 3 - рама; 4, 6 - зворотні клапани; 5 - циліндр; 7 - гільза; 8 - гвинтовий паз; 9 - голка-поршень.

Ключові конструктивні параметри пневмоін'єктора:

- діаметр поршня пневмоциліндра - D ;
- діаметр штока поршня - d ;
- діаметр підвідного газового трубопроводу - F ;
- діаметр випускного сопла голки - f ;
- хід поршня - S .

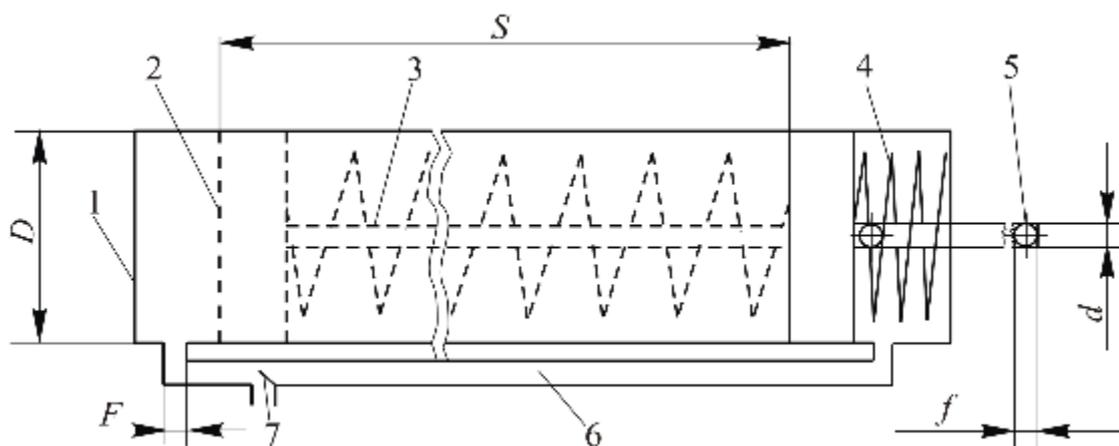


Рисунок 2.4 - Розрахункова схема ін'єктора для внесення CO₂ у сінаж: 1 - пневмоциліндр; 2 - поршень; 3 - голка; 4 - зворотна пружина; 5 - отвір на голці; 6 - газовий трубопровід; 7 - вентиль.

З огляду на середній радіус рулону $\approx 1,0$ м приймаємо хід поршня $S=0,5$ м, що забезпечує достатню глибину ін'єкції та покриття активної зони масообміну в товщі рулону.

2.3 Інжектор для внесення вуглекислого газу в сінажну масу

Інжектор для подачі CO₂ у сінаж можна трактувати як транспортувальний пневмоциліндр, який створює зусилля по всій довжині ходу поршня. Відповідно до рекомендацій, діаметр пневмоциліндра визначають через безрозмірний параметр навантаження χ :

$$\chi = \frac{P_H}{P_P} \quad (2.1)$$

де P_H - максимальне навантаження на привод пневмоциліндра інжектора; P_P - зусилля у поршневій порожнині пневмоциліндра інжектора, кН.

Для транспортувальних пневмоциліндрів оптимальним є інтервал $\chi = 0,4 \dots 0,5$. Перевищення цього діапазону збільшує час спрацювання, а менші

значення свідчать про неефективне використання циліндра. Далі приймаємо $\chi = 0,45$.

Визначимо P_H та P_P :

$$P_H = P_1 + P_3 \quad (2.2)$$

де P_1 - навантаження на шток пневмоциліндра під час подолання опору шару сінажу в рулоні, кН;

P_3 - сила з боку зворотної пружини наприкінці ходу поршня, кН.

Складова P_1 визначається опором ущільненого шару сінажу зануренню інжектора. Через структурну неоднорідність маси та поєднання локальних режимів різання й зминання точна модель є досить складною. Для наближеного розрахунку вважатимемо, що навантаження витрачається на зминання стебел. Тоді питомий опір зминанню C (Н/мм³) запишемо як:

$$C = \frac{P'}{k' F'} \quad (2.3)$$

де P' - сила зминання шару при вході голки інжектора, Н; k' - глибина зминання, мм;

F' - площа зминання, мм².

Для сінажу з вологістю 50...55% приймаємо $C = 1,8$ Н/мм³ (еквівалентно $1,8 \cdot 10^6$ кН/м³). Глибина зминання дорівнює ходу поршня $S = 0,5$ м. Площа зминання відповідає площі введення штока діаметром d . Отже, навантаження на шток P_1 дорівнює силі зминання P' .

Після підстановок із (2.2) отримаємо оцінку навантаження на шток:

$$P_1 = 0.7 \cdot 10^6 d^2 \quad (2.4)$$

Силу стиску пружини задаємо залежністю:

$$P_3 = \frac{c_p S}{3} \quad (2.5)$$

де c_p - жорсткість зворотної пружини штока пневмоциліндра, Н/м.

З урахуванням $S = 0,5$ м матимемо:

$$P_3 = 0.5 c_p \quad (2.6)$$

Підставивши (2.4) та (2.6) у (2.2), отримаємо:

$$P_H = 0.7 \cdot 10^6 d^2 + 0.5 c_p \quad (2.7)$$

Максимальне навантаження на приводі оцінюють так:

$$P_H = \frac{\pi}{4} D^2 (\rho_m - k_{tr}) \quad (2.8)$$

де k_{tr} - коефіцієнт тертя ущільнювальних манжет пневмоциліндра;

ρ_m - мінімальний абсолютний тиск у магістралі.

За магістрального тиску 0,5 (за вихідними припущеннями) та $k_{tr} = 0,2$ отримуємо:

$$P_H = 0.048 \cdot 10^6 D^2 \quad (2.9)$$

Підставляючи (2.7) та (2.9) у (2.1), маємо залежність:

$$\chi = \frac{0.048 \cdot 10^6 D^2}{0.7 \cdot 10^6 d^2 + 0.5 c_p} \quad (2.10)$$

З технологічних міркувань хід поршня S обмежують 8...10 діаметрами поршня D . Оскільки $S = 0,5$ м, діаметр доцільно прийняти $D = 0,05...0,06$ м; у розрахунках використовуємо $D = 0,05$ м.

За обраного D підбираємо зворотну пружину штока за ГОСТ 13766-86: діаметр дроту 0,004 м, діаметр пружини 0,048 м, жорсткість $c_p = 29,48$ кН/м.

Підставивши відомі величини до (2.10), отримаємо розрахунковий діаметр штока: $d = 0,007$ м.

Діаметр підвідного газового трубопроводу приймаємо $F = 0,1D$ для досягнення максимальної швидкості поршня: $F = 0,005$ м.

Щоб забезпечити однакові швидкості в обох напрямках, діаметр випускного сопла на голці приймаємо рівним F : $f = 0,005$ м.

Підсумок: для інжектора CO_2 прийнято $D = 50$ мм; $d = 7$ мм; $F = 5$ мм; $f = 5$ мм.

2.4 Визначення об'єму газозаміщення всередині сінажної маси

Рослинна сировина, упакована в полімерну плівку, піддається впливу низки внутрішніх і зовнішніх чинників, від яких залежить перебіг процесів консервування та збереження поживної цінності корму. Ці чинники умовно поділяють за ступенем важливості (первинні та вторинні), тривалістю дії (короткочасні - 2...5 діб після закладання та довготривалі - протягом усього періоду зберігання), а також за можливістю регулювання (регульовані й нерегульовані).

До основних належать час перебування скошеної маси під впливом зовнішнього середовища до моменту герметизації, вологість ω , густина пресування p і тривалість аеробної фази. У цей період мікроорганізми споживають кисень і вуглеводи, що містяться в масі. Коли кисень вичерпується, процес переходить в анаеробну фазу. Для якісного видалення повітря потрібно знати його об'єм у сінажній масі.

Для розрахунку кількості вуглекислого газу, необхідного для заміщення повітря, використовують залежності, наведені у працях А.А. Зубриліна та І.Я. Автомонова. Масова частка повітря в ущільненій рослинній масі визначається за формулою:

$$F_{\text{пов}} = 1 - F_{\text{реч}} - F_{\text{вод}} \quad (2.11)$$

де $F_{\text{пов}}$ - масова частка повітря в одиниці об'єму сінажу; $F_{\text{реч}}$ - масова частка речовини;

$F_{\text{вод}}$ - масова частка води.

$$F_{\text{вод}} = \frac{\omega \rho}{100} \quad (2.12)$$

де ω - вологість маси, %; ρ - її густина, т/м³; 100 - коефіцієнт переводу.

$$F_{\text{реч}} = \frac{\rho_{\text{с.в}}}{\rho_{\text{т.ф}}} \quad (2.13)$$

де $\rho_{\text{с.в}}$ - густина сухої речовини сінажу, т/м³;

$\rho_{\text{т.ф}}$ - густина частинок корму (1,55 т/м³ за целюлозою).

$$\rho_{\text{с.в}} = \frac{\rho_{\text{т.ф}}}{1 + \omega/100} \quad (2.14)$$

$$F_{\text{реч}} = \frac{\rho_{\text{т.ф}}}{\rho(1 + \omega/100)} \quad (2.15)$$

Підставивши (2.14) у (2.13), отримуємо залежність (2.15).

$$F_{\text{пов}} = 1 - \frac{\omega \rho}{100} - \frac{\rho_{\text{т.ф}}}{\rho \left(1 + \frac{\omega}{100}\right)} \quad (2.16)$$

Розрахунки за формулою (2.16) свідчать, що зі збільшенням густини пресування ρ коефіцієнт $F_{\text{пов}}$ зменшується лінійно для будь-якого рівня вологості ω (рис. 2.5).

Використовуючи коефіцієнт $F_{\text{пов}}$, за відомих ω та ρ можна знайти об'єм повітря у пресованій масі:

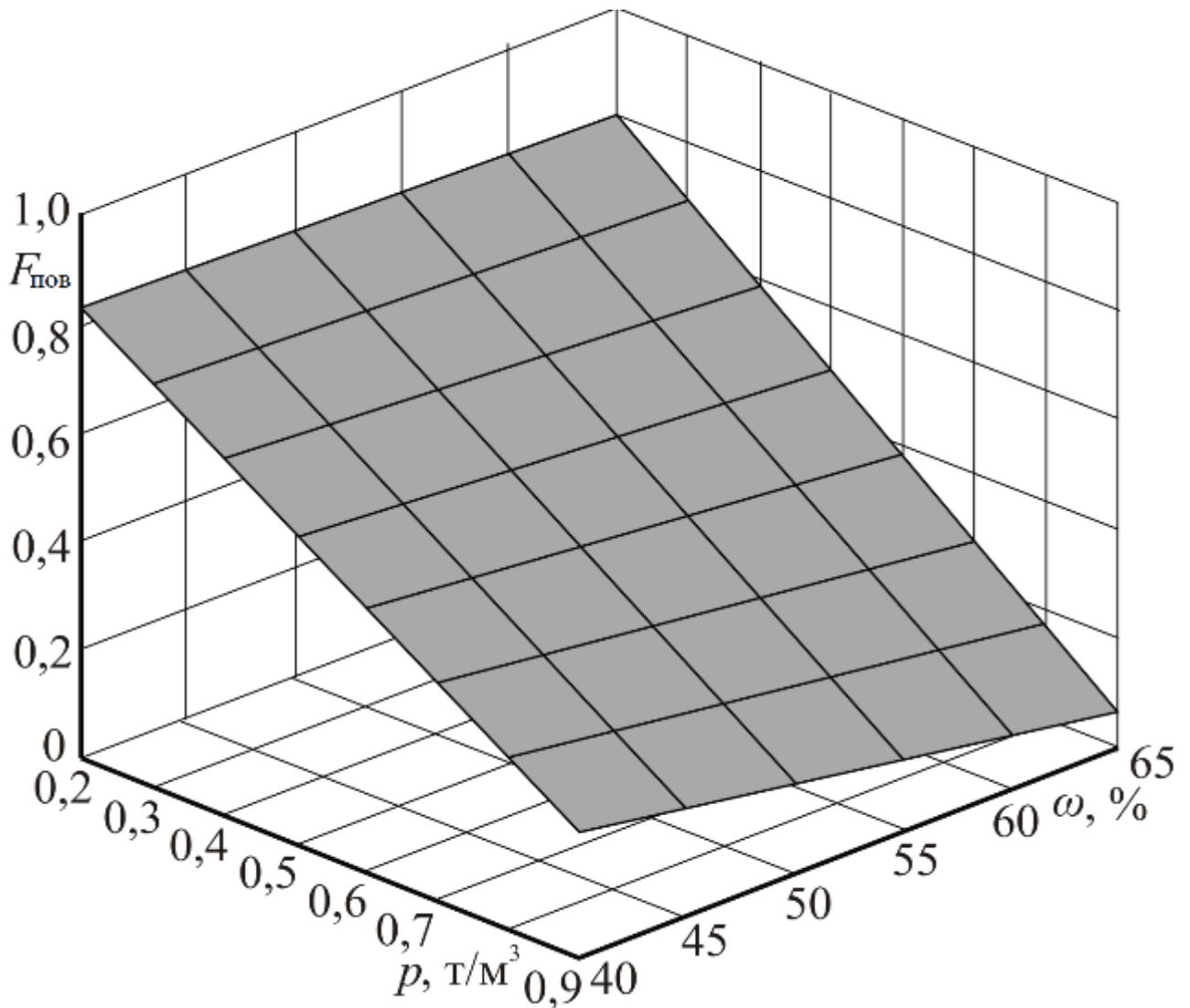


Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнта $F_{\text{пов}}$, що характеризує вміст повітря в сінажі, від вологості ω та густини ρ пресування

$$V_{\text{пов}} = F_{\text{пов}} S h \quad (2.17)$$

де S - площа шару, м^2 ; h - його висота, м .

$$V_{\text{пов}} = F_{\text{пов}} V_{\text{рул}} \quad (2.18)$$

де $V_{\text{рул}}$ - об'єм рулона сінажу, м^3 .

$$q = \frac{F_{\text{пов}} V_{\text{рул}}}{m_{\text{рул}}} \quad (2.19)$$

Дозу q поданого консервувального газу визначаємо як відношення об'єму повітря всередині рулона до його маси.

$$q = \frac{F_{\text{пов}}}{\rho} \quad (2.20)$$

Отже, дозу q внесення газового консерванта в сінаж можна визначити, знаючи густину пресування ρ та коефіцієнт вмісту повітря $F_{\text{пов}}$. Розрахунки показують, що зі збільшенням густини пресування доза q зменшується за квадратичною залежністю при будь-якій вологості ω (рис. 2.6).

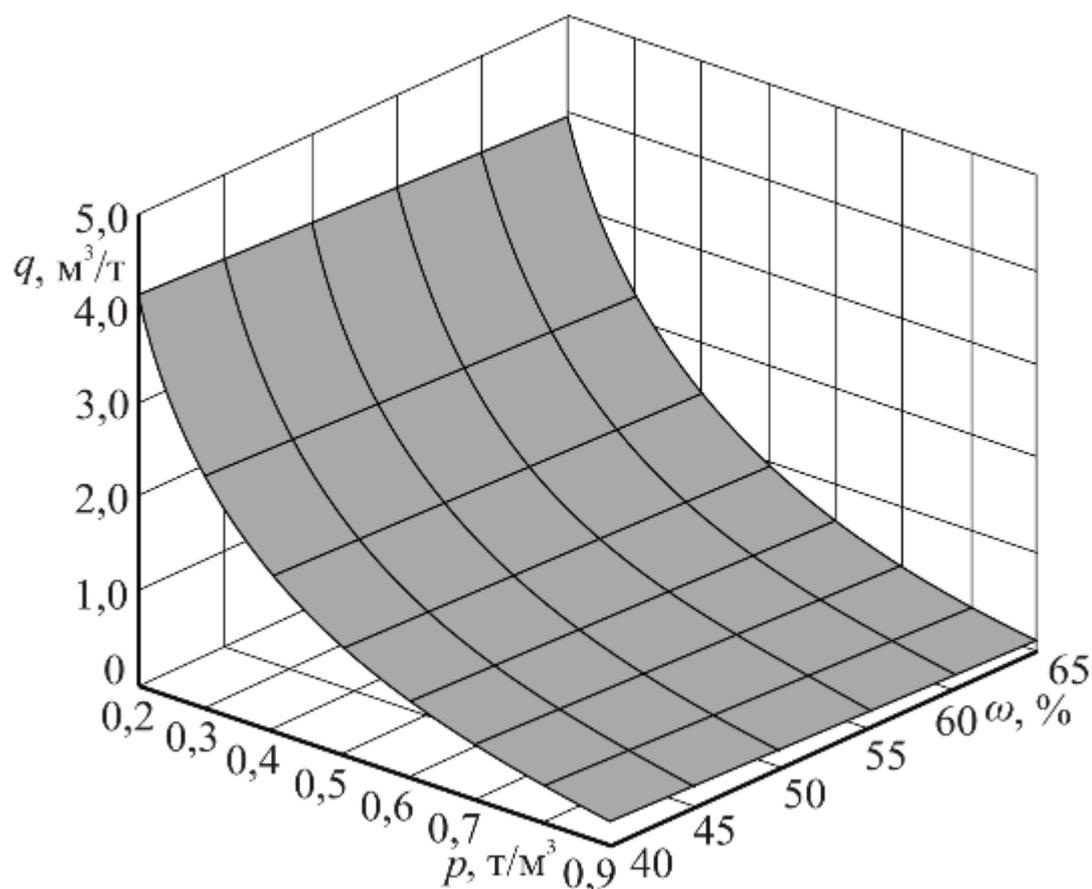


Рисунок 2.6 – Залежність дози q внесення консерванта від густини ρ пресування та вологості ω рослинної сировини

2.5 Висновки

У результаті проведених теоретичних досліджень щодо застосування вуглекислого газу як консерванта під час заготівлі сінажу отримано такі висновки:

1. Обґрунтовано конструкційно-технологічну схему та робочий процес пристрою для обробки сінажної маси газоподібним консервантом. Пристрій складається з цільнолитого балона з вуглекислим газом, обладнаного редуктором із витратоміром і з'єднаного гнучким шлангом із робочим елементом внесення консерванта (інжектором) у сінажну масу.

2. Запропоновано технічний засіб, який забезпечує механізацію процесу обробки сінажної маси вуглекислим газом під час заготівлі в рулони. Теоретично обґрунтовано основні конструктивні параметри інжектора для подавання CO_2 у сінажну масу.

3. Отримано залежності коефіцієнта $F_{\text{пов}}$, що характеризує вміст повітря в сінажі за різної вологості та густини пресування. На основі цих параметрів (табл. 2.1) можна розрахувати теоретичну дозу консервувального газу, необхідну для забезпечення ефективного зберігання корму.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Під час проведення експериментальних досліджень передбачалося вивчення основних параметрів і режимів роботи пристрою для обробки сінажу вуглекислим газом як консервантом.

До завдань експериментальних досліджень входило:

порівняльне вивчення впливу різних інгібіторів на збереження поживної цінності сінажу;

лабораторне дослідження зміни температури саморозігрівання трав'яної маси, рівня рН і вмісту органічних кислот у кормі;

визначення якісних показників сінажу, приготованого в лабораторних умовах із використанням вуглекислого газу як консерванта;

вибір оптимальних параметрів обробки трав'яної маси вуглекислим газом під час заготівлі сінажу.

Для реалізації цих завдань були розроблені лабораторна установка та дослідний зразок пристрою для обробки сінажу вуглекислим газом, а також методики вибору інгібуючої речовини, режимів і параметрів обробки сінажу в лабораторних і польових умовах.

3.2 Лабораторна установка для обробки сінажу вуглекислим газом

Експериментальні дослідження з визначення оптимальних параметрів заготівлі сінажу з використанням вуглекислого газу проводили на спеціально зібраній лабораторній установці, схема та загальний вигляд якої подані на рисунках 3.1 і 3.2.

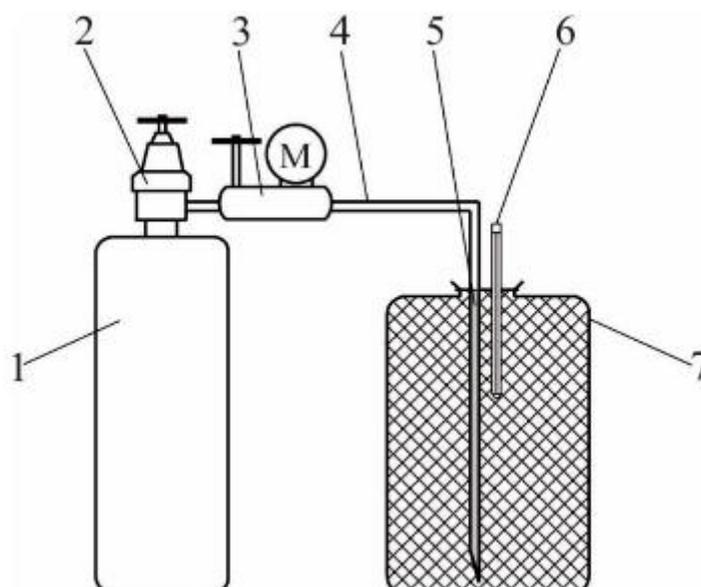


Рисунок 3.1 – Схема лабораторної установки для обробки сінажу вуглекислим газом: 1 – газовий балон; 2 – запірний вентиль; 3 – редуктор; 4 – гнучкий шланг; 5 – штанга з розпилювачем; 6 – термометр; 7 – трав'яна маса в герметичній упаковці.



а



б



в

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лабораторної установки для обробки сінажу вуглекислим газом: а – газовий балон; б – редуктор із манометром-витратоміром; в – штанга з розпилювачем.

Лабораторна установка містить цільнолитий балон, заповнений вуглекислим газом. На горловині балона встановлено запірний вентиль і редуктор із витратоміром, до якого приєднано гнучкий шланг внутрішнім діаметром 6 мм. Штанга з розпилювачем із нержавіючої сталі занурюється в середину ущільненої трав'яної маси, розміщеної у герметичному плівковому мішку. Після подачі консерванта встановлюють термометр і герметизують упаковку.

3.3 Дослідний зразок пристрою для обробки сінажу вуглекислим газом

Для механізації процесу обробки рулонів сінажу вуглекислим газом створено дослідний зразок пристрою, який складається з цільнолитого балона та інжектора.

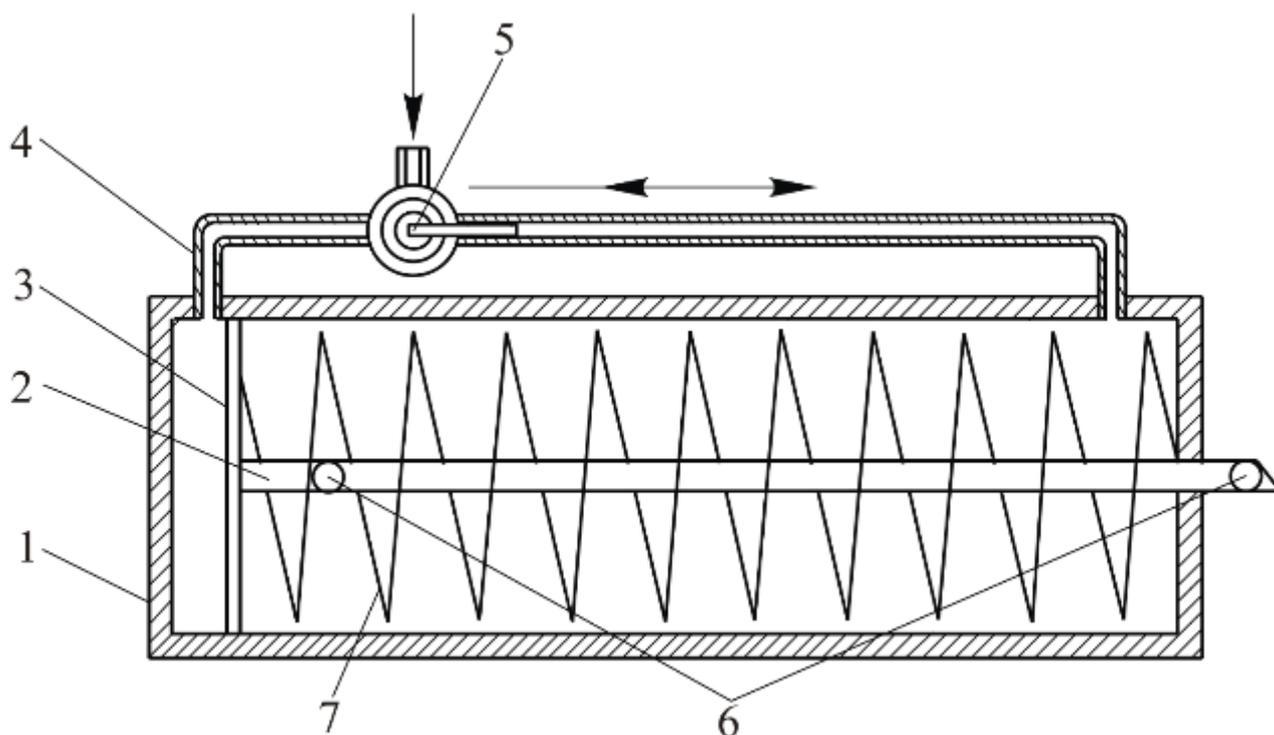


Рисунок 3.3 – Принципова схема інжектора для обробки сінажу вуглекислим газом: 1 – пневмоциліндр; 2 – голка-інжектор; 3 – поршень; 4 – газопровід; 5 – вентиль; 6 – отвори на голці інжектора; 7 – зворотна пружина.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд інжектора для обробки сінажу вуглекислим газом при заготівлі в рулонах.

Інжектор складається з пневмоциліндра, поршня, порожнистої голки, що виконує функцію штока, газового трубопроводу, вентиля та пружини зворотного ходу. На робочій поверхні голки виконані отвори для рівномірного виходу газу.

У пневмоциліндр постійно подається CO_2 зі стандартного балона через регулювальний вентиль. Під тиском газу поршень переміщується, стискаючи зворотну пружину, і просуває голку інжектора в сінажну масу. Після досягнення необхідного ходу подача газу в циліндр перекривається, і газ перетікає через з'єднувальний трубопровід у штокову порожнину, виходячи через отвори голки в товщу рулона. Після зниження тиску відбувається розпрямлення пружини й автоматичне повернення голки у вихідне положення.

3.4 Результати експериментальних досліджень впливу обробки сінажу вуглекислим газом на поживний склад

Для всебічного вивчення процесів, що відбуваються у сінажній масі під дією вуглекислого газу, було проведено багатофакторні експериментальні дослідження за методом плану Бокса-Бенкіна (2^4). У якості критеріїв оптимізації (функцій відгуку) було прийнято температуру Y_1 ($^{\circ}\text{C}$) саморозігріву сінажу, вміст Y_2 (%)

сирого протеїну та вміст Y_3 (од./кг) кормових одиниць.

До складу змінних факторів увійшли:

x_1 – густина ρ пресування сінажної маси, кг/м³;

x_2 – доза q поданого консерванта при атмосферному тиску, м³/кг;

x_3 – об'єм Q сінажної маси у зоні дії одного розпилювача, м³;

x_4 – витрата V_0 вуглекислого газу під час обробки, м³/год.

Межі та інтервали варіювання зазначених факторів визначалися на підставі попередніх однофакторних випробувань і теоретичних розрахунків. Їх кодування, рівні та інтервали подано у таблиці 3.1.

Код фактора	Назва фактора та одиниця вимірювання	Нижній рівень (-1)	Основний рівень (0)	Верхній рівень (+1)
x_1	Густина ρ пресування сінажної маси, кг/м ³	250	300	350
x_2	Доза q внесення консерванта, м ³ /кг	0,30	0,45	0,60
x_3	Об'єм Q сінажної маси в зоні одного розпилювача, м ³	0,048	0,096	0,144
x_4	Витрата V_0 газу, м ³ /год	0,3	0,5	0,7

Отримано такі адекватні моделі регресії впливу досліджуваних факторів на функції відгуку:

$$Y_1 = 27,75 - 5,41x_1 - 2,00x_2 + 1,00x_3 + 0,58x_4 + 1,21x_2^2 - 1,15x_3^2 \quad (3.1)$$

$$Y_2 = 10,98 + 1,54x_1 + 1,13x_2 - 0,61x_3 - 0,57x_4 + 0,25x_1^2 \quad (3.2)$$

$$Y_3 = 0,79 + 0,14x_1 + 0,13x_2 - 0,03x_3 - 0,12x_4 - 0,07x_3^2 + 0,13x_4^2 \quad (3.3)$$

Для рівняння (3.1) скоригований коефіцієнт множинної детермінації R_s^2 (R -squared, adjusted for d.f.) становить 78,9 %, тобто 78,9 % варіації функції $Y_1 = f(p, q, Q, V_0)$ пояснюється змінами змінних p , q , Q і V_0 . Стандартна помилка оцінки (Standard Error of Est.) дорівнює 1,919. Середня абсолютна помилка (Mean absolute error) становить 1,086. Показник Durbin–Watson statistic дорівнює 2,347 ($1,5 < DW < 2,5$), залишкова автокореляція (Lag 1 residual autocorrelation) 0,178 - отже, автокореляція відсутня, модель прийнятної якості.

Для рівняння (3.2) $R_s^2 = 86,7$ %, Standard Error of Est. = 0,550, Mean absolute error = 0,345. Durbin–Watson statistic = 2,343, залишкова автокореляція 0,196, що свідчить про достатню якість моделі та відсутність автокореляції.

Для рівняння (4.7) $R_s^2 = 87,0$ %, Standard Error of Est. = 0,069, Mean absolute error = 0,047. Durbin–Watson statistic = 2,343 (у межах 1,5–2,5), залишкова автокореляція 0,215 - модель якісна та статистично прийнятна.

Вивчення рівнянь регресії (3.3) і двовимірних перерізів поверхонь відгуку (рисунок 3.5) дозволило встановити такі закономірності впливу на температуру Y_1 (°C) саморозігріву трав'яної маси:

- Густина p пресування істотно впливає на температуру Y_1 (рисунок 4.6а). За $p = 290 \dots 310$ кг/м³ і мінімальній дозі консерванта температура не перевищувала 31 °C. Збільшення p понад 350 кг/м³ дозволяє відмовитися від консервантів, хоча така щільність не завжди досяжна сучасними засобами механізації.

- Внесення CO₂ з дозою $q = 0,39$ м³/кг (рисунок 3.5, б) утримувало температуру Y_1 на рівні 35 °C за мінімальної густини $p = 250$ кг/м³.

- Підвищення дози q до 0,49...0,59 м³/кг за $p = 270 \dots 310$ кг/м³ забезпечувало дозрівання сінажу без саморозігріву (20...30 °C). Це свідчить про ефективне пригнічення процесів бродіння.

- Різниця температури Y_1 між варіантом з максимальною дозою q за мінімальної p (0,60 м³/кг; 250 кг/м³) і мінімальною дозою q за максимальною p (0,30 м³/кг; 350 кг/м³) становила 7 °C (29 і 22 °C відповідно).

- Збільшення об'єму Q у три рази за незмінної точки введення консерванта підвищувало температуру Y_1 лише на 2 °C (рисунок 3.5, с), що вказує на достатню швидкість дифузії газу всередині маси.

- Підвищення витрати V_0 з 0,3 до 0,7 м³/год збільшувало температуру Y_1 на 2 °С через порушення рівномірності розподілу CO₂ та наявність невитісненого кисню.

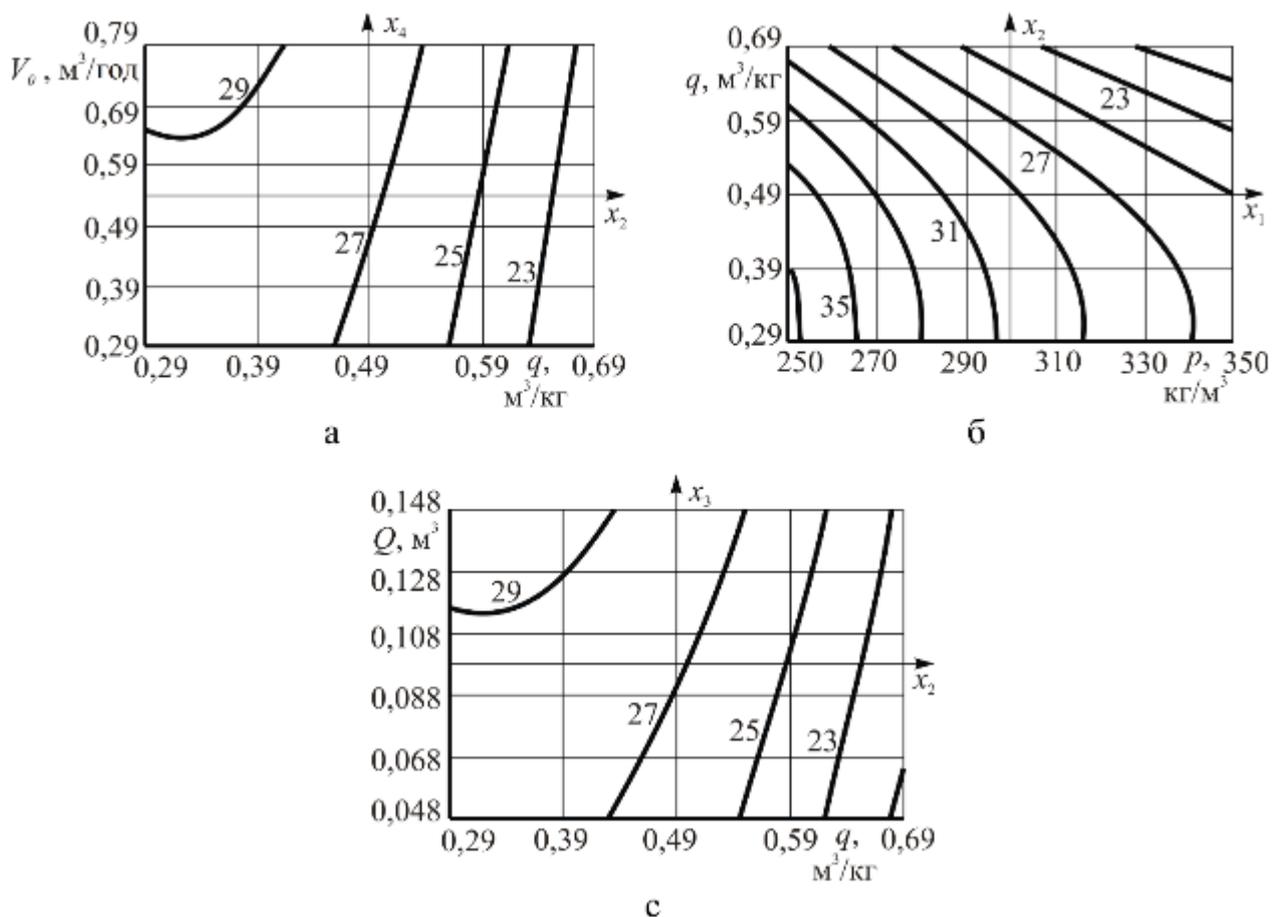


Рисунок 3.5 – Двовимірні перерізи поверхні відгуку, що характеризують температуру Y_1 (°С) саморозігріву сінажу: а – при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $Q(x_3) = 0,096$ м³; б – при $Q(x_3) = 0,096$ м³; $V_0(x_4) = 0,5$ м³/год; в – при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $V_0(x_4) = 0,5$ м³/год.

Вивчення моделі регресії (3.2) і двовимірних перерізів поверхонь відгуку (рисунок 3.6) дозволило встановити закономірності впливу факторів на вміст Y_2 (%) протеїну у готовому сінажі:

- Спостерігається лінійна залежність між факторами: вміст Y_2 прямо пропорційний густині p та дозі q , і обернено пропорційний витраті V_0 та об'єму Q .

- Збільшення дози q на 0,10 м³/кг у середньому зберігало додатково 1,2 % протеїну.

- Найінтенсивніший позитивний ефект дози q спостерігався в інтервалі $0,39 \dots 0,59 \text{ м}^3/\text{кг}$ за $p = 270 \dots 310 \text{ кг}/\text{м}^3$.

- За $p = 250 \dots 310 \text{ кг}/\text{м}^3$ вміст Y_2 підвищувався від $7,8 \%$ до $9,7 \%$; за $p = 310 \dots 350 \text{ кг}/\text{м}^3$ вміст Y_2 становив $9,7 \dots 10,9 \%$.

- Зростання об'єму Q , що обробляється однією форсункою, на $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ зменшувало вміст Y_2 на $0,3 \%$, а зниження витрати V_0 на $0,05 \text{ м}^3/\text{год}$ підвищувало Y_2 на $0,3 \%$.

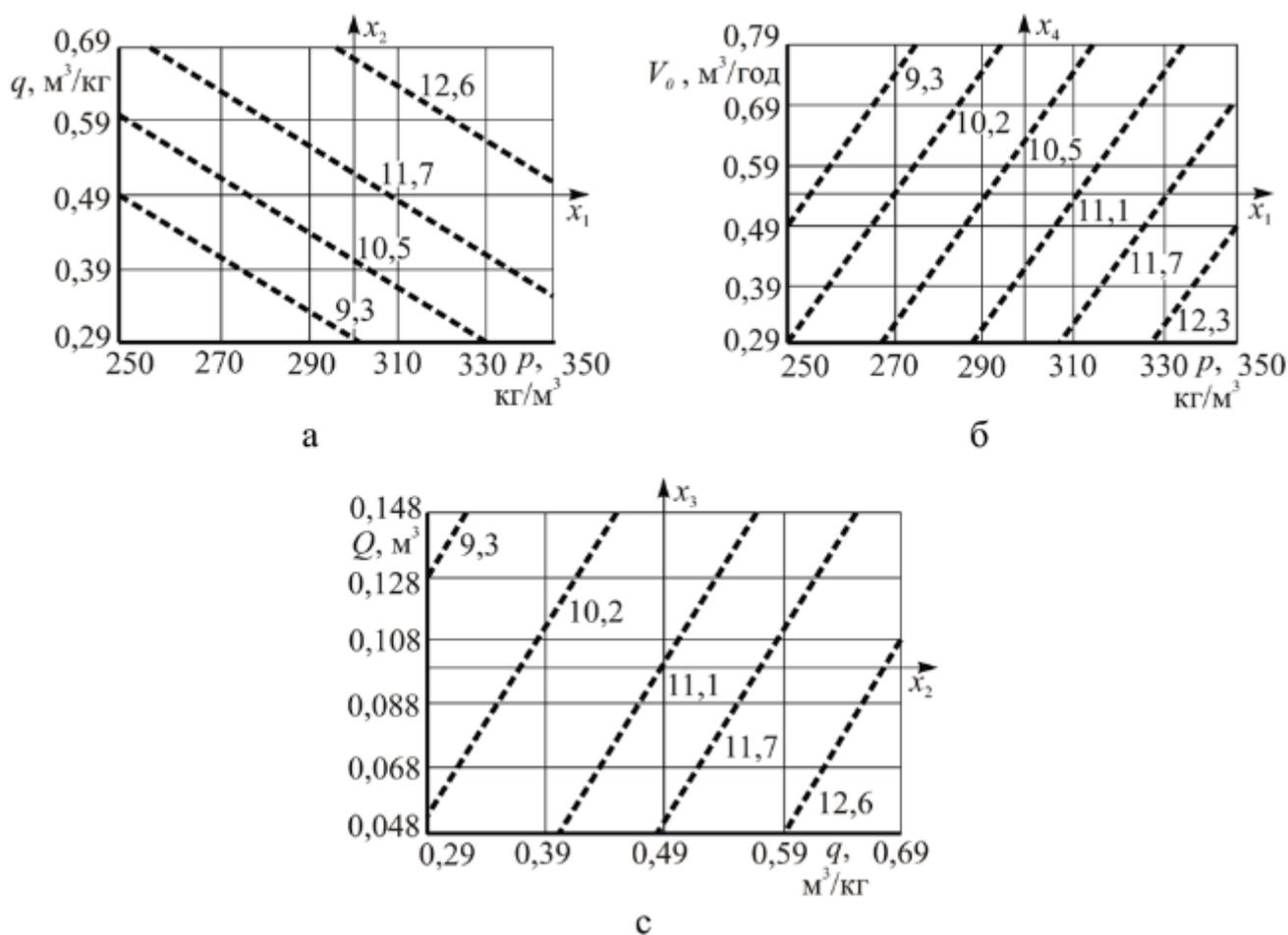


Рисунок 3.6 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вміст Y_2 (%) протеїну в сінажі: а – при $Q(x_3) = 0,096 \text{ м}^3$; $V_0(x_4) = 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$; б – при $p(x_1) = 300 \text{ кг}/\text{м}^3$; $Q(x_3) = 0,096 \text{ м}^3$; в – при $p(x_1) = 300 \text{ кг}/\text{м}^3$; $V_0(x_4) = 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Вивчення моделі регресії (3.3) і двовимірних перерізів поверхонь відгуку (рисунок 3.7) дозволило встановити закономірності впливу на вміст Y_3 (од./кг) кормових одиниць у готовому сінажі:

- Вплив об'єму Q , що обробляється однією форсункою, був незначним. Наприклад, зниження об'єму V_0 поданого газу з $0,128 \text{ м}^3$ до $0,068 \text{ м}^3$ за $q = 0,59 \text{ м}^3/\text{кг}$ збільшувало Y_3 лише на $0,04 \text{ од./кг}$; аналогічно при зміні з $0,148$ до $0,088 \text{ м}^3$.

- Підвищення густини p пресування на 20 кг/м^3 за незмінних інших факторів у середньому збільшувало Y_3 на $0,07 \text{ од./кг}$.

- Збільшення дози q з $0,29$ до $0,49 \text{ м}^3/\text{кг}$ забезпечувало приріст Y_3 на $0,24 \text{ од./кг}$; подальше зростання q мало несуттєвий додатковий ефект.

- Оптимальна доза q внесення CO_2 становила $0,39 \dots 0,59 \text{ м}^3/\text{кг}$, за якої досягався максимальний вміст Y_3 у масі.

- За $q = 0,59 \text{ м}^3/\text{кг}$ у точці введення газу досягався максимум Y_3 ; збільшення Q на $0,060 \text{ м}^3$ спричиняло поступове зниження Y_3 на $0,04 \text{ од./кг}$.

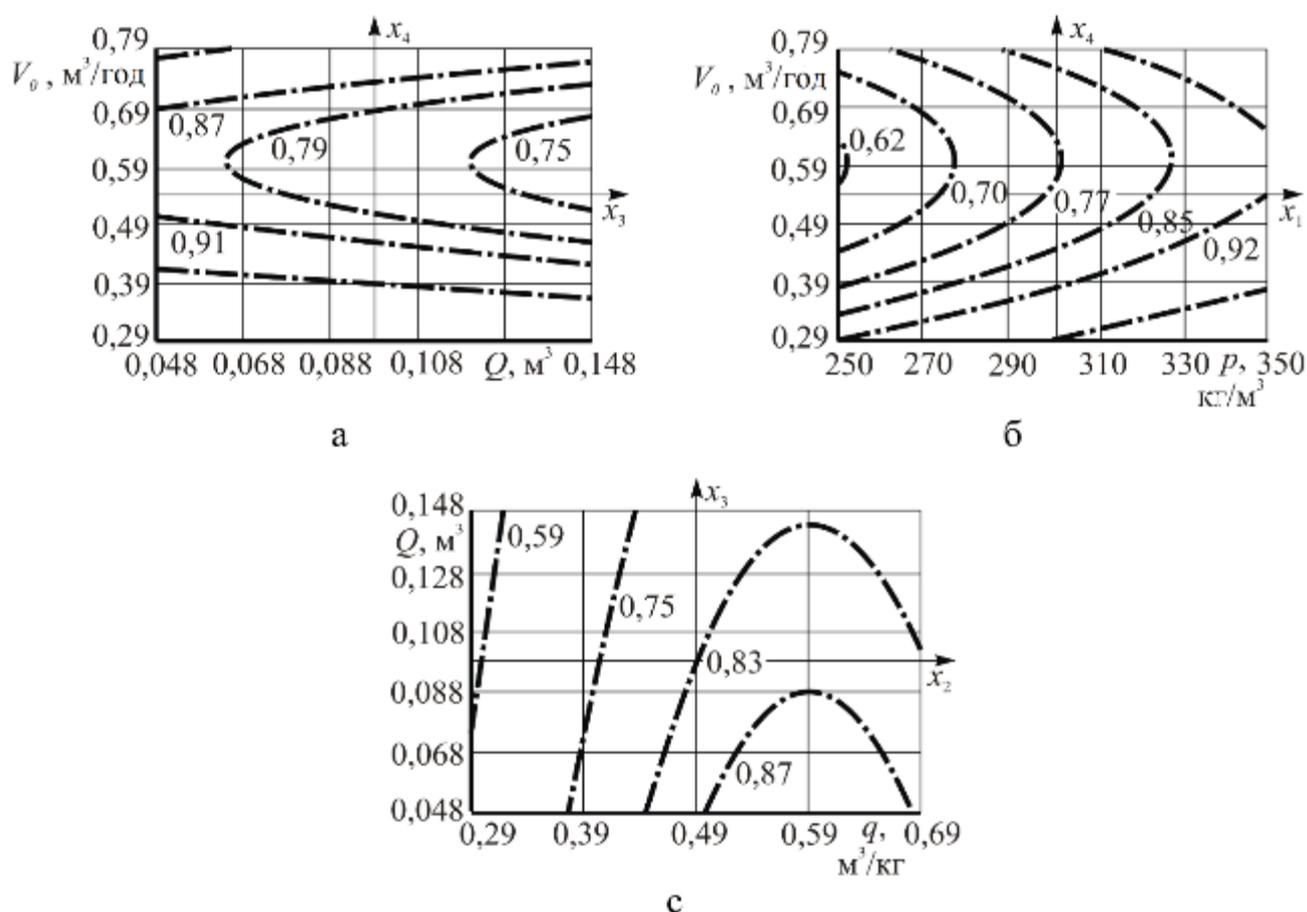


Рисунок 3.7 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вміст Y_3 (од./кг) кормових одиниць у сінажі: а – при $p(x_1) = 300 \text{ кг/м}^3$; $q(x_2) = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}$; б – при $q(x_2) = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}$; $Q(x_3) = 0,096 \text{ м}^3$; в – при $p(x_1) = 300 \text{ кг/м}^3$; $V_0(x_4) = 0,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Таким чином, у результаті дослідження моделей регресії впливу факторів (густина пресування p , доза q внесення консерванта при атмосферному тиску, об'єм Q у зоні обробки одного розпилювача, витрата газу V_0) на температуру Y_1 саморозігріву, вміст Y_2 протеїну та вміст Y_3 кормових одиниць встановлено, що найефективніше вуглекислий газ діє при заготівлі сінажу з густиною $p = 290 \dots 330$ кг/м³ у дозі $q = 0,40 \dots 0,50$ м³/кг. Витрата $V_0 = 0,50 \dots 0,60$ м³/год забезпечує достатню рівномірність розподілу CO₂ у сінажі об'ємом Q до 1,0 м³.

3.5 Висновки

Оцінка регресійних моделей впливу досліджуваних факторів (густина пресування p (кг/м³) сінажної маси, доза q (м³/кг) внесення консервувальної речовини за атмосферного тиску, об'єм Q (м³) сінажної маси в зоні дії одного розпилювача, витрата газу V_0 (м³/год)) на температуру Y_1 (°C) саморозігріву корму, вміст Y_2 (%) протеїну та вміст Y_3 (од./кг) кормових одиниць показала, що найрезультативнішим застосування вуглекислого газу є під час заготівлі сінажу з густиною $p = 290 \dots 330$ кг/м³ у дозі $q = 0,40 \dots 0,50$ м³/кг. Витрата газу V_0 на рівні 0,50...0,60 м³/год забезпечує достатню рівномірність розподілу CO₂ у сінажі за об'єму Q до 1,0 м³.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці при заготівлі стеблових кормів

Нормативні засади. Під час організації робіт необхідно дотримуватися вимог Закону України «Про охорону праці», правил пожежної безпеки, санітарних норм, вимог безпеки машин та електроустановок (з урахуванням настанов виробників обладнання), загальних принципів ризик-менеджменту (ISO 12100) та безпеки електрообладнання машин (EN/ДСТУ EN 60204-1).

Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час заготівлі стеблових кормів:

- рухомі та обертові частини техніки (косарки, плющилки, прес-підбирачі, транспортери, обмотчики);
- зтягування матеріалом (валки, стретч-плівка, сітка, ремені, ланцюги);
- пил, аерозолі рослинного та мікробіологічного походження, спори пліснявих грибів;
- шум (часто 85–95 дБА) і локальна вібрація;
- підвищена небезпека переїзду/наїзду технікою в полі та на токах;
- робота за несприятливих погодних умов, слизькі поверхні, нерівний рельєф;
- небезпека ураження електричним струмом під час роботи стаціонарного обладнання;
- використання балонів зі стисненими газами (CO₂) - ризик асфіксії, обмороження струменем газу, розриву арматури;
- ергономічні ризики: підймання та переміщення рулонів/тюків, робота у вимушених позах.

Загальні організаційні вимоги:

- допуск до робіт - лише після навчання, інструктажів (вступного, первинного, повторного), перевірки знань і медичного огляду (за потреби);
- визначення та позначення небезпечних зон, маршрутів руху техніки, місць навантаження/розвантаження; застосування сигнальної розмітки та знаків;

- справність і наявність огорожень, блокувань, аварійних зупинок (E-STOP), захисних кожухів;
- заборона робіт одноосібно у замкнених просторах або біля силосних траншей/рукавів без нагляду;
- забезпечення ЗІЗ: каска, захисні окуляри/щиток, рукавиці, берці з металевим підноском, респіратор FFP2/FFP3 під час запиленості, протишумові навушники/вкладиші;
- регламент перерв і питний режим у спеку; засоби першої допомоги та зв'язок.

4.2 Оцінка з точки зору охорони праці преса-пакувальника сінажу з розробленою системою внесення консерванту

Обладнання: прес-пакувальник сінажу з вузлом ін'єктування/дозування CO₂, подачею у рулон/пакет перед герметизацією.

Механічні ризики (удар, здавлення, затягування):

- суцільні огороження усіх зон захоплення; міжкришкові блокування; E-STOP з фіксацією; дворуківний пуск на режимах налагодження; LOTO для техобслуговування.

Пневмо- та газова частина (CO₂):

- балони у вертикальному положенні, фіксація; захисні ковпаки; редуктори та шланги за тиском виробника; випробування на герметичність; витяжна вентиляція в зоні подачі; датчик CO₂ з сигналізацією; навчання персоналу; температура зберігання балонів < +50 °С.

Електробезпека:

- ступінь захисту шаф керування не нижче IP54; заземлення; ПЗВ/дифзахист; маркування та схеми; обслуговування лише електротехперсоналом.

Ергономіка та шум:

- робочі висоти столів/пультів; механізоване позиціонування рулонів; протишумові огороження; ЗІЗ органів слуху; контроль рівнів шуму.

Пожежна безпека:

- чистота від рослинних решток; заборона відкритого вогню; вогнегасники (порошкові/вуглекислотні); доступ до виїздів/проїздів.

Орієнтовні граничні величини для організації безпечної роботи:

- Шум: до 85 дБА за 8-годинну зміну - з протишумовими ЗІЗ; вище - обмеження часу/інженерні заходи.

- CO₂ у повітрі робочої зони: ≤ 0,5 % об. (5000 ppm) середньозмінно; ≤ 3 % (30000 ppm) короткочасно. Безперервний контроль у закритих приміщеннях.

Вентиляція (підхід до розрахунку): $Q = G / (C_{доп} - C_{фоновий}) \cdot k_{зап}$, де Q - потрібна витрата повітря (м³/год), G - потенційний витік (м³/год), C_{доп} - допустима об'ємна частка CO₂, C_{фоновий} - фон, k_{зап} - коефіцієнт запасу (1,3–2,0). Відсмоктування - у нижній зоні (CO₂ важчий за повітря), без рециркуляції.

Таблиця 4.1 - Типова матриця оцінки ризиків

Небезпека	Імовірність	Тяжкість	Рівень ризику	Основні заходи
Захоплення плівкою/сіткою обмотчика	Середня (3)	Висока (4)	12 (Суттєвий)	Огородження/блокування, дворуківний пуск, інструктаж, ЗІЗ рук
Контакт із рухомими частинами прес-підбирача	Низька (2)	Дуже висока (5)	10 (Суттєвий)	Фіксовані кожухи, LOTO, E-STOP
CO ₂ - витік у зоні пакування	Середня (3)	Висока (4)	12 (Суттєвий)	Вентиляція, детектор CO ₂ , герметичність, навчання
Перекидання/наїзд технікою	Низька (2)	Дуже висока (5)	10 (Суттєвий)	Маршрути руху, сигнали, супровід, огляд місцевості
Пил/біоаерозолі	Висока (4)	Середня (3)	12 (Суттєвий)	Зволоження, локальна витяжка, респіратори FFP2/FFP3
Шум ≥ 85 дБА	Висока (4)	Середня (3)	12 (Суттєвий)	Техобслуговування, кожухи, протишумові ЗІЗ
Ручне переміщення рулонів	Середня (3)	Середня (3)	9 (Помірний)	Механізація, візки, навчання підйому

Пріоритет зниження ризику: інженерні заходи → адміністративні заходи → засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).

4.3 Проект інструкції з охорони праці при роботі з пресом-пакувальником сінажу

1. Загальні положення

- До роботи допускаються повнолітні працівники, які пройшли медогляд (за показаннями), навчання, інструктажі та перевірку знань.

- Працівник зобов'язаний знати будову преса-пакувальника, системи внесення CO₂, розташування органів керування, E-STOP, порядок LOTO.

- Обов'язкові ЗІЗ: каска, захисні окуляри, рукавиці, берці з металевим підноском, протишумові навушники, респіратор FFP2/FFP3 за запиленості.

2. Вимоги безпеки перед початком роботи

- Оглянути робоче місце, прибрати сторонні предмети, перевірити освітлення, вентиляцію.

- Переконатися у справності огорожень, блокувань, E-STOP; відсутності людей у небезпечних зонах.

- Перевірити електроживлення, заземлення, відсутність пошкоджень кабелів.

- Оглянути систему CO₂: вертикальна фіксація балонів, цілісність шлангів/хомутів, справність редуктора/манометрів, відсутність витоків; наявність захисних ковпаків.

- Перевірити роботу витяжки та датчика CO₂ (самотест/калібрування).

- Провести холостий запуск і перевірити дозування консерванта без матеріалу.

- Одягнути ЗІЗ, прибрати вільний одяг/аксесуари, зафіксувати волосся.

3. Вимоги безпеки під час роботи

- Забороняється знімати огороження, обходити блокування, працювати при несправних E-STOP або датчиках.

- Матеріал подавати штатними пристроями; не підсовувати руки/інструменти у зону рухомих частин.

- Налаштування, очищення, видалення плівки - лише після зупинки, LOTO і знеструмлення, зі стравлюванням тиску.

- Під час роботи з CO₂: відкривати вентилі повільно; не спрямовувати струмінь на людей; уникати контакту шкіри/очей; контролювати показники датчика.

- Підтримувати чистоту, не допускати накопичення рослинних решток біля моторів/шаф; не палити.

- Забезпечити зв'язок і узгоджені сигнали з машиністом навантажувача/трактористом.

4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

- Зупинити прес штатно, вимкнути живлення, LOTO, дочекатися повної зупинки.

- Перекрити вентиль балона CO₂, скинути тиск, встановити захисні ковпаки.

- Очистити зону, перевірити відсутність тління, прибрати інструмент.

- Зняти ЗІЗ, оглянути їх стан, зробити запис у журналі про зауваження, витрати газу/плівки.

5. Аварійні ситуації та дії персоналу

- Підвищення CO₂ (сигналізація): зупинити обладнання, провітрити, евакуювати, повідомити відповідального; локалізувати витік після зниження концентрації.

- Травмування/затягування: натиснути E-STOP, викликати «103», надати першу допомогу.

- Пожежа: E-STOP, знеструмити, використати порошковий/CO₂ вогнегасник, викликати «101», евакуація.

- Електротравма: знеструмити, звільнити потерпілого діелектричними засобами, СЛР, викликати «103».

4.4 Висновки

Визначено основні небезпеки заготівлі стеблових кормів і встановлено пріоритети керування ризиками: інженерні рішення, організаційні заходи, ЗІЗ.

Оцінка преса-пакувальника з системою внесення CO₂ показала критичні зони: захист від захоплення/затягування, герметичність і контроль середовища (вентиляція, датчики CO₂), електробезпека, пожежна профілактика. Запропонований проєкт інструкції з охорони праці визначає вимоги до/під час/після роботи, процедури LOTO, правила поводження з балонами, алгоритми дій у НС. Дотримання вимог розділу знижує травматизм, попереджає профзахворювання (шум, пил/біоаерозолі, вплив CO₂) і забезпечує безпечну експлуатацію преса-пакувальника.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАГОТІВЛІ СІНАЖУ

5.1 Вихідні дані

Наведене порівняння оцінює економіку двох технологій заготівлі сінажу в рулонах: класичної схеми з внесенням рідкого/біологічного консерванта та розробленої схеми з ін'єкцією CO₂ під час пакування. Розрахунки виконано для 1 т свіжої маси за таких базових допущень: вологість 50% (тобто 0,5 т сухої речовини в тонні СМ); витрати на плівку й експлуатацію преса/обмотчика та праці - однакові для обох варіантів; для класичної схеми прийнято дозу консерванта 3 л/т за ціною 120 грн/л, для CO₂ - 6 кг/т за ціною 35 грн/кг; втрати сухої речовини становлять 5% для класичної схеми та 3% для CO₂-схеми. Також враховано помірні різниці в амортизації додаткового обладнання.

Мета - порівняти питомі витрати та сукупну вартість заготівлі сінажу в рулонах за двома технологіями:

- T1: пресування та індивідуальна обмотка рулонів із внесенням рідкого/біологічного консерванта;
- T2: пресування та індивідуальна обмотка рулонів із ін'єкцією CO₂ за розробленою системою.

Обсяг порівняння - питомі показники на 1 т свіжої маси (СМ) та на 1000 т СМ за базового сценарію.

Структура витрат

2.1. Постійні:

- Додаткове обладнання дозування (T1) / ін'єкції CO₂ (T2) (грн).
- Датчики, арматура, монтаж (грн).
- Додаткові вимоги до вентиляції/детекції (переважно для T2) (грн).

2.2. Змінні (на 1 т СМ):

- Пальне та зношування преса/обмотчика (грн/т).
- Плівка/сітка (грн/т).
- Консервант рідкий/біологічний (T1) - доза (л/т) × ціна (грн/л).
- CO₂ (T2) - споживання (кг або м³/т) × ціна (грн/кг або грн/м³).

- Праця (грн/т).
- Техобслуговування і ремонт (грн/т).

2.3. Втрати поживних речовин (зниження виходу СР/ОЕ): економічна оцінка за ціною СР або кормової енергії.

Таблиця 5.1 - Вхідні дані (база для розрахунку)

Параметр	Одиниця	Значення
Масова частка вологи свіжої маси	%	50
Суха речовина в 1 т СМ	т СР/т СМ	$= (100-W)/100$
Середня маса рулона	т	0,30
Плівка та витратні (на 1 т СМ)	грн/т	900
Пальне/зношування (на 1 т СМ)	грн/т	700
Праця (на 1 т СМ)	грн/т	250
ТОіР (на 1 т СМ)	грн/т	150
Ціна 1 т СР (оцінка втрат)	грн/т СР	12000
Втрати СР, Т1 (рідк./біо)	% від СР	5
Втрати СР, Т2 (СО ₂)	% від СР	3
Доза консерванта, Т1	л/т СМ	3,0
Ціна консерванта, Т1	грн/л	120
Споживання СО ₂ , Т2	кг/т СМ (або м ³ /т)	6 (або 3 м ³)
Ціна СО ₂	грн/кг (або грн/м ³)	35
Додаткова амортизація/т, Т1	грн/т	20
Додаткова амортизація/т, Т2	грн/т	35

5.2 Результати розрахунків

За цих умов повна собівартість класичної технології становить близько 2 680 грн на тонну свіжої маси, тоді як технологія з ін'єкцією СО₂ - близько 2 425 грн/т. Таким чином, очікувана економія від використання СО₂ складає приблизно

255 грн на кожен тону. Якщо перенести це на сезонні обсяги, отримуємо орієнтовну економію близько 0,13 млн грн за 500 т, близько 0,51 млн грн за 2 000 т і близько 1,28 млн грн за 5 000 т свіжої маси відповідно. Економія масштабу лінійна: чим більший сезонний обсяг, тим більший загальний фінансовий ефект за незмінних питомих параметрів.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунків

Показники	Базовий варіант (рідкий консервант)	Розробка (ін'єкція CO ₂)	% до базового
Обслуговуючий персонал, осіб	1	1	100,0
Капітальні вкладення (додаткові), грн	-	560 000	-
Операційні витрати, грн/т	2 000	2 000	100,0
Доза та вартість «консерванта», грн/т	360 (3 л/т × 120)	210 (6 кг/т × 35)	58,3
Амортизація дод. вузлів, грн/т	20	35	175,0
Прямі змінні витрати, грн/т	2 380	2 245	94,3
Вартість втрат СР, грн/т	300	180	60,0
Повна собівартість, грн/т	2 680	2 425	90,5
Економія питомих витрат, грн/т	-	255	-

Чутливісний аналіз показує, що результат найбільше залежать від трьох факторів: ціни й дози «консерванта на тону», різниці у втратах сухої речовини та вартості CO₂. Для розглянутого прикладу точка беззбитковості за ціною CO₂ - близько 77,5 грн/кг: поки фактична ціна нижча, схема з CO₂ зберігає перевагу. Для рідкого консерванта критичною є ціна близько 35 грн/л (за дозою 3 л/т): якщо консерванти суттєво подешевшають нижче цього рівня, їхня технологія

наближається за вартістю до CO₂. За втратами сухої речовини ключовою є межа близько 7,25% для CO₂-схеми: доки фактичні втрати нижчі (у базовому сценарії - 3%), економічна перевага зберігається із запасом.

Таблиця 5.3 – Сезонні результати (лінійне масштабування)

Показники	500 т/сезон	2 000 т/сезон	5 000 т/сезон
Максимальне річне навантаження, т	500	2 000	5 000
Річні витрати, базовий (грн)	1 340 000	5 360 000	13 400 000
Річні витрати, розробка (грн)	1 212 500	4 850 000	12 125 000
Річна економія операційних витрат, грн	127 500	510 000	1 275 000
Строк окупності капвкладень, років	4,4	1,1	0,4

5.3 Висновки

За типових ринкових параметрів технологія з ін'єкцією CO₂ забезпечує стійке зниження повної собівартості заготівлі на рівні приблизно 255 грн/т завдяки дешевшій «дозі консерванта на тонну» та меншим втратам поживних речовин. Для максимізації ефекту на практиці важливо забезпечити якісну герметизацію рулонів, рівномірне внесення CO₂ й контроль фактичних втрат сухої речовини; саме ці чинники визначатимуть, наскільки реальний результат наблизиться до розрахункового. Якщо надати ваші конкретні ціни, дози та виміряні втрати, можна перерахувати показники для господарських умов і уточнити сезонний економічний ефект.

Загальні висновки

1. Доведено доцільність заготівлі сінажу з вологістю 50–55% у герметичній упаковці та показано, що критичними є скорочення аеробної фази й швидке створення анаеробних умов. Обґрунтовано переваги контрольованого консервування через заміщення повітря CO_2 : зменшення активності небажаної мікрофлори, нижча температура саморозігріву, краще збереження протеїну та каротину. Порівняно основні схеми внесення консервантів і виявлено обмеження рідких/біологічних препаратів на етапі підбору/пресування (втрати, неоднорідність, вплив погоди), що мотивувало вибір газового підходу.

2. Запропоновано конструктивно-технологічну схему ін'єкції CO_2 у напівобгорнутий рулон з подальшим дообмотуванням, захищену патентними рішеннями. Теоретично змодельовано інжектор (пневмоциліндр, шток-ігла з отворами, пружина), обґрунтовано ключові параметри: $D \approx 50$ мм, $d \approx 7$ мм, діаметр підвідного та випускного каналів ≈ 5 мм, хід $S \approx 0,5$ м. Розраховано об'єм газозаміщення як функцію щільності пресування та вологості, показано, що потрібна доза CO_2 зменшується зі зростанням щільності, а критерії якості (Т саморозігріву, протеїн, кормові одиниці) можуть бути описані вихідними параметрами процесу.

3. Створено лабораторну установку і дослідний інжектор для перевірки режимів ін'єкції; сформовано програму досліджень із порівнянням інгібіторів і вимірюванням температури саморозігріву, рН та вмісту органічних кислот. Методика забезпечує відтворюваність і дозволяє варіювати чотири керовані фактори: щільність пресування p , доза q , об'єм Q у зоні однієї форсунки, витрата V_0 . Отримано набір даних для регресійного моделювання й подальшої оптимізації параметрів під виробничі умови.

4. За планом Бокса–Бенкіна побудовано адекватні регресійні моделі для трьох функцій відгуку (температура саморозігріву, протеїн, кормові одиниці). Встановлено оптимальні діапазони: $p \approx 290\text{--}330$ кг/м³, $q \approx 0,40\text{--}0,50$ м³/кг, $V_0 \approx 0,50\text{--}0,60$ м³/год; у цих межах знижується температура до фонового рівня, а збереження протеїну й кормових одиниць зростає. Показано, що надмірне збільшення витрати

газу погіршує рівномірність заміщення повітря, тоді як помірне збільшення щільності пресування суттєво підсилює ефект CO₂.

5. Порівняльні розрахунки засвідчили зменшення повної собівартості приблизно на ≈ 255 грн/т свіжої маси (за базових цін і доз), що масштабується до сотень тисяч – понад мільйона грн за сезон залежно від обсягів. Чутливистий аналіз підтвердив стійкість переваги CO₂ до коливань ціни газу, вартості/дозид рідких консервантів та різниці у втратах CP; визначено граничні «точки безбитковості». Запропоновані вимоги безпеки (герметизація, контроль CO₂, вентиляція) забезпечують відповідність охороні праці й мінімізують ризики під час експлуатації інжекційного вузла у виробничих умовах.

Бібліографія

1. Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455–475.
2. Coblenz, W. K., & Akins, M. S. (2018). Recent advances and future technologies for baled silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4075–4092.
3. Ciotti, A., Niderkorn, V., Bousset, J., & Cherney, D. (1993). Effect of a *Lactobacillus plantarum* inoculant on lucerne bale silage. *Proceedings of the 10th International Silage Conference*, 136–137.
4. da Costa, M. L. L., et al. (2018). Fermentation pattern of tropical grass haylage and its nutritional value. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 47, e20170188.
5. Ezequiel, F. L. S., et al. (2022). Quality of haylage of *Brachiaria brizantha* with different dry matter contents in storage. *The Journal of Agricultural Science*, 160(1), 90–98.
6. Gonda, H., et al. (2023). Efficacy of six lactic acid bacteria strains as silage inoculants. *Grass and Forage Science*, 78(4), 495–510.
7. Kung, L., Shaver, R., Grant, R., & Schmidt, R. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4020–4033.
8. Li, M., et al. (2017). CO₂ production, dissolution and pressure dynamics during silage production: Multi-sensor-based insight. *Scientific Reports*, 7, 10285.
9. McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. (1991). *The biochemistry of silage* (2nd ed.). Marlow: Chalcombe Publications.
10. Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung, L. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3980–4000.
11. Müller, C. E. (2009). Long-stemmed vs. cut haylage in bales-Effects on fermentation and hygienic quality. *Small Ruminant Research*, 82(1), 58–64.
12. Müller, C. E. (2018). Silage and haylage for horses. *Grass and Forage Science*, 73(4), 815–827.

13. Овчаренко, В., & ін. (2024). Використання мікробних добавок під час консервування кормів. *Сучасні інновації, техніка і технології*, 12(1), 45–53.
14. Okoye, C. O., et al. (2023). The performance of lactic acid bacteria in silage production: A review. *Journal of Applied Microbiology*, 134(5), 1xad010.
15. Playne, M. J., & McDonald, P. (1966). The buffering constituents of herbage and of silage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 17(6), 264–268.
16. Romero, G., et al. (2025). Bale ensiling preserves nutritional and microbial quality of red grape pomace for ruminant feed. *AgriEngineering*, 7(6), 172.
17. Rooke, J. A., & Hatfield, R. D. (2003). Biology of ensiling. In D. R. Buxton, R. E. Muck, & J. H. Harrison (Eds.), *Silage science and technology* (pp. 95–139). Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA.
18. Santos, M. C., et al. (2015). Adding heterofermentative LAB to improve aerobic stability of silages. *Animal Feed Science and Technology*, 204, 31–39.
19. Schmidt, R. J., & Kung, L. (2010). The effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of silages. *Journal of Dairy Science*, 93(1), 196–201.
20. Shan, G., et al. (2023). Insight of CO₂ and ethanol emission from maize silage. *Environmental Pollution*, 324, 121289.
21. Skaar, B., et al. (2020). Bale silage density, film layers and forage quality: A field study. *Agricultural and Food Science*, 29(3), 214–223.
22. Tremblay, G. F., et al. (2014). Effects of wilting and wrapping on bale silage quality. *Canadian Journal of Animal Science*, 94(4), 713–723.
23. Wilkinson, J. M., & Davies, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: Key findings and recent developments. *Grass and Forage Science*, 68(1), 1–19.
24. Woolford, M. K. (1984). *The silage fermentation*. New York: Marcel Dekker.
25. Zhao, X., et al. (2024). Innovative lactic acid production techniques driving development of silage fermentation. *Fermentation*, 10(10), 533.
26. Лі, С., & кол. (2021). *Мікробна екологія сінажу та контроль аеробної нестабільності*. Київ: НАУ.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

Обґрунтування параметрів обладнання для заготівлі сінажу

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-1-24
Омельченко Дмитро Анатолійович

Керівник: к.т.н., доцент
Дудін Володимир Юрійович

Дніпро-2025

Мета і задачі досліджень

Мета роботи – теоретично обґрунтувати, розробити та експериментально перевірити технологію і технічний засіб ін'єкції CO_2 у рулон сінажу в процесі пакування, оцінити вплив параметрів процесу на показники якості корму та обґрунтувати економічну доцільність застосування.

Завдання дослідження:

1. Провести огляд технологій і технічних засобів консервування сінажу; сформулювати зоотехнічні вимоги до результату.
2. Обґрунтувати конструктивно-технологічну схему пристрою для ін'єкції CO_2 ; змодельовати робочий орган (інжектор) і визначити його раціональні параметри.
3. Розрахувати об'єм газозаміщення всередині маси сінажу з урахуванням вологості та щільності пресування; встановити аналітичні залежності для вибору дози CO_2 .
4. Створити лабораторну установку та дослідний зразок інжектора; розробити програму багатofакторних експериментів.
5. Отримати регресійні моделі впливу керованих факторів (p , q , Q , V_0) на температуру саморозігріву, вміст протеїну та кормові одиниці; визначити оптимальні діапазони.
6. Виконати економічне порівняння базової технології (рідкий/біо консервант) і розробленої схеми (ін'єкція CO_2) на 1 т СМ і для сезонних обсягів; оцінити окупність.
7. Сформулювати вимоги з охорони праці та безпеки при роботі з вузлом ін'єкції CO_2 ; розробити проект інструкції.

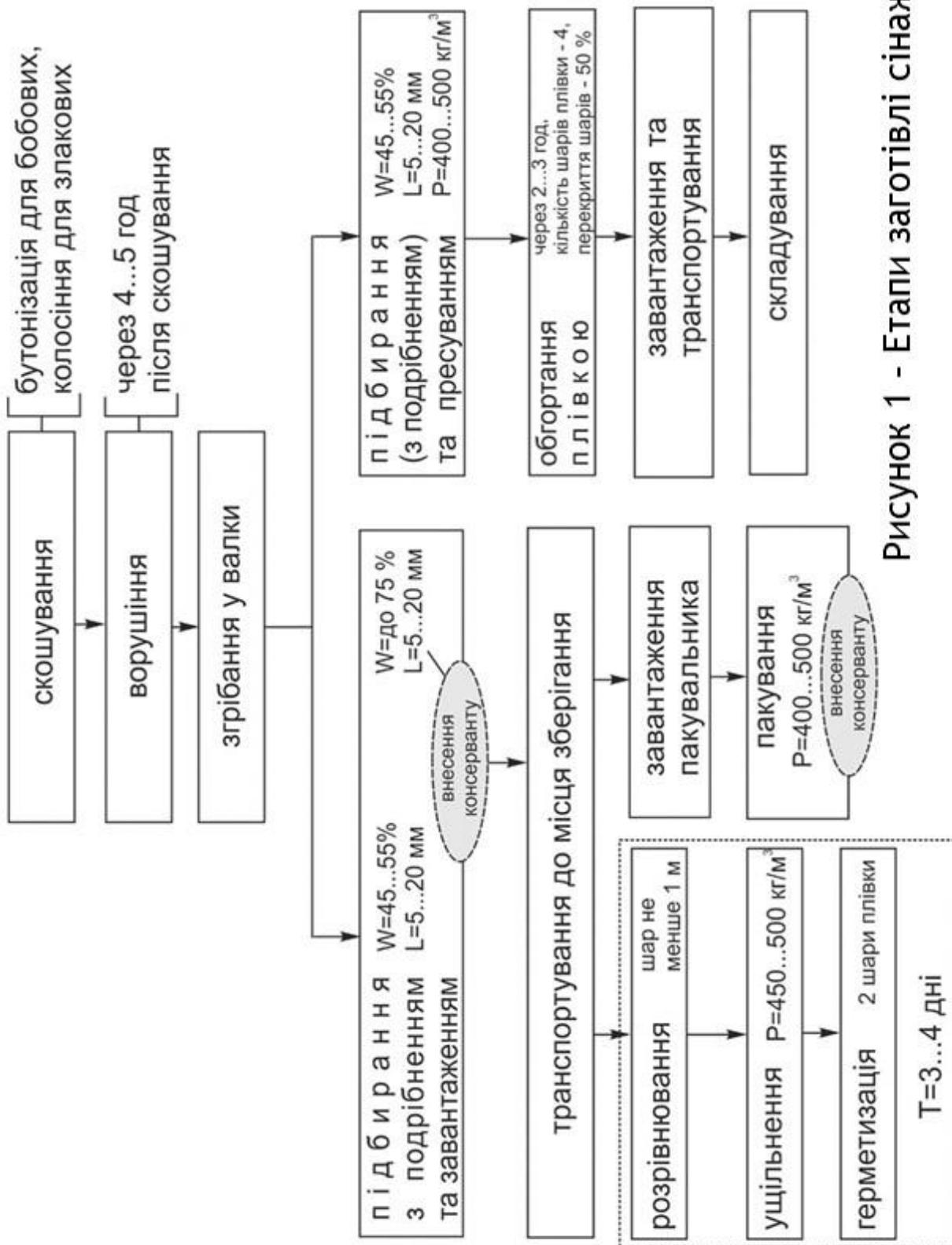
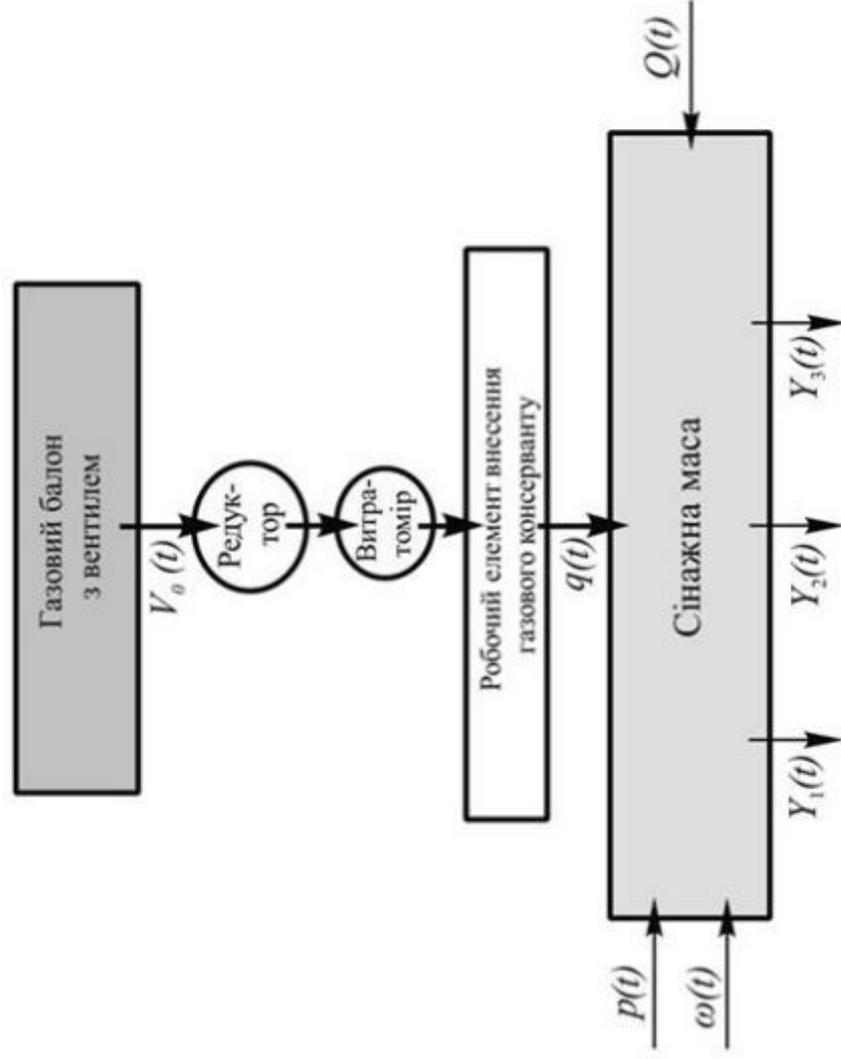


Рисунок 1 - Етапи заготівлі сінажу

Теоретичні дослідження



Керувальнi (вихiднi) дiї: витрата газу $V_0(t)$ та доза внесення $q(t)$, що визначають перiодичнiсть операцiї та забезпечують витiснення повітря з об'єму рулону.

Параметри процесу в масi сiнажу:

вологiсть $\omega(t)$, щiльнiсть

пресування $p(t)$, локальний об'єм

$Q(t)$ у зонi роботи одного iн'єктора.

Вихiднi (контрольованi) показники

якостi:

$Y_1(t)$ – температура

саморозгiрвання;

$Y_2(t)$ – вміст сирого протеїну;

$Y_3(t)$ – вміст кормових одиниць.

Рисунок 3 - Конструктивно-технологiчна схема пристрою обробки сiнажу газоподiбним консервантом

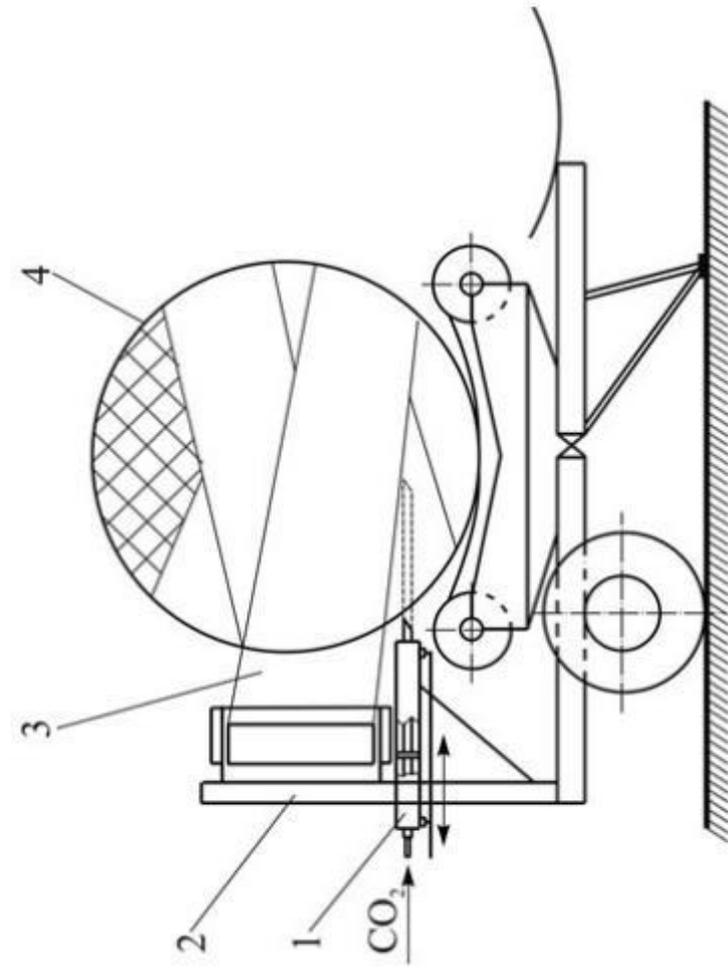


Рисунок 3 – Схема пристрою для обробки рулону сінажу CO_2 з індивідуальною упаковкою: 1 – ін'єктор; 2 – обмотувач рулонів; 3 – полімерна плівка; 4 – рулон сінажу

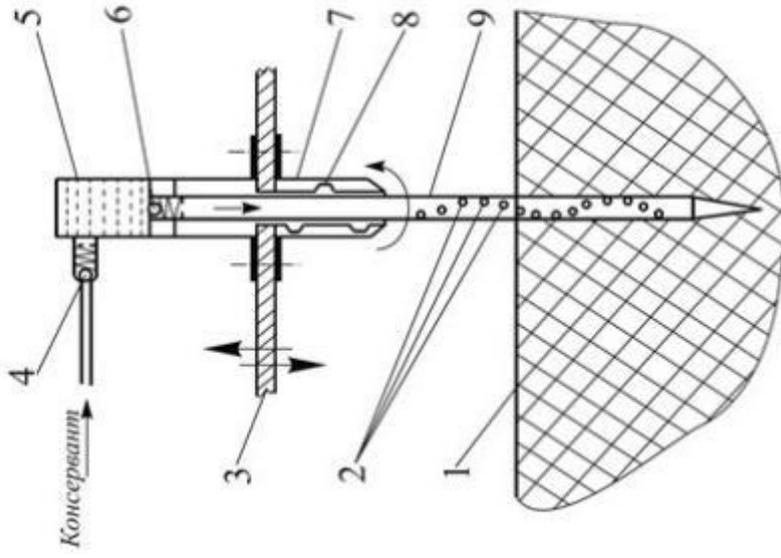


Рисунок 4 – Схема ін'єктора для обробки трав'яної маси рідкими консервантами: 1 – трав'яна маса; 2 – отвори-сопла; 3 – рама; 4, 6 – зворотні клапани; 5 – гвинтовий паз; 7 – гільза; 8 – гвинтовий паз; 9 – голка-поршень.

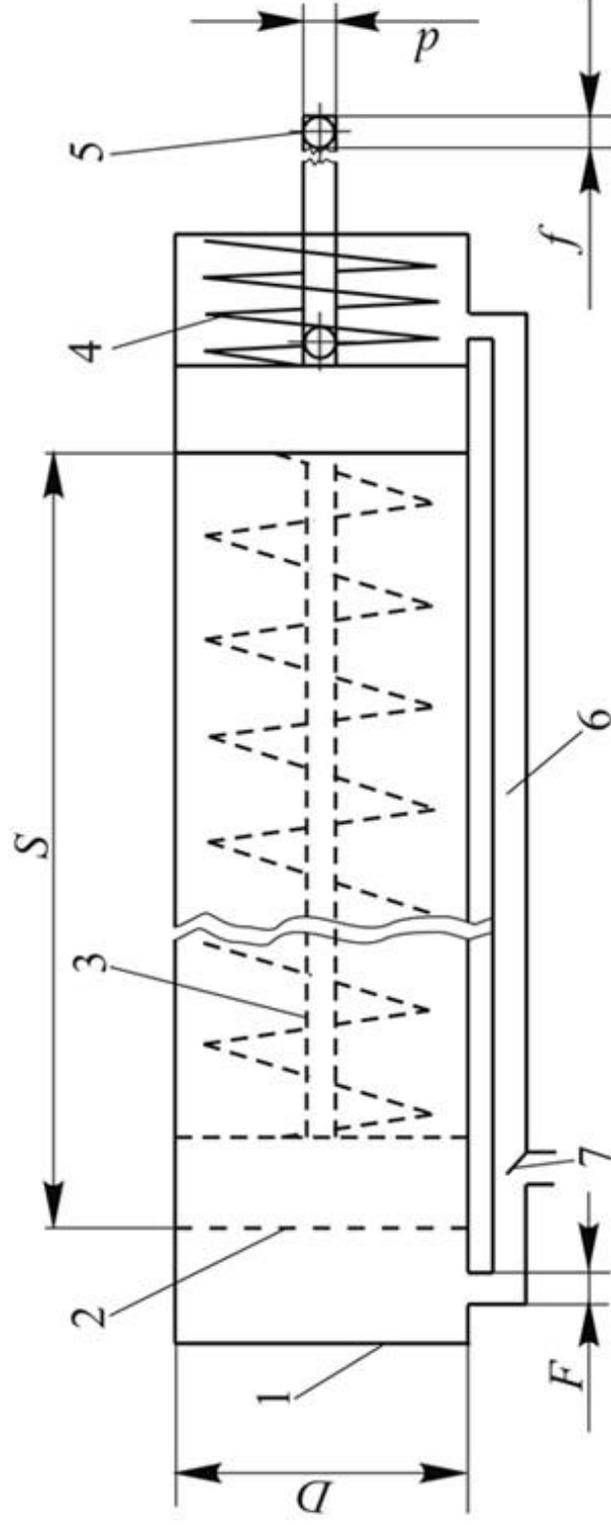


Рисунок 5 – Розрахункова схема ін'єктора для внесення CO_2 у сінаж: 1 – пневмоциліндр; 2 – поршень; 3 – голка; 4 – зворотна пружина; 5 – отвір на голці; 6 – газовий трубопровід; 7 – вентиль

ключові конструктивні параметри пневмоін'єктора: діаметр поршня пневмоциліндра – D ; діаметр штока поршня – d ; діаметр підвідного газового трубопроводу – F ; діаметр випускного сопла голки – f ; хід поршня – S .

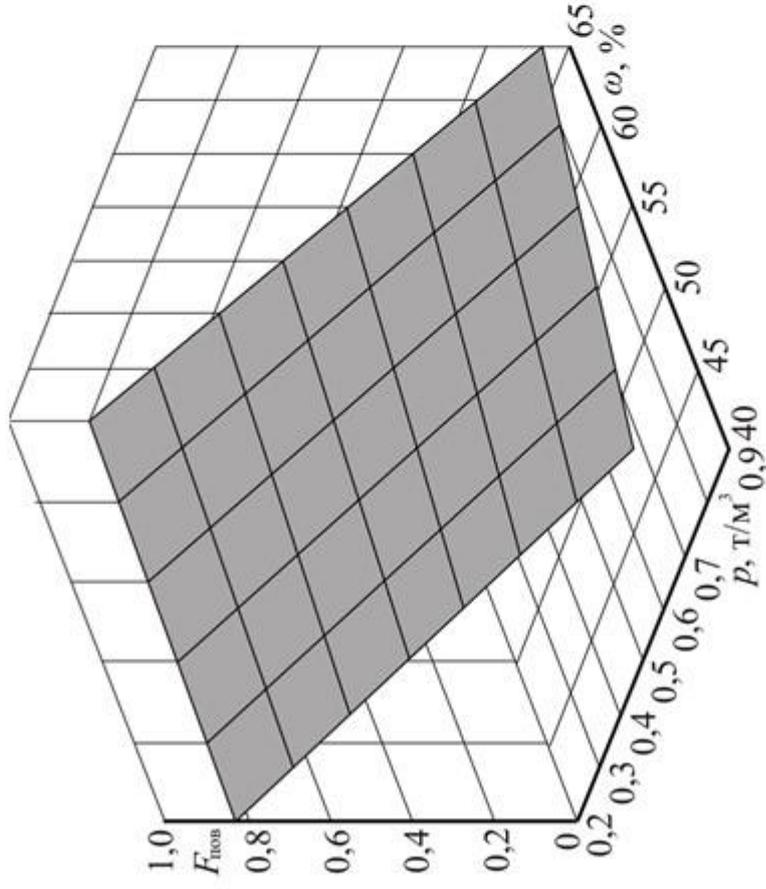


Рисунок 6 - Залежність коефіцієнта F_{tot} , що характеризує вміст повітря в сінажі, від вологості ω та густини ρ пресування

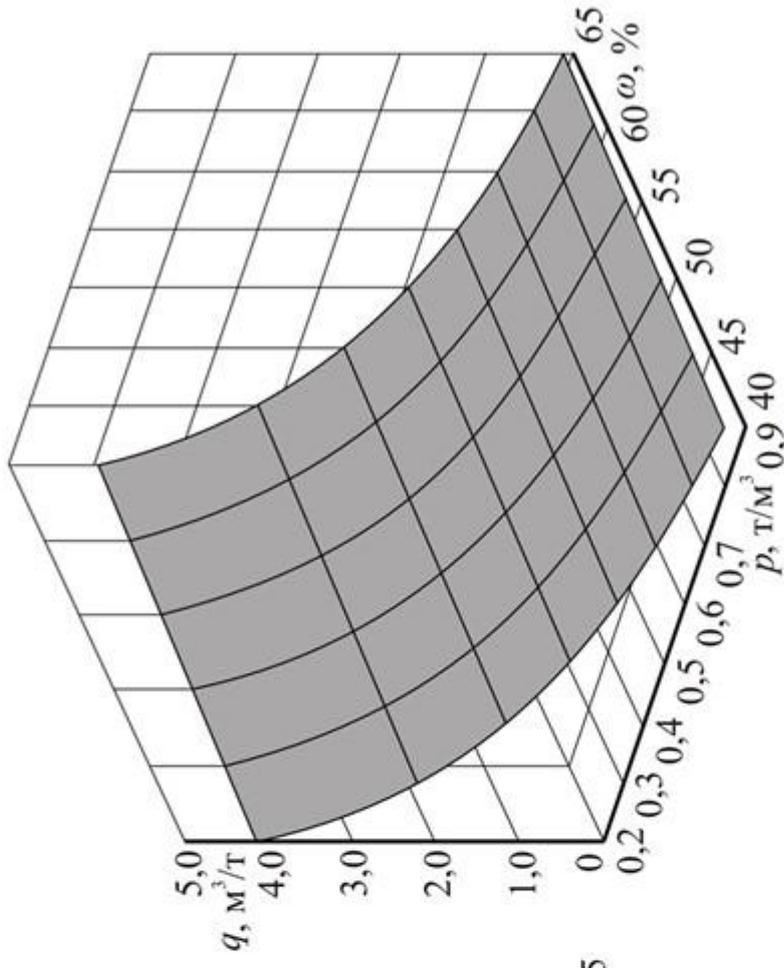


Рисунок 7 - Залежність дози q внесення консерванта від густини ρ пресування та вологості ω рослинної сировини

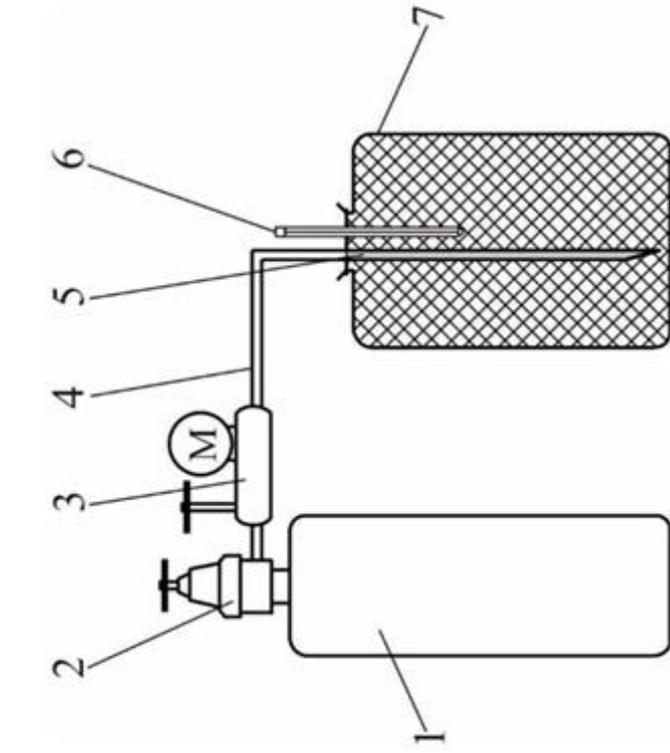


Рисунок 8 - Схема лабораторної установки для обробки сінажу вуглекислим газом: 1 - газовий балон; 2 - запірний вентиль; 3 - редуктор; 4 - гнучкий шланг; 5 - штанга з розпилювачем; 6 - термометр; 7 - трав'яна маса в герметичній упаковці



а



б



в

Рисунок 9 - Загальний вигляд лабораторної установки для обробки сінажу вуглекислим газом: а - газовий балон; б - редуктор із манометром-витратоміром; в - штанга з розпилювачем

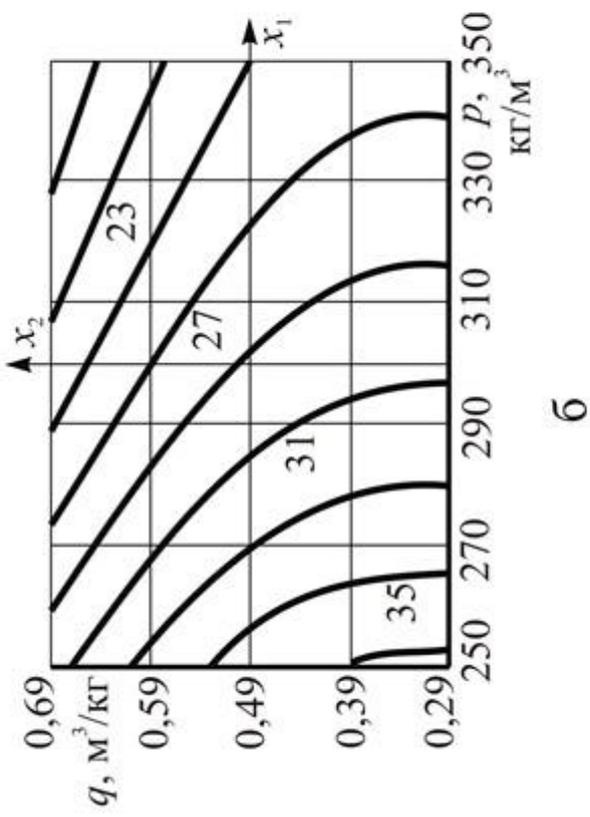
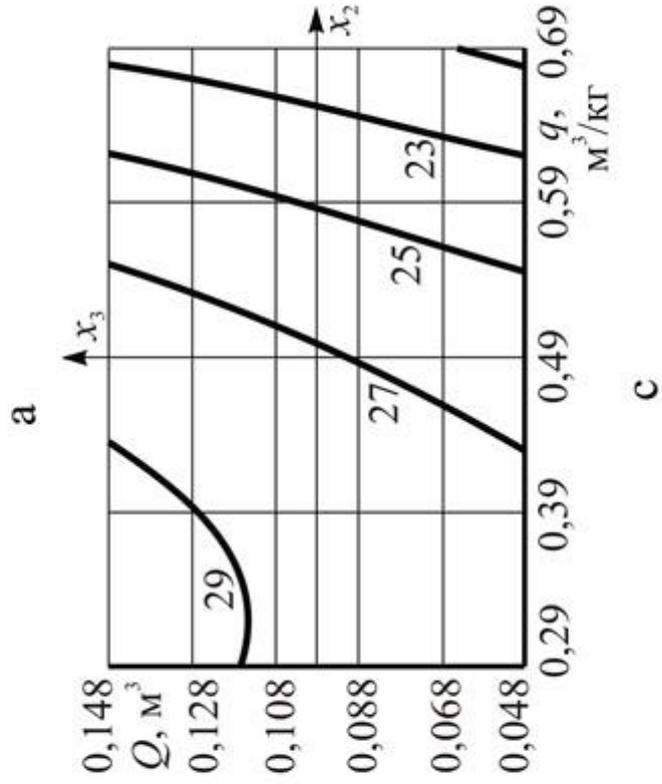
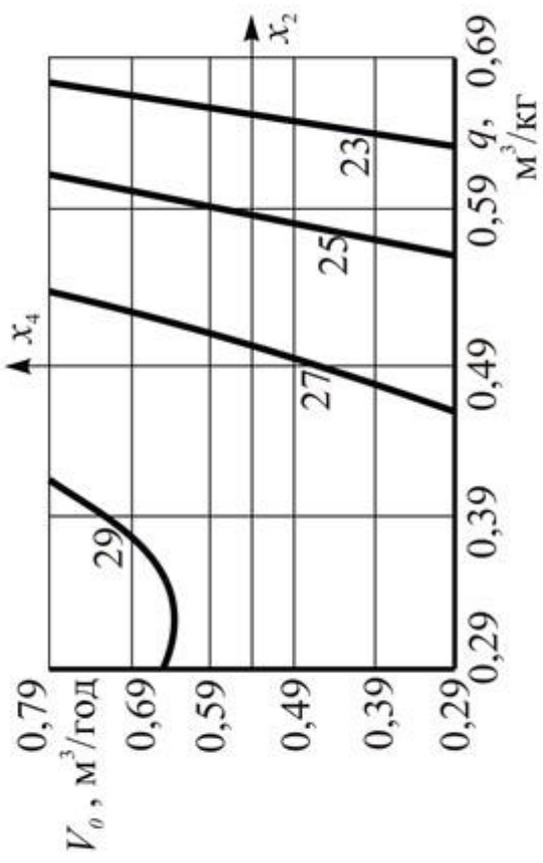
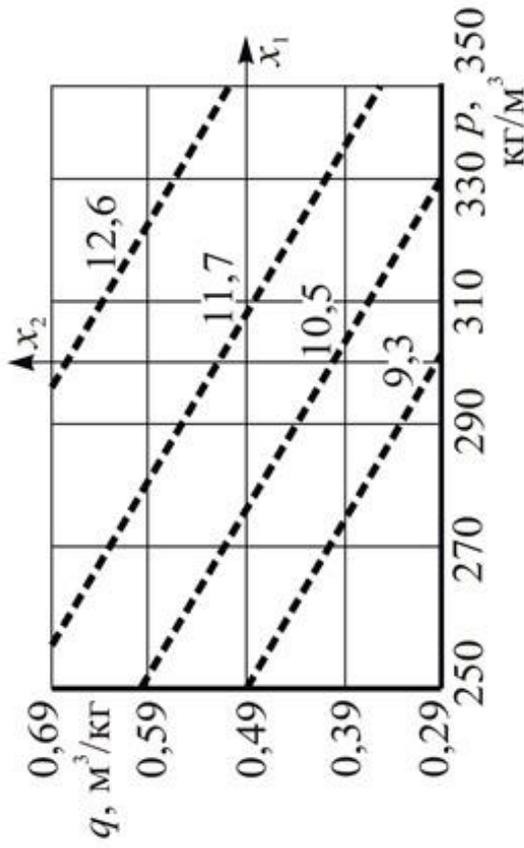
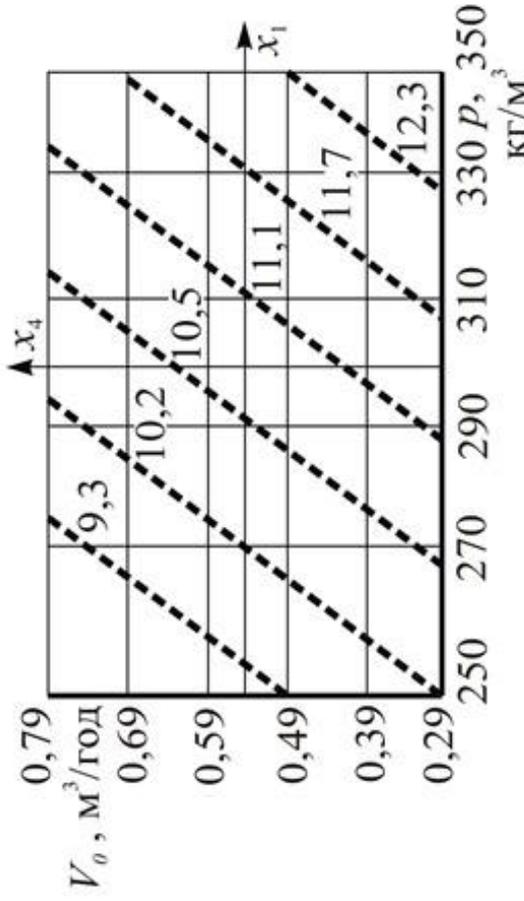


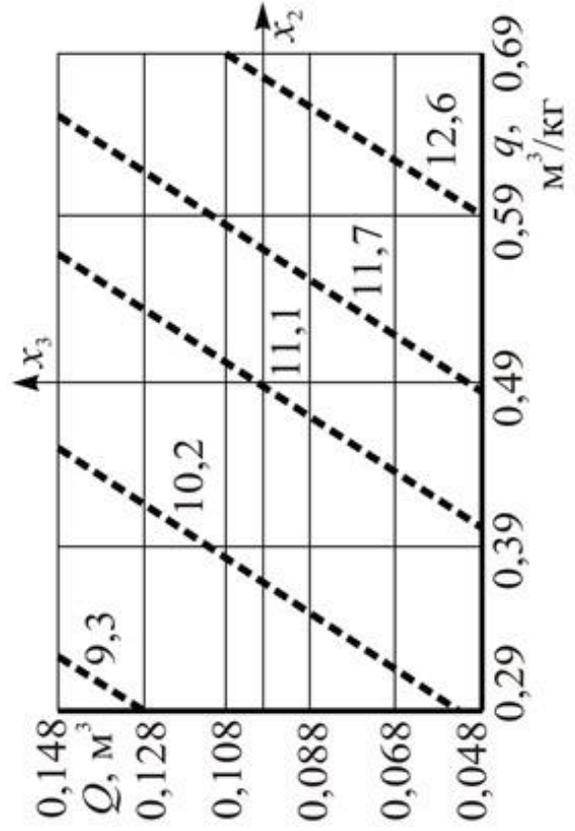
Рисунок 10 - Двовимірні перерізи поверхні відгуку, що характеризують температуру Y_1 (°C) саморозігріву сінажу: а - при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $Q(x_3) = 0,096$ м³; б - при $Q(x_3) = 0,096$ м³; $V_0(x_4) = 0,5$ м³/год; в - при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $V_0(x_4) = 0,5$ м³/год.



а

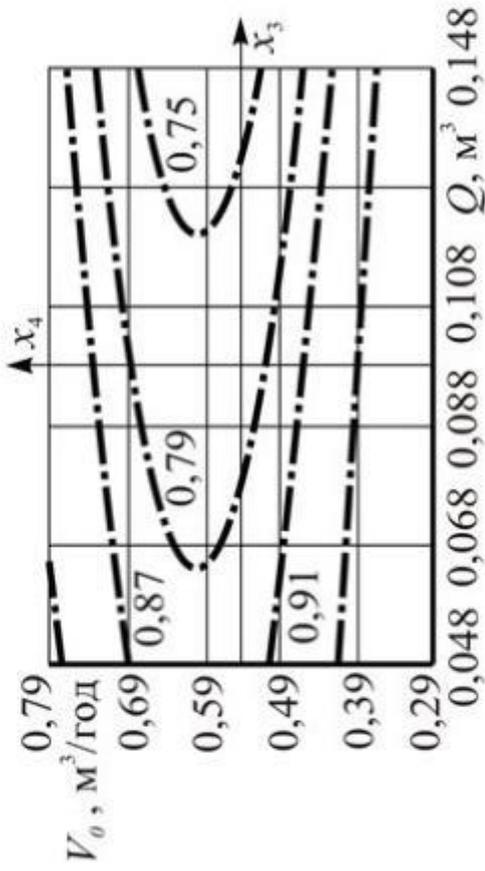


б

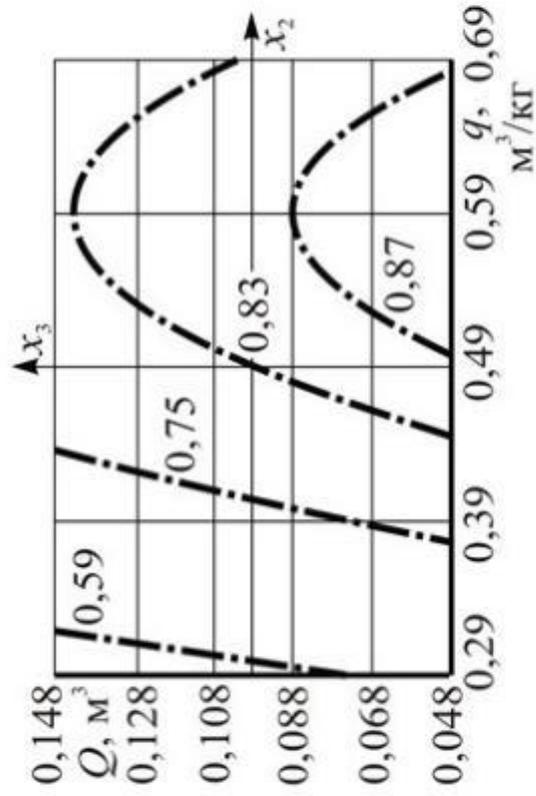


с

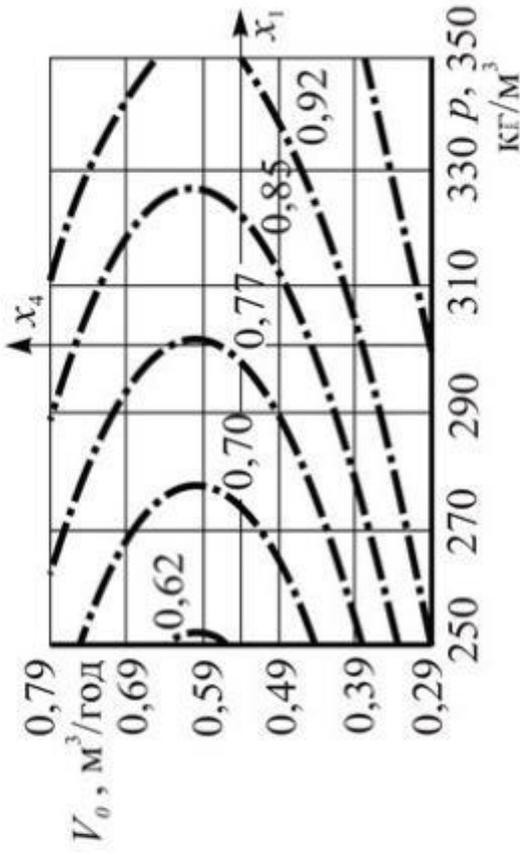
Рисунок 11 - Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вміст Y_2 (%) протеїну в сінажі: а - при $Q(x_3) = 0,096 \text{ м}^3$; $V_0(x_4) = 0,5 \text{ м}^3/\text{ГОД}$; б - при $p(x_1) = 300 \text{ кг}/\text{М}^3$; $Q(x_3) = 0,096 \text{ м}^3$; в - при $p(x_1) = 300 \text{ кг}/\text{М}^3$; $V_0(x_4) = 0,5 \text{ м}^3/\text{ГОД}$.



а



с



б

Рисунок 12 - Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вміст Y_3 (од./кг) кормових одиниць у сінажі: а - при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $q(x_2) = 0,45$ м³/кг; б - при $q(x_2) = 0,45$ м³/кг; $Q(x_3) = 0,096$ м³; в - при $p(x_1) = 300$ кг/м³; $V_0(x_4) = 0,5$ м³/год.

Таблиця – Матриця оцінки ризиків

Небезпека	Імовірність	Тяжкість	Рівень ризику	Основні заходи
Захоплення плівкою/сіткою обмотчика	Середня (3)	Висока (4)	12 (Суттєвий)	Огородження/блокування, дворуківний пуск, інструктаж, ЗІЗ рук
Контакт із рухомими частинами прес-підбирача	Низька (2)	Дуже висока (5)	10 (Суттєвий)	Фіксовані кожухи, LOTO, E-STOP
CO ₂ – витік у зоні пакування	Середня (3)	Висока (4)	12 (Суттєвий)	Вентиляція, детектор CO ₂ , герметичність, навчання
Перекидання/наїзд технікою	Низька (2)	Дуже висока (5)	10 (Суттєвий)	Маршрути руху, сигнали, супровід, огляд місцевості
Пил/біоаерозолі	Висока (4)	Середня (3)	12 (Суттєвий)	Зволоження, локальна витяжка, респіратори FFP2/FFP3
Шум ≥ 85 дБА	Висока (4)	Середня (3)	12 (Суттєвий)	Техобслуговування, кожухи, протишумові ЗІЗ
Ручне переміщення рулонів	Середня (3)	Середня (3)	9 (Помірний)	Механізація, візки, навчання підйому

Результати розрахунків

Показники	Базовий варіант (рідкий консервант)	Розробка (ін'єкція CO ₂)	% до базового
Обслуговуючий персонал, осіб	1	1	100,0
Капітальні вкладення (додаткові), грн	—	560 000	—
Операційні витрати, грн/т	2 000	2 000	100,0
Доза та вартість «консерванта», грн/т	360	210	58,3
Амортизація дод. вузлів, грн/т	20	35	175,0
Прямі змінні витрати, грн/т	2 380	2 245	94,3
Вартість витрат СР, грн/т	300	180	60,0
Повна собівартість, грн/т	2 680	2 425	90,5
Економія питомих витрат, грн/т	—	255	—

Сезонні результати (лінійне масштабування)

Показники	500 т/сезон	2 000 т/сезон	5 000 т/сезон
Максимальне річне навантаження, т	500	2 000	5 000
Річні витрати, базовий (грн)	1 340 000	5 360 000	13 400 000
Річні витрати, розробка (грн)	1 212 500	4 850 000	12 125 000
Річна економія операційних витрат, грн	127 500	510 000	1 275 000
Строк окупності капкладень, років	4,4	1,1	0,4

1. Доведено доцільність заготівлі сінажу з вологістю 50-55% у герметичній упаковці та показано, що критичними є скорочення аеробної фази й швидке створення анаеробних умов. Обґрунтовано переваги контрольного консервування через заміщення повітря CO₂: зменшення активності небажаної мікрофлори, нижча температура саморозігріву, краще збереження протеїну та каротину. Порівняно основні схеми внесення консервантів і виявлено обмеження рідких/біологічних препаратів на етапі підбору/пресування (втрати, неоднорідність, вплив погоди), що мотивувало вибір газового підходу.
2. Запропоновано конструктивно-технологічну схему ін'єкції CO₂ у напівобгорнутий рулон з подальшим дообмотуванням, захищену патентними рішеннями. Теоретично змодельовано інжектор (пневмоциліндр, шток-ігла з отворами, пружина), обґрунтовано ключові параметри: D≈50 мм, d≈7 мм, діаметр підвідного та випускного каналів ≈5 мм, хід S≈0,5 м. Розраховано об'єм газозаміщення як функцію щільності пресування та вологості, показано, що потрібна доза CO₂ зменшується зі зростанням щільності, а критерії якості (Т саморозігріву, протеїн, кормові одиниці) можуть бути описані вихідними параметрами процесу.
3. Створено лабораторну установку і дослідний інжектор для перевірки режимів ін'єкції; сформовано програму досліджень із порівнянням інгібіторів і вимірюванням температури саморозігріву, рН та вмісту органічних кислот. Методика забезпечує відтворюваність і дозволяє варіювати чотири керовані фактори: щільність пресування Р, доза q, об'єм Q у зоні однієї форсунки, витрата V₀. Отримано набір даних для регресійного моделювання й подальшої оптимізації параметрів під виробничі умови.
4. За планом Бокса-Бенкіна побудовано адекватні регресійні моделі для трьох функцій відгуку (температура саморозігріву, протеїн, кормові одиниці). Встановлено оптимальні діапазони: p≈290-330 кг/м³, q≈0,40-0,50 м³/кг, V₀≈0,50-0,60 м³/год; у цих межах знижується температура до фонового рівня, а збереження протеїну й кормових одиниць зростає. Показано, що надмірне збільшення витрати газу погіршує рівномірність заміщення повітря, тоді як помірне збільшення щільності пресування суттєво підсилює ефект CO₂.
5. Порівняльні розрахунки засвідчили зменшення повної собівартості приблизно на ≈255 грн/т свіжої маси (за базових цін і доз), що масштабується до сотень тисяч - понад мільйона грн за сезон залежно від обсягів. Чутливіший аналіз підтвердив стійкість переваги CO₂ до коливань ціни газу, вартості/дози рідких консервантів та різниці у втратах CP; визначено граничні «точки беззбитковості». Запропоновані вимоги безпеки (герметизація, контроль CO₂, вентиляція) забезпечують відповідність охороні праці й мінімізують ризики під час експлуатації інжекційного вузла у виробничих умовах.