

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет
Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин**

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломного проекту

ступеня вищої освіти «Бакалавр» на тему:

**Модернізація зерносушарного комплексу шляхом впровадження
теплогенератора на твердому біопаливі**

Виконав: здобувач 4 курсу групи АІ-2-22

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

Наумик Антон Сергійович _____

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро – 2026

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

Ступінь вищої освіти: «Бакалавр»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис) (прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Наумик Антон Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація зерносушарного комплексу шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі

керівник роботи Золотовська Олена Володимирівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

« 5 » травня 2026 року № 912

2. Строк подання студентом роботи 07.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту Аналіз виробничої діяльності підприємства. Аналіз літературних джерел та обґрунтування актуальності дипломного проєкту. Аналіз конструктивно-режимних теплогенераторних установок для отримання зерносушарного комплексу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Обґрунтування існуючих технологій, конструкцій та обґрунтування теми дипломного проєкту 2. Обґрунтування використання біопалива для теплогенератора зерносушарки. 3. Конструкторська проробка проєкту. 4. Охорона праці та захист

навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка проєктних рішень. Висновки. Бібліографічний список.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Аналіз конструкцій Таблиці (А1). 2. Технологічна схема зерносушарного комплексу. (А1). 3. Загальний вигляд СЗШ-16 з теплогенератором (А1). 4. Шнек подачі біопалива. (А3). Вал шнека (А3). Патрубок подачі гарячого повітря (А3). Опора шнека (А3). Колосникова решітка (А3) 6. Техніко-економічна оцінка.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В., доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Бойко В.Б., доцент		

7. Дата видачі завдання: 11.03.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Характеристика господарства	11.03.26-11.04.26	
2	Аналіз актуальності проєкту	13.03.26-13.05.26	
3	Технологічно-конструктивний	14.04.26-21.05.26	
4	Охорона праці	15.04.26-20.05.26	
5	Економічний	19.04.26-7.06.26	
6	Графічна частина	10.05.65-7.06.65	

Здобувач

(підпис)

Наумик А.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Золотовська О.В.

(прізвище та ініціали)

№строк	Формат	Позначення	Найменування	Кільк.	Номер листа	Примітка
			Документація			
1	A4	52.ДП.104.000.000.ПЗ	Розрахунково -			
			пояснювальна записка	60		
2	A1	52.ДП.104.000.001.ТБ	Аналіз конструкцій	1	1	
3	A1	52.ДП.104.000.002.ТХ	Технологічна схема			
			зерносушарного комплексу	1	2	
			Складальне креслення			
4	A1	52.ДП.104.000.003.ВЗ	Вид загальний	1	3	
5	A4	52.ДП.104.000.001.СК	Шнек подачі	1	4	
			біопалива			
6	A4	52.ДП.104.000.002.СК	Вал шнека	1	4	
7	A4	52.ДП.104.000.003.СК	Опора шнека	1	4	
8	A4	52.ДП.104.000.004.СК	Патрубок подачі			
			Гарячого повітря	1	4	
9	A3	52.ДП.104.000.005.СК	Фланець			
			повітропроводу	1	4	
10	A4	52.ДП.104.000.006.СК	Колосникова решітка	1	4	
11	A1	52.ДП.104.000.000.ТБ	Техніко-економічна			
			оцінка	1	4	
				1	7	
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата	52.ДП.104.000.000.ПЗ	
Розроб.	Наумик А.С					
Перев.	Золотовська О.В.					
Н.Контр	Бойко В.Б.				Відомості дипломного проекту	
					Літ	Лист
						Листів
						60
					ДДАЕУ	

Затв.	Теслюк Г.В..				Група АІ-2-22
-------	--------------	--	--	--	---------------

АНОТАЦІЯ

Наумик А.С. Модернізація зерносушарного комплексу шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». – ДДАЕУ, Дніпро, 2026.

Розрахунково-пояснювальна записка проекту складається з п'яти розділів. У ній наведено обґрунтування існуючих установок в механізованому процесі сушіння. Основною метою проекту є зменшення витрат на паливно-мастильні матеріали, зниження негативного впливу на навколишнє середовище та скорочення споживання електричної енергії. У даній роботі аналізуються основи процесу сушіння, а також специфіка використання теплогенераторів у зерносушарних комплексах, їх технічні характеристики, переваги і недоліки такого підходу. Оцінка цього питання є важливою для покращення енергоефективності агропідприємств і сприяння сталому розвитку сільськогосподарського сектору. Розглянуто види сушильних установок. Обґрунтовано конструкторський розділ. Для її реалізації виконано необхідні технічні розрахунки.

Сформульовані основні положення з охорони праці при виконанні технологічних операцій та обслуговуванні техніки. Проведено техніко-економічне обґрунтування проекту.

Ключові слова: теплогенератор, зерносушарка, тверде біопаливо, біомаса, підвищення ефективності

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОБҐРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ПРОЄКТУ	9
1.1. Технологічні вимоги до процесу сушіння зерна	9
1.2 Обґрунтування конструктивних особливостей зерносушарок	10
1.3 Аналіз способів нагрівання повітря для зерносушарок	24
2. ОБґРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ЗЕРНОСУШАРКИ	29
2.1 Розробка схеми модернізованого зерносушильного комплексу	31
2.2 Обґрунтування принципу роботи теплогенератора	32
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ПРОРОБКА ПРОЕКТУ	35
3.1 Методика розрахунку основних параметрів	35
3.2 Тепловий баланс зерносушарки	45
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	49
4.1 Загальні вимоги охорони праці при експлуатації зерносушильних установок	49
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	49
4.3 Вимоги безпеки при експлуатації теплогенератора на біопаливі	50
4.5 Засоби індивідуального захисту працівників	51
4.6 Захист навколишнього середовища при експлуатації зерносушильного комплексу	51
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ	54
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

Стійкий розвиток агропромислового комплексу України безпосередньо пов'язаний із забезпеченням високої якості та конкурентоспроможності зернової продукції. Важливим етапом післязбиральної обробки зерна є сушіння, яке визначає його зберіжувальність, технологічні властивості та безпечність під час тривалого зберігання. Недостатнє або неякісне сушіння призводить до розвитку мікробіологічних процесів, самозігрівання та значних втрат продукції, що негативно впливає на економічні показники підприємств.

Процес сушіння зерна є енергоємним і характеризується значними витратами теплової енергії. У більшості зерносушильних установок як джерело тепла використовується природний газ або рідке паливо. В умовах нестабільності енергетичного ринку, зростання вартості традиційних енергоносіїв та необхідності підвищення рівня енергетичної незалежності держави особливої актуальності набуває впровадження альтернативних джерел енергії.

Перспективним напрямком є використання біомаси як відновлюваного енергетичного ресурсу. Україна володіє значним потенціалом твердого біопалива, сформованого за рахунок відходів рослинництва, деревообробної промисловості та переробних підприємств. Раціональне використання біомаси дозволяє не лише зменшити витрати на енергоносії, а й підвищити екологічну безпеку виробництва шляхом зниження викидів парникових газів та утилізації відходів.

Одним із технічно доцільних рішень є модернізація існуючих зерносушарок шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі. Проте ефективність такого рішення значною мірою залежить від правильного обґрунтування конструктивних параметрів теплогенератора, режимів його роботи, забезпечення стабільності процесу горіння та відповідності теплотехнічних характеристик вимогам технології сушіння зерна. Недостатня

узгодженість між параметрами джерела тепла та характеристиками сушильної установки може призвести до зниження ККД системи та погіршення якості зерна.

Таким чином, науково-технічне обґрунтування модернізації зерносушильної установки із застосуванням теплогенератора на твердому біопаливі є актуальним завданням, що має як практичне, так і економічне значення для аграрного сектору.

Метою дипломного проєкту є науково-технічне обґрунтування модернізації зерносушарки шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі з визначенням його раціональних конструктивних та режимних параметрів.

- Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: виконати аналіз сучасних конструкцій зерносушильних установок та систем їх теплопостачання;
- фізико-хімічні особливості твердого біопалива як енергетичного ресурсу;
- теплотехнічне обґрунтування процесу сушіння зерна; визначити необхідну теплову потужність модернізованої установки; розробити конструктивну схему теплогенератора на твердому біопаливі;
- обґрунтувати основні параметри його роботи;
- оцінити техніко-економічну ефективність запропонованої модернізації.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості впровадження розроблених технічних рішень на аграрних підприємствах з метою підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна та зниження витрат на паливо.

1. ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ПРОЄКТУ

1.1. Технологічні вимоги до процесу сушіння зерна

Зерно як об'єкт сушіння характеризується складною капілярно-пористою структурою, наявністю води різних форм зв'язку та чутливістю до температурного впливу. Вода в зерні перебуває у вигляді вільної, капілярно-зв'язаної та адсорбційної, що зумовлює складність процесу її видалення. Інтенсивність масо- та теплообміну під час сушіння залежить від фізико-механічних властивостей культури, її початкової вологості, температури сушильного агента та швидкості руху повітря.

Основною метою сушіння є зниження вологості зерна до кондиційних значень, що забезпечують його безпечне зберігання без втрати посівних і харчових якостей. Для більшості зернових культур допустима кінцева вологість становить 13–15 %, тоді як початкова вологість після збирання може досягати 18–30 %, а для кукурудзи – до 35 % і більше. Таким чином, процес сушіння супроводжується значним тепловим навантаженням і потребує раціонального енергозабезпечення.

Важливою технологічною вимогою є обмеження температури нагрівання зерна. Перегрів призводить до зниження схожості насіннєвого матеріалу, погіршення продовольчих характеристик та утворення мікротріщин у структурі зернівки. Температура сушильного агента визначається видом культури та її призначенням. Для продовольчого зерна вона, як правило, не перевищує 60–80 °С, для насіннєвого матеріалу – 40–55 °С. При цьому температура нагрівання самого зерна повинна бути нижчою за температуру теплоносія.

Процес сушіння зерна є нестационарним та складається з періодів прогрівання, постійної швидкості сушіння та зниження швидкості сушіння. У початковий період видаляється переважно вільна вода, надалі процес обмежується внутрішньою дифузією води до поверхні зернівки. Саме на цей

стадії визначальну роль відіграють температурний режим та рівномірність подачі теплоносія.

Однією з ключових вимог є забезпечення рівномірності сушіння по всьому об'єму зернової маси. Нерівномірність температурного поля або швидкості повітряного потоку призводить до пересушування частини зерна та недосушування іншої, що знижує якість продукції та ускладнює її подальше зберігання. Тому зерносушильна установка повинна забезпечувати стабільні параметри теплоносія та рівномірний розподіл повітря.

Суттєвим показником ефективності є питомі витрати теплоти на видалення 1 кг вологи. Вони залежать від типу сушарки, організації теплообміну, вологості навколишнього повітря та ККД джерела тепла. Зменшення питомих витрат теплоти є одним із головних напрямів підвищення енергоефективності зерносушильних установок.

З технологічної точки зору до процесу сушіння висуваються такі основні вимоги: забезпечення заданої кінцевої вологості зерна; обмеження максимально допустимої температури нагрівання; мінімізація механічних пошкоджень зерна; рівномірність сушіння; мінімальні питомі енерговитрати; пожежна та екологічна безпечність процесу.

Таким чином, ефективність сушіння зерна визначається узгодженістю параметрів сушильної камери та джерела теплової енергії. Саме тому при модернізації зерносушарки шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі особливого значення набуває правильне визначення теплової потужності, температурного режиму та стабільності подачі теплоносія.

1.2 Обґрунтування конструктивних особливостей зерносушарок

Шахтна зерносушарка є установкою безперервної дії, призначеною для зниження вологості зернової маси до кондиційних показників шляхом пропускання нагрітого повітря через шар зерна, що самопливом переміщується

у вертикальній шахті. Даний тип сушарок найбільш широко застосовується на елеваторах та зернопереробних підприємствах завдяки високій продуктивності, надійності та можливості стабільного підтримання технологічних режимів.

Конструктивно шахтна зерносушарка (рис.1.1) являє собою вертикальний корпус прямокутного або круглого перерізу, усередині якого розміщена сушильна шахта з системою повітророзподільних коробів. У верхній частині розташований завантажувальний пристрій, що забезпечує рівномірний розподіл зерна по перерізу шахти. Важливою умовою ефективної роботи є формування однорідного шару матеріалу, оскільки нерівномірне заповнення призводить до локального перегріву або недосушування окремих ділянок.

Основною робочою зоною є сушильна шахта, в якій зерно рухається вниз під дією сили тяжіння. Швидкість його переміщення регулюється розвантажувальним механізмом, що розташований у нижній частині установки. Усередині шахти по чергово встановлені повітророзподільні та відвідні короби жалюзійного типу, розміщені у шаховому порядку. Така конструкція забезпечує перехресний рух теплоносія через шар зерна та рівномірний розподіл температурного поля по висоті сушильної камери.

Джерелом теплової енергії є теплогенератор, який може працювати на газовому, рідкому або твердому паливі. У випадку модернізації передбачається використання теплогенератора на твердому біопаливі. Теплогенератор складається з камери згоряння, теплообмінника, системи подачі повітря для горіння та вузла видалення продуктів згоряння. Нагріте повітря за допомогою вентилятора подається у повітророзподільну систему сушарки та проходить через зерновий шар.

Принцип роботи шахтної зерносушарки полягає у поєднанні процесів тепло- та масообміну під час контакту нагрітого повітря із зерном. Після завантаження зернова маса поступово переміщується вниз, проходячи через зону нагрівання та зону сушіння. У початковий період відбувається прогрівання зерна до температури, близької до температури сушильного агента. Надалі починається інтенсивне випаровування вологи з поверхні зернівки. На

завершальному етапі швидкість сушіння знижується, оскільки видалення вологи обмежується внутрішньою дифузією з центральних шарів зернівки до її поверхні.

Температура сушильного агента визначається видом культури та її призначенням і, як правило, перебуває в межах 60-120°C, тоді як температура самого зерна не повинна перевищувати допустимих значень для збереження його технологічних властивостей. Регулювання температури та витрати повітря здійснюється зміною режимів роботи теплогенератора та вентилятора.

У нижній частині шахти розташована зона охолодження, де через зерно пропускається атмосферне повітря. Охолодження є необхідним етапом технологічного процесу, оскільки дозволяє знизити температуру зерна перед зберіганням, запобігти конденсації вологи та розвитку процесів самозігрівання. Після проходження зони охолодження зерно вивантажується через дозувальний механізм, який одночасно визначає тривалість перебування матеріалу у сушильній камері.

Шахтна зерносушарка працює за принципом фільтраційного сушіння, коли теплоносій проходить через нерухомий або повільно рухомий шар матеріалу. Інтенсивність процесу визначається температурою і швидкістю повітря, товщиною шару зерна, його початковою вологістю та коефіцієнтом тепловіддачі. Важливою характеристикою є питомі витрати теплоти на видалення одного кілограма вологи, що значною мірою залежать від ефективності роботи теплогенератора.

До основних переваг шахтних зерносушарок належать висока продуктивність, безперервність процесу, відносно рівномірне сушіння та можливість автоматизації. Разом з тим вони характеризуються значними габаритами, металомісткістю та залежністю ефективності роботи від стабільності параметрів теплопостачання. Саме тому модернізація таких установок шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі потребує ретельного обґрунтування його теплової потужності, режимів роботи та конструктивного виконання, що дозволить забезпечити необхідну якість

сушіння за мінімальних енергетичних витрат. До недоліків можна віднести значні габарити; висока металомісткість; залежність якості сушіння від рівномірності подачі повітря; потреба у стабільному джерелі тепла.

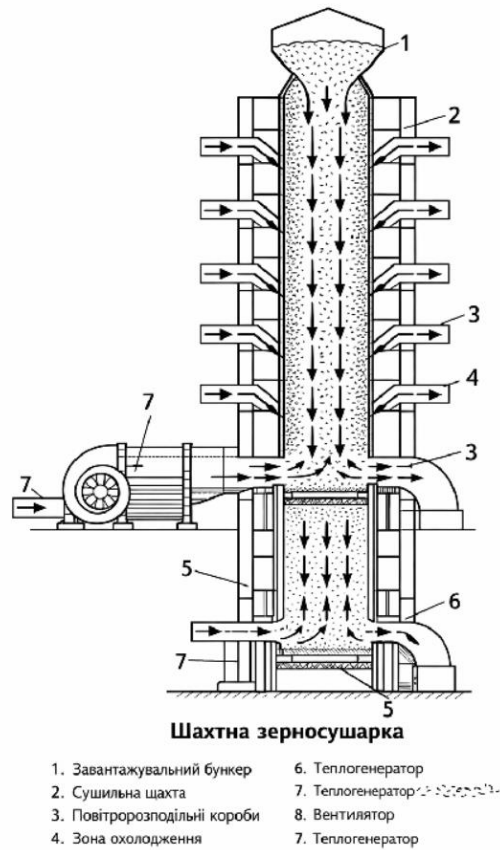
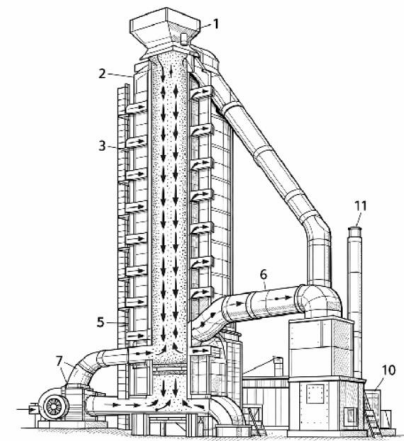


Рисунок 1.1 – Загальна схема шахтної зерносушарки

Зерносушарка М-819 шахтного типу (рис.1.2) призначена для зниження вологості зернових культур до кондиційних показників з метою забезпечення їх безпечного зберігання або подальшої переробки. Установка застосовується на елеваторах та агропідприємствах для сушіння пшениці, ячменю, кукурудзи, жита та інших культур. Сушарка працює у безперервному режимі, що дозволяє інтегрувати її у технологічні лінії післязбиральної обробки зерна.



Зерносушарка шахтного типу М-819 (Польська)

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Завантажувальний бункер | 6. Повітропроводи гарячого повітря |
| 2. Розподільний шнек | 7. Вентилятор гарячого повітря |
| 3. Сушильна шахта | 8. Рециркуляційний шнек |
| 4. Зона охолодження | 9. Блок теплогенератора |
| 5. Розвантажувальний механізм | 10. Камера згоряння |
| 6. Рециркулятор гарячого повітря | 11. Димовід |

Рисунок 1.2 – Загальний вигляд М-819

Конструктивно М-819 являє собою вертикальну шахту, всередині якої розміщені повітророзподільні коробки, розташовані у шаховому порядку. Зерно подається у верхню частину сушарки та самопливом переміщується вниз під дією сили тяжіння. Швидкість його руху регулюється розвантажувальним механізмом, що визначає тривалість перебування матеріалу в зоні сушіння.

Нагріте повітря від теплогенератора (у базовій комплектації – газового пальника) подається вентиляторами у повітророзподільну систему та проходить поперек шару зерна. У процесі контакту відбувається передача тепла зерну і випаровування вологи. Після сушіння зерно проходить зону охолодження, де через нього пропускається атмосферне повітря, що знижує температуру перед вивантаженням і запобігає самозігріванню під час зберігання.

Таким чином, принцип роботи сушарки базується на поєднанні самопливного руху зерна та фільтраційного пропускання теплоносія через його шар із забезпеченням безперервності процесу.

Переваги зерносушарки М-819: безперервний режим роботи та стабільна продуктивність; відносно рівномірне сушіння; можливість автоматичного регулювання температури; надійність і простота конструкції.

Недоліки: значна енергоємність при використанні природного газу; залежність ефективності від стабільності теплопостачання; значні габарити та металомісткість; потреба у регулярному очищенні повітряних каналів.

З огляду на зростання вартості традиційних енергоносіїв, доцільним є розгляд модернізації сушарки М-819 шляхом впровадження теплогенератора на твердому біопаливі з метою зниження експлуатаційних витрат.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд СЗШ-16

Зерносушарка СЗШ-16 є стаціонарною шахтною установкою безперервної дії, призначеною для зниження вологості зернових, зернобобових та олійних культур до кондиційних показників перед їх зберіганням або переробкою. Номінальна продуктивність сушарки становить близько 16 т/год залежно від культури та початкової вологості зерна. Установка широко застосовується на елеваторах і зернопереробних підприємствах середньої потужності.

Конструктивно сушарка складається з вертикальної сушильної шахти, завантажувального пристрою, повітророзподільних коробів, теплогенераторного блоку, вентиляторів подачі та відведення повітря, зони

охолодження та розвантажувального механізму. Усередині шахти розміщені повітряні коробки жалюзійного типу, встановлені у шаховому порядку, що забезпечує рівномірний перехресний рух нагрітого повітря через шар зерна. Джерелом тепла є теплогенератор, який у базовому виконанні працює на природному газі або рідкому паливі.

Принцип роботи сушарки полягає у самопливному переміщенні зерна вниз по шахті та одночасному пропусканні через нього нагрітого повітря. У процесі контакту теплоносія із зерном відбувається його нагрівання та випаровування вологи, яка видаляється разом із відпрацьованим повітрям. У нижній частині розташована зона охолодження, де зерно продувається атмосферним повітрям для зниження температури перед вивантаженням і зберіганням.

СЗШ-16 характеризується безперервністю роботи, відносною рівномірністю сушіння та можливістю автоматичного регулювання режимів. Разом із тим вона має значні енерговитрати при використанні традиційних видів палива та потребує стабільного теплопостачання, що робить актуальною її модернізацію із застосуванням альтернативних джерел теплової енергії.

Таблиця 1.1

Порівняння основних характеристик

Показник	СЗШ-16	М-819
Тип	Шахтна, безперервної дії	Шахтна, безперервної дії
Продуктивність	≈ 16 т/год	15–20 т/год
Джерело тепла	Газ / рідке паливо / можливе біопаливо	Переважно природний газ
Система повітророзподілу	Жалюзійні коробки	Вдосконалена шахова схема
Рівень автоматизації	Середній	Вищий
Енергоефективність	Залежить від модернізації	Відносно стабільна
Вартість впровадження	Нижча	Вища

Аналіз показує, що обидві сушарки мають подібний принцип роботи та конструктивну основу. Проте СЗШ-16 є більш доцільною для модернізації в умовах переходу на альтернативні джерела теплової енергії, оскільки її конструкція простіша та легше адаптується до встановлення теплогенератора

на твердому біопаливі. М-819 характеризується вищим рівнем автоматизації, але значною мірою залежить від стабільного постачання природного газу.

Таким чином, з огляду на зростання вартості традиційних енергоносіїв та необхідність підвищення енергонезалежності агропідприємств, модернізація шахтних сушарок типу СЗШ-16 із впровадженням теплогенератора на твердому біопаливі є технічно та економічно обґрунтованим напрямом удосконалення сушильного обладнання.

Барабанні зерносушарки належать до установок безперервної дії, в яких процес сушіння відбувається під час переміщення зерна всередині обертового циліндричного барабана при його контакті з гарячими газами або нагрітим повітрям. Даний тип сушарок застосовується переважно для сушіння зерна з високою початковою вологістю, а також для обробки сипких матеріалів різної природи.

Конструктивно барабанна сушарка складається з металевого циліндричного барабана, встановленого під невеликим кутом до горизонту та змонтованого на опорних роликах. Усередині барабана розміщені лопатки або підйомні полиці, які під час обертання піднімають зерно та пересипають його крізь потік гарячого теплоносія. Така конструкція забезпечує інтенсивний тепло- і масообмін.

До основних вузлів барабанної сушарки належать завантажувальний пристрій, обертовий барабан із приводом, пальниковий або теплогенераторний блок, вентилятор подачі теплоносія, система відведення відпрацьованих газів та розвантажувальний пристрій. У деяких конструкціях передбачені циклони або фільтри для очищення повітря від пилу.

Принцип роботи полягає у безперервній подачі зерна у верхню частину барабана. Під дією обертання та нахилу барабана матеріал поступово переміщується до виходу. Одночасно через барабан проходить гарячий теплоносій –у прямотечійному або протитечійному режимі. Під час контакту зерна з нагрітим повітрям відбувається його прогрівання та випаровування вологи. Інтенсивність процесу визначається температурою теплоносія,

швидкістю його руху, частотою обертання барабана та тривалістю перебування зерна всередині сушарки.

Барабанні сушарки забезпечують високу інтенсивність сушіння завдяки активному перемішуванню зерна. Вони відзначаються відносною простотою конструкції та можливістю роботи з матеріалами різної вологості. Разом із тим для зернових культур існує ризик механічного пошкодження зернівки через постійне пересипання і тертя, що обмежує їх використання для насінневого матеріалу.

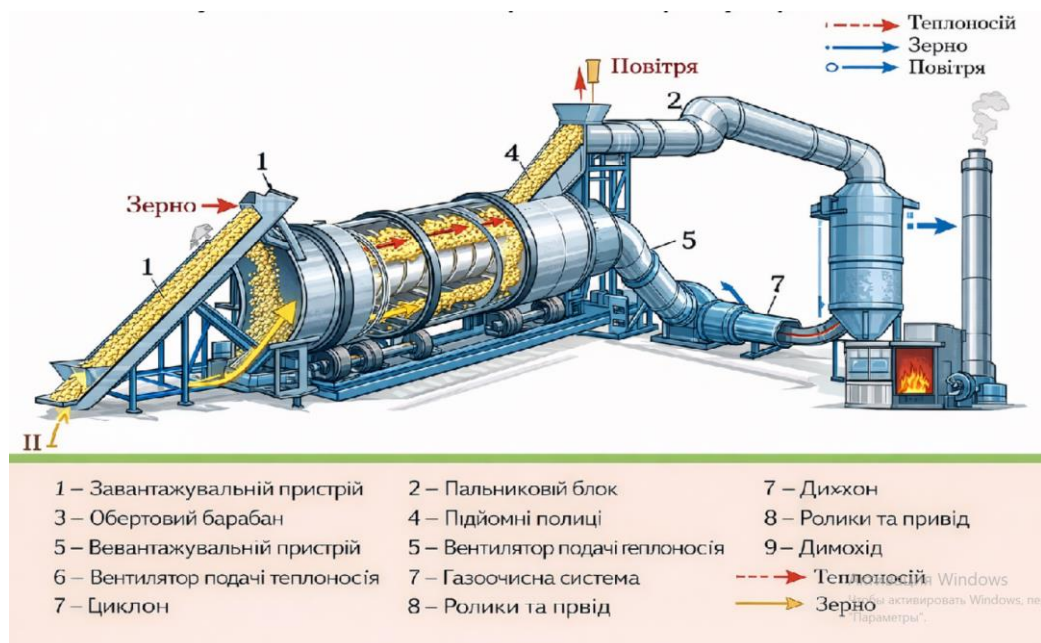


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд барабанної зерносушарки

До переваг барабанних сушарок належать компактність, висока продуктивність і можливість роботи з дуже вологим зерном. Недоліками є підвищені тепловтрати з відпрацьованими газами, значні енерговитрати, складність точного регулювання температурного режиму та підвищений рівень механічного травмування зерна.

У порівнянні із шахтними сушарками барабанні установки забезпечують більш інтенсивний процес сушіння, однак поступаються їм у рівномірності обробки зернової маси та економічності при великих обсягах роботи. Саме тому на елеваторах частіше застосовують шахтні сушарки, тоді як барабанні

використовуються для спеціальних технологічних завдань або при необхідності швидкого видалення значної кількості вологи.

Колонкова зерносушарка (рис.1.5) складається з вертикальної сушильної колони (або циліндричного/призматичного корпусу) з перфорованими стінками, повітроподаючого тракту (вентилятор, повітропровід, камера/пленум) та системи нагріву повітря (пальник або теплогенератор). Зерно подається зверху й рухається вниз самопливом тонким шаром у робочій зоні. Нагріте повітря подається поперек шару зерна (cross-flow), проходить через зернову масу та виходить назовні як відпрацьоване вологе повітря. Перевагою колонкових сушарок є відносна простота й модульність, однак для дипломного обґрунтування важливо зазначити, що через “відкритість” повітряних потоків зростають втрати теплоти та вимоги до аспірації/пилоочищення, що може зменшувати очікуваний ефект від переходу на біопаливо.

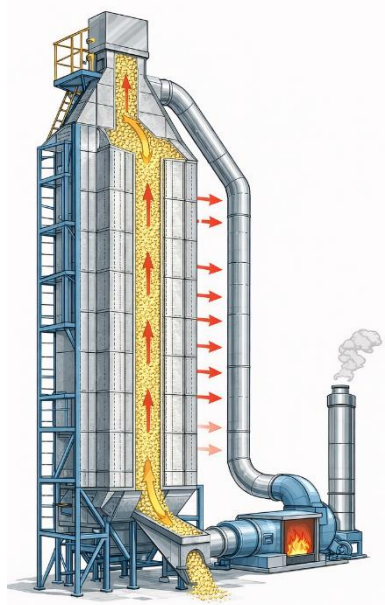


Рисунок 1.6 – Колонкова (модульна) зерносушарка

Баштові сушарки (рис.1.7) mixed-flow належать до поточкових (continuous-flow) установок, у яких зерно безперервно переміщується вниз у шахті, а повітря вводиться в зерновий потік через систему каналів/коробів під різними кутами та в різних напрямках. На відміну від класичного cross-flow, змішаний потік дає кращу рівномірність температури та вологості по перерізу зернового шару (менше “пересушування” біля входу повітря і “недосушування” в

глибині). Для модернізації під біопаливний теплогенератор така сушарка технічно сумісна (подача гарячого повітря), але зазвичай потребує більш складного узгодження автоматики, вентсистеми та повітропроводів, тому в умовах дипломного проєкту її доцільно наводити як сучасну альтернативу, але не як основний об'єкт модернізації.

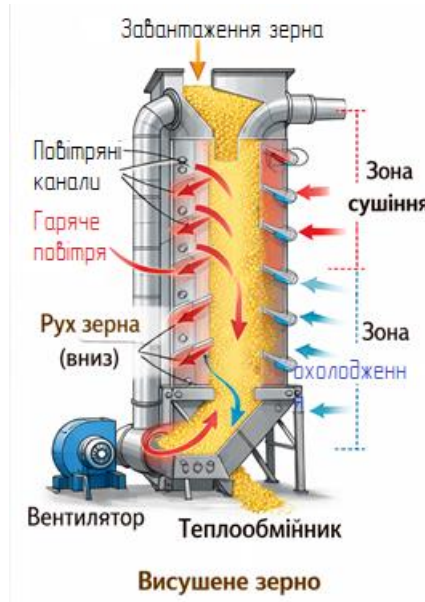


Рисунок 1.7 - Баштова сушарка типу mixed-flow (змішаний потік).

Рециркуляційні сушарки (рис.1.8) працюють циклічно: зерно завантажується порціями, проходить через зону сушіння нагрітим повітрям, після чого переміщується у зону темперування (витримки) для вирівнювання вологи в зернівці, далі знову повертається на сушіння. Така організація процесу покращує якість сушіння (особливо для насіннєвого зерна), однак ставить підвищені вимоги до стабільності температури теплоносія та точності керування режимами. При використанні твердого біопалива (де можливі коливання тепловиділення) це часто ускладнює автоматизацію й підтримання постійного режиму, тому рециркуляційні сушарки в дипломі варто показати як якісні, але більш складні для модернізації під біопаливо.

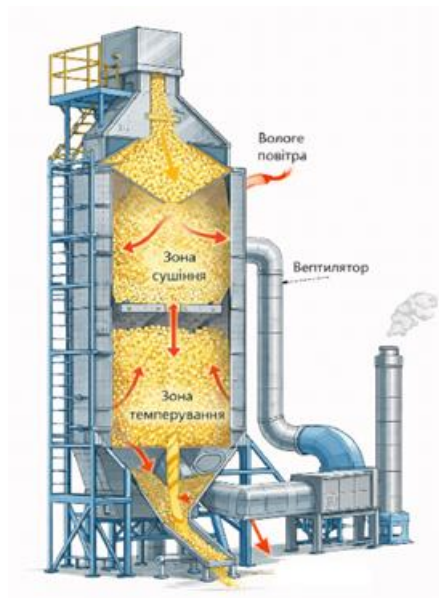


Рисунок 1.8 - Рециркуляційна (порційна) сушарка: секції сушіння та температурування

Для обґрунтування доцільності вибору типу сушильної установки доцільно розглянути конкретні приклади барабанних зерносушарок, що застосовуються в агропромисловому виробництві. Аналіз виконано на прикладі моделей різних виробників, які відрізняються продуктивністю, конструктивним виконанням та рівнем автоматизації.

Барабанна сушарка БС-6 (рис.1.9) є установкою безперервної дії з обертовим циліндричним барабаном, встановленим під невеликим кутом до горизонту. Переміщення зерна відбувається за рахунок обертання барабана та сили тяжіння. Усередині розташовані підйомні полиці, що забезпечують пересипання зерна крізь потік теплоносія.



Рисунок 1.9 - Барабанна сушарка БС-6 (Україна)

Основні характеристики:

- продуктивність – до 0,2–1,0 т/год (залежно від вологості);
- швидкість обертання – 6–10 об/хв;
- можливість роботи з різними джерелами тепла;
- відносно проста конструкція.

Дана модель є прикладом компактної сушарки для фермерських

Барабанні сушарки компанії Sukup (рис.1.10) використовуються у великих агропідприємствах. Конструкція передбачає великий обертовий барабан із системою автоматичного контролю температури та подачі теплоносія.

Характерні особливості:

- висока продуктивність (до 10–20 т/год і більше);
- автоматизоване керування;
- ефективна система газоочищення;
- робота переважно на природному газі або дизельному паливі.



Рисунок 1.10 - Промислова барабанна сушарка Sukup Rotary Dryer (США)

Промисловий тип сушарок Industrial Rotary Drum Dryer (рис.1.11) використовується у зернопереробних комплексах великої потужності. Відрізняється значними габаритами, розвиненою системою повітропроводів та високою тепловою потужністю.

Перевагами є:

- інтенсивний теплообмін;

- можливість сушіння зерна з високою вологістю;
- адаптація під різні види палива.
- Недоліками залишаються:
- значні тепловтрати;
- підвищене механічне травмування зерна;
- складність регулювання рівномірності сушіння.



Рисунок 1.11 - Industrial Rotary Drum Dryer

Камерні та конвеєрні сушарки застосовуються переважно для спеціальних технологічних умов або невеликих обсягів переробки. Їх використання на елеваторах обмежене, а модернізація під біопаливний теплогенератор часто є економічно недоцільною через невисоку продуктивність та специфічність конструкції.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що з позиції впровадження теплогенератора на твердому біопаливі найбільш раціональною базою для модернізації є шахтна сушарка типу СЗШ-16. Її повітряна схема сушіння легко узгоджується з теплогенератором непрямого нагріву через теплообмінник, що виключає контакт зерна з продуктами згоряння. Конструкція є достатньо простою, технологічно зрозумілою та поширеною в господарствах, що дозволяє

мінімізувати обсяг конструктивних змін та забезпечити економічний ефект від переходу на альтернативне паливо.

Таблиця 1.2

Порівняльна оцінка типів сушарок з позиції переходу на біопаливо

Тип сушарки	Можливість непрямого нагріву	Складність модернізації	Енерговтрати	Доцільність впровадження біопалива
Шахтна (СЗШ)	Висока	Невелика	Середні	Найбільш доцільна
Колонкова	Можлива	Середня	Підвищені	Можлива, але менш ефективна
Mixed-flow	Висока	Висока	Низькі	Ефективна, але складна та дорога
Рециркуляційна	Можлива	Висока	Середні	Технологічно складна
Камерна	Обмежена	Невиправдана	Високі	Малоефективна

1.3 Аналіз способів нагрівання повітря для зерносушарок

Ефективність роботи зерносушарки значною мірою визначається способом нагрівання сушильного агента –повітря, що подається в сушильну камеру. Саме джерело теплової енергії формує енергетичну складову собівартості сушіння та впливає на екологічні показники процесу.

У сучасній практиці застосовують такі основні способи нагрівання повітря:

1. Газові пальники (прямий або непрямий нагрів).
2. Рідкопаливні пальники (дизель, мазут).
3. Парові та водяні теплообмінники.
4. Електричні нагрівачі.
5. Твердопаливні теплогенератори (біомаса).

Газові системи нагрівання є найбільш поширеними у шахтних та баштових сушарках. Вони характеризуються стабільністю температурного режиму,

високим коефіцієнтом корисної дії та простотою автоматизації. Проте в умовах постійного зростання вартості природного газу їх експлуатація стає економічно затратною. Крім того, залежність від централізованого постачання газу знижує енергетичну автономність агропідприємств.

Рідкопаливні системи мають подібні характеристики, але відзначаються вищою вартістю палива, складністю зберігання та підвищеними екологічними ризиками. Їх застосування доцільне переважно як резервне джерело тепла.

Парові та водяні теплообмінники використовуються переважно на великих підприємствах, де існують централізовані котельні. Такий спосіб забезпечує непрямий нагрів повітря та виключає контакт зерна з продуктами згоряння, проте потребує розвиненої теплотранспортної інфраструктури.

Електричний нагрів відзначається високою екологічністю та простотою керування, однак через значні витрати електроенергії практично не застосовується для сушіння великих обсягів зерна.

Альтернативою традиційним джерелам тепла є теплогенератори на твердому біопаливі (деревна тріска, пелети, агровідходи, лушпиння, солома). Принцип їх роботи полягає у спалюванні біомаси в камері згоряння з подальшою передачею теплоти через теплообмінник повітрю, що подається у сушарку. За умови використання непрямого нагріву виключається контакт зерна з продуктами згоряння, що забезпечує збереження якості продукції.

Основними перевагами використання теплогенератора на біопаливі є: суттєве зниження витрат на енергоносії у порівнянні з природним газом; енергетична незалежність підприємства; можливість використання власних відходів як палива; зменшення собівартості сушіння; екологічна нейтральність біомаси (вуглецево-нейтральний цикл).

Економічний ефект від впровадження біопаливного теплогенератора особливо відчутний у господарствах, що мають власну сировинну базу (солома, відходи переробки зерна, деревні відходи). При цьому капітальні вкладення у встановлення теплогенератора окуповуються протягом декількох сезонів за рахунок різниці у вартості палива.

З технологічної точки зору найбільш раціональним є застосування теплогенератора з непрямым нагрівом повітря через теплообмінник, що повністю відповідає конструкції шахтної зерносушарки типу СЗШ-16. Така схема дозволяє забезпечити стабільну температуру сушильного агента, безпечність процесу та збереження якісних показників зерна.

Таким чином, аналіз способів нагрівання повітря показує, що в умовах сучасного агропромислового виробництва найбільш економічно та технологічно доцільним рішенням є впровадження теплогенератора на твердому біопаливі з непрямою схемою нагріву повітря.

На рисунку 1.12 представлено загальний вигляд теплогенератора на твердому біопаливі



Рисунок 1.12- Теплогенератор з теплообмінником на твердому біопаливі

Конструктивно теплогенератор складається з бункера для подачі біопалива, механізму дозованої подачі (шнекового транспортера), камери згоряння, теплообмінника повітряного типу, вентилятора подачі повітря та димовідвідної труби. Паливо (деревна тріска, пелети, агровідходи) надходить із бункера у камеру згоряння, де відбувається контрольоване горіння. Теплова енергія передається через теплообмінні поверхні повітрю, яке подається вентилятором до сушильної шахти.

Запропонована конструкція реалізує принцип непрямого нагріву, тобто продукти згоряння не контактують із зерном. Це забезпечує збереження якісних

показників продукції та відповідає технологічним вимогам до сушіння продовольчого і насіннєвого зерна.

Впровадження теплогенератора передбачається шляхом заміни існуючого газового або рідкопаливного джерела тепла у складі сушарки СЗШ-16. Підключення здійснюється через повітропровід до системи подачі сушильного агента без внесення суттєвих змін у конструкцію самої шахти. Температурний режим регулюється зміною інтенсивності подачі палива та витрати повітря, що дозволяє підтримувати необхідну температуру сушильного агента в межах технологічних параметрів.



Рисунок 1.13 – Проект модернізації СЗШ-16 з теплогенератором

Висновки

Аналіз різних типів зерносушильних установок показує, що найбільш технічно та економічно обґрунтованим рішенням для впровадження теплогенератора на твердому біопаливі є модернізація шахтної зерносушарки типу СЗШ-16 (рис.1.13). Така модернізація забезпечує мінімальні

конструктивні зміни, стабільність технологічного процесу та зниження витрат на енергоносії без погіршення якості зерна.

Основною перевагою такого рішення є зниження експлуатаційних витрат за рахунок використання дешевшого місцевого палива та підвищення енергетичної незалежності підприємства. Крім того, модернізація не потребує повної реконструкції сушильної установки, що робить її технічно та економічно доцільною.

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ЗЕРНОСУШАРКИ

Одним із важливих напрямів підвищення енергоефективності зерносушильних комплексів є використання відновлюваних джерел енергії, зокрема твердого біопалива. Традиційно зерносушарки працюють на природному газі або рідкому паливі, що зумовлює значні експлуатаційні витрати та залежність від вартості енергоресурсів. Тому впровадження теплогенераторів, які використовують біомасу, дозволяє істотно зменшити собівартість сушіння зерна та підвищити енергетичну автономність сільськогосподарських підприємств.

Аналіз сучасних енергоносіїв показує, що традиційні види палива, такі як природний газ та дизельне паливо, мають високу теплотворну здатність, однак їх використання пов'язане зі значними експлуатаційними витратами та залежністю від постачання енергоресурсів. Крім того, застосування рідкого або газоподібного палива не дозволяє використовувати місцеві відходи сільськогосподарського виробництва як енергетичний ресурс.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання твердого біопалива у вигляді пелет рослинного походження. Для модернізованого зерносушильного комплексу на базі шахтної зерносушарки СЗШ-16 доцільно використовувати пелети з лушпиння соняшнику або деревні пелети, які характеризуються стабільними фізико-механічними та теплотехнічними властивостями. Пелети являють собою пресовані гранули діаметром 6–10 мм, виготовлені з подрібненої біомаси. У процесі гранулювання відбувається ущільнення матеріалу, що забезпечує високу насипну щільність палива та полегшує його транспортування і зберігання.

Теплотворна здатність пелет становить у середньому 16–18 МДж/кг, що дозволяє отримувати достатню теплову потужність для нагрівання сушильного агента. Для порівняння, теплота згоряння природного газу становить близько 33–35 МДж/м³, однак використання біопалива є економічно вигіднішим за рахунок нижчої вартості та місцевого походження ресурсу. Крім того,

використання пелет забезпечує стабільний процес горіння, рівномірний тепловий режим і можливість автоматичного регулювання теплової потужності теплогенератора (табл.2.1)

Таблиця 2.1

Техніко-фізичні показники

Показник	Природний газ	Дизельне паливо	Деревні пелети	Пелети з лушпиння соняшнику
Теплотворна здатність	33–35 МДж/м ³	42–43 МДж/кг	16–18 МДж/кг	17–19 МДж/кг
Середня вологість	практично відсутня	відсутня	8–10 %	8–12 %
Насипна щільність	—	—	600–700 кг/м ³	550–650 кг/м ³
Автоматизація подачі	висока	середня	висока (шнек)	висока (шнек)
Вартість палива	висока	дуже висока	середня	низька
Доступність у с/г	залежить від газових мереж	обмежена	висока	дуже висока
Екологічність	середня	Низька	висока	висока
Можливість використання відходів	відсутня	відсутня	частково	висока

Важливою перевагою біопалива є можливість механізації та автоматизації процесу подачі. Завдяки рівномірній формі пелет їх можна стабільно транспортувати шнековими транспортерами, що забезпечує рівномірне дозування палива і підтримання стабільного температурного режиму сушіння зерна.

У модернізованому зерносушильному комплексі передбачається сушіння основних сільськогосподарських культур, характерних для більшості аграрних підприємств України, а саме пшениці, кукурудзи та соняшнику. Під час збирання, транспортування та первинної очистки цих культур утворюється значна кількість рослинних відходів, які можуть бути використані як енергетична сировина для роботи теплогенератора.

Найбільш цінним видом біопалива є лушпиння соняшнику, яке утворюється під час переробки насіння соняшнику на олійноекстракційних

підприємствах або при очищенні насіння перед зберіганням. Лушпиння характеризується високою теплотворною здатністю, яка становить приблизно 17–19 МДж/кг, а також низькою вологістю і хорошою сипучістю. Завдяки цим властивостям воно може використовуватися як паливо для теплогенераторів у вигляді гранул або пелет. Крім того, лушпиння добре транспортується шнековими механізмами, що дозволяє організувати автоматизовану подачу палива до камери згоряння.

При доробці зерна пшениці та кукурудзи на зерноочисних машинах утворюються відходи первинної очистки: полова, зернова домішка, подрібнені рослинні частинки та пил. Частина цих відходів може використовуватись як допоміжне біопаливо після попереднього підсушування або гранулювання. Такі матеріали мають меншу теплотворну здатність, однак можуть застосовуватись у суміші з основним паливом.

Крім того, значний енергетичний потенціал мають рослинні рештки кукурудзи (стебла, листя, качани), які залишаються після збирання врожаю. Після подрібнення та пресування вони можуть використовуватись для виробництва пелет або брикетів, що також придатні для використання у теплогенераторах.

2.1 Розробка схеми модернізованого зерносушильного комплексу

Зерно з приймального бункера 1 за допомогою норії подається у верхню частину шахтної зерносушарки через завантажувальний патрубок. У сушильній шахті зерно переміщується вниз під дією сили тяжіння та проходить через зону сушіння і зону охолодження.

Нагрівання сушильного агента здійснюється у теплогенераторі на твердому біопаливі. Біопаливо з бункера подається у камеру згоряння за допомогою шнека. У процесі згоряння утворюється теплова енергія, яка через теплообмінник передається повітрю.

Нагріте повітря вентилятором подається через повітропровід у повітророзподільні коробки сушильної шахти. Під час проходження через шар зерна гаряче повітря відбирає вологу, забезпечуючи процес сушіння.

Висушене зерно вивантажується через розвантажувальний пристрій і подається норією до місця подальшого транспортування або зберігання.

Продукти згоряння відводяться через димохід, що забезпечує безпечну роботу теплогенератора та виключає контакт зерна з димовими газами.

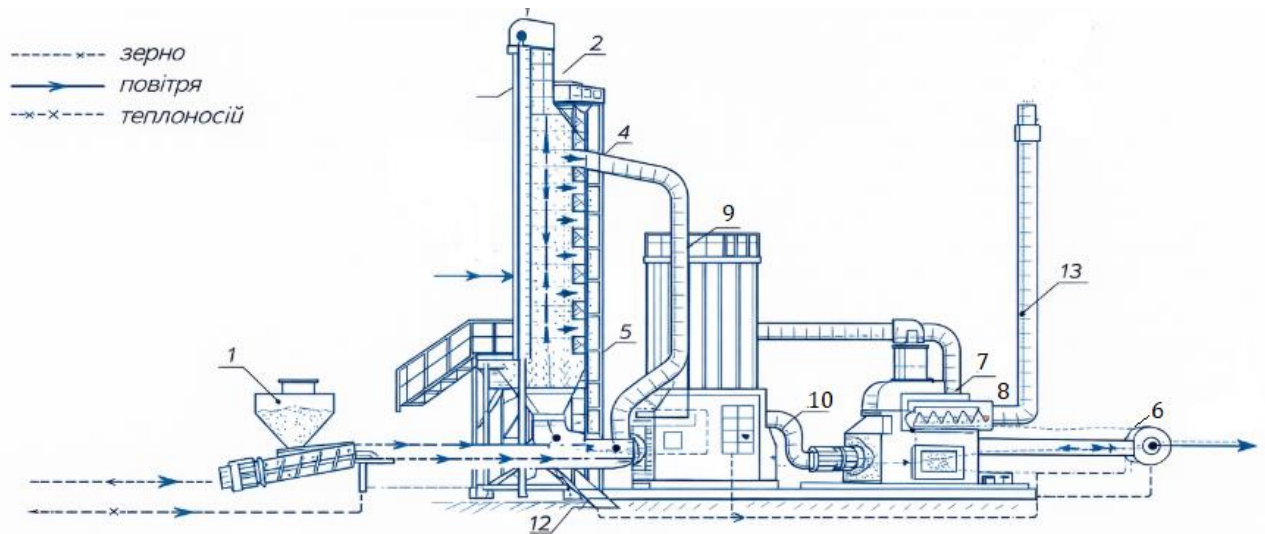


Рисунок 2.1 – Модернізований зерносушильний комплекс

2.2 Обґрунтування принципу роботи теплогенератора

Теплогенератор призначений (рис.2.2) для отримання теплової енергії шляхом спалювання твердого біопалива та подальшого нагрівання повітря, яке використовується як сушильний агент у зерносушарці.

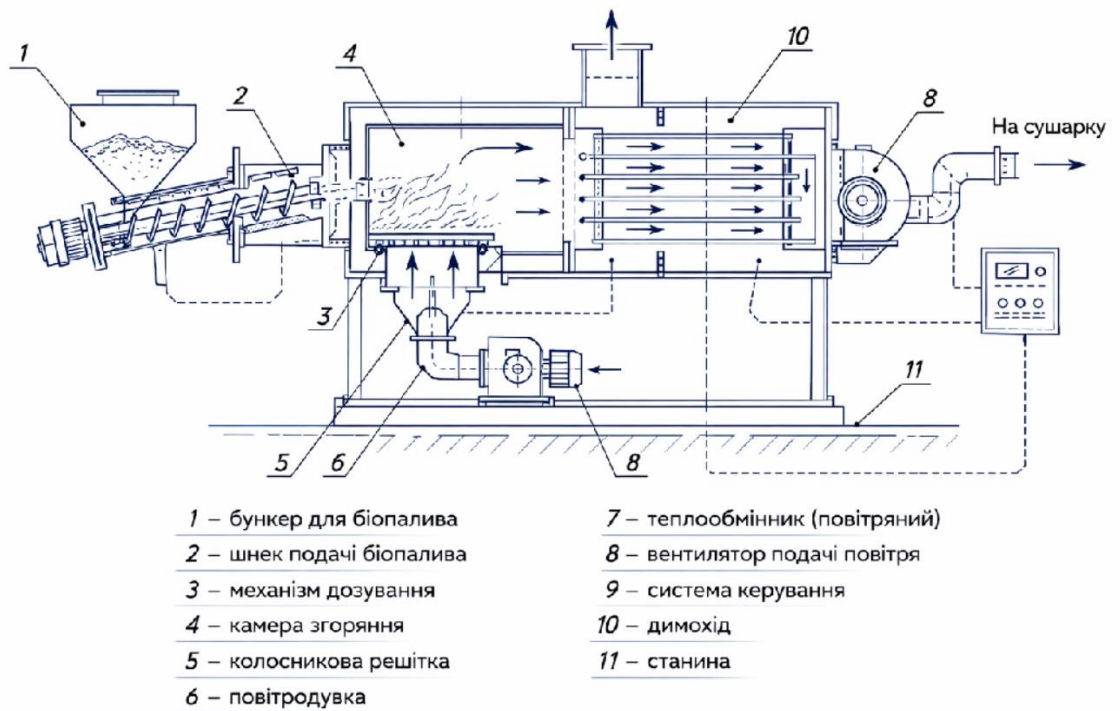


Рисунок 2.2 Схема теплогенератора

1-бункер для біомаси; 2-шнек подачі біомаси; 3-механізм дозування; 4-камера згоряння; 5-колоснікова решітка; 6-повітропровод; 7-теплообмінник (повітряний); 8-вентилятор подачі повітря; 10-димохід; 11-сатина.

Біопаливо (пелети, деревна тріска, агровідходи) подається у бункер для біопалива (1), з якого за допомогою шнека подачі біопалива (2) транспортується до механізму дозування (3). Даний механізм забезпечує рівномірну та регульовану подачу палива у камеру згоряння (4), що дозволяє підтримувати необхідний тепловий режим роботи теплогенератора.

У камері згоряння (4) відбувається процес горіння біопалива. Паливо розміщується на колосниковій решітці (5), через яку подається повітря, необхідне для підтримання процесу горіння. Подача повітря здійснюється за допомогою повітрорудки (6), що забезпечує інтенсивне змішування повітря з продуктами згоряння та підвищує ефективність процесу горіння.

Гарячі продукти згоряння із камери згоряння надходять у повітряний теплообмінник (7). У теплообміннику відбувається передача теплоти від димових газів до повітря, яке нагнітається вентилятором подачі повітря (8). При

цьому нагріте повітря не контактує безпосередньо з продуктами згоряння, що забезпечує чистоту сушильного агента та виключає можливість забруднення зерна.

Нагріте повітря через систему повітропроводів подається до зерносушарки, де використовується для сушіння зерна. Водночас продукти згоряння після проходження через теплообмінник відводяться у атмосферу через димохід (10).

Керування роботою теплогенератора здійснюється системою керування (9), яка дозволяє регулювати подачу палива, інтенсивність подачі повітря та температурний режим роботи установки.

Усі основні вузли теплогенератора змонтовані на станині (11), що забезпечує жорсткість конструкції та надійність роботи обладнання.

Таким чином, теплогенератор забезпечує перетворення хімічної енергії біопалива на теплову енергію нагрітого повітря, яке подається у зерносушарку та використовується як сушильний агент для видалення вологи із зерна.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ПРОРОБКА ПРОЕКТУ

Для забезпечення стабільної роботи теплогенератора важливим є вибір конструкції системи подачі палива. Використання пелет дозволяє застосувати шнекову систему транспортування, яка забезпечує рівномірне дозування палива в камеру згоряння. Саме тому у конструкції модернізованого теплогенератора передбачено шнек подачі біопалива, вал шнека та підшипниковий вузол, що забезпечують надійну роботу механізму подачі.

Під час згоряння пелет у камері згоряння утворюється стабільний шар палива на колосниковій решітці, через яку подається повітря для підтримання процесу горіння. Колосникова решітка забезпечує рівномірний розподіл повітря в зоні горіння та ефективно видалення золи. Отримані гарячі гази передають теплоту повітрю у теплообміннику, після чого нагріте повітря подається до зерносушарки СЗШ-16 для здійснення процесу сушіння зерна.

Таким чином, використання біопалива для забезпечення роботи теплогенератора зерносушарки СЗШ-16 може базуватися на місцевих відходах рослинництва та переробки сільськогосподарської продукції. Основним паливом доцільно прийняти пелети з лущиння соняшнику або деревні пелети, а як додаткове паливо можуть використовуватись відходи очистки зерна пшениці та кукурудзи. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати місцеві енергетичні ресурси, зменшити витрати на сушіння зерна та підвищити енергоефективність зерносушильного комплексу.

Використання відходів рослинництва як палива дозволяє реалізувати принцип замкненого енергетичного циклу на підприємстві, коли частина енергії, що міститься у побічній біомасі, використовується для технологічних потреб сушіння зерна.

3.1 Методика розрахунку основних параметрів

Визначення води, яка випаровується з 1 т зерна, де маса партії $m_0 = 1000$ кг

Суха речовина:

$$m_{\text{сух}} = m_0 (1 - W_1)$$

W_1 - початкова вологість

W_2 кінцева вологість

Кінцева маса зерна після сушіння:

$$m_2 = \frac{m_{\text{сух}}}{1 - W_2}$$

Маса води, що випаровується:

$$m_e = m_0 W_1 - m_2 W_2$$

Приймаємо типові режими:

пшениця: 18% → 14%

кукурудза: 25% → 14%

соняшник: 12% → 8%

Отримуємо (для 1 т вологого зерна):

Пшениця 18 → 14%: $m_e \approx 46,5$ кг води

Кукурудза 25 → 14%: $m_e \approx 127,9$ кг води

Соняшник 12 → 8%: $m_e \approx 43,5$ кг води

Потрібна теплота та перехід до витрати палива. Для зерносушіння практична потреба теплоти на випаровування 1 кг вологи (з урахуванням нагрівання зерна, повітря та втрат) береться в межах $q = 2,8 \dots 3,2$ МДж/кг випареної води. Ефективність системи “теплогенератор + повітропроводи + сушарка” $\eta = 0,55 \dots 0,70$

Тоді енергія палива на 1 кг випареної води:

$$q_{\text{пал}} = \frac{q}{\eta} \approx 4,0 \dots 5,82 \text{ МДж/кг}$$

Для пелет з лушпиння соняшнику прийемо нижчу теплотворну здатність

$Q_H \approx 18$ МДж/кг

Витрата палива на 1 кг випареної води:

$$b = \frac{q_{\text{нал}}}{Q_H} \approx \frac{4,0...5,82}{18} = 0,22...0,32 \text{ кг/кг води}$$

Підсумкова витрата біопалива на 1 т зерна (пелети з лушпиння соняшнику)

$$B = m_{\text{г}} \cdot b$$

Результати (діапазон):

Пшениця (18 → 14%): $46,5 \cdot (0,22...0,32) \approx 10,3...15,0$ кг пелет/т

Кукурудза (25 → 14%): $127,9 \cdot (0,22...0,32) \approx 28,4...41,3$ кг пелет/т

Соняшник (12 → 8%): $43,5 \cdot (0,22...0,32) \approx 9,7...14,0$ кг пелет/т

Для “номінальної оцінки” зручно брати середину:

пшениця ≈ 12 кг/т

кукурудза ≈ 33 кг/т

соняшник ≈ 11 кг/т

Для забезпечення стабільної роботи теплогенератора необхідно організувати рівномірну та безперервну подачу біопалива до камери згоряння. З цією метою у конструкції теплогенератора передбачено використання шнекового транспортера, який забезпечує механізоване транспортування пелет із бункера до топки. Шнекова подача дозволяє дозувати паливо, підтримувати стабільний тепловий режим та автоматизувати процес горіння.

Продуктивність шнекового транспортера визначається за формулою:

$$Q = 47 D^2 S n \varphi \rho$$

де:

Q – продуктивність шнека, т/год; D – діаметр шнека, м; S – крок гвинтової спіралі, м; n – частота обертання шнека, об/хв; φ – коефіцієнт заповнення шнека; ρ – насипна густина палива, т/м³.

Для пелет з лушпиння соняшнику приймаємо - насипна густина палива $\rho = 0,6 \text{ т/м}^3$, коефіцієнт заповнення шнека $\varphi = 0,3$

Для подачі біопалива до теплогенератора приймаємо:

діаметр шнека:

$$D = 0,1 \text{ м}$$

крок шнека:

$$S = 0,1 \text{ м}$$

частоту обертання:

$$n = 60 \text{ об/хв}$$

Підставляємо значення у формулу:

$$Q = 47 \cdot (0,1)^2 \cdot 0,1 \cdot 60 \cdot 0,3 \cdot 0,6$$

$$Q = 47 \cdot 0,01 \cdot 0,1 \cdot 60 \cdot 0,18$$

$$Q \approx 0,051 \text{ т/год}$$

Отже, продуктивність шнека становить приблизно:

$$Q \approx 0,05 \text{ т/год або } 50 \text{ кг/год}$$

Отримана продуктивність шнека забезпечує подачу приблизно 50 кг біопалива на годину, що відповідає потребам теплогенератора невеликої теплової потужності, який використовується для нагрівання сушильного агента зерносушарки СЗШ-16.

Застосування шнекового транспортера дозволяє забезпечити рівномірну подачу пелет до камери згоряння, зменшити коливання температури теплоносія та підвищити ефективність роботи теплогенератора.

Крім того, така конструкція подачі палива забезпечує можливість автоматичного регулювання інтенсивності горіння шляхом зміни швидкості обертання шнека.

Для забезпечення роботи шнекового транспортера необхідно визначити потужність приводу, яка повинна забезпечувати подолання опору переміщення палива вздовж шнека та втрат у механічній передачі.

Потужність приводу шнека можна визначити за формулою:

$$N = \frac{Q \cdot L \cdot g \cdot f}{1000 \cdot \eta}$$

де

N – необхідна потужність приводу, кВт; Q – продуктивність шнека, кг/с; L – довжина шнека, м; g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²; f – коефіцієнт опору переміщенню матеріалу; η – коефіцієнт корисної дії приводу.

Для шнекових транспортерів, що переміщують сипучі матеріали, коефіцієнт опору приймається:

$$f = 0,5$$

ККД приводу шнека з урахуванням втрат у підшипниках та редукторі:

$$\eta = 0,75$$

Продуктивність шнека, визначена у попередньому розрахунку:

$$Q = 50 \text{ кг/год}$$

Переведемо у кг/с

$$Q = 503600 = 0,0139 \text{ кг/с}$$

Довжину шнека приймаємо:

$$L = 2 \text{ м}$$

Підставляємо значення у формулу:

$$N = \frac{0,0139 \cdot 2 \cdot 9,81 \cdot 0,5}{1000 \cdot 0,75}$$

$$N = \frac{0,136}{750}$$

$$N \approx 0,00018 \text{ кВт}$$

Отримане значення є дуже малим, тому з урахуванням пускових навантажень, можливих нерівномірностей подачі палива та запасу потужності приймаємо електродвигун значно більшої потужності.

Для приводу шнека доцільно застосувати електродвигун потужністю:

$$N_{\text{дв}} = 0,37 \text{ кВт}$$

з редуктором, що забезпечує частоту обертання шнека:

$$n = 60 \text{ об/хв}$$

Для приводу шнека подачі біопалива доцільно використати асинхронний електродвигун загальнопромислового виконання з редуктором. Такий привід забезпечує: надійну роботу механізму подачі палива; можливість регулювання подачі біопалива шляхом зміни швидкості обертання; простоту експлуатації та обслуговування.

Застосування редуктора дозволяє знизити частоту обертання електродвигуна до необхідної частоти обертання шнека, що забезпечує рівномірну подачу пелет до камери згоряння теплогенератора.

Таким чином, обраний привід забезпечує необхідні умови роботи шнекового транспортера та стабільну подачу біопалива до камери згоряння теплогенератора.

Для вибору теплогенератора необхідно визначити теплову потужність, яка забезпечить випаровування вологи із зерна при заданій продуктивності сушарки. Розрахунок виконуємо через масу води, що видалається за одиницю часу, та питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи з урахуванням втрат.

Тоді маса води, що випаровується за годину:

$$M_{\text{в}} = G \cdot m_{\text{в}}$$

Отже:

пшениця:

$$M_{\text{в}} = 16 \cdot 46,5 = 744 \text{ кг/год}$$

кукурудза:

$$M_{\epsilon} = 16 \cdot 127,9 = 2046 \text{ кг/год}$$

соняшник:

$$M_{\epsilon} = 16 \cdot 43,5 = 696 \text{ кг/год}$$

Питома потреба теплоти на випаровування 1 кг вологи в зерносушінні (з урахуванням нагрівання зерна, повітря та втрат у сушарці) приймається:

$$q = 3,0 \text{ МДж/кг}$$

Тоді корисна теплота за годину:

$$Q_{\text{кор}} = M_{\epsilon} \cdot q \text{ МДж/год}$$

А корисна теплова потужність:

$$N_{\text{кор}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{3600} \text{ МВт}$$

Розрахунок:

Пшениця

$$Q_{\text{кор}} = 744 \cdot 3,0 = 2232 \text{ МДж/год}$$

$$N_{\text{кор}} = \frac{2232}{3600} = 0,62 \text{ МВт}$$

Кукурудза

$$Q_{\text{кор}} = 2046 \cdot 3,0 = 6138 \text{ МДж/год}$$

$$N_{\text{кор}} = \frac{6138}{3600} = 1,71 \text{ МВт}$$

Соняшник

$$Q_{\text{кор}} = 696 \cdot 3,0 = 2088 \text{ МДж/год}$$

$$N_{\text{кор}} = \frac{2088}{3600} = 0,58 \text{ МВт}$$

З урахуванням втрат у теплогенераторі, теплообміннику та повітропроводах приймаємо сумарний ККД системи:

$$\eta = 0,65$$

Тоді необхідна теплова потужність теплогенератора:

$$N_{mг} = \frac{N_{кор}}{\eta}$$

Отримуємо:

пшениця:

$$N_{mг} = \frac{0,62}{0,65} = 0,95 \text{ МВт}$$

кукурудза:

$$N_{mг} = \frac{1,71}{0,65} = 2,63 \text{ МВт}$$

соняшник:

$$N_{mг} = \frac{0,58}{0,65} = 0,89 \text{ МВт}$$

Оскільки найбільш енергоємним режимом є сушіння кукурудзи з 25% до 14%, потужність теплогенератора визначаємо за найгіршим випадком, додаючи експлуатаційний запас 15 – 20%:

$$N_{np} = 2,63 \cdot 1,2 \approx 3,16 \text{ МВт}$$

Приймаємо до впровадження теплогенератор номінальною потужністю $N_{mг} \approx 3,0 \dots 3,2 \text{ МВт}$

Нижча теплота згоряння пелет:

$$Q_n = 18 \text{ МДж/кг}$$

Енергія палива за годину при режимі кукурудзи:

$$Q_{пал} = \frac{Q_{кор}}{\eta} = \frac{6138}{0,65} = 9443 \text{ МДж/год}$$

Витрата пелет:

$$B = \frac{Q_{нал}}{Q_n} = \frac{9443}{18} = 524 \text{ кг/год}$$

Отже, для найважчого режиму (кукурудза 25→14% при 16 т/год) орієнтовна витрата пелет становить близько 0,52 т/год.

Розрахунок показав, що для зерносушарки СЗШ-16 при сушінні пшениці, соняшнику та кукурудзи найбільш енергоємним є режим сушіння кукурудзи. З урахуванням втрат і запасу потужності доцільно прийняти теплогенератор на біопаливі з номінальною тепловою потужністю 3,0–3,2 МВт, що забезпечить стабільну роботу зерносушильного комплексу у всіх передбачених режимах сушіння.

Для забезпечення процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці СЗШ-16 необхідно подати певну кількість нагрітого повітря (сушильного агента), яке забезпечує випаровування вологи із зерна та транспортування водяної пари із сушильної зони.

Витрата повітря для зерносушарок шахтного типу визначається залежно від кількості вологи, що випаровується. У практиці зерносушіння приймається, що для випаровування 1 кг вологи необхідно приблизно 20–25 м³ повітря.

Для найважчого режиму сушіння (кукурудза) маса води, що випаровується за годину, становить:

$$M_{\epsilon} = 2046 \text{ кг/год}$$

Тоді необхідна витрата повітря становитиме:

$$L = M_{\epsilon} \cdot l$$

де l – питома витрата повітря на випаровування 1 кг вологи.

Приймаємо:

$$l = 22 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Тоді

$$L = 2046 \cdot 22$$

$$L = 45012 \text{ м}^3/\text{год}$$

Отже, необхідна витрата сушильного агента становить приблизно:

$$L \approx 45000 \text{ м}^3/\text{год}$$

Повний тиск вентилятора повинен компенсувати опір усіх елементів повітряного тракту: опір повітропроводів; опір теплообмінника; опір зернового шару; місцеві опори (повороти, патрубки, фланці).

Для зерносушарок шахтного типу сумарний аеродинамічний опір системи зазвичай становить:

$$\Delta P = 1500 \dots 2000 \text{ Па}$$

Приймаємо:

$$\Delta P = 1800 \text{ Па}$$

Отже, для забезпечення роботи модернізованого зерносушильного комплексу необхідно використати вентилятор із такими параметрами:

витрата повітря

$$L = 45000 \text{ м}^3/\text{год}$$

повний тиск

$$\Delta P = 1800 \text{ Па}$$

Для таких умов роботи доцільно застосувати радіальний вентилятор середнього тиску, який здатний забезпечити необхідну подачу повітря при підвищеному аеродинамічному опорі сушильної системи.

Потужність вентилятора визначається за формулою:

$$N = \frac{L \cdot \Delta P}{3600 \cdot \eta}$$

де

N – потужність вентилятора, кВт; L – витрата повітря, м³/год;
 ΔP – повний тиск вентилятора, Па; η – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Приймаємо:

$$\eta = 0,7$$

Підставляємо значення:

$$N = \frac{45000 \cdot 1800}{3600 \cdot 0,7}$$

$$N = \frac{81000000}{2520}$$

$$N \approx 32 \text{ кВт}$$

Отже, для забезпечення роботи зерносушильного комплексу необхідно встановити вентилятор потужністю приблизно:

$$N \approx 30 \dots 35 \text{ кВт}$$

Проведений розрахунок показав, що для забезпечення процесу сушіння зерна в зерносушарці СЗШ-16 необхідна витрата повітря становить приблизно 45 000 м³/год при повному тиску близько 1800 Па. Для цих умов доцільно застосувати радіальний вентилятор середнього тиску з електродвигуном потужністю 30–35 кВт, що забезпечить стабільну подачу нагрітого повітря до суш

ильної шахти.

3.2 Тепловий баланс зерносушарки

Рівняння теплового балансу (рис.3.1). У спрощеному вигляді приймаємо:

$$Q_{\text{пал}} = Q_z + Q_{\text{вт}} + Q_{\text{втрат}}$$

де

$Q_{\text{пал}}$ – теплота, що надходить із паливом (МДж/год);

Q_3 – теплота, що «залишається» в нагрітому сухому зерні (МДж/год);

$Q_{вт}$ – теплота, що відводиться з парою та відпрацьованим повітрям (МДж/год);

$Q_{втрат}$ – втрати теплоти в навколишнє середовище (МДж/год).

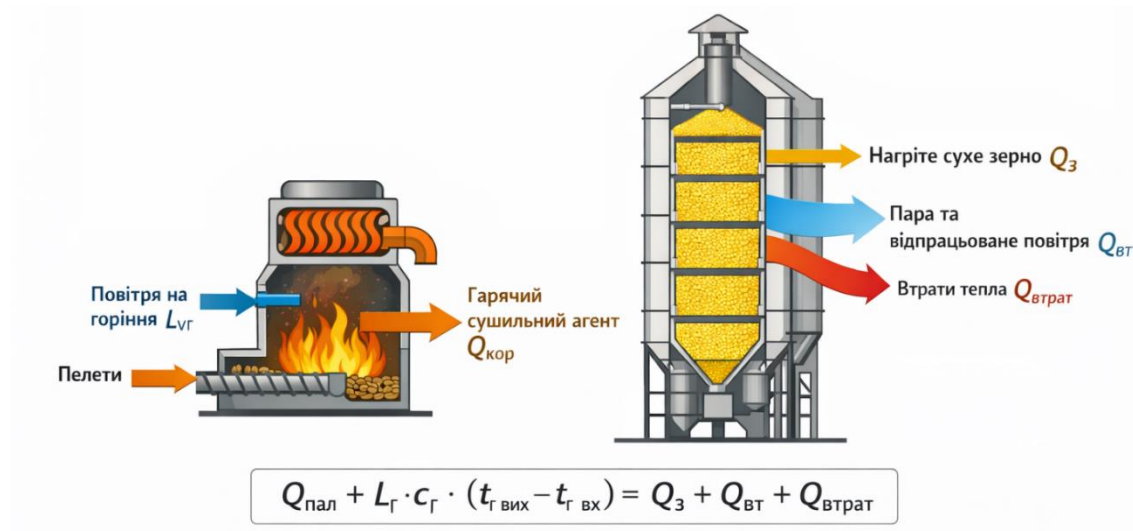


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема теплового балансу

Вихідні дані:

Продуктивність сушарки: $G = 16$ т/год

Кукурудза: $W_1 = 25\%$, $W_2 = 14\%$

Випарувана волога:

$$m_e = 127,9 \text{ кг/т}$$

$$M_e = G \cdot m_e = 16 \cdot 127,9 \approx 2046 \text{ кг/год}$$

Температури для оцінки: зерно на вході: $t_{з,вх} = 25^\circ\text{C}$, на виході: $t_{з,вих} = 55^\circ\text{C}$ (типово для сушарок). Теплота пароутворення при $\sim 55^\circ\text{C}$: $r_{55} \approx 2380$ кДж/кг. Теплоємність води: $c_e = 4,19$ кДж/(кг/К).

Теплоємність зерна (середнє): $c_z \approx 1,3$ кДж/(кг/К) . Паливо: пелети лушпиння соняшнику, $Q_n = 18$ МДж/кг

Беремо витрату пелет, яку ми вже отримували для цього режиму:

$$B \approx 524 \text{ кг/год}$$

. Теплота, що підводиться з паливом:

$$Q_{\text{пал}} = B \cdot Q_n = 524 \cdot 18 = 9432 \text{ МДж/год}$$

Вода в зерні спочатку нагрівається від 25°C до приблизно 55°C , потім випаровується:

$$q_{\text{на } 1 \text{ кг}} = c_v (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) + r_{55}$$

$$q_{\text{на } 1 \text{ кг}} = 4,19 \cdot (55 - 25) + 2380 = 4,19 \cdot 30 + 2380 = 126 + 2380 = 2506 \text{ кДж/кг}$$

Корисна теплота на випаровування вологи:

$$Q_{\text{вип}} = M_v \cdot q_{\text{на } 1 \text{ кг}} = 2046 \cdot 2506 = 5127000 \text{ кДж/год}$$

Теплота на нагрів зерна Q_z :

$$Q_z = G \cdot c_z \cdot (t_{z, \text{вих}} - t_{z, \text{вх}})$$

$$Q_z = 16000 \cdot 1,3 \cdot (55 - 25) = 16000 \cdot 1,3 \cdot 30 = 624000 \text{ кДж/год}$$

$$= 624 \text{ МДж/год}$$

Коректно приймати 10–15% від $Q_{\text{пал}}$ (огороження, нещільності, втрати з випромінюванням, втрати в повітропроводах). Приймаємо 12%.

Втрати теплоти:

$$Q_{\text{втрат}} = 0,12 \cdot Q_{\text{пал}} = 0,12 \cdot 9432 = 1132 \text{ МДж/год}$$

Теплота, що відводиться з парою та відпрацьованим повітрям $Q_{вт}$:

Із рівняння балансу:

$$Q_{вт} = Q_{пал} - Q_з - Q_{втрат}$$

$$Q_{вт} = 9432 - 624 - 1132 = 7676 \text{ МДж/год}$$

$$Q_{відп} = Q_{вт} - Q_{вин} = 7676 - 5127 = 2549 \text{ МДж/год}$$

Стаття балансу	Позначення	Значення, МДж/год	Частка, %
Підведено з паливом	$Q_{пал}$	9432	100
Нагрів зерна	$Q_з$	624	6,6
Винос з парою та відпрацьованим повітрям	$Q_{вт}$	7676	81,4
Втрати в навколишнє середовище	$Q_{втрат}$	1132	12,0
Перевірка балансу		$9432 = 624 + 7676 + 1132$	

Розрахунок теплового балансу показав, що при сушінні кукурудзи (25→14%) основна частка підведеної теплоти витрачається на випаровування вологи та виноситься з відпрацьованим повітрям (понад 80%). На нагрів зерна припадає близько 6–7%, а втрати через огороження та нещільності повітропроводів становлять близько 10–15% (у розрахунку прийнято 12%). Отримані значення підтверджують доцільність застосування теплогенератора на біопаливі, оскільки найбільш енергоємним є режим сушіння кукурудзи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Загальні вимоги охорони праці при експлуатації зерносушильних установок

Експлуатація зерносушильних комплексів пов'язана з дією ряду небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть негативно впливати на здоров'я обслуговуючого персоналу. До основних небезпечних факторів належать підвищена температура повітря, наявність пилу зернових культур, рухомі частини механізмів, електричний струм, а також можливість виникнення пожежі або вибуху пилоповітряної суміші.

Зерносушильні комплекси відносяться до технологічних установок підвищеної пожежної небезпеки, оскільки в процесі сушіння використовуються нагріте повітря або продукти згоряння палива. Крім того, під час транспортування і очищення зерна утворюється значна кількість органічного пилу, який у певних концентраціях може утворювати вибухонебезпечні суміші.

Безпечна експлуатація зерносушильного обладнання повинна забезпечуватись відповідно до вимог законодавства України з охорони праці, зокрема Закону України «Про охорону праці», правил безпечної експлуатації технологічного обладнання, а також галузевих нормативних документів.

До роботи на зерносушильних установках допускаються працівники, які пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також навчання безпечним методам виконання робіт.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації зерносушильного комплексу з теплогенератором на біопаливі на працівників можуть діяти такі небезпечні та шкідливі фактори. У зоні сушильної шахти та теплогенератора температура повітря може досягати 80–120 °С, що створює небезпеку теплових опіків та перегріву організму.

При транспортуванні та очищенні зерна утворюється пил, що може спричиняти захворювання органів дихання, а також утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям. До небезпечних зон належать шнекові транспортери, норії, вентилятори, приводи механізмів та інші рухомі частини обладнання. Електродвигуни, системи керування та інше електрообладнання можуть створювати небезпеку ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції або неправильній експлуатації. Застосування теплогенератора на біопаливі пов'язане з процесом горіння, що вимагає дотримання підвищених вимог пожежної безпеки.

4.3 Вимоги безпеки при експлуатації теплогенератора на біопаливі

Теплогенератор, що працює на твердому біопаливі, повинен експлуатуватись відповідно до встановлених правил технічної безпеки. Камера згоряння повинна бути обладнана системою контролю температури та автоматичним регулюванням подачі палива.

Подача біопалива до камери згоряння здійснюється за допомогою шнекового механізму, що забезпечує рівномірне дозування палива. Усі рухомі частини механізму повинні бути закриті захисними кожухами.

Для запобігання перегріву обладнання необхідно забезпечити безперервну роботу вентиляційної системи та контроль температури сушильного агента.

Обслуговування теплогенератора повинно виконуватися лише після його повної зупинки та охолодження.

Зерносушильні комплекси відносяться до об'єктів підвищеної пожежної безпеки. Основними причинами виникнення пожеж можуть бути:

- перегрів сушильного агента;
- накопичення пилу;
- несправність електрообладнання;
- порушення правил експлуатації теплогенератора.

Для запобігання пожежам необхідно:

- регулярно очищати обладнання від пилу;
- контролювати температуру сушильного агента;
- забезпечувати справність електрообладнання;
- обладнати приміщення системами пожежогасіння.

На території зерносушильного комплексу повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння: вогнегасники, пожежні щити, ящики з піском.

4.5 Засоби індивідуального захисту працівників

Працівники, які обслуговують зерносушильні установки, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, до яких належать:

- спецодяг та спецвзуття;
- рукавиці;
- захисні окуляри;
- респіратори для захисту від пилу;
- захисні каски.

Застосування засобів індивідуального захисту дозволяє зменшити вплив небезпечних факторів та підвищити рівень безпеки праці.

4.6 Захист навколишнього середовища при експлуатації зерносушильного комплексу

Сучасне агропромислове виробництво повинно забезпечувати не лише ефективність технологічних процесів, але й мінімальний негативний вплив на навколишнє природне середовище. Експлуатація зерносушильних комплексів може супроводжуватись викидами пилу, продуктів згоряння палива, шумом та утворенням відходів. Тому при проектуванні та модернізації зерносушильного комплексу необхідно передбачати комплекс природоохоронних заходів.

Одним із важливих напрямів зменшення негативного впливу на довкілля є використання відновлюваних джерел енергії. У запропонованій конструкції

зерносушильного комплексу передбачено застосування теплогенератора, що працює на твердому біопаливі. Використання пелет із лушпиння соняшнику або інших рослинних відходів дозволяє зменшити споживання викопних енергоресурсів і знизити викиди парникових газів у атмосферу.

Під час роботи теплогенератора утворюються продукти згоряння, які виводяться через димохід у атмосферу. Для зменшення забруднення повітря необхідно забезпечити повне згоряння палива та застосування ефективних систем очищення газів. У зерносушильних комплексах для цього використовуються циклони або інші пиловловлюючі пристрої, які дозволяють затримувати тверді частинки та зменшувати запиленість викидів.

Значним джерелом забруднення повітря на зернопереробних підприємствах є пил зернових культур, що утворюється під час транспортування та очищення зерна. Для зменшення запиленості повітря необхідно застосовувати герметизацію транспортного обладнання, використання аспіраційних систем та регулярне очищення технологічного обладнання від пилу.

Важливим аспектом охорони довкілля є також раціональне використання відходів виробництва. У процесі сушіння зерна утворюються відходи у вигляді полови, зернової домішки та рослинних частинок. Частина цих відходів може використовуватися як додаткове біопаливо або сировина для виробництва органічних добрив.

Висновки

1. Дотримання вимог охорони праці під час експлуатації зерносушильного комплексу з теплогенератором на біопаливі є необхідною умовою забезпечення безпеки працівників і безперебійної роботи обладнання. Виконання комплексу організаційних та технічних заходів дозволяє мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій, пожеж і травмування персоналу.

2. Особливу увагу необхідно приділяти зменшенню шуму, що виникає під час роботи вентиляторів, транспортерів та іншого обладнання. Для цього застосовують шумоізоляцію обладнання, правильне розміщення машин у виробничих приміщеннях та використання сучасних електродвигунів з низьким рівнем шуму.

3. Таким чином, впровадження зерносушильного комплексу з теплогенератором на біопаливі дозволяє зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, раціонально використовувати відходи рослинництва та підвищити екологічну безпеку агропромислового виробництва.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Метою техніко-економічного розрахунку є визначення доцільності модернізації зерносушильного комплексу шляхом впровадження теплогенератора на біопаливі. Економічна ефективність запропонованого рішення оцінюється шляхом порівняння витрат на сушіння зерна у базовому варіанті та після модернізації.

У якості базового варіанта розглядається зерносушильний комплекс, що працює на традиційному паливі. У проектному варіанті передбачається використання теплогенератора на біопаливі з подачею пелет шнековим транспортером. Основним економічним ефектом від модернізації є зниження витрат на паливо під час сушіння зерна.

Для виконання техніко-економічного розрахунку приймаємо такі вихідні дані:

- продуктивність зерносушильного комплексу – 16 т/год;
- тривалість роботи за сезон – 300 год;
- обсяг зерна, що висушується за сезон:

$$Q_{\text{сез}} = 16 \cdot 300 = 4800 \text{ т}$$

У якості основного палива у модернізованому варіанті приймаються пелети з лущиння соняшнику. Для найважчого режиму сушіння прийнята витрата біопалива $B = 524$ кг/год.

Сезонна витрата біопалива становитиме:

$$B_{\text{сез}} = 524 \cdot 300 = 157200 \text{ кг}$$

Для дипломного розрахунку приймаємо умовні ціни енергоносіїв:

- вартість пелет – 4500 грн/т;
- вартість традиційного палива в перерахунку на ту саму теплову потужність – 9000 грн/т умовного еквівалента.

Для спрощення порівняння приймається, що витрати на традиційне паливо приблизно у 2 рази перевищують витрати на біопаливо при однаковому тепловому ефекті.

Витрати на біопаливо за сезон визначаються за формулою:

$$С_{бп} = V_{сез} \cdot Ц_{бп}$$

Де $С_{бп}$ – витрати на біопаливо за сезон, грн; $V_{сез}$ – сезонна витрата біопалива, т; $Ц_{бп}$ – ціна 1 т біопалива, грн/т.

Підставляємо значення:

$$С_{бп} = 157,2 \cdot 4500 = 707400 \text{ грн}$$

Для базового варіанта витрати на традиційне паливо приймаємо:

$$С_{тр} = 1414800 \text{ грн}$$

Річна економія визначається як різниця між витратами на паливо у базовому та проектному варіантах:

$$Е_p = С_{тр} - С_{бп}$$

$$Е_p = 1414800 - 707400 = 707400 \text{ грн}$$

Отже, річна економія від використання теплогенератора на біопаливі становить:

$$Е_p = 707400 \text{ грн}$$

До складу капітальних вкладень на модернізацію включаємо:

- виготовлення або придбання теплогенератора;
- монтаж обладнання;
- виготовлення повітропроводів;
- встановлення шнекової подачі палива;
- налагоджувальні роботи.

Для дипломного розрахунку приймаємо сумарні капітальні вкладення:

$$K = 950000 \text{ грн}$$

Термін окупності капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T = \frac{K}{E_p}$$

де T - термін окупності, років; K - капітальні вкладення, грн;
 E_p - річна економія, грн.

Підставляємо значення:

$$T = \frac{950000}{707400} = 1,34 \text{ роки}$$

Отже, термін окупності модернізації становить приблизно:

$$T \approx 1,3 \text{ роки}$$

Собівартість паливної складової сушіння 1 т зерна визначається за формулою:

$$S = \frac{C}{Q_{\text{сез}}}$$

Для базового варіанта:

$$S_{\text{бп}} = \frac{4800}{4800141} = 294,75 \text{ грн / т}$$

Для проектного варіанта:

$$S_{\text{бп}} = \frac{707400}{4800} = 147,38 \text{ грн / т}$$

Зниження витрат на сушіння 1 т зерна становить:

$$\Delta S = 294,75 - 147,38 = 147,37 \text{ грн / т}$$

Для оцінки ефективності модернізації зерносушильного комплексу проведено порівняння базового варіанта сушіння зерна з використанням традиційного палива та проектного варіанта із застосуванням теплогенератора на біопаливі.

Показник	Базовий варіант	Проектний варіант
Тип палива	традиційне паливо	біопаливо (пелети)
Продуктивність сушарки, т/год	16	16
Обсяг сушіння за сезон, т	4800	4800
Витрата палива за сезон, т	157,2	157,2
Вартість палива, грн/т	9000	4500
Сезонні витрати на паливо, грн	1 414 800	707 400
Собівартість сушіння 1 т зерна, грн/т	294,75	147,38
Річна економія коштів, грн	—	707 400
Капітальні вкладення, грн	—	950 000
Термін окупності, років	—	1,3

Проведений техніко-економічний розрахунок показав, що модернізація зерносушильного комплексу шляхом впровадження теплогенератора на біопаливі є економічно доцільною. Використання пелет з лушпиння соняшнику дозволяє зменшити сезонні витрати на паливо майже вдвічі, а річна економія становить 70740 грн. При капітальних вкладеннях у модернізацію на рівні 95 тис. грн термін окупності становить близько 1,3 року. Собівартість сушіння 1 т зерна при цьому знижується на 147,37 грн/т, що підтверджує ефективність запропонованого технічного рішення.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих зерносушильних комплексів та встановлено, що їх основним недоліком є висока енергоємність процесу сушіння та значна залежність від традиційних енергоносіїв, вартість яких постійно зростає.
2. Обґрунтовано доцільність використання теплогенератора на твердому біопаливі, зокрема пелет з лущиння соняшнику, що мають теплотворну здатність 17–19 МДж/кг і забезпечують стабільний процес горіння.
3. Розроблено конструкцію модернізованого зерносушильного комплексу з використанням теплогенератора та шнекової подачі біопалива, що забезпечує рівномірне дозування палива та стабільність температурного режиму сушіння.
4. Виконано розрахунок шнека подачі біопалива, у результаті якого встановлено його продуктивність на рівні 50 кг/год, що відповідає вимогам роботи теплогенератора.
5. Визначено необхідну теплову потужність теплогенератора, яка для найенергоємнішого режиму сушіння становить 3,0–3,2 МВт, що забезпечує ефективне сушіння зерна різних культур.
6. Проведено тепловий баланс процесу сушіння, який показав, що основна частка теплоти (понад 80%) витрачається на випаровування вологи та виноситься з відпрацьованим повітрям, тоді як втрати теплоти становлять близько 10–12%.
7. Визначено параметри вентиляційної системи, згідно з якими необхідна витрата повітря становить близько 45 000 м³/год, а потужність вентилятора –30–35 кВт.
8. Обґрунтовано вибір конструктивних елементів для деталювання (шнек, вал, колосникова решітка, підшипниковий вузол, повітропроводи), які забезпечують надійну роботу теплогенератора та ефективну подачу теплоносія.

9. Проведений техніко-економічний розрахунок показав, що впровадження теплогенератора на біопаливі дозволяє зменшити витрати на паливо на 70740 тис. грн на рік, що становить близько 50% економії.
10. Встановлено, що капітальні вкладення у модернізацію зерносушильного комплексу в розмірі 95 тис. грн окупаються протягом 1,3 року, що свідчить про високу економічну ефективність проекту.
11. Впровадження запропонованого рішення дозволяє знизити собівартість сушіння зерна на 147 грн/т, а також забезпечує використання відновлюваних джерел енергії та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змін.).
2. ДСТУ EN 15234-2:2018. Біопаливо тверде. Забезпечення якості палива. Частина 2. Деревні пелети. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 18 с.
3. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Борта А. В. Сушіння зерна : підручник. – 2-ге вид., перероб. і допов. – Одеса : КП ОМД, 2021. – 248 с.
4. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Янюк Т. І. Сушіння та зберігання зерна : підручник. – Київ : Олді+, 2023. – 396 с.
5. Паламарчук І. П., Бандуренко Г. М. Машини та обладнання для післязбиральної обробки зерна : навч. посіб. – Харків : ХНТУСГ, 2018. – 312 с.
6. Хоменко О. М., Ковальчук В. І. Теплогенератори на твердому біопаливі : навч. посіб. – Київ : Техніка, 2021. – 198 с.
7. Калетнік Г. М. Біопаливо: продовольча, енергетична та екологічна безпека України : підручник. – Київ : Аграрна наука, 2020. – 336 с.
8. Бурлака В. В., Мельник О. М. Енергетичне використання біомаси в Україні : навч. посіб. – Київ : ННЦ ІАЕ, 2021. – 276 с.
9. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва : підручник. – Київ : Аграрна освіта, 2019. – 393 с.
10. Дідур В. А., Журавель Д. П. Технічна механіка рідини і газу : підручник. – Мелітополь : Колор Принт, 2019. – 468 с.
11. Ткаченко А. В. Обладнання і технологія сушіння насіння соняшнику : навч. посіб. – Київ : Ліра-К, 2018. – 144 с.
12. ASABE Standards. Grain Drying, Handling and Storage. – St. Joseph, Michigan : ASABE, 2020. – 295 p.
13. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. – 3rd ed. – London : Academic Press, 2018. – 530 p.
14. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 1312 p.

15. Obernberger I., Thek G. The Pellet Handbook. – London : Earthscan, 2019. – 549 p.

ДОДАТКИ

[illegible]

Розроб.	Наумик А.С.			Загальний вигляд СЗШ-8 з теплогенератором	Літ	Лист	Листів
Перев.	Золотовська О.В.						
Н.контр оль	Бойко В.Б				ДДАЕУ Група АІ-2-22		
Затв.	Теслюк Г.В.						

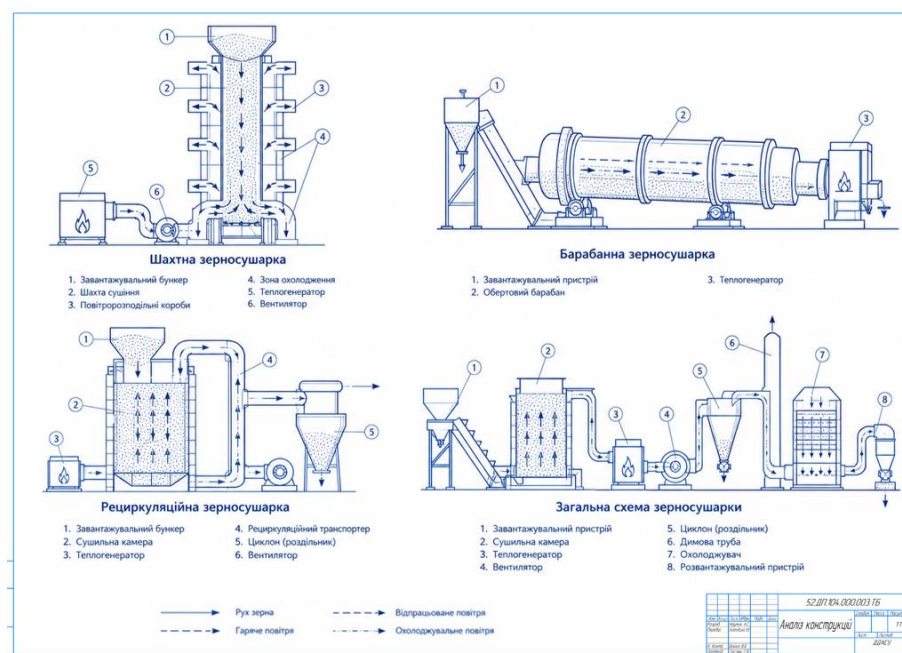
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ТРАКТОРІВ І СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

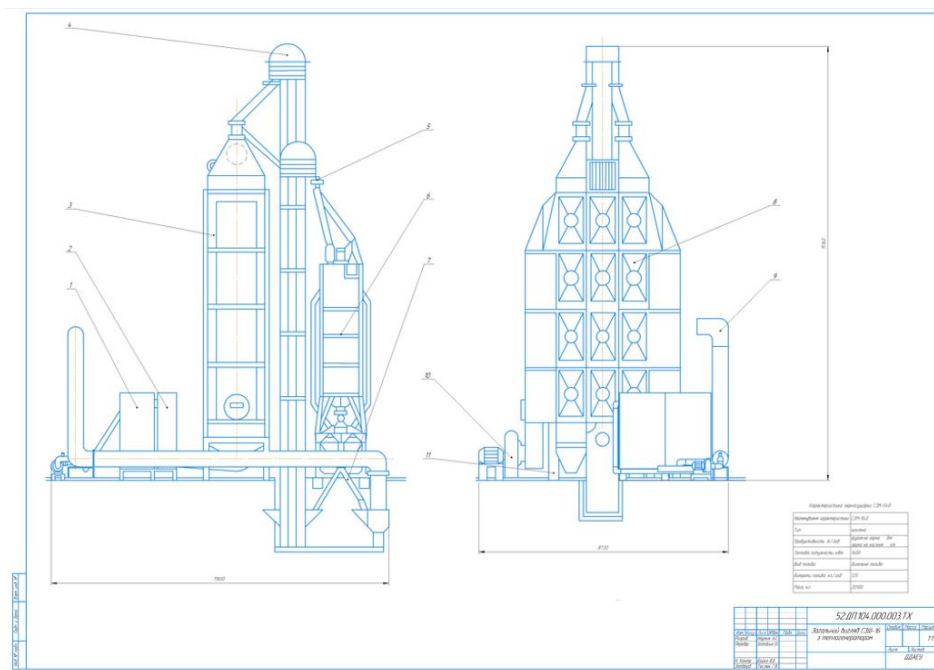
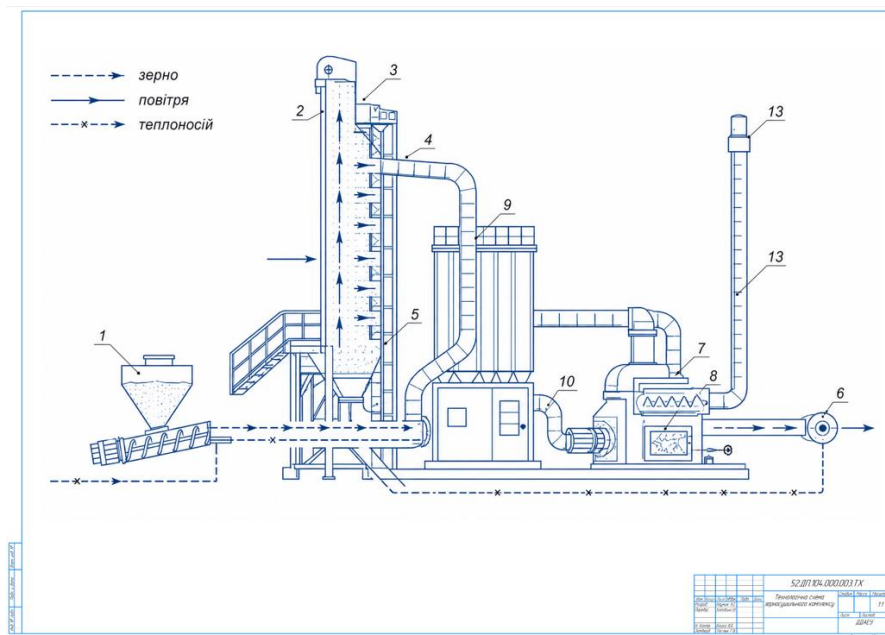
**Модернізація зерносушарного комплексу шляхом
впровадження теплогенератора на твердому біопаливі**
Демонстраційний матеріал до дипломного проєкту освітнього ступеня «Бакалавр»

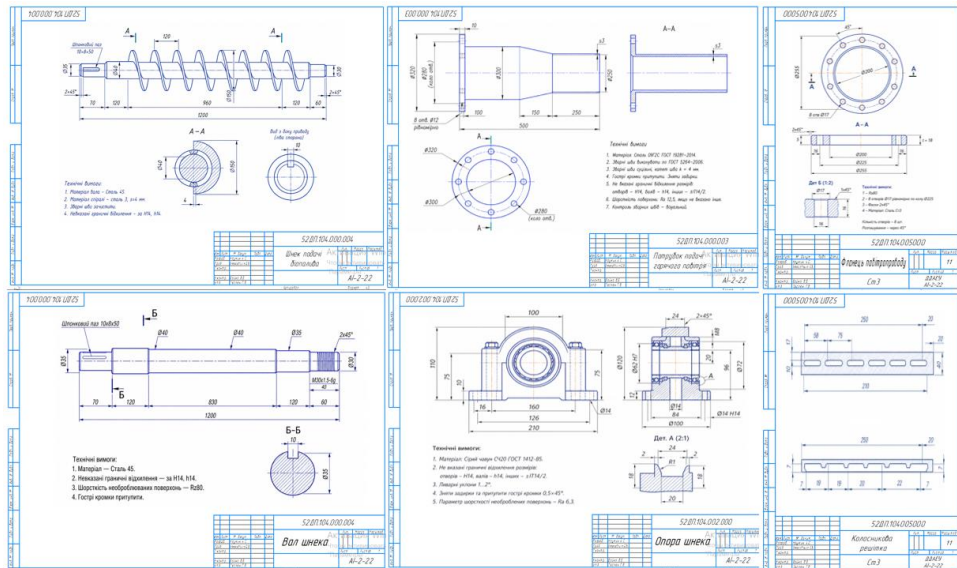
Виконав: групи АІ-2-22
Наумик Антон Сергійович

Керівник: к.т.н., доцентка
Золотовська Олена Володимирівна

Дніпро 2026







Показник	Базовий варіант	Проектний варіант
Тип палива	традиційне паливо	біопаливо (пелети)
Продуктивність сушарки, т/год	16	16
Обсяг сушіння за сезон, т	4800	4800
Витрата палива за сезон, т	157,2	157,2
Вартість палива, грн/т	9000	4500
Сезонні витрати на паливо, грн	141480	70740
Собівартість сушіння 1 т зерна, грн/т	294,75	147,38
Річна економія коштів, грн	—	70740
Капітальні вкладення, грн	—	95000
Термін окупності, років	—	1,3