

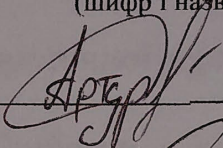
Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра теплоенергетики
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

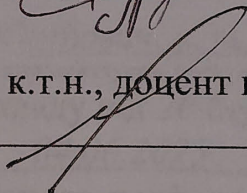
Пояснювальна записка
до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему:

«Модернізація теплової схеми проточної зерносушарки S 440 CSRE «Арай»»

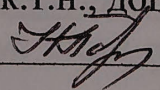
Виконав: студент 2 курсу, групи ТЕ-23мс
спеціальності 144 – теплоенергетика
(шифр і назва спеціальності)


_____ П'ятак А.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТЕ

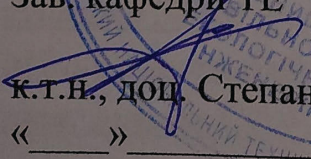

_____ Співак О. Ю.
(прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. БМГА


_____ Попович М.М.
(прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри ТЕ


к.т.н., доц. Степанов Д.В.

« ____ » _____ 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії
Кафедра теплоенергетики
Рівень вищої освіти I (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 144 – Теплоенергетика
Освітньо-кваліфікаційна програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕ

Степанов Д.В.

25 березня 2025 року

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

П'ятаку Артуру Станіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи «Модернізація теплової схеми проточної зерносушарки S 440 CSRE
«Арай»»

керівник роботи Співак Олександр Юрійович, к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 20 березня 2025 р. № 97

2. Термін подання студентом роботи 04.06.2025

3. Вхідні дані до роботи: температура свіжого повітря $t_0 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$; вологість свіжого повітря $\varphi_0 = 70\%$; температура сушіння $t'_1 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; вологість вихідного сушильного агента $\varphi_2 = 50\%$; видатність сушарки $G = 23\text{ т/год}$; початкова вологість зерна $\omega' = 13\%$; температура зерна після сушіння $\vartheta'' = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; кінцева вологість зерна після охолодження $\omega''_1 = 7\%$;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: аналіз літературних та патентних джерел; розрахунки проточної зерносушарки S440; багатоваріантний аналіз; розрахунки обладнання для модернізації; охорона праці; висновки, додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
сушарка S440; теплогенератор для зерносушарки АРАЙ S440 на вугіллі; конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента; циклон СТФ-Ц-1200

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	к.т.н., доц. Співак О.Ю.	25.03.25	04.08.25
Охорона праці	к.пед.н., доц. Кобилянська І.М.		
Нормоконтроль	к.т.н., доц. Боднар Л.А.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Прим.
		початок	закінчення	
1.	Аналіз літературних та патентних джерел	25.03.2025	27.03.2025	
2.	Розрахунки проточної зерносушарки S440	28.03.2025	01.04.2025	
3.	Багатоваріантний аналіз	02.04.2025	10.04.2025	
4.	Розрахунки обладнання для модернізації	11.04.2025	17.04.2025	
4.1	Розрахунок топки	18.04.2025	23.04.2025	
4.2	Конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого агента	24.04.2025	01.05.2025	
4.3	Система очищення відпрацьованого теплоносія в проточній зерносушарці S 440 CSRE «Арай»	09.05.2025	19.05.2025	
5.	Охорона праці	20.05.2025	30.05.2025	
7.	Оформлення висновків по роботі	31.05.2025	01.06.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу.	01.06.2025	04.06.2025	
9.	Перевірка на антиплагіат	04.05.2025	04.06.2025	
10.	Нормоконтроль	05.06.2025	05.06.2025	
11.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	05.06.2025	11.06.2025	
12.	Захист БКР ЕК	12.06.2025	12.06.2025	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

П'ятак А.С.
(прізвище та ініціали)

Співак О.Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.33.221

П'ятак А.С. Модернізація теплової схеми проточної зерносушарки S 440 CSRE «Арай». Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 144 – Теплоенергетика, освітня програма - Теплоенергетика. Вінниця: ВНТУ, 2025. 96 с.

Бібліогр.: 67 назв; рис.: 10; табл. 19.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення енергоефективності зерносушильного обладнання шляхом модернізації теплової схеми проточної сушарки Арай S440 CSRE. Основна мета дослідження — зменшення експлуатаційних витрат та підвищення ККД сушарки за рахунок використання альтернативного твердого палива замість природного газу.

У роботі проведено теплотехнічний розрахунок сушильної камери, побудовано матеріальний і тепловий баланси, визначено необхідну теплову потужність та коефіцієнт корисної дії обладнання. Здійснено багатоваріантний аналіз п'яти видів палива (вугілля, мазут, паливо пічне, пелети з лушпиння соняшника, природний газ) та обґрунтовано доцільність використання кам'яного вугілля як основного енергоносія.

Виконано тепловий і аеродинамічний розрахунок топки, розраховано параметри конденсаційного теплообмінника та запропоновано конструкцію системи очищення відпрацьованого теплоносія на основі батареї циклонів.

Розглянуто технічні рішення з охорони праці, що супроводжують модернізацію сушильного комплексу.

Ключові слова: зерносушарка, тепла схема, багатоваріантний аналіз, альтернативне паливо, кам'яне вугілля, теплообмінник, топка, циклони, охорона праці.

ABSTRACT

Piatak A.S. Modernization of the Thermal Scheme of the Continuous Flow Grain Dryer S 440 CSRE “Arai”. Bachelor’s Qualification Paper in specialty 144 – Thermal Power Engineering, educational program – Thermal Power Engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 96 p. References: 67 sources; illustrations: 10; tables: 19.

This bachelor’s qualification paper addresses the issue of improving the energy efficiency of grain drying equipment through the modernization of the thermal scheme of the continuous flow grain dryer Arai S 440 CSRE.

The main objective of the research is to reduce operating costs and increase the thermal efficiency of the dryer by replacing natural gas with alternative solid fuels.

The work includes a thermal calculation of the drying chamber, the development of material and energy balances, determination of the required thermal power, and the efficiency of the equipment. A multivariate analysis of five fuel types (coal, fuel oil, heating oil, sunflower husk pellets, and natural gas) was performed, and the use of bituminous coal was justified as the most cost-effective energy source.

A separate thermal and aerodynamic calculation of the combustion chamber was carried out. The design parameters of the condensation heat exchanger were calculated, and a waste heat cleaning system based on a bank of cyclones was proposed. Technical safety solutions related to the modernization of the drying complex were also considered.

Keywords: grain dryer, thermal scheme, multivariate analysis, alternative fuel, coal, heat exchanger, furnace, cyclones, occupational safety.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ І ПАТЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ.....	6
2 РОЗРАХУНКИ ПРОТОЧНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ S 440 CSRE «АРАЙ»	9
2.1 Початкові дані для розрахунку	9
2.2 Визначення параметрів свіжого повітря.....	9
2.3 Процес в дійсній сушарці	11
2.3.1 Теплоємність зерна на всіх стадіях сушіння	11
2.3.2 Теплота на нагрів сировини	12
2.3.3 Втрати теплоти через теплову ізоляцію стін сушарки	12
2.3.4 Відхилення процесу від теоретичного	15
2.4 Дійсний процес сушіння в h-d діаграмі	15
2.5 ККД сушарки	17
3 БАГАТОВАРІАНТНИЙ АНАЛІЗ	18
3.1 Затрати на роботу сушарки	18
3.2 Графічна інтерпретація розрахунків	20
4 РОЗРАХУНКИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	23
4.1 Тепловий розрахунок топки.....	23
4.1.1 Об'єми та ентальпії повітря та продуктів згорання.....	23
4.1.2 Розрахунки характеристик газів	24
4.1.3 Тепловий баланс і витрата палива.....	25
4.1.4 Аеродинамічний розрахунок топки	26
4.2 Конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента	27
4.2.1 Формування початкових даних.....	27
4.2.2 Параметри і характеристики теплоносіїв	27
4.2.3 Вибір діаметрів труб	30
4.2.4 Коефіцієнт теплопередачі.....	31
4.2.6 Температурний напір	38
4.2.7 Площа теплообміну і довжина труб	39
4.3 Система очищення відпрацьованого теплоносія в проточній зерносушарці S 440 CSRE «Арай»	39
4.3.1 Дані у відповідності до завдання.....	39
4.3.2 Вибір геометричних розмірів циклона	42
4.3.3 Ефективність циклона.....	42
4.3.4 Оцінювання дисперсного складу пилу	43
4.3.5 Загальна ефективність циклона	45

4.3.6 Аеродинамічний розрахунок	46
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	48
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	48
5.1.2 Електробезпека	51
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	54
5.2.1 Мікроклімат	54
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	54
5.2.3 Виробниче освітлення	55
5.2.4 Виробничий шум.....	56
5.2.5 Виробничі вібрації	58
5.3 Пожежна безпека.....	59
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64
ДОДАТКИ.....	70
Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	71
Додаток Б (обов'язковий) ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ	72
Додаток В (обов'язковий) ГРАФІЧНА ЧАСТИНА.....	76
Додаток Д (довідниковий) Розрахунок топки	85
Додаток Е (довідниковий) Лістинг програми розрахунку видів палива	94

ВСТУП

Зерносушильна техніка в Україні в основному представлений зерносушарками відкритого типу одно- і двошахтними, такими як ДСП-12, ДСП-24 і ДСП-32, що випускалися Карловським машинобудівним заводом з середини 50-х років, і сушарками А1-ДСП-50, які замінили попередні моделі з початку 80-х років [1].

В 90-ті роки на їх базі за розробками заводу створено номенклатурний ряд зерносушарок значно меншої продуктивності - ДСК-25, ДСК-20 і ДСК-10. Широке поширення шахтних пояснюється їх компактністю, гравітаційним переміщенням зерна в шахтах, простотою конструкції і монтажу, експлуатаційною надійністю і довговічністю (фактичний термін служби нерідко перевищує три нормативних), відносною дешевизною (якщо порівнювати із зарубіжними аналогами – в 3-5 разів) [2]. Але шахтні сушарки мають і суттєві недоліки, це:

- висока питома металоємність;
- завищені енергетичні витрати (в порівнянні з кращими світовими зразками);
- обмеження зниження вологості: за один пропуск через сушарку до 6%;
- нерівномірність як сушіння так і охолодження зерна;
- низька пожежна безпека і можливість забруднення навколишнього середовища виносом в зоні сушарки.

Низька енергетична ефективність та вищеперераховані чинники, (тепловий ККД становить усього 45 – 50%), є основними причинами високої вартості сушіння зерна та олійних культур в Україні [3].

До 90 % маси насіння сушать у шахтних сушарках, хоч при цьому спостерігається нерівномірність нагрівання зерна (до 20 °С), а при підвищеній його засміченості насінням бур'янів можливе загоряння. При завантаженні в шахту неочищеного заряду відбувається самосортування насіння, за якого легші

компоненти розміщуються біля стінок шахти сушарки і зменшується швидкість руху матеріалу в пристінній зоні шахти. Тому шахтні сушарки дещо вдосконалили: короби замінили колонками, в результаті відстань від бокової стінки шахти до коробів збільшилася з 4–6 до 10–11,5 см. [3].

В модельний ряд таких колонкових зерносушарок входять моделі СЗТ-2,5, СЗТ-5, СЗТ-8, СТ-10, СЗТ-12, СЗ-16, СЗ-25, СЗТ-30, котрі відрізняються розмірами, масою, ємністю зернового бункера (шахти) і, відповідно, продуктивністю. Всі ці сушарки є стаціонарними зерносушарками колонкового типу безперервної дії, автоматизованими і з електричним приводом. Такі зерносушарки відрізняються хорошою експлуатаційною надійністю, зручністю управління і високою безпекою [1]. Колонкові зерносушарки складаються з сушильної камери, завантажувального пристрою, який знаходиться над сушильною камерою, патрубків підведення теплоносія, площадок обслуговування і інверторів, розвантажувального пристрою, топкового блоку з сушильним вентилятором, що забезпечує охолодження висушеного матеріалу, електрообладнання та системи зернопроводів-коробів. Сушильна камера має дві колонки, між якими є замкнутий простір.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат зерносушарки шляхом заміни традиційного виду палива на альтернативне, а також удосконалення її теплотехнічної схеми.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати придатність місцевих видів альтернативного твердого біопалива для генерації теплоти теплоносія, що використовується для сушіння;
- скласти тепловий баланс сушарки і визначити її к.к.д., витрату палива, необхідну для роботи сушарки;
- виконати розрахунок обладнання для модернізації;
- забезпечити заходи з охорони праці.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ І ПАТЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ

Сушіння зерна — важливий технологічний етап після його збирання, що забезпечує стабільність зберігання, зменшує ризик ураження мікроорганізмами, а також зберігає поживну цінність [1]. Виділяють кілька типів сушіння за способом передачі тепла: конвективне, контактне, радіаційне (ІЧ/мікрохвильове). Найбільш поширене — конвективне сушіння гарячим повітрям, зокрема у зерносушарках шахтного або проточного типу [2].

Такі сушарки забезпечують безперервний процес сушіння, що особливо ефективно при обробці великих партій зерна (3). Оптимальні температури сушіння для зернових становлять 40–60 °С, залежно від виду культури, початкової вологості та кінцевої мети (насіннєве або фуражне зерно) [3].

Наприклад, у патенті UA127020U описано конструкцію шахтної зерносушарки з багатосекційною камерою і вертикальним рухом зерна. Винахід забезпечує кращий розподіл повітря по висоті шахти, що дозволяє уникнути локального перегріву зерна [4].

Інший приклад — патент UA113738C2, в якому розглядається зерносушарка із застосуванням імпульсного подавання теплоносія. Такий принцип дозволяє знизити витрати енергії до 15% порівняно з традиційними безперервними системами сушіння [5].

На міжнародному рівні, в патенті WO2014112964A1 (Польща) запропоновано універсальну зерносушарку з функцією аераційного сушіння з рециркуляцією повітря, що дозволяє повторно використовувати тепло і значно зменшує викиди CO₂ [6].

Проточні зерносушарки є одними з найефективніших для промислового застосування. Їх головна особливість — безперервний потік зерна через сушильну зону, що дає змогу підтримувати рівномірну вологість у всьому об'ємі зерна [7].

Такі сушарки забезпечують:

Продуктивність від 10 до 60 т/год;

Можливість регулювання температури в різних зонах;

Зменшення питомих витрат палива до 0,8–1,2 кг умовного палива на 100 кг видаленої вологи [7];

Можливість інтеграції з рекупераційними системами, що дозволяє повторно використовувати нагріте повітря [8].

Перевагою проточних сушарок є також адаптація до роботи з різними культурами (кукурудза, пшениця, ячмінь), змінною вологістю та погодними умовами.

Зерносушарка ARAJ S440 — приклад сучасного проточного обладнання, яке поєднує ефективність, гнучкість у налаштуванні та високу надійність. Виробляється в Польщі. Цей агрегат належить до категорії високопродуктивних модулів для сушіння різних культур, зокрема кукурудзи та пшениці [9].

Технічні характеристики моделі S440:

- продуктивність: до 40 тонн/год для кукурудзи за вологості 30%;
- паливо: дизельне пальне або природний газ;
- система контролю: автоматизована, з регуляцією температури й вологості;
- енергоефективність: реалізовано систему часткової рециркуляції повітря;
- матеріали: оцинкована конструкція з антикорозійним покриттям [9].

Ця сушарка часто використовується в господарствах середнього і великого розміру та відповідає вимогам екологічності та надійності [9].

З огляду на зростання цін на енергоресурси та вимоги до зменшення викидів, питання енергоефективності сушіння зерна стало ключовим у виборі технологій. Дослідження показують, що до 25–30% загальних витрат на післязбиральну обробку припадає саме на сушіння [10].

Зменшення витрат палива досягається завдяки:

- використанню автоматичних систем керування температурою;
- модульній конструкції сушарок, що дозволяє адаптувати роботу до

обсягу зерна;

- впровадженню теплових рекуператорів для повторного використання теплого повітря [11];

- переходу на альтернативні джерела енергії, зокрема біомасу, пелети чи навіть відпрацьоване масло [12].

Крім того, сучасні зерносушарки проєктуються з урахуванням екологічних вимог. Наприклад, конструкції ARAJ мають низький рівень пиловиділення завдяки вбудованим фільтрам та оптимізованій аерації, що дозволяє використовувати їх у районах з підвищеними екологічними вимогами (9).

У провідних країнах ЄС та США активно впроваджуються інтелектуальні системи сушіння, які дозволяють:

- визначати вологість у реальному часі за допомогою вбудованих сенсорів;
- здійснювати віддалене управління сушаркою через мобільні додатки;
- оптимізувати режим роботи в залежності від погоди, вологості повітря, типу зерна [13].

У патенті EP3455017A1 (Німеччина) запропоновано адаптивну зерносушарку, що автоматично змінює температуру сушіння в кожному сегменті камери відповідно до показників вологості, отриманих з вбудованих датчиків [14].

Також перспективним напрямом є інтеграція сушарок із системами агроаналітики, що дозволяє поєднувати післязбиральну обробку з логістичним плануванням і зберіганням [15].

2 РОЗРАХУНКИ ПРОТОЧНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ

S 440 CSRE «АРАЙ»

2.1 Початкові дані для розрахунку

- температура свіжого повітря $t_0 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вологість свіжого повітря $\varphi_0 = 70\%$;
- температура сушильного агента на вході $t'_1 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вологість вихідного сушильного агента $\varphi_2 = 50\%$;
- видатність сушарки $G = 23\text{ т/год}$;
- початкова вологість зерна соняшника $\omega'_1 = 13\%$;
- кінцева вологість зерна соняшника $\omega''_1 = 7\%$;
- температура зерна на виході $\vartheta''_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- кратність рециркуляції теплоносія 0,4.

2.2 Визначення параметрів свіжого повітря

З h-d діаграми повітря визначаємо параметри свіжого повітря на вході в сушарку і сушильного агента на виході з обох зон сушарки (Рис.2.1 і табл. 2.1).

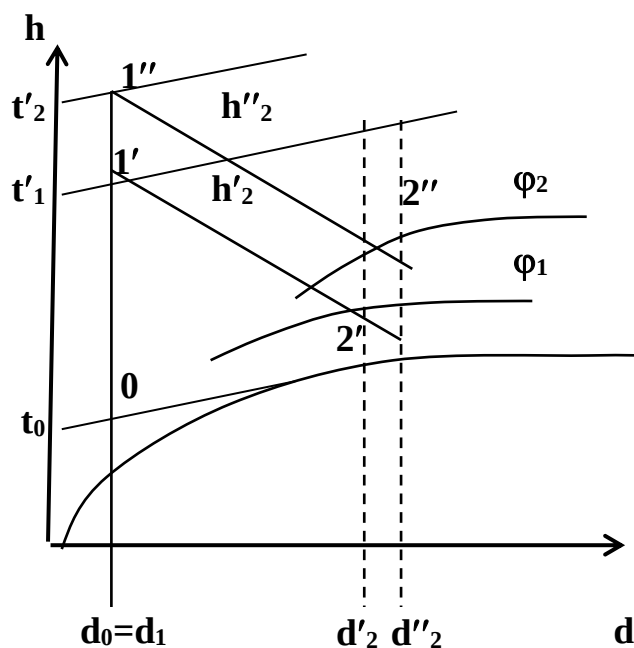


Рисунок 2.1 – Теоретичний процес сушіння в h-d діаграмі

Таблиця 2.1 – Параметри теплоносія по зонах сушарки

		t, °C	d, г/кг	h, кДж/кг	φ, %
свіже повітря		12	6	31	70
	вхід	70	6	167	65
	вихід	43	20	98	50

Питома витрата повітря

$$\ell_1 = \frac{1000}{d'_2 - d_0}, \quad (2.1)$$

$$\ell_1 = \frac{1000}{20 - 6} = 14 \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

Питома витрата теплоти

$$q_{\text{т1}} = \frac{h'_2 - h_0}{d'_2 - d_0}, \quad (2.2)$$

$$q_{\text{т1}} = \frac{167 - 31}{20 - 6} = 9714 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right);$$

Кількість видаленої вологи

$$W_1 = G \frac{\omega'_1 - \omega''_1}{100 - \omega''_1}, \quad (2.3)$$

$$W_1 = 23 \frac{13 - 7}{100 - 7} = 1484 \left(\frac{\text{кг}}{\text{год}} \right).$$

2.3 Процес в дійсній сушарці

В дійсному процесі враховують температуру сировини на вході і виході з сушарки і теплові втрати через стінки сушарки.

2.3.1 Теплоємність зерна на всіх стадіях сушіння

$$c = \frac{100 - \omega}{100} c_c + \frac{\omega}{100} c_\omega, \quad (2.4)$$

де ω – вологість зерна, %;

c_c – теплоємність сухого скелета зерна;

c_ω – теплоємність води в зерні.

За [16] $c_c = 1,55 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $c_\omega = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

На вході в сушарку

$$c'_1 = \frac{100 - \omega'_1}{100} c_c + \frac{\omega'_1}{100} c_\omega, \quad (2.5)$$

$$c'_1 = \frac{100 - 13}{100} 1,55 + \frac{13}{100} 4,19 = 1,89 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

На виході

$$c''_1 = \frac{100 - 7}{100} 1,55 + \frac{7}{100} 4,19 = 1,74 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

λ_1 – теплопровідність сталі, 45 Вт/(м·К) [18];

δ_2 – товщина шару пінопласту, 100 мм;

λ_2 – теплопровідність пінопласту, 0,05 Вт/(м·К) [18].

За визначальну температуру процесу приймаємо температуру теплоносія [17]. $t'_b = 70^\circ\text{C}$, за визначальний розмір приймаємо відстань між коробами.

$$\ell_1^* = 90 \text{ мм.}$$

З таблиць теплофізичних властивостей сухого повітря визначаємо основні параметри [22]:

- коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu'_1 = 20,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda'_1 = 2,96 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
- критерій Прандтля $\text{Pr}'_1 = 0,694$.

Критерій Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{w_1 \cdot \ell}{\nu} : \quad (2.8)$$

$$\text{Re}'_b = \frac{0,3 \cdot 0,9}{20,02 \cdot 10^{-6}} = 13487 \rightarrow \text{ламiнарний рух};$$

Критерій Нуссельта для обтікання плоских поверхонь ламінарним потоком

$$\text{Nu}'_b = 0,57 \text{ Re}'^{0,5}, \quad (2.9)$$

$$\text{Nu}'_b = 0,57 \cdot 13487^{0,5} = 66,2;$$

Коефіцієнт тепловіддачі в камері сушарки

$$\alpha'_b = \frac{\text{Nu}'_b \cdot \lambda'_1}{\ell_1^*}, \quad (2.10)$$

$$\alpha'_B = \frac{66,2 \cdot 0,0296}{0,9} = 2,2 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right),$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки сушарки. За визначальну температуру процесу приймаємо температуру навколишнього середовища [22]. Для $t_B = 10^\circ\text{C}$.

За визначальний розмір приймаємо висоту робочої камери сушарки.
 $\ell = 3300 \text{ мм}$.

З таблиць теплофізичних властивостей сухого повітря визначаємо основні параметри [22]:

- коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu_2 = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_2 = 2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Критерій Рейнольдса

$$\text{Re}_3 = \frac{0,1 \cdot 3,3}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 23305, \rightarrow \text{ламінальний рух.}$$

Критерій Нуссельта

$$\text{Nu}_3 = 0,57 \cdot 23305^{0,5} = 87.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки сушарки

$$\alpha_3 = \frac{87 \cdot 0,0251}{3,3} = 0,66 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right),$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_B} + \frac{2 \cdot \delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3}}, \quad (2.11)$$

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{2,2} + \frac{2 \cdot 0,002}{45} + \frac{0,1}{0,05} + \frac{1}{0,66}} = 0,25 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Втрати теплоти через стінки сушарки

$$Q'_5 = k' \cdot F' \cdot (t'_1 - t_0), \quad (2.12)$$

$$Q'_5 = 0,25 \cdot 46 \cdot (70 - 10) = 690 \text{ Вт};$$

2.3.4 Відхилення процесу від теоретичного

$$\Delta' = c_w \cdot t_0 - \frac{Q'_{\text{пр}} + Q'_5}{W_1} \cdot 3600, \quad (2.13)$$

$$\Delta' = 4,19 \cdot 10 - \frac{187,19 + 0,69}{1484} \cdot 3600 = -414 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг вол.}} \right);$$

2.4 Дійсний процес сушіння в h-d діаграмі

Дійсний процес сушіння в h-d діаграмі показано на Рис. 2.3.

Довжина відрізка: ef = 31 мм, тоді

$$es = ef \frac{\Delta'}{2500} = 31 \frac{414}{2500} = 5,14 \text{ мм}.$$

Точку $2_d'$ знаходимо на перетині лінії $1's$ і $\varphi_1 = 65\%$. В точці $2_d'$ вологовміст $d_2' = 16 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$.

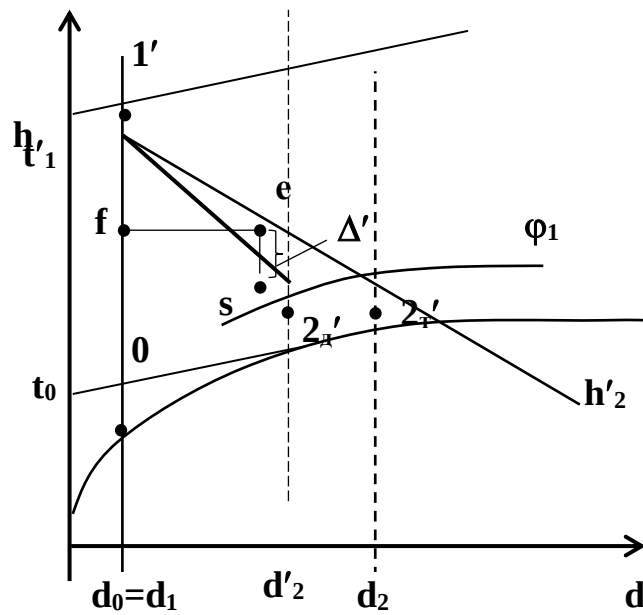


Рисунок 2.3 – Дійсний процес сушіння в h-d діаграмі

Витрата повітря для дійсного процесу

$$L_1 = \frac{1000}{d'_2 - d_0} W_1, \quad (2.14)$$

$$L_1 = \frac{1000}{16 - 6} \cdot 1484 = 148400 \left(\frac{\text{кг}}{\text{год}} \right).$$

Втрати теплоти на дійсний процес

$$Q_\Sigma = \frac{L_1(h'_1 - h_0)}{3600}, \quad (0.1)$$

$$Q_\Sigma = \frac{148400 \cdot (167 - 31)}{3600} = 3334 \text{ (кВт)}.$$

Теплота на випаровування вологи (корисна теплота)

$$Q_w = W_1 \cdot r_1, \quad (2.16)$$

де r_1 теплота пароутворення, $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right)$.

$$\text{З [7] для температур зерна } \vartheta_1'', r_1 = 2444 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right) .$$

$$Q_w = \frac{1561 \cdot 2444}{3600} = 1783 \text{ (кВт)} .$$

2.5 ККД сушарки

$$\eta = \frac{Q_w}{Q_\Sigma} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{1783}{3334} \cdot 100 = 53,4\% .$$

Висновки до Розділу 2.

Виконано розрахунок робочої камери сушарки Арай S 440. Підібрано оптимальну швидкість повітря в сушарці, складено матеріальний та тепловий баланси процесу сушіння.

Розраховано теоретичний та дійсний процеси сушіння зерна по зонах, визначено теплові втрати сушарки і її ККД, який склав 53,4%.

Встановлено, що сумарна потужність сушарки при сушінні зерна гарячим повітрям має становити 3334 кВт.

3 БАГАТОВАРІАНТНИЙ АНАЛІЗ

Ефективність роботи зерносушарки значною мірою залежить від вибору виду палива. Основними критеріями при виборі є теплота згоряння, вартість палива, доступність та екологічні аспекти. Проведемо порівняльний аналіз різних видів палива з метою визначення найбільш економічно доцільного варіанту для використання в зерносушарці.

У даному дослідженні використано математичну модель, реалізовану в середовищі Mathcad. Виконаємо аналіз таких видів палива:

- вугілля Волинського басейну, марки «Г»;
- мазут;
- пічне паливо (дизельне паливо з мазутом);
- палети з лущиння соняшнику
- газ природний;

3.1 Затрати на роботу сушарки

Визначимо добові затрати на роботу сушарки Арай S 440 при використанні різних видів палива. Ціни на паливо візьмемо з мережі Інтернет з сайтів що здійснюють гуртову і роздрібну торгівлю паливом.

Ціна на паливо*:

- вугілля: 16,7 грн/кг [24];
- мазут: 18,5 грн/кг [25];
- паливо пічне: 20 грн/кг [26];
- пелети соняшникові: 4,7 грн/кг [27];
- природний газ: 21 грн/м³ (еквівалентно 21 грн/кг) [28].

*Ціни на паливо взяті станом на 02.04.25 р.

Добові витрати коштів

$$K = B_p \cdot C \cdot 86400, \quad (3.1)$$

- на вугілля:

$$K_1 = 0,002923 \cdot 16,7 \cdot 86400 = 3217 \text{ грн/добу};$$

- на мазут:

$$K_2 = 0,002193 \cdot 18,5 \cdot 86400 = 3496,32 \text{ грн/добу};$$

- на паливо пічне:

$$K_3 = 0,001965 \cdot 20 \cdot 86400 = 3391,20 \text{ грн/добу};$$

- на пелети соняшникові:

$$K_4 = 0,004466 \cdot 4,7 \cdot 86400 = 1815,52 \text{ грн/добу};$$

- на природний газ:

$$K_5 = 0,002535 \cdot 21 \cdot 86400 = 4591,78 \text{ грн/добу};$$

Таблиця 3.1 – Показники роботи топок на різних видах палива для сушарки АРАЙ S440

Показник	Вугілля	Мазут	Паливо пічне	Пелети соняшникові	Природний газ
Нижча теплота згоряння Q_n , МДж/кг	21,7	38,73	43,21	19,02	33,50
ККД сушарки, %	44,37	44,94	45,31	44,54	31,79
Витрата палива, кг/с	0,002923	0,002193	0,001965	0,004466	0,002535
Ціна палива, грн/т	16700	18500	20000	4700	21000
Витрати на паливо, грн/год	120,50	146,04	141,51	75,56	191,67

3.2 Графічна інтерпретація розрахунків

На рис 3.1 показано графік який показує, скільки кілограмів кожного виду палива потрібно спалити за годину, щоб забезпечити нормальну роботу сушарки. Найменше пального потрібно у випадку пічного палива — його витрата найнижча, так як воно дуже калорійне. Трохи більше витрачається мазуту і вугілля — їхні показники схожі. Найбільше пального потрібно, якщо використовувати пелети з лушпиння соняшника — їх треба спалювати найбільше за годину, бо вони дають менше тепла. Газ займає середнє положення.

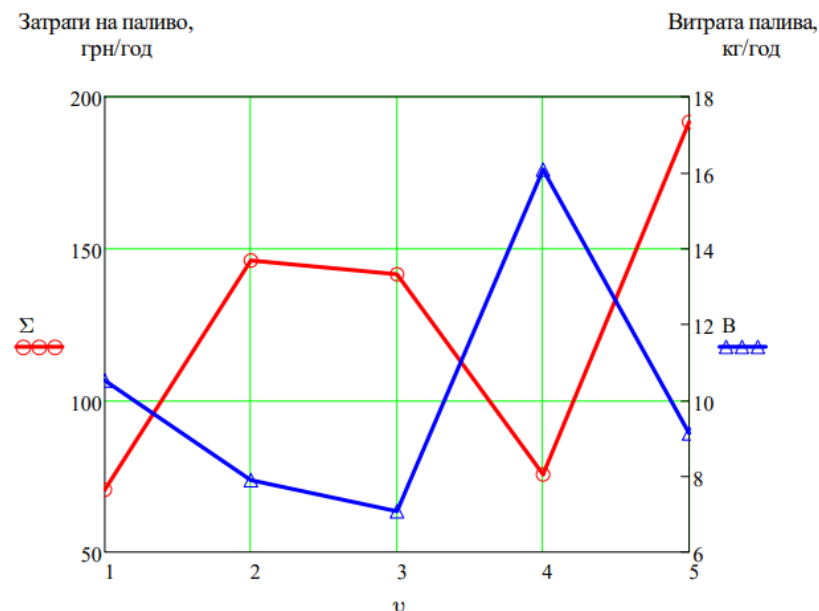


Рисунок 3.1 – Залежність витрат на паливо (грн/год) від виду палива.

На рисунку 3.2 зображено залежність витрат палива від виду палива, графік показує, скільки грошей витрачається на паливо щогодини, якщо сушарка працює без зупинки. Найменше коштує робота сушарки на вугіллі – це найдешевший варіант, і саме тому його часто обирають. Пелети трохи дорожчі, але ненабагато. Це виглядає непогано, враховуючи, що це екологічне паливо. Мазут і пічне паливо – дорожчі, хоча й ефективні. Природний газ – найдорожчий. Хоча це зручне паливо, його вартість робить його найменш вигідним.

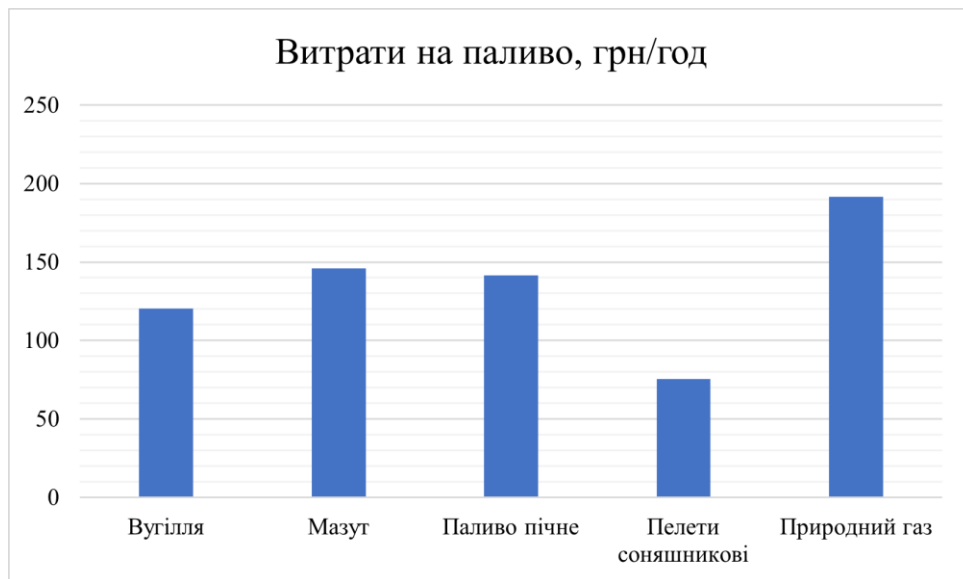


Рисунок 3.2– Залежність витрати палива (кг/год) від виду палива.

Висновки до Розділу 3.

У ході багатоваріантного аналізу ефективності використання різних видів палива для сушарки Арай S 440 було розглянуто п'ять варіантів: вугілля, мазут, паливо пічне, пелети з лущиння соняшника та природний газ.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що вугілля є найбільш доцільним видом палива для забезпечення стабільної та економічно вигідної роботи сушарки. Воно поєднує в собі:

- достатню теплоту згоряння (21,7 МДж/кг),
- низьку вартість (16,7 грн/кг),
- помірну витрату (0,002923 кг/с),
- та, як наслідок, найменші добові витрати — лише 3217 грн/добу, що нижче, ніж у решти варіантів.

Крім того, вугілля є доступним на українському ринку, має розвинену інфраструктуру поставок і добре підходить для стабільного тривалого використання.

Водночас, пелети з лущиння соняшника також виглядають як непоганий варіант. Вони мають низьку ціну (4,7 грн/кг) та показують добові витрати

1815,52 грн/добу, що лише трохи більше, ніж у вугілля. Пелети є екологічно чистим та відновлюваним ресурсом, проте мають низьку теплоту згоряння і високу витрату по масі, що ускладнює їх постійну подачу. До того ж, їх кількість обмежена, і забезпечити постійне безперебійне постачання пелет у великих обсягах складно, особливо для тривалої роботи сушарного обладнання.

Таким чином, з урахуванням техніко-економічних показників, надійності постачання та загальної рентабельності, вугілля є оптимальним вибором для використання в сушарці Арай S 440. Пелети можуть бути альтернативою для короткострокового або резервного використання, за умови наявності постачань у потрібних обсягах.

4 РОЗРАХУНКИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

4.1 Тепловий розрахунок топки

Початкові дані

- потужність топки 8500 кВт;
- температура холодного повітря $t_x = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_T = 1,4$.
- температура відхідних газів $t_{вг} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$;

В якості палива обране кам'яне вугілля з родовища Волинського басейну марки «Г». Елементарний склад палива наведений в таблиці 4.1 [29].

Таблиця 4.1 – Склад палива

W ^p , %	A ^p , %	S ^p , %	C ^p , %	H ^p , %	N ^p , %	O ^p , %	Сума, %
10,0	19,8	2,6	55,5	3,7	0,9	7,5	100

4.1.1 Об'єми та ентальпії повітря та продуктів згорання

Теплота згорання палива

$$Q_H^p = 338 \cdot C^p + 1025 \cdot H^p - 108,5 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p, \quad (4.1)$$

$$Q_H^p = 338 \cdot 55,5 + 1025 \cdot 3,7 - 108,5 \cdot (7,5 - 2,6) - 25 \cdot 10,0 = 21,7 \text{ (МДж/кг)}.$$

Теоретична кількість повітря

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,033 \cdot O^p, \quad (4.2)$$

$$V^0 = 0,0889 \cdot (55,5 + 0,375 \cdot 2,6) + 0,265 \cdot 3,7 - 0,033 \cdot 7,5 = 5,75 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Теоретичний об'єм триатомних газів

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p), \quad (4.3)$$

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (55,5 + 0,375 \cdot 2,6) = 1,05 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Теоретичний об'єм азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^p, \quad (4.4)$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot 5,75 + 0,008 \cdot 0,9 = 4,54 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Теоретичний об'єм водяних парів

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0 + 1,24 \cdot W_\phi, \quad (4.5)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot 3,7 + 0,0124 \cdot 10,0 + 0,0161 \cdot 5,75 + 1,24 \cdot 0 = 0,627 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Характеристики продуктів згорання розраховані за [31] і зведені в таблицю 4.2. Коефіцієнт надлишку повітря в топці прийнятий на підставі умов завдання $\alpha = 1,6$.

4.1.2 Розрахунки характеристик газів

Дійсний об'єм водяної пари, м³/кг

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0, \quad (4.6)$$

$$V_{H_2O} = 0,627 + 0,0616 \cdot (1,6 - 1) \cdot 5,75 = 0,839 \text{ (м}^3\text{/кг)}$$

Дійсний об'єм димових газів, м³/кг

$$V_r = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}, \quad (4.7)$$

$$V_r = 1,05 + 0,839 + 4,54 = 6,429 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Об'ємна частка триатомних газів

$$r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_r, \quad (4.8)$$

$$r_{RO_2} = 1,05 / 6,429 = 0,16.$$

Об'ємна частка водяної пари

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_{\text{r}}, \quad (4.9)$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,839 / 6,429 = 0,131.$$

Сумарна частка триатомних газів

$$r_{\text{n}} = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (4.10)$$

$$r_{\text{n}} = 0,16 + 0,131 = 0,291.$$

Таблиця 4.2 – Характеристики продуктів згорання в газоходах

Величина	Одиниці вимірювання	Значення
Коефіцієнт надлишку повітря, α		1,6
Дійсний об'єм водяної пари, $V_{\text{H}_2\text{O}}$	м ³ /кг	0,839
Дійсний об'єм димових газів, V_{r}	м ³ /кг	6,429
Об'ємна частка триатомних газів, r_{RO_2}		0,16
Об'ємна частка водяної пари, $r_{\text{H}_2\text{O}}$		0,131
Сумарна частка триатомних газів, r_{n}		0,291

Значення ентальпій теоретичного об'єму та продуктів згорання приведені в таблицях 4.3 та 4.4.

Приймаємо частку виносу золи із топки для шарового спалювання, $\alpha_{\text{вин}} = 0,15$ [31].

Значення ентальпії газів

$$I_{\text{r}} = I_{\text{r}}^0 + (\alpha - 1)I_{\text{n}}^0. \quad (4.11)$$

$$G_{\text{см}} = G_{\text{т}}.$$

Таблиця 4.3 – Визначення ентальпій повітря та продуктів згорання в залежності від температури

Θ, °C	$V_{\text{RO}_2} = 1,05 \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{\text{N}_2}^0 = 4,54 \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,627 \text{ м}^3/\text{кг}$ $V^0 = 5,75 \text{ м}^3/\text{кг}$					
	$I_{\text{RO}_2}^0 = V_{\text{RO}_2} (c\theta)_{\text{RO}_2}$, кДж/кг	$I_{\text{N}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^0 (c\theta)_{\text{N}_2}$, кДж/кг	$I_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$, кДж/кг	$I_{\text{п}}^0 = V^0 (c\theta)_{\text{п}}$, кДж/кг	$I_{\text{г}}^0 = I_{\text{RO}_2}^0 + I_{\text{N}_2}^0 + I_{\text{H}_2\text{O}}^0$, кДж/кг	$I_3 = \frac{A^p}{100} \cdot \alpha_{\text{вин}} \cdot (c\theta)_{\text{зл}}$, кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
100	177,5	590,2	94,7	759,0	862,3	2,4
200	374,9	1180,4	190,6	1529,5	1745,9	5,0
300	587,0	1779,7	290,3	2317,3	2656,9	7,8
400	810,6	2392,6	392,5	3116,5	3595,7	10,7
500	1045,8	3014,6	497,8	3933,0	4558,2	13,6
600	1283,1	3650,2	606,3	4772,5	5539,6	16,7
700	1534,1	4294,8	719,2	5629,3	6548,1	19,7
800	1789,2	4962,2	837,0	6497,5	7588,5	22,8
900	2048,6	5643,2	966,8	7400,3	8658,6	26,0
1000	2312,1	9052,8	1081,6	8257,0	12446,4	29,2
1100	2579,9	7014,3	1207,6	9171,3	10801,8	32,6
1200	2852,9	7695,3	1336,1	10085,5	11884,3	35,8
1300	3127,4	8408,1	1470,0	11011,3	13005,5	41,2
1400	3402,0	9120,9	1603,9	11937,0	14126,7	46,7
1500	3679,2	9833,6	1742,7	12877,1	15255,6	50,5

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7
1600	3955,4	10546,4	1881,6	13817,3	16383,4	54,4
1700	4236,8	11270,6	2024,9	14754,5	17532,2	59,6
1800	4518,2	11994,7	2168,2	15691,8	18681,0	64,9
1900	4801,7	12725,6	2314,9	16654,9	19842,2	69,7
2000	5085,2	13456,6	2461,6	17618,0	21003,3	74,6
2100	5370,8	14196,6	2609,9	18581,1	22177,2	78,3
2200	5656,4	14936,6	2758,2	19544,3	23351,1	82,0

Таблиця 4.4 – Ентальпії теоретичного об'єму повітря і продуктів згорання (І - 9 таблиця)

ϑ °С	I_{Γ}^0 , кДж/кг	I_{Π}^0 , кДж/кг	I_{Γ} , кДж/кг	$I=I_{\Gamma}+I_{\Sigma}$, кДж/кг
100	862,3	759	1317,7	1320,1
200	1745,9	1529,5	2663,6	2668,6
300	2656,9	2317,3	4047,3	4055,1
400	3595,7	3116,5	5465,6	5476,3
500	4558,2	3933	6918,0	6931,6
600	5539,6	4772,5	8403,1	8419,7
700	6548,1	5629,3	9925,6	9945,3
800	7588,5	6497,5	11487,0	11509,8
900	8658,6	7400,3	13098,8	13124,7
1000	12446,4	8257	17400,6	17429,9
1200	11884,3	10085,5	17935,6	17971,4
1400	14126,7	11937	21288,9	21335,6
1500	15255,6	12877,1	22981,9	23032,4
1600	16383,4	13817,3	24673,7	24728,1
1700	17532,2	14754,5	26384,9	26444,5
1800	18681	15691,8	28096,0	28160,9
1900	19842,2	16654,9	29835,1	29904,8
2000	21003,3	17618	31574,1	31648,7
2100	22177,2	18581,1	33325,9	33404,2
2200	23351,1	19544,3	35077,7	35159,6

4.1.3 Тепловий баланс і витрата палива

Для теплового балансу необхідно розрахувати всі теплові потоки в топці і визначити коефіцієнт корисної дії топкового пристрою. Ескіз стін теплогенератора представлений на рисунку 4.1.1 та 4.1.2.

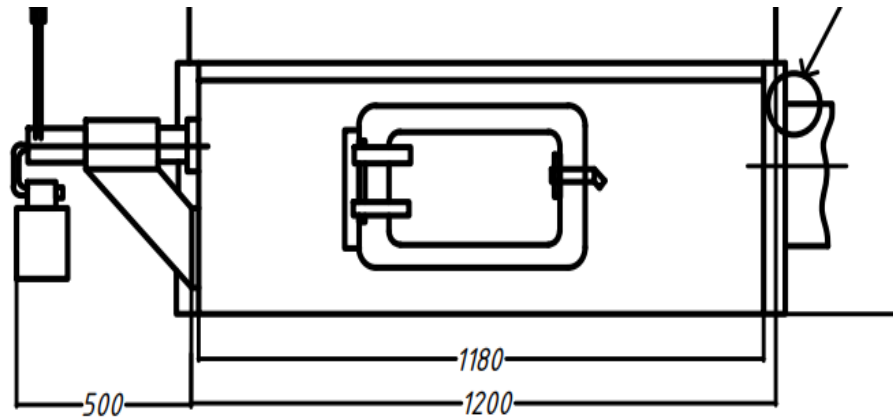


Рисунок 4.1 – Ескіз стін теплогенератора

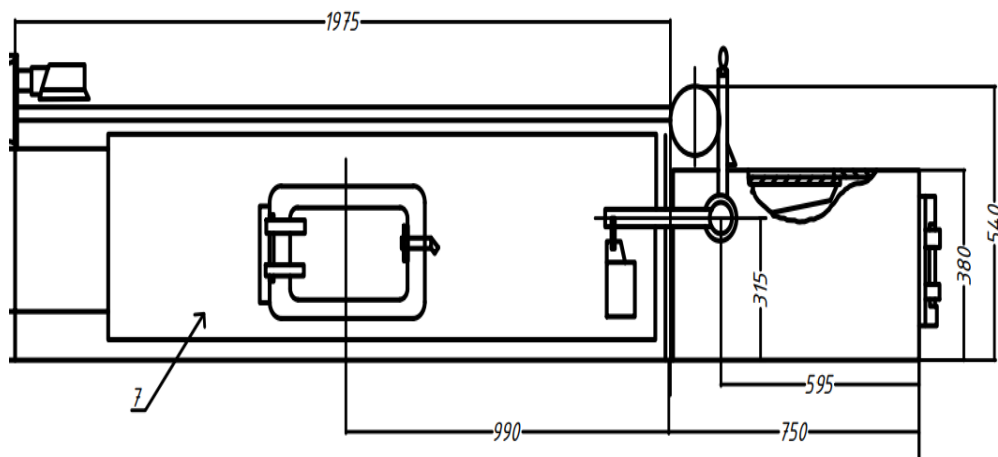


Рисунок 4.2 – Ескіз стін теплогенератора

Для виконання розрахунку з ескізу і креслень визначаємо всі необхідні для розрахунку втрат теплоти через огороження параметри. Всі дані заносимо до таблиці Д.1 (Додаток Д). Оскільки фронтна стіна умовно складається з трьох різних за теплопередачею частин, то її розрахунок ведемо для цих частин окремо.

Для розрахунку необхідні теплофізичні властивості шамотної цегли, силікатної цегли і повітря, значення яких разом з розрахунком занесені в

таблицю Д.2 (Додаток Д).

Оскільки розрахункова розбіжність менше 2,5%, то перерахунок не проводимо і приймаємо температуру газів на виході з топки $\vartheta''=1638\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оскільки розбіжність для температури стін топкової камери складає 0,93 % то перерахунок також не проводимо і приймаємо температуру внутрішніх стін топки $1615\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.4 Аеродинамічний розрахунок топки

Розрахунки виконані за методикою та рівняннями нормативного методу аеродинамічного розрахунку котлоагрегатів [33].

За результатами теплового розрахунку початковими даними є:

- витрата палива $B_p = 0,488\text{ кг/с}$;
- теоретична витрата повітря $V^0 = 5,75\text{ м}^3/\text{кг}$;
- дійсний об'єм димових газів $V_r = 6,429\text{ м}^3/\text{кг}$;
- коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,4$;
- температура повітря на вході в топку $t_x = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;

Об'єми газів та повітря V_r та V^0 виражені в $\text{м}^3/\text{кг}$ при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 101325 Па .

Оскільки топка працює під наддувом, то вважатимемо, що присмоктувань повітря немає.

Розрахунок повітряного тракту. Для розрахунку повітряного тракту і вибору вентилятора визначаємо всі необхідні характеристики тракту і заносимо їх у таблицю Д.3 (Додаток Д).

Аеродинамічний розрахунок повітряного тракту поданий в таблиці Д.4 (Додаток Д).

Так як всмоктувальний повітропровід має еквівалентний діаметр 1 м , то швидкості в ньому невеликі і його аеродинамічним опором нехтують.

4.2 Конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента

4.2.1 Формування початкових даних

Робочі параметри:

- потужність теплогенератора $Q = 8500$ кВт;
- видатність вентиляторів 82800 м³/год;
- температура сушильного агента на виході з сушарки $t''_1 = 70$ °С;
- відносна вологість відпрацьованого сушильного агента $\phi_2 = 40\%$;
- температура охолодної води на вході $t'_2 = 14$ °С.

За h-d діаграмою повітря визначається температура початку конденсації, ентальпія і вологовміст сушильного агента на виході з сушарки (рис. 4.3).

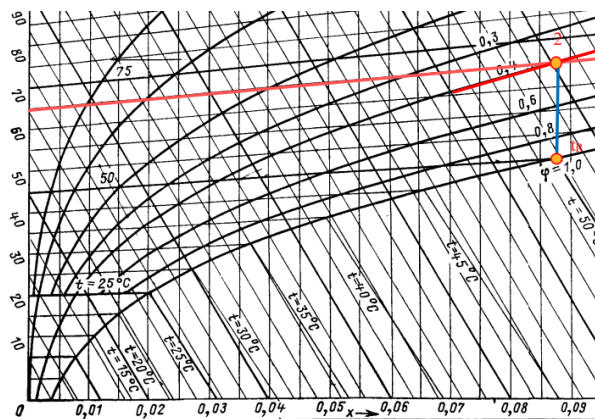


Рисунок 4.3 – Температура початку конденсації за h-d діаграмою повітря.

З h-d діаграми:

- ентальпія $h_2 = 299$ кДж/кг;
- вологовміст $d_2 = 89$ г/кг;
- точка роси $t_R = 49$ °С.

4.2.2 Параметри і характеристики теплоносіїв

Густина вологого повітря

$$\rho_{п2} = \frac{P}{RT} \cdot \frac{1 + d_2}{1 + 1,61 \cdot d_2}, \quad (4.12)$$

де P – тиск відпрацьованого повітря, приймаємо 100 кПа;

R – газова стала, кДж/(кг·К);

T – температура вологого повітря, К.

$$\rho_{п2} = \frac{100000}{0,287 \cdot (70 + 273)} \cdot \frac{1 + 89 \cdot 10^{-3}}{1 + 1,61 \cdot 89 \cdot 10^{-3}} = 968 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Витрата повітря

$$G_1 = \frac{V \cdot \rho_{п2}}{3600}, \quad (4.13)$$

$$G_1 = \frac{82800 \cdot 0,968}{3600} = 22,3 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right).$$

Тепловий баланс газоводяного ТА

$$Q = G_1 (h'_1 - h''_1) \cdot \eta = G_2 C' p_2 (t''_2 - t'_2), \quad (4.14)$$

де h'_2 і h''_2 – ентальпії відпрацьованого теплоносія на вході і виході з ТА.

Прийmemo, що в ТА втрати теплоти через оболонку відсутні, тобто $\eta = 1$.

Прийmemo температуру охолодної (мережної) води на виході з ТА $t''_2 = 66^\circ\text{C}$.

Середня температура води

$$\bar{t}_2 = \frac{t'_2 + t''_2}{2}, \quad (4.15)$$

$$\bar{t}_2 = \frac{14 + 66}{2} = 40^\circ\text{C}.$$

Теплоємність мережної води, визначаємо за $\bar{t}_2$ з теплофізичних властивостей води $C_{p1}' = 4,174, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ [41].

З теплового балансу, секундна витрата води

$$G_2 = \frac{Q}{C_{p2}(t_2'' - t_2')}, \quad (4.16)$$

$$G_2 = \frac{8500}{4,174(66 - 14)} = 39 \left(\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right).$$

Приймаємо температуру відпрацьованого повітря на виході з ТА $t_1'' = 15^\circ \text{C}$.

Середня температура відпрацьованого повітря

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}, \quad (4.17)$$

$$\bar{t}_1 = \frac{70 + 15}{2} = 42,5^\circ \text{C}.$$

Для середньої температури відпрацьованого повітря з теплофізичних властивостей сухого повітря:

$$C_{p2} = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad v_1 = 16,98 \cdot 10^{-6}; \quad \lambda_1 = 2,78 \cdot 10^{-2}; \quad Pr_1 = 0,699 \text{ [36]}.$$

Теплота пароутворення, визначається з теплофізичних властивостей сухої насиченої пари за $\bar{t}_1$, $r = 2399 \text{ кДж}/\text{кг}$ [41].

Температура мережної води на виході з теплообмінника

$$t_2'' = \frac{Q}{G_2 \cdot C_{p2}'} + t_2', \quad (4.18)$$

$$t_2'' = \frac{8500}{39 \cdot 4,174} + 14 = 66,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Розрахунки показують, що температура охолодної води на виході складе 66,2 °С. Ми прийняли її 66 °С.

$$\varepsilon = \frac{66,2 - 66}{66,2} 100\% = 0,3\% < 2\%.$$

Подальші уточнення температури води на виході з ТА можна не виконувати.

4.2.3 Вибір діаметрів труб

Приймемо попередньо загальну кількість труб для ходу води в теплообмінному апараті, $n = 48$.

Площа поперечного перерізу труби для проходження мережної води

$$f_{\text{жп2}} = \frac{G_2}{n \cdot \rho_2 \cdot w_2}, \quad (4.19)$$

де w_1 – швидкість мережної води в трубі, приймаємо 1, м/с;

ρ_1 – густина мережної води, визначаємо за $\bar{t}_1$ з теплофізичних властивостей води [36] $\rho_1 = 995,5 \text{ кг/м}^3$

$$f_{\text{жп2}} = \frac{39}{48 \cdot 995,5 \cdot 1} = 0,0008 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Внутрішній діаметр труб в теплообміннику

$$d_B = \sqrt{\frac{f_B \cdot 4}{\pi}}, \quad (4.20)$$

$$d_B = \sqrt{\frac{0,0008 \cdot 4}{3,14}} = 0,025 \text{ (м)}.$$

Підбираємо труби сталеві з діаметрами 30/25 мм [43].

4.2.4 Коефіцієнт теплопередачі

Критерій Рейнольдса для руху мережної води в трубах

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot l_1^*}{\nu_1}, \quad (4.21)$$

де l_1^* – визначальний розмір, для труб приймаємо d_y ;

ν_1 – кінематична в'язкість, визначаємо за $\bar{t}_1$ з теплофізичних властивостей води [41] $\nu_1 = 0,633 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

$$Re_1 = \frac{1 \cdot 0,025}{0,633 \cdot 10^{-6}} = 39495.$$

Критерій Прандтля, Pr_1 визначається для $\bar{t}_1$ з теплофізичних властивостей води $Pr_1 = 4,12$ [41].

Критерій Нуссельта для течії в трубі

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43}, \quad (4.22)$$

$$Nu_1 = 0,023 \cdot 39495^{0,8} \cdot 4,12^{0,43} = 183,6.$$

Критерій тепловіддачі від мережної води до внутрішньої стінки труби

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{l_1^*}, \quad (4.23)$$

де λ_1 – коефіцієнт теплопровідності води, за [41] $\lambda_1 = 0,638$ Вт/(м·К).

$$\alpha_1 = \frac{183,6 \cdot 0,638}{0,025} = 4685,5 \text{ (Вт/(м}^2\cdot\text{К))}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для парогазової суміші

$$\alpha_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{1}{\alpha_2 + r \cdot \beta_p \frac{P_{\text{п}} - P_{\text{п0}}}{t_{\text{п0}} - t_{\text{п}}}}}, \quad (4.24)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі для конденсації водяної пари;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні твердої стінки від конденсату;

β_p – коефіцієнт масовіддачі віднесений до різниці парціальних тисків;

$P_{\text{п0}}$ – парціальний тиск водяної пари, 12,46, кПа (з h-d діаграми);

$P_{\text{п}}$ – парціальний тиск для повітря 100-12,46 = 87,54, кПа;

$t_{\text{п0}}$ – температура початку конденсації водяної пари 49 °С;

$t_{\text{п}}$ – температура закінчення процесу конденсації 15 °С;

ε – об'ємний вміст повітря у водяній парі, прийmemo $\varepsilon = 0,2$.

Попередньо прийmemo довжину труб в ТА $\ell = 4$ м.

Приведена довжина поверхні (число Григуля) для чистої пари

$$Z = \pi \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{ст}}) \cdot \ell \cdot A, \quad (4.25)$$

де A – комплекс який визначається з табличних даних $A = 15,6$, 1/(м·К);

$$Z = 3,14 \cdot (49 - 15) \cdot 4 \cdot 15,6 = 4996.$$

Критерій Рейнольдса для пари

$$Re_1 = 3,25 \cdot Z^{0,75}, \quad (4.26)$$

$$Re_1 = 3,25 \cdot 4996^{0,75} = 1931.$$

Коефіцієнт тепловіддачі при конденсації пари

$$\alpha_2 = \frac{Re_1}{\pi \cdot \ell \cdot (t_n - t_{ct}) \cdot B} \cdot \varepsilon_n, \quad (4.27)$$

де B – комплекс який визначається з табличних даних [41] $B = 306 \cdot 10^{-3}$ м/Вт;

ε_n – поправковий коефіцієнт, що враховує кількість рядів труб у пучку

$\varepsilon_n = 0,9$ [36];

t_{ct} – температура стінки труби, приймаємо 15 °С.

$$\alpha_2 = \frac{1931}{3,14 \cdot 4 \cdot (49 - 15) \cdot 3,06 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,9 = 1773 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Теплофізичні характеристики конденсату за температури конденсату

$$\nu_k = 0,522 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right); \quad \lambda_k = 0,645 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right); \quad Pr_k = 3,95.$$

Приймаємо швидкість руху конденсату, $w_k = 0,1$, м/с.

Критерій Рейнольдса для міжтрубного простору

$$Re_k = \frac{w_k \cdot d_2}{\nu_k}, \quad (4.28)$$

$$Re_k = \frac{0,1 \cdot 0,03}{0,522 \cdot 10^{-6}} = 5747.$$

Критерій Нуссельта в міжтрубному просторі

$$Nu_k = 0,008 \cdot Re_k^{0,9} \cdot Pr_k^{0,43} \left(\frac{Pr_k}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (4.29)$$

$$Nu_k = 0,008 \cdot 5747^{0,9} \cdot 3,95^{0,43} \cdot \left(\frac{3,95}{7,08} \right)^{0,25} = 30,2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі на поверхні твердої стінки від конденсату

$$\alpha_k = \frac{Nu_k \cdot \lambda_k}{d_2}, \quad (4.30)$$

$$\alpha_k = \frac{30,2 \cdot 0,645}{0,03} = 649 \left(\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right)$$

4.2.5 Вплив масовіддачі на конденсацію

Динамічна в'язкість водяної пари

$$\mu = \nu \cdot \rho, \quad (4.31)$$

За [36] кінематична в'язкість водяної пари при температурі конденсації

$$v_{\pi} = 10 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right), \text{ густина водяної пари } \rho_{\pi} = 0,08 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Тоді, за (4.31)

$$\mu_{\pi} = v_{\pi} \cdot \rho_{\pi} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,08 = 8 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right).$$

Динамічна в'язкість суміші

$$\mu_{\text{см}} = \frac{(1-\varepsilon)\mu_{\pi} + 1,6 \cdot \varepsilon \cdot \mu_{\text{пов}}}{1 + 0,61\varepsilon}, \quad (4.32)$$

де $\mu_{\text{пов}}$ – динамічна в'язкість повітря за t_k з теплофізичних властивостей сухого насиченого повітря, $\mu_{\text{пов}} = 19,55 \cdot 10^{-6}$, Н·с/м²

$$\mu_{\text{см}} = \frac{(1-0,2) \cdot 8 \cdot 10^{-7} + 1,6 \cdot 0,2 \cdot 19,55 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,61 \cdot 0,2} = 1,13 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right),$$

Еквівалентний діаметр міжтрубного простору. В першому наближенні приймаємо умовний діаметр кожуха ТА $D_b = 1,5$ м.

$$d_e = \frac{D_b^2 - nd_3^2}{D_b^2 + nd_3^2}, \quad (4.33)$$

$$d_e = \frac{1,5^2 - 48 \cdot 0,03^2}{1,5^2 + 48 \cdot 0,03^2} = 0,95 \text{ (м)}.$$

Швидкість грійного теплоносія

$$w_1 = \frac{V_1}{f_{\text{жп1}}}, \quad (4.34)$$

$$w_1 = \frac{82800}{3600 \cdot 0,95^2 \cdot 0,785} = 32,5 \text{ (м)}.$$

Теплофізичні характеристики грійного теплоносія за визначальною температурою

$$\nu_1 = 16,98 \cdot 10^{-6}; \lambda_1 = 2,78 \cdot 10^{-2}; Pr_1 = 0,699.$$

Критерій Рейнольдса для міжтрубного простору

$$Re_{\text{вп}} = \frac{w_1 \cdot d_e}{\nu_1}, \quad (4.35)$$

$$Re_{\text{вп}} = \frac{32,5 \cdot 0,95}{16,98 \cdot 10^{-6}} = 1818315.$$

Дифузійний критерій Нуссельта

$$Nu_D = C Re_{\text{вп}}^{0,5} \cdot \pi^{\frac{1}{3}} \cdot \varepsilon^{-0,6}, \quad (4.36)$$

де C – поправковий коефіцієнт для третього і наступних рядів труб, 0,82;

ε – об'ємний вміст повітря в парі, 0,2.

$$Nu_D = 0,82 \cdot 1818315^{0,5} \cdot 3,14^{\frac{1}{3}} \cdot 0,2^{-0,6} = 1991.$$

Коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків

$$\beta_p = \frac{Nu_D \cdot D}{l^* \cdot RT}, \quad (4.37)$$

де Nu_D – дифузійний критерій Нуссельта;

R – газова стала повітря, 0,287;

T – температура насичення вологого повітря, К;

l^* – визначальний розмір, приймаємо d_e ;

D – коефіцієнт молекулярної дифузії, $0,108 \cdot 10^{-6}$ (м/с).

$$\beta_p = \frac{1991 \cdot 0,108 \cdot 10^{-6}}{0,95 \cdot 287 \cdot (70 + 273)} = 2,3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}} \right).$$

$$\alpha_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{1}{649} + \frac{1}{1773 + 2405 \cdot 2,3 \cdot 10^{-9} \frac{87,54 - 12,46}{49 - 15}}} = 620 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{см}}} \right)^{-1}, \quad (4.38)$$

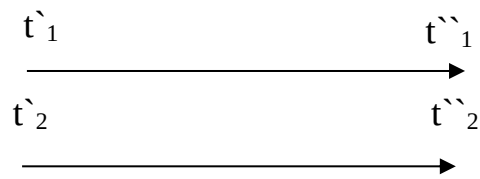
де $\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки труби, 0,0025, м;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності сталі, 45, Вт/(м·К)

$$K = \left(\frac{1}{4685,5} + \frac{0,0025}{45} + \frac{1}{620} \right)^{-1} = 531 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

4.2.6 Температурний напір

Більше і менше температурні навантаження



Різниця температур

$$\Delta t_1 = t'_1 - t'_2, \quad (4.39)$$

$$\Delta t_2 = t''_1 - t''_2, \quad (4.40)$$

$$\Delta t_6 = 70 - 14 = 56^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_m = 66 - 15 = 51^\circ\text{C}.$$

Перевірка придатності формули

$$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{56}{51} = 1,09 < 1,4 - \text{необхідно застосувати формулу для}$$

середньоарифметичного температурного напору

Середньоарифметичний температурний напір

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2}, \quad (4.41)$$

$$\Delta \bar{t} = \frac{56 + 51}{2} = 53,5^\circ\text{C}.$$

4.2.7 Площа теплообміну і довжина труб

З рівняння теплопередачі визначаємо площу теплообміну

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \Rightarrow F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}, \quad (4.42)$$

$$F = \frac{8500 \cdot 10^3}{531 \cdot 53,5} = 34,7 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Загальна довжина труб

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{зн}}}, \quad (4.43)$$

$$L = \frac{34,7}{3,14 \cdot 0,03} = 368 \text{ (м)}.$$

Кількість труб

$$n = \frac{L}{\ell}, \quad (4.44)$$

$$n = \frac{368}{4} = 92 \text{ (штук)}.$$

4.3 Система очищення відпрацьованого теплоносія в проточній зерносушарці S 440 CSRE «Арай»

4.3.1 Формування початкових даних

- температура сушильного агента на вході в сушарку $t'_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура сушильного агента на виході з сушарки $t''_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- вологість вихідного сушильного агента $\varphi_2 = 50\%$;
- видатність сушарки $G = 23 \text{ т/год}$;

- початкова вологість зерна соняшника $\omega'_1 = 13\%$;
- кінцева вологість зерна соняшника $\omega''_1 = 7\%$;
- температура зерна на виході $\vartheta''_1 = 30\text{ }^\circ\text{C}$;
- концентрація пилу на вході в циклон $\mu = 90\text{ г/м}^3$;

Параметри відпрацьованого теплоносія

Для температури $50\text{ }^\circ\text{C}$, густина сухого повітря

$$\rho_{\text{пв}} = \frac{P_6}{RT}, \quad (4.45)$$

де P_6 – тиск в циклоні, беремо 100000 (Па) ;

R – газова стала повітря, беремо $287 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$.

$$\rho_{\text{пв}} = \frac{100000}{287 \cdot (273 + 50)} = 1,078 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Тиск насичення водяної пари за температури $50\text{ }^\circ\text{C}$ [45]:

$$P_{\text{н}} = 12,3499\text{ (кПа)}.$$

Парціальний тиск водяної пари за відносної вологості 50%

$$P_{\text{п}} = \varphi \cdot P_{\text{н}}, \quad (4.46)$$

$$P_{\text{п}} = 0,5 \cdot 12,3499 = 6,175\text{ (кПа)}.$$

Вологовміст вологого повітря за температури $50\text{ }^\circ\text{C}$ за відносної вологості 50%

$$d = \frac{622 \cdot P_{\text{п}}}{P_6 - P_{\text{п}}}, \quad (4.47)$$

$$d = \frac{622 \cdot 6,175}{100 - 6,175} = 40,93 \left(\frac{\text{г}}{\text{кг}} \right).$$

Густина вологого повітря

$$\rho_{\text{вп}} = \rho_{\text{пв}} \frac{1 + d}{1 + 1,6078 \cdot d}, \quad (4.48)$$

$$\rho_{\text{вп}} = 1,078 \cdot \frac{1 + 0,04093}{1 + 1,6078 \cdot 0,0493} = 1,039 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Для розрахунку об'ємної витрати беремо масову витрату теплоносія відповідно до [47] : $G = 148400$ (кг/год).

Об'ємна витрата відпрацьованого повітря для очищення

$$V = \frac{G}{\rho_{\text{вп}}}, \quad (4.49)$$

$$V = \frac{148400}{1,039} = 142830 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right).$$

Для збірки приймаємо 8 штук циклонів. Тоді

$$V_1 = \frac{142830}{8} = 17854 \approx 18000 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{год}} \right).$$

4.3.2 Вибір геометричних розмірів циклона

Для витрати V_1 вибираємо циклон СТФ-Ц з такими параметрами [49]:

- 1) внутрішній діаметр циклону $D = 1200$ мм;
- 2) внутрішній діаметр вихлопної труби циклону $d = 720$ мм;
- 3) внутрішній діаметр пиловипускного отвору $d_1 = 360$ мм;
- 4) висота вхідного патрубку $a = 792$ мм;
- 5) ширина вхідного патрубку $b = 240$ мм;
- 6) ширина вхідного патрубку на вході $b_1 = 312$ мм;
- 7) довжина вхідного патрубку $\ell = 720$ мм;
- 8) висота вихлопної труби $h = 2532$ мм;
- 9) висота циліндричної частини корпусу циклону $h_1 = 1656$ мм;
- 10) висота конічної частини $h_2 = 1176$ мм;
- 11) діаметр конічної частини вихлопної труби $d_2 = 1000$ мм;
- 12) діаметр конічної частини корпусу циклону $d_3 = 1428$ мм;
- 13) діаметр ковпака $d_4 = 960$ мм;
- 14) висота внутрішнього бункера $h_3 = 710$ мм;
- 15) висота зовнішнього бункера $h_4 = 860$ мм;
- 16) діаметр зовнішнього бункера $d_5 = 1710$ мм;
- 17) діаметр зовнішнього корпусу $D_1 = 1440$ мм;
- 18) висота вихлопного патрубку верхнього равлика $a_1 = 792$ мм;
- 19) ширина вихлопного патрубку верхнього равлика $b_2 = 312$ мм;
- 20) діаметр вихлопної труби верхнього равлика $d_6 = 350$ мм;
- 21) повна висота циклону $H = 5472$ мм;
- 22) Товщина стінки циклону $S = 6$ мм.

4.3.3 Ефективність циклона

Швидкість газу

Швидкість газу у вхідному перерізі циклона

$$w = \frac{V}{3600 \cdot f_{vc}}, \quad (4.50)$$

де f_{vc} – площа вхідного отвору циклона, м²

$$f_{vc} = a \cdot b_1, \quad (4.51)$$

$$f_{vc} = 0,792 \cdot 0,312 = 0,247 \text{ (м}^2\text{)}.$$

$$w = \frac{18000}{3600 \cdot 0,247} = 20,24 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Умовна швидкість газу в корпусі циклона

$$w_{\Pi} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2}, \quad (4.52)$$

$$w_{\Pi} = \frac{4 \cdot 18000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,2^2} = 4,42 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

4.3.4 Оцінювання дисперсного складу пилу

Дисперсний склад пилу представлений в таблиці 4.9 [50].

Таблиця 4.9 – Дисперсний склад пилу при сушінні зернових

Розмір часток фракції d_i , мкм	<1	1-3	3-5	5-7	7-10	10-15	15-20	20-30	30-40	40-60
Вихід фракції за масою p_i , %	1,98	5,24	8,07	3,41	8,52	13,14	11,44	17,70	11,80	18,70

Беремо 2 фракції:

$d_{cp1} = 50$ мкм, сумарний вихід по плюсу $p_1 = 18,7$ %;

$d_{cp2} = 8,5$ мкм, сумарний вихід по плюсу $p_2 = 81,3$ %.

Коефіцієнт неоднорідності суміші

$$n = \frac{\lg \left[\lg \left(\frac{100}{p_1} \right) \right] - \lg \left[\lg \left(\frac{100}{p_2} \right) \right]}{\lg d_1 - \lg d_2}, \quad (4.53)$$

$$n = \frac{\lg \left[\lg \left(\frac{100}{18,7} \right) \right] - \lg \left[\lg \left(\frac{100}{81,3} \right) \right]}{\lg 50 - \lg 8,5} = 1,18.$$

Еквівалентний розмір часток

$$d_e = \frac{d_2}{\sqrt[n]{2,302 \cdot \lg \left(\frac{100}{p_2} \right)}}, \quad (4.54)$$

$$d_e = \frac{8,5}{\sqrt[1,18]{2,302 \cdot \lg \left(\frac{100}{81,3} \right)}} = 32,2 \text{ (мкм)}.$$

Параметр диференціальної функції розподілу

$$b = \frac{1}{d_e^n}, \quad (4.55)$$

$$b = \frac{1}{32,2^{1,18}} = 0,017.$$

4.3.5 Загальна ефективність циклона

Інтегральна функція розподілення часток, за формулою Розіна- Рам- лера [51]

$$P = \exp(-0,017 \cdot d_e^n), \quad (4.56)$$

$$P = \exp(-0,017 \cdot 32,2^{1,18}) = 0,36.$$

Диференціальна функція розподілення часток

$$f_1(d) = 0,02 \cdot d_e^{n-1} \cdot \exp(-0,017 \cdot d_e^n), \quad (4.57)$$

$$f_1(d) = 0,02 \cdot 32,2^{0,18} \cdot \exp(-0,017 \cdot 32,2^{1,18}) = 0,013.$$

Загальна ефективність циклона

$$\eta_{\text{ц}} = 103,1 - 3,39 \cdot w - 0,253 \cdot \mu + 0,021 \cdot w \cdot \mu + 0,114 \cdot w^2, \quad (4.58)$$

$$\eta_{\text{ц}} = 103,1 - 3,39 \cdot 20,24 - 0,253 \cdot 90 + 0,021 \cdot 20,24 \cdot 90 + 0,114 \cdot 20,24^2 = 96,67\%.$$

Параметр фракційної ефективності циклона

$$A = 0,58 \cdot \eta_{\text{ц}}^9, \quad (4.59)$$

$$A = 0,58 \cdot 0,9667^9 = 0,43.$$

Концентрація пилу на виході з циклона

$$\mu_2 = \mu - \eta_{\text{ц}} \cdot \mu, \quad (4.60)$$

$$\mu_2 = 90 - 0,9667 \cdot 90 = 2,997 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right).$$

4.3.6 Аеродинамічний розрахунок

Беремо коефіцієнт гідравлічного опору циклона, віднесений до швидкості газу в циклоні $\zeta_{\text{ц}} = 215$ [47].

Густина газу беремо розрахованою за формулою для сухого повітря (2.1), оскільки при збільшенні вологості густина зменшується. Тому

$$\rho = 1,078 \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Втрати тиску в циклоні

$$\Delta P = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho \cdot w_{\text{ц}}^2}{2}, \quad (4.61)$$

$$\Delta P = 215 \frac{1,078 \cdot 4,42^2}{2} = 2264 \text{ (Па)}.$$

Отримане значення втрат тиску характеризує опір безпосередньо очисного агрегату. Втрати тиску всієї системи очищення включатимуть втрати в очисному агрегаті та в системі повітроводів, повітрозабірних пристроях тощо.

На підставі даних про загальні втрати тиску та витрату повітря проводиться підбір нагнітальної машини.

Висновки до Розділу 4.

Розрахунок проводився для спалювання кам'яного вугілля Волинського басейну, марки «Г», проведено розрахунок об'ємів газів і теоретичного об'єму повітря та розрахунок ентальпій топкових газів. Зроблено розрахунок теплового балансу топки і витрат палива, де було визначено втрати теплоти в топці, дійсну ентальпію і температуру газів на виході з топки. Температура газів на виході рівна 1638 °С. Теплові втрати в топці склали 1,34%.

За результатами розрахунку теплового балансу ТА було визначено густину вологого повітря, витрати води та повітря, середні температури води та повітря і підібрано діаметр сталевих труб.

Коефіцієнт тепловіддачі для парогазової суміші складає $620 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$

Коефіцієнт теплопередачі дорівнює $531 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$.

З рівнянь теплопередачі визначено площу теплообмінника яка становить 34,7 (м²). Кількість труб становить 92 штуки, а загальна їх довжина формує 368 (м).

Розрахунок очисного пристрою для очищення відпрацьованого теплоносія показав, що для роботи може бути застосована збірка з восьми циклонів типу СТФ-Ц діаметром 1200 мм.

Загальна ефективність очищення такої збірки складає 96,67%, а концентрація пилу дрібних фракцій на виході з циклона 2,997 г/м³.

Втрати тиску в одиночному циклоні СТФ-Ц 1200 складають 2264 Па.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розглянуто питання охорони праці в процесі модернізації теплової схеми проточної зерносушарки. Під час модернізації електричної та теплової схем сушарок потрібно розробити та використовувати проєктну та нормативно-технічну документацію. Для безпечного та ефективного виконання монтажних робіт працівники повинні бути забезпечені всім потрібним будівельним обладнанням та інструментами. Крім того, потрібно створити для них нешкідливі та безпечні умови праці.

Отже, на будівельно-монтажний персонал, що вдосконалює електричну та теплову схеми сушарок, впливають такі шкідливі виробничі фактори [49, 50]:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, в основному аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Під час монтажу інженерних систем теплової схеми проточної

зерносушарки монтажники повинні отримуватися правил охорони праці в будівництві [51], за якими потрібно перебувати на раніше встановлених і надійно закріплених конструкціях чи засобах підмоцнування. Забороняється перебування людей на елементах конструкцій і обладнання під час їх піднімання та переміщення.

Навісні монтажні площадки, сходи та інші пристосування, що необхідні для виконання робіт на висоті, потрібно встановлювати на конструкціях, які монтуються до їх піднімання. Для переходу монтажників з однієї конструкції на іншу необхідно застосовувати драбини, перехідні містки і трапи, що мають огорожі. Забороняється перехід монтажників по встановлених конструкціях та їх елементах (фермах, ригелях тощо), на яких неможливо забезпечити необхідну ширину проходу при встановлених огорожах, без застосування спеціальних запобіжних пристроїв (натягнутого уздовж ферми чи ригеля каната для закріплення карабіна запобіжного поясу). Місця і способи кріплення каната повинні бути зазначені в ПВР. Спосіб стропування елементів конструкцій та обладнання повинен забезпечувати їх подавання до місця розміщення в положенні, близькому до проектного.

Заготівлю та припасування труб необхідно виконувати в заготівельних майстернях. Виконання цих робіт на риштуваннях, призначених для монтажу трубопроводів, забороняється.

Ліквідацію недоліків, виявлених під час випробувань змонтованої системи та обладнання, необхідно виконувати на підставі розроблених і затверджених замовником і генеральним підрядником разом із субпідрядними організаціями заходів щодо безпеки виконання цих робіт.

Встановлення та зняття перемичок (зв'язків) між змонтованим і діючим устаткуванням, а також підключення тимчасових установок до діючих систем (електричних, парових, технічних тощо) без письмового дозволу генерального підрядника і замовника не допускається.

Монтаж трубопроводів і повітроводів на естакадах необхідно виконувати з інвентарного риштування, обладнаного сходами для піднімання та

спускання працівників. Піднімання та спускання конструкціями естакад не допускається. Забороняється перебування людей під обладнанням, що встановлюється, монтажними вузлами обладнання і трубопроводів до їх остаточного закріплення.

Опускати труби у закріплену траншею необхідно так, щоб не порушувати кріплення траншеї. Не дозволяється скочувати труби в траншею за допомогою ломів і ваг, а також використовувати розпірки кріплення траншей як опори для труб.

Монтаж обладнання, трубопроводів і повітропроводів поблизу електричних мереж (у межах відстані, яка дорівнює найбільшій довжині вузла чи ланки трубопроводу, що монтується) виконується при знятій напрузі. За неможливості зняття напруги роботи необхідно виконувати за нарядом-допуском, затвердженим у визначеному порядку.

Під час монтажу трубопроводів і обладнання стикування та з'єднання отворів і перевіряння їх збігу в деталях, що монтуються, необхідно виконувати за допомогою спеціального інструменту (конусних оправок, складальних пробок тощо). Перевіряти збіг отворів у деталях, що монтуються, пальцями рук не допускається.

Під час монтажу обладнання повинні бути вжиті заходи із запобігання самовільному чи випадковому його вмиканню. Під час монтажу обладнання з використанням домкратів необхідно вжиття заходів, що запобігають перекосу чи перекиданню домкратів.

Під час переміщення конструкцій чи обладнання відстань від них і до частин змонтованого обладнання, конструкцій, що виступають, повинна бути по горизонталі не менше ніж 1,0 м, а по вертикалі – не менше ніж 0,5 м. Під час перерви у роботі залишати підняті елементи конструкцій і обладнання у піднятому стані заборонено.

Установлені в проектне положення елементи конструкцій чи обладнання повинні бути закріплені так, щоб забезпечувалася їх стійкість і геометрична незмінність. Забороняється виконання монтажних робіт на висоті у відкритих

місцях за швидкості вітру 15 м/с і більше, під час ожеледі, грози, туману, що унеможлиблює видимість у межах фронту робіт.

5.1.2 Електробезпека

Живлення будівельного обладнання та системи освітлення здійснюється трифазною чотирьохпровідною мережею із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з ГОСТ ПБЕ [52, 53] умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях, що будуються, є струмопровідною.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення. Електропривод насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

Будівельно-монтажний персонал під час використання електрифікованого інструменту повинен дотримуватися таких правил з охорони праці [52, 53]. Електрифікований інструмент за умовами безпеки поділяється на такі класи:

I – електроінструмент, у якого всі деталі, що перебувають під напругою, ізольовані і штепсельна вилка має заземлювальний контакт. У електроінструмента класу I всі деталі, що перебувають під напругою, можуть бути з основою, а окремі деталі – з подвійною або посиленою ізоляцією; II – електроінструмент, у якого всі деталі, що перебувають під напругою, мають подвійну або посилену ізоляцію, Цей електроінструмент не має пристроїв для заземлення. Номінальна напруга для електроінструмента класів I і II має бути не більше 220 В для електроінструмента постійного струму; 380 В – для електроінструмента змінного струму; III – електроінструмент на номінальну напругу не вище 42 В, у якого ні внутрішні, ні зовнішні кола не перебувають під іншою

напругою. Електроінструмент класу ІІІ призначений для живлення від безпечної наднизької напруги.

Якщо безпечну наднизьку напругу одержують перетворенням вищої напруги, то це слід здійснювати за допомогою безпечного ізолювального трансформатора, далі за текстом – "розподільчий трансформатор безпеки", або перетворювача з окремими обмотками. Електроінструмент, який живиться від електромережі, слід обладнувати незнімним гнучким кабелем (шнуром) зі штепсельною вилкою. Незнімний гнучкий кабель електроінструмента класу І повинен мати жилу, яка з'єднує заземлювальний затискач електроінструмента із заземлювальним контактом штепсельної вилки.

Кабель в місці введення до електроінструмента класу І слід захищати від стирань і перегинів еластичною трубкою з ізоляційного матеріалу. Трубку слід закріплювати в корпусних деталях електроінструмента, вона повинна виступати з них на довжину не менше п'яти діаметрів кабелю. Закріплення трубки на кабелі поза інструментом забороняється.

Для приєднання однофазного електроінструмента шланговий кабель повинен мати три жили: дві – для живлення, одну – для заземлення. Для приєднання трифазного електроінструмента застосовується чотирижильний кабель, одна жила якого слугує для заземлення. Ці вимоги стосуються тільки електроінструмента із таким корпусом, який слід заземлювати.

Доступні для доторкання металеві деталі електроінструмента класу І, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, повинні бути з'єднані із заземлювальним затискачем. Електроінструмент класів ІІ і ІІІ не заземлюють.

Заземлення корпусу електроінструмента слід здійснювати спеціальною жилою живильного кабелю, яка не може одночасно бути провідником робочого струму. Використовувати з цією метою нульовий робочий провід забороняється. Штепсельна вилка повинна мати відповідну кількість робочих і один заземлювальний контакт. Конструкція вилки повинна забезпечувати випереджальне замикання заземлювального контакту під час ввімкнення та більш

запізнене розмикання його під час вимикання. Конструкція штепсельних вилок електроінструмента класу III повинна унеможливлувати з'єднання їх з розетками на напругу понад 42 В.

Працівники, допущені до роботи з електроінструментом, повинні спочатку пройти навчання і перевірку знань щодо безпечного виконання робіт з застосуванням електроінструменту. До роботи з електроінструментом класу I в приміщеннях з підвищеною небезпекою та поза приміщеннями допускаються працівники з II групою електробезпеки. До роботи з електроінструментом II і III класу достатньо I групи з електробезпеки.

У електроінструмента класу I, крім того, має бути перевірена справність кола заземлення між його корпусом і заземлювальним контактом штепсельної вилки. Працівнику мають бути видані засоби індивідуального захисту (діелектричні рукавички, калоші, килими) або розподільчий трансформатор, чи перетворювач із окремими обмотками, чи захисно вимикальне устаткування.

Забороняється видавати для роботи електроінструмент, який не відповідає хоча б одній із перелічених вимог або електроінструмент з протермінованою датою періодичної чергової перевірки.

У приміщеннях без підвищеної небезпеки ураження працівників електричним струмом достатньо застосувати діелектричні рукавиці, а в приміщеннях зі струмопровідними підлогами – також і діелектричні калоші або килими. Електроінструментом класів II і III дозволяється працювати без застосування індивідуальних засобів захисту в приміщеннях без підвищеної небезпеки ураження працівників електричним струмом.

У посудинах, апаратах та інших металевих спорудах в умовах обмеженої можливості переміщення і виходу з них дозволяється працювати електроінструментом класів I і II за умови, якщо тільки один електроінструмент одержує живлення від автономної двигун-генераторної установки, розподільчого трансформатора безпеки або перетворювача частоти із роздільними обмотками, а також електроінструментом класу III. В цьому разі джерело живлення (трансформатор, перетворювач тощо) слід розміщувати поза вказаними посудинами,

а вторинне коло джерела не слід заземлювати.

Обов'язкова установка захисного заземлення та захисного відключення. При роботі з електроустаткуванням використовуються основні та додаткові електрозахисні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі та струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожувальні пристосування; плакати та знаки безпеки.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [54]. Мікроклімат приміщення характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відносною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень наведені в таблиці 5.1. Робота з монтажу системи опалення та її обладнання відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Таблиця 5.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холодний	Пб	13-23	75	не більше 0,4
Теплий		15-29	70 при 25 °C	0,2-0,5

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [54].

Під час монтажу системи опалення виділяється пил нетоксичний. При

роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [54] наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні монтажника

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення допустимих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до ДБН проектом передбачені наступні рішення [55]:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

5.2.3 Виробниче освітлення

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень

аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечері постає проблема в штучному освітленні.

Характеристика зорових робіт – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [56] розряд зорової роботи V, підрозряд «в». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5,0 включно	V	в	малий	світлий	-	200	1	0,6

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

Під час монтажу системи опалення на будівництві джерелом шуму є будівельне обладнання, машини, механізми та переносний електроінструмент –

механічний шум. Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину.

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності. Шум має кумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини. Процес нервово-психічних захворювань вищий серед осіб, що працюють у гомінких умовах, ніж у людей, що працюють у нормальних звукових умовах.

При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

- нормування за гранично допустимим спектром шуму;
- нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою – постійний; за походженням – гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [57] і наведені в таблиці 5.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумові навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці). Допустимі рівні загальної вібрації на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [58] і наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	<u>1,3</u> 108	<u>0,45</u> 99	<u>0,22</u> 93	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10^{-2} , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

5.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [59, 60]. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [61], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [62].

Отже, приміщення, де встановлене обладнання проточної зерносушарки, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії В (пожежонебезпечна) – горючі гази, легкозаймисті, горючі і/або важкогорючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важкогорючі речовини та матеріали (включно горючий пи́л і/або волокна), за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються), не відносяться до категорій А або Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих, горючих та важкогорючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна перевищує 180 МДж•м⁻².

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН

В.1.1.7-2016 [63] наведено в таблиці 5.6.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення категорії В, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [63] наведено в таблиці 5.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 5.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник) [63].

Таблиця 5.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	4	REI 15	3	2

Таблиця 5.7 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колонни	сходові площадки, ко- стури, сходи,	перекриття міжповерхові (у т.ч.	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні несучі	внутрішні несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12

На території сільськогосподарського підприємства, де встановлені проточні зерносушарки, встановлено 12 газових вогнегасника ВВК-7 і 19 порошкових вогнегасника ВВП-5 (ВП-5) [64].

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано техніко-економічне обґрунтування модернізації сушильного комплексу з урахуванням заміни традиційного палива на альтернативне поновлюване джерело енергії для сушарки Арай S 440.

У першому етапі дослідження виконано повний теплотехнічний розрахунок робочої камери сушарки. Визначено оптимальні параметри сушіння, побудовано матеріальний та тепловий баланси, а також розраховано коефіцієнт корисної дії сушарки, який склав 53,4 %. Уточнено, що сумарна теплова потужність, необхідна для процесу сушіння, становить 3334 кВт. Враховуючи роботу сушарки на природному газі, зроблено висновок про доцільність переходу на поновлюване тверде паливо.

У ході багатоваріантного аналізу розглянуто п'ять варіантів палива: вугілля, мазут, паливо пічне, пелети з лушпиння соняшника та природний газ. Найвигіднішим з точки зору витрат і надійності постачання виявилось вугілля. Воно має найнижчі добові витрати (3217 грн/добу), достатню теплоту згоряння, доступність на ринку та розвинену інфраструктуру логістики. Пелети з лушпиння соняшника також виявились придатними, однак через високу масову витрату та обмеженість постачання вони не можуть забезпечити стабільну довготривалу роботу.

Проведено детальний розрахунок топкового обладнання, включаючи ентальпію продуктів згоряння, обсяги повітря, температуру газів на виході (1638 °C), та втрати теплоти (1,34%). Підібрано вентилятор типу ВДН-9 та електродвигун АІР 112МВ6. Створено загальне креслення топки.

У розділі теплообмінного обладнання розраховано параметри роботи конденсаційного теплообмінника. Визначено площу теплообміну (34,7 м²), кількість труб (92 шт.) та їх загальну довжину (368 м). Отримано значення коефіцієнта теплопередачі (531 Вт/(м²·К)), що підтверджує ефективність розрахованої конструкції.

Окрему увагу приділено питанню очищення відпрацьованого теплоносія. На основі розрахунків запропоновано встановлення збірки з 8 циклонів типу СТФ-Ц діаметром 1200 мм, що забезпечують ефективність очищення 96,67 %. Концентрація пилу на виході складає 2,997 г/м³, а втрати тиску в одному циклоні — 2264 Па.

Загалом, виконана робота підтверджує, що перехід на вугілля як основне паливо для сушарки Арай S 440 є технічно обґрунтованим, економічно доцільним і практично реалізованим варіантом. Розраховані конструктивні елементи та підібране обладнання забезпечують енергоефективну, екологічно безпечну і стабільну роботу сушильного комплексу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Савченко В. І., Петренко Ю. А. Технологія зберігання і переробки зерна. Київ: Аграрна наука, 2020. 232 с.
2. Подпряттов Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. Київ: Видавництво НАУ, 2000. 125с.
3. Кравчук І.П. Енергетична ефективність сушіння зерна в сучасних умовах. *Вісник. ХНТУСГ*, 2021. С. 56-63.
4. Шахтна зерносушарка з вертикальною подачею зерна : пат. 127020 Україна : F26B17/00 / С. І. Романов, Ю. Ю. Чумак, Ю. В. Цісар. № u201803342; заявл. 04.04.2018; опубл. 25.07.2018, бюл. №14. 4 с.
5. Сушарка для зернових з імпульсним обігрівом : пат. 113738 Україна : F26B 17/00 / І. О. Наконечний, П. М. Карпенко. № a201306580; заявл. 30.05.2013; опубл. 10.01.2017, бюл. №1. 4 с.
6. Flow-through recirculating grain dryer : пат. WO2014112964A1. Poland : Int. Cl. F26B17/12, F26B21/00 / М. Józwiak, А. Zarzycki. заявл. 22.01.2014; опубл. 31.07.2014. 22 с.
7. Бойко С. М. Проточні зерносушарки: принцип роботи та ефективність. *АгроСвіт*. №3, 2022. С.78-83.
8. Лещенко Ю.М. Теплові втрати в сушарках та шляхи їх мінімізації. *Наукові праці ВНАУ*, 2021. С. 79 с.
9. ARAJ S440. Технічні характеристики сушарки. Офіційний сайт ARAJ. URL: <https://araj.pl/produkty/suszarnie/suszarnia-s440> (дата звертання 22.03.25).
10. Павлюк О.О. Аналіз витрат енергії на сушіння зернових культур. *Техніка та енергетика АПК*. 2022. С. 45–49.
11. Ковальчук І.Р. Рекуперація тепла в зерносушильному обладнанні. *Вісник аграрної інженерії*. 2021. С. 32–36.
12. Grygier D., Górska A. Alternative fuels in grain drying technology. *Agronomy Research*, 2022. P. 15–25.

13. Smart grain drying: overview of AI applications. *AgriTech Europe*, 2023. URL : <https://agritech-europe.eu/smart-drying> (дата звертання 22.03.25).
14. EP3455017A1 Grain dryer with humidity sensors and adaptive control system. URL: <https://patents.google.com/patent/EP3455017A1/en> (Дата звертання 22.03.25).
15. Integration of drying with postharvest logistics. *Journal of Smart Agriculture Systems*, 2023. — P. 88–96.
16. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О. Сушіння та зберігання зерна. Київ : Олді+, 2019. 208 с.
17. Яковенко А. І., Борта А. В. Технологія зберігання та сушіння зерна: кількісно-якісний облік зерна. Одеса: 2016. 192 с.
18. Станкевич Г. М., Страхова Т. В. Основи сушіння зерна. Одеса: 2022. 156 с.
19. Харченко Є. І., Шаран А. В. Інновації в зернових технологіях. Київ : Олді+, 2024. 224 с.
20. Осокіна Н. М., Мостов'як І. І. Технологія зберігання зерна з основами захисту від шкідників. Київ: КНЕУ, 2016. 144 с.
21. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2008. 188 с.
22. Ткаченко С.Й., Степанова Н.Д. Термодинамічні властивості води і водяної пари на лінії насичення. Вінниця: ВНТУ, 2009. 112 с.
23. Степанов Д. В., Боднар Л. А. Методичні вказівки до виконання курсових проєктів з дисципліни «Джерела тепlopостачання промислових підприємств» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» Вінниця: ВНТУ, 2021. 36 с.
24. Ціна на вугілля в Україні URL : <https://tes24.org/ua/p2225538734-ugol-100-500.html> (дата звернення 02.04.25).
25. Ціна на мазут в Україні URL : <https://tcu.com.ua/tproduct/578391259-598092074331-mazut-topkovii-m-100> (дата звернення 02.04.25).

26. Ціна на пічне паливо в Україні URL : <https://www.vtorenergo.com.ua/vydy-pichnogo-palyva/pkvs-1/> (дата звернення 02.04.25).
27. Ціна на пелети з соняшнику в Україні URL : <https://bioopt.ua/uk/pellety-iz-otkhodov-podsolnechnika.html> (дата звернення 02.04.25).
28. Ціна на природний газ в Україні URL : <https://gas.ua/uk/business/tariffs> (дата звернення 02.04.25).
29. Склад вугілля. URL : https://vue.gov.ua/Вугілля_кам%27яне. (дата звернення 02.04.25).
30. Вугілля. URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Вугілля>. (дата звернення 02.04.25).
31. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2011. 120 с.
32. Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії: Підручник. Київ : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2003. 232 с.
33. Співак О. Ю., Резидент Н. В. Тепломасообмін. Частина I : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 113 с.
34. Чепурний М. М., Степанов Д.В., Корженко Є. С. Теплові розрахунки парогенераторів. Вінниця : ВНТУ, 2005. 142 с.
35. Степанов Д. В., Ткаченко С. Й., Боднар Л. А., Загаєцька Т. Ю. Залежності для теплових розрахунків в жаротрубних пучків котлів малої потужності. *Вісник ВПІ*, 2006. № 2. С. 31-40.
36. Боднар Л. А. Експериментальні дослідження теплообміну в круглому каналі. *Вісник ВПІ*. 2009. №3. С.79-83.
37. Ткаченко С. Й., Боднар Л. А. Екологічні аспекти виробництва енергії: навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 83 с.
38. Довідник з гідравлічних опорів / за ред. М. О. Штейнберг. Київ: Наукова думка, 1992. 672 с.
39. Слобожанський електромеханічний завод «СЛЕМЗ» каталог URL : <https://slemz.com.ua/elektrodiviguni> (дата звернення 10.05.25).

40. Методичні вказівки до виконання курсових проєктів з дисципліни «Теплотехнологічні процеси та установки» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / уклад.: Н. В. Резидент, О. Ю. Співак. Вінниця : ВНТУ, 2023. 23 с.
41. Чепурний М. М., Резидент Н. В. Тепломасообмін в прикладах і задачах : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2011. 128 с.
42. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Основи технічної термодинаміки. Вінниця : Поділля-2000, 2004. 351 с.
43. Клименко М. І., Панасенко Є. В., Стреляєв Ю. М., Ткаченко І. Г. Варіаційне числення та методи оптимізації : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2015. 84 с.
44. Сайт компанії Армашоп. Таблиця відповідності зовнішніх діаметрів сталевих і полімерних труб. URL: <https://armashop.ua/ua/tekhnicheskiiy-spravochnik/tablitza-sootvetstviya-naruzhnykh-diametrov-stalnykh-i-polimernykh-trub/> (дата звернення 21.05.2025).
45. Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Приклади та задачі : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2015. 112 с.
46. ДСТУ 2264-93. Обладнання для кондиціонування повітря та вентиляції. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994. 49 с.
47. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Технічні засоби очищення газових викидів: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2005. 158 с.
48. СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. Міністерство промислової політики України, 2009. 193с.
49. Пацков В. П., Корнієнко О. В., Крицький А. В., Пацкова Т. В. Вплив запиленості полідисперсного потоку на ефективність роботи циклона-сепаратора ЦКШ. В зб. Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, Вип. 1, Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2009. С. 168-182.
50. Клименко М. О., Прищепа А. М., Вознюк Н. М. Моніторинг довкілля : підручник. Рівне : НУВГП, 2023. 351 с.
51. Суртаєв В. В. Підвищення загальної ефективності теплоенергетичних

установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла. *Вісник Криворізького національного університету*, вип. 52, 2021. С. 110-119.

52. ДСНіП Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?iddoc=58073>. (дата звернення 21.05.25).

53. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>. (дата звернення 21.05.25).

54. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.

55. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

56. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>. (дата звернення 22.05.25).

57. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>. (дата звернення 22.05.25)

58. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

59. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.

60. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>. (дата звернення 23.05.25).
61. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Постанова МОЗ № 39 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>. (дата звернення 23.05.25).
62. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [Чинний від 2021-01-22]. Вид. офіц. Київ : МВС України, 2014. 47 с.
63. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 84 с.
64. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 75 с.
65. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 31 с.
66. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-02-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 35 с.
67. Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників. Наказ МВС № 765 від 28.10.2020. [Чинний від 2021-01-26]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>. (дата звернення 23.05.25).

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація теплової схеми проточної зерносушарки S 440 CSRE «АРАЙ»

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ ФБЦЕІ, кафедра ТЕ, група ТЕ-23мс
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 22,1 %

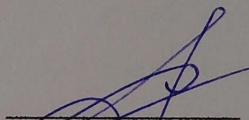
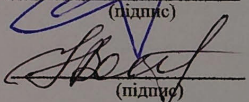
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

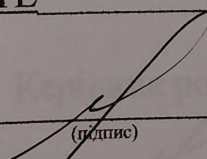
- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Степанов Д.В., зав. кафедри ТЕ
(прізвище, ініціали, посада)

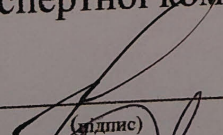
Резидент Н.В., доцент кафедри ТЕ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

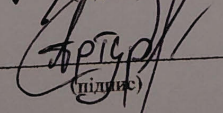
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Співак О.Ю.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

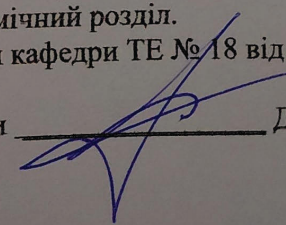
Керівник 
(підпис)

Співак О.Ю., доцент
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

П'ятак А.С.
(прізвище, ініціали)

У відповідності до розпорядження 03/15 від 01.06.2022 р на засіданні кафедри теплоенергетики прийнято рішення виключити в кваліфікаційних роботах здобувачів кафедри з перевірки наявності текстових запозичень розділ Охорони праці та Економічний розділ.
Протокол засідання кафедри ТЕ № 18 від 14.05.2024 р.

Зав. кафедри  Д.В. Степанов

Додаток Б
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕ

к.т.н., доц.

Д.В. Степанов

підпис

2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу:

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ПРОТОЧНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ S
440 CSRE «АРАЙ»
08-15.БКР.010.00.00.000 ТЗ

Керівник роботи: к.т.н., доц.

Співак О.Ю.

Виконавець: студент гр. ТЕ – 23мс

П'ятак А.С.

Вінниця 2025

1 Тематика розробки та галузь її застосування

Розробка стосується промислової теплоенергетики і присвячена питанню енергозбереження і використання проточної зерносушарки S 440 CSRE «Арай» на альтернативний вид палива та підвищення екологічної чистоти навколишнього середовища.

2 Мета і призначення розробки

Переведення проточної зерносушарки на роботу від теплогенератора на твердому альтернативному біопаливі та застосування утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія з метою зниження собівартості готової продукції, зниження енергоспоживання, підвищення екологічної чистоти сушильної установки, забезпечення високоякісної сушеної продукції стабільно високої якості з мінімізацією вимог щодо кваліфікації обслуговуючого персоналу, розрахунок необхідного допоміжного обладнання.

3 Основа для виконання робіт

Основою для виконання робіт є наказ ректора ВНТУ № 97 від 20 березня 2025 р., документація на проточну зерносушарку S 440 CSRE «Арай», розробки і патентна документація, потреба знаходження нових альтернативних відновлювальних джерел теплоти, зниження енергетичних витрат. Це дає можливість отримати в результаті використання ефективної сушильної техніки високоякісні сушені продукти найвищого гатунку, котрі користуються великим попитом на внутрішньому і міжнародному ринках. Для підвищення енергоефективності сушарки і зменшення втрат корисної теплової енергії в атмосферу використовується додаткове теплоенергетичне та теплообмінне обладнання.

4 Технічні вимоги

4.1 Використання твердого біопалива для одержання теплоти у теплогенераторі. Визначення температури повітря на всіх етапах підігріву та сушіння, витрати повітря для основного технологічного процесу та для рециркуляції. Схематичне зображення сушарки на плакатах, креслення теплообмінних апаратів. Дотримання стандартів щодо виготовлення готової продукції та її якості.

4.2 Основні технічні показники:

- температура свіжого повітря $t_0 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вологість свіжого повітря $\varphi_0 = 70\%$;
- температура сушіння $t'_1 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вологість вихідного сушильного агента $\varphi_2 = 50\%$;
- видатність сушарки $G = 23\text{ т/год}$;
- початкова вологість зерна $\omega' = 13\%$;
- температура зерна після сушіння $\vartheta'' = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- кінцева вологість зерна після охолодження $\omega''_1 = 7\%$;

5 Етапи розробки та терміни їх виконання

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Прим.
		початок	закінчення	
1.	Аналіз літературних та патентних джерел	25.03.2025	27.03.2025	
2.	Розрахунки проточної зерносушарки S440	28.03.2025	01.04.2025	
3.	Багатоваріантний аналіз	02.04.2025	10.04.2025	
4.	Розрахунки обладнання для модернізації	11.04.2025	17.04.2025	
4.1	Розрахунок топки	18.04.2025	23.04.2025	
4.2	Конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого агента	24.04.2025	01.05.2025	
4.3	Система очищення відпрацьованого теплоносія в проточній зерносушарці S 440 CSRE «Арай»	09.05.2025	19.05.2025	
5.	Охорона праці	20.05.2025	30.05.2025	
7.	Оформлення висновків по роботі	31.05.2025	01.06.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу.	01.06.2025	04.06.2025	
9.	Перевірка на антиплагіат	04.05.2025	04.06.2025	
10.	Нормоконтроль	05.06.2025	05.06.2025	
11.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	05.06.2025	11.06.2025	
12.	Захист БКР ЕК	12.06.2025	12.06.2025	

6 Перелік графічного матеріалу

- сушарка S440 складальне креслення;
- теплогенератор для зерносушарки АРАЙ S440 на вугіллі;
- складальне креслення конденсаційного теплообмінника для утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента;
- циклон СТФ-Ц-1200 складальне креслення;

7 Порядок контролю та прийняття кваліфікаційної роботи

Виконання етапів графічної та розрахункової документації кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання БКР.

Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедри згідно з графіком захисту.

Корегування технічного завдання допускається з дозволу керівника роботи.

Технічне завдання розроблено на підставі джерел розробки і може уточнюватись протягом виконання бакалаврської роботи.

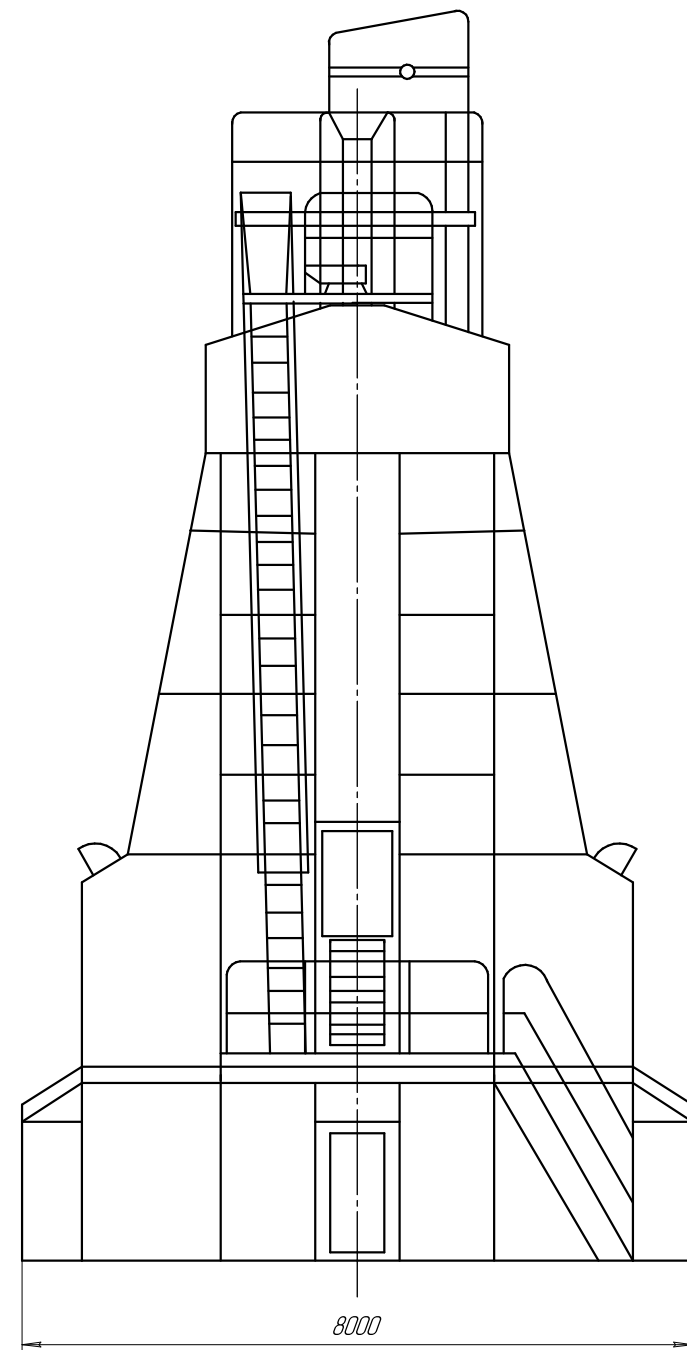
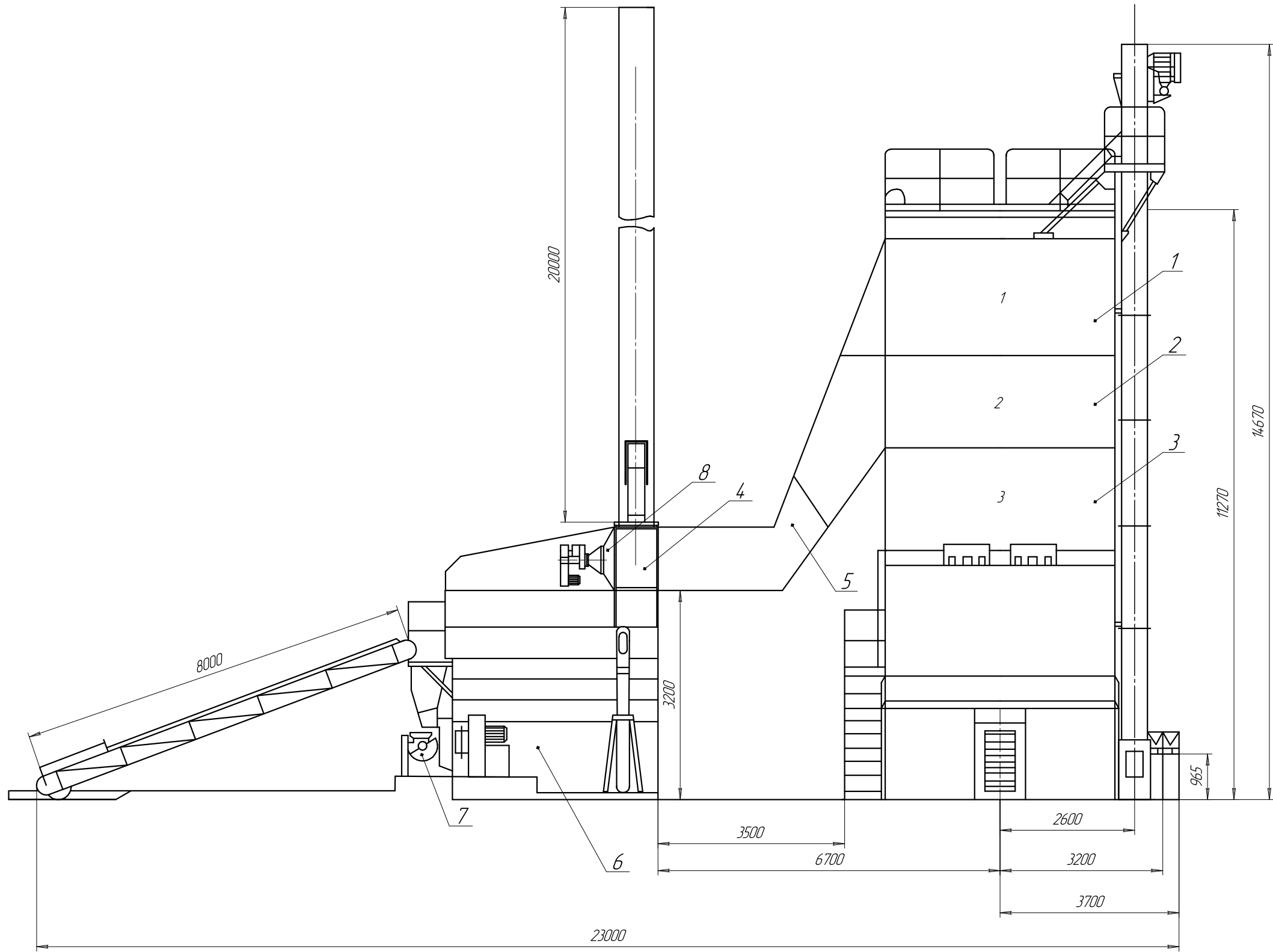
Додаток В
(обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ПРОТОЧНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ
S 440 CSRE «АРАЙ»

Студент _____ П'ятак А.С.
Керівник роботи _____ Співак О.Ю.

[illegible]



Технічні характеристики:
Температура зовнішнього повітря $t=12\text{ }^{\circ}\text{C}$;
Газоповітряна суміш, яка поступає: $t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
Витрата повітря $G=23\text{ кг/с}$;
Початкова вологість зерна $\omega'=13\%$

						08-15.БКР.010.01.000.СК					
						Сушарка S440 Складальне креслення			Літ.	Маса	Масштаб
											1:25
Зм.	Арк	№ докум.	Підп.	Дата					Арк		Аркциф
Розроб.	П'ятак А.С								ВНТУ зр.ТЕ-23мс		
Керівник.	Співак О.Ю.										
Т.контр.											
Реценз.	Попович М.М.										
Н.контр.	Боднар Л.А.										
Затв.	Степанов Д.В.										

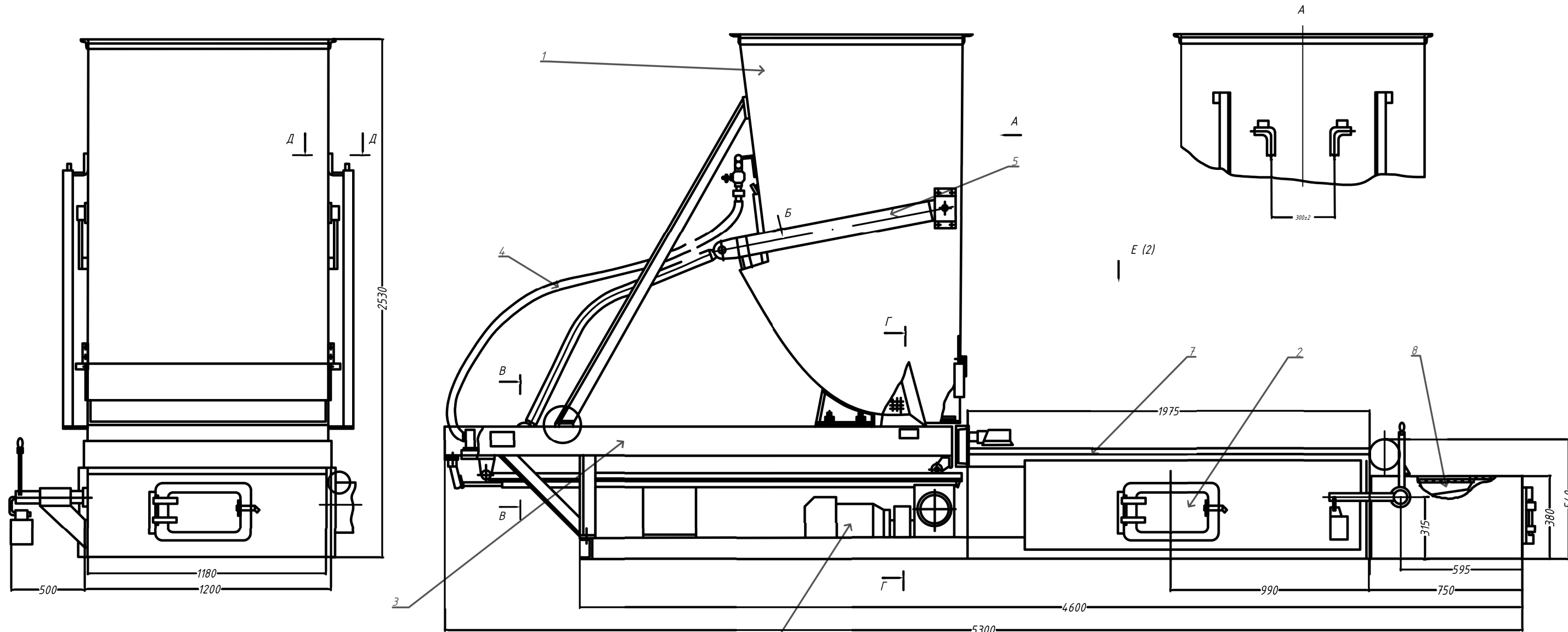
Перв. прим.

Справ. №

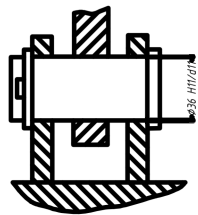
Взам. інв. № / інв. № дубл. Підп. та дата

Інв. № підп. Підп. та дата

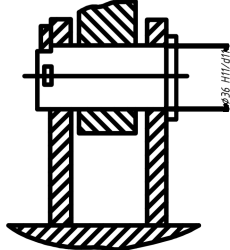
08-15.БКР.010.02.00.000 СК



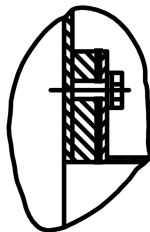
Б-Б (1:2)



В-В (1:2)



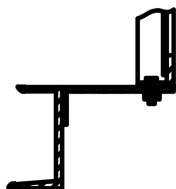
А1 (1:2)



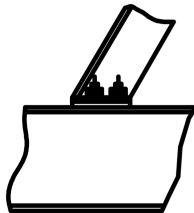
Д-Д (1:1)



Г-Г



А2 (1:4)



Технічна характеристика

1.Номінальна теплопродуктивність, мВт	2,5
2.Розміри колосникових ґрат, мм	довжина 1975
	ширина 1170
3.Хід планки максимальний, мм	1765
4.Місткість дункера, м³	не більше 1,20
5.Ширина топки (монтажний отвір котла), мм	1290

Технічні вимоги

- Розміри без граничних відхилень довідок.
- Зварні шви виконати за ДСТУ ГОСТ 5264 - 80.
- Зварювальний шов №1 - зварювання ручне дугове.
- Електроди марки МР-3 за ДСТУ ГОСТ 9466-75. Допускається застосування інших марок електродів згідно з Р.Д2730.940.102-92.
- Контроль якості зварних швів провести візуальним і вимірвальним методом згідно з РД 34.10.130 -96.
- Хід планки живильника дункера повинен бути вільним, без заїдань.
- Покриття: грунт ГФ-021 ДСТУ ГОСТ 25129-82; Емаль ПФ-133 ДСТУ ГОСТ 926-82

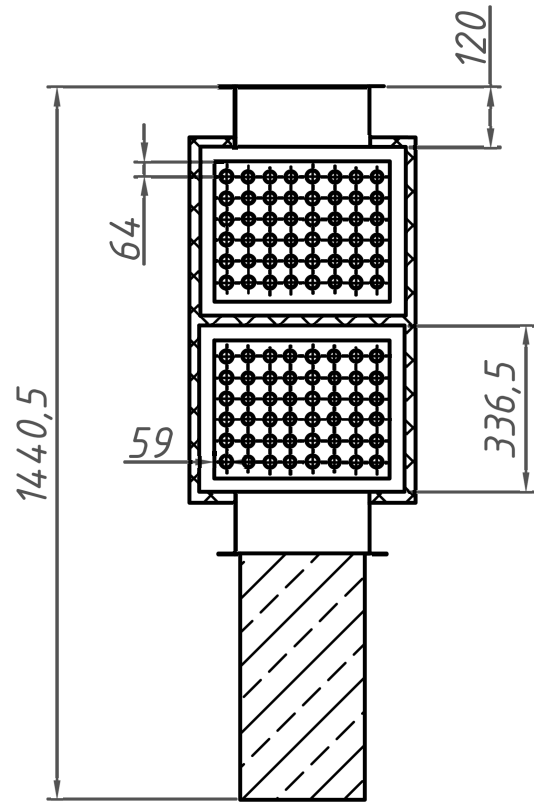
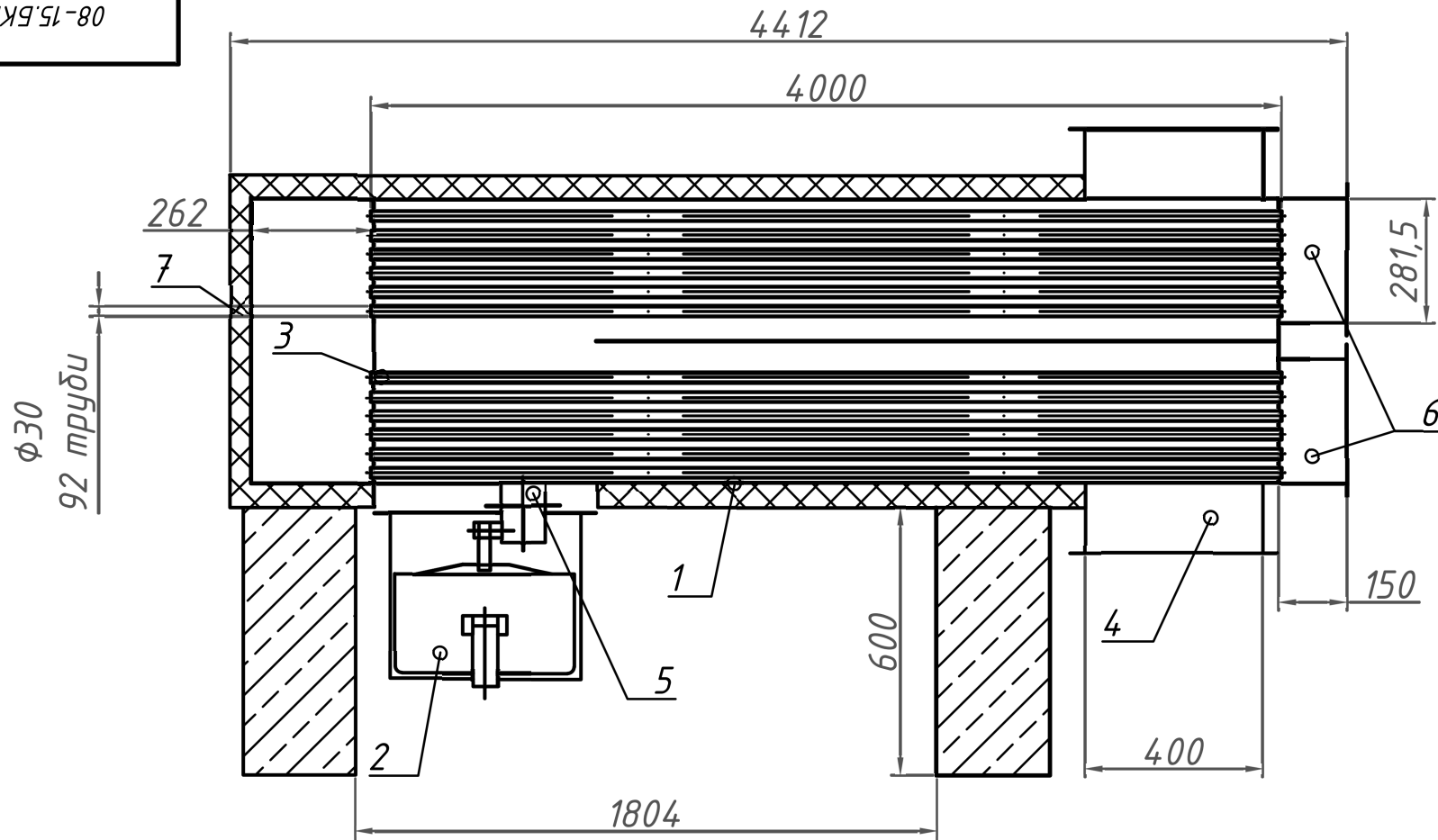
					08-15.БКР.010.02.00.000 СК										
					Теплогенератор для зерносушарки АРАЙ S440 на вугіллі Складальне креслення				Лист		Маса		Масштаб		
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								2400		1:10	
Розроб.	П'ятак А.С.														
Керівник	Співак О.Ю.														
Т.контр									Лист		Листів				
Н.контр	Боднар Л.А.								ТЕ-23мс						
Реценз.	Попович М.М.														
Утв.	Степанов Д.В.														

Копіював

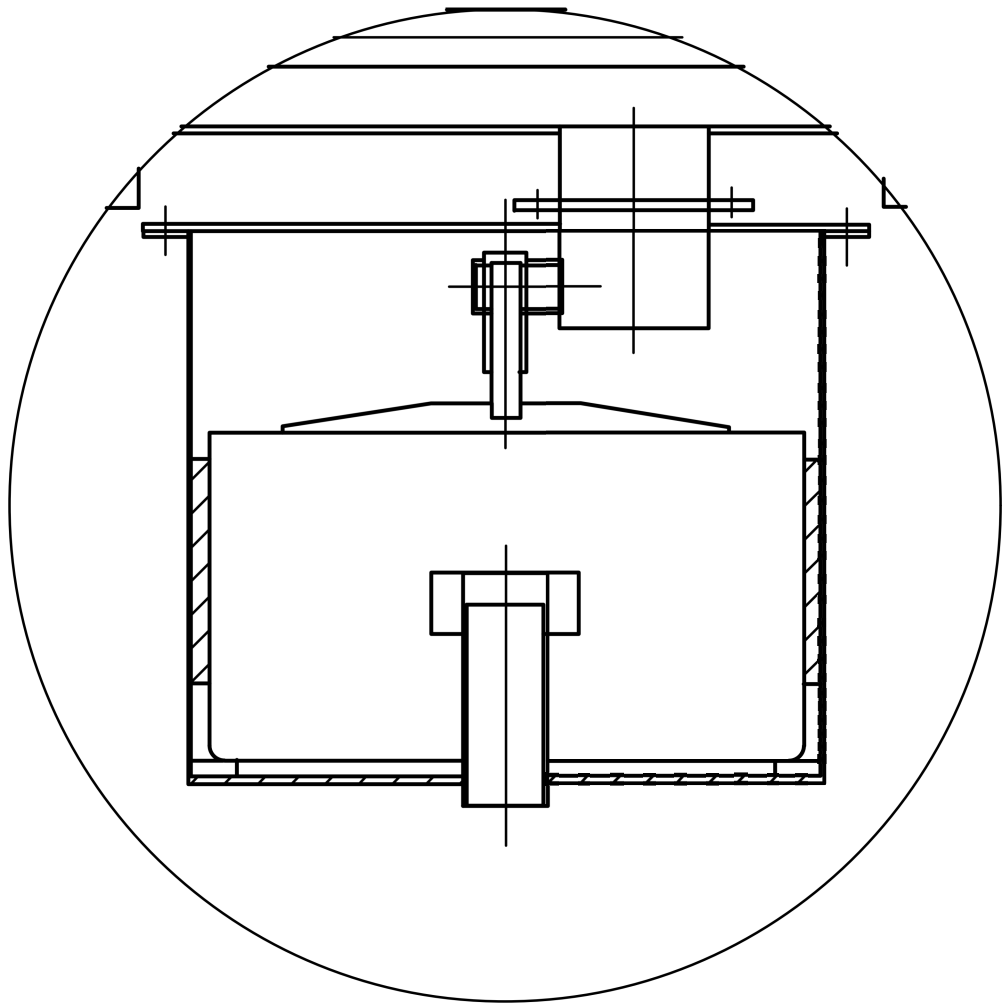
Формат А3

[illegible]

08-15.БКР.010.03.00.000 СК



Б(1:5)

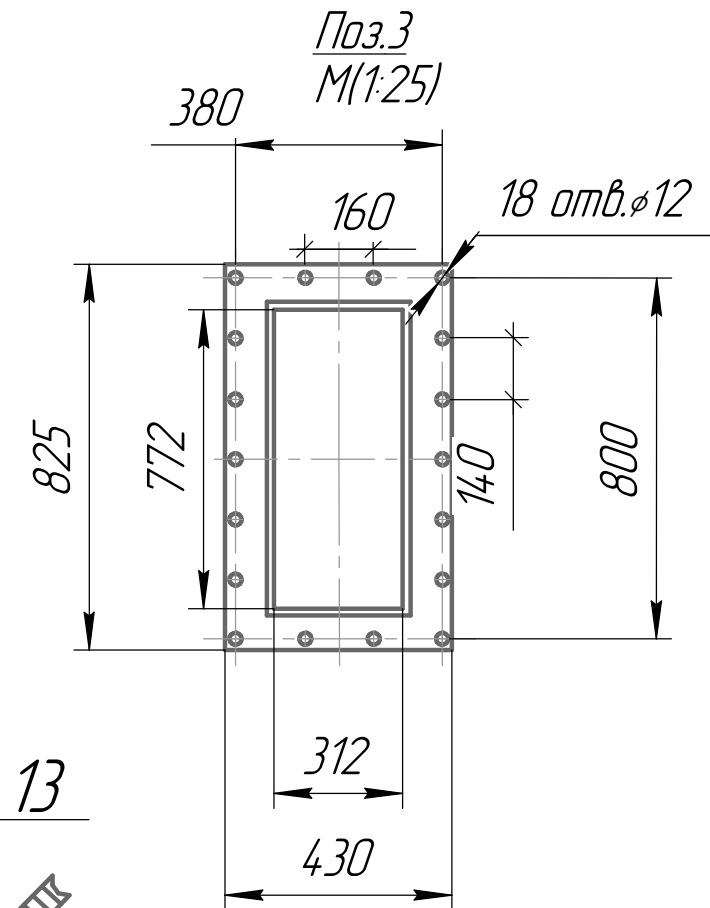
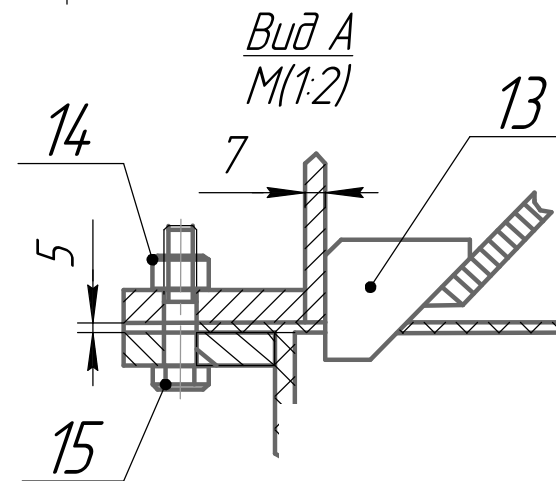
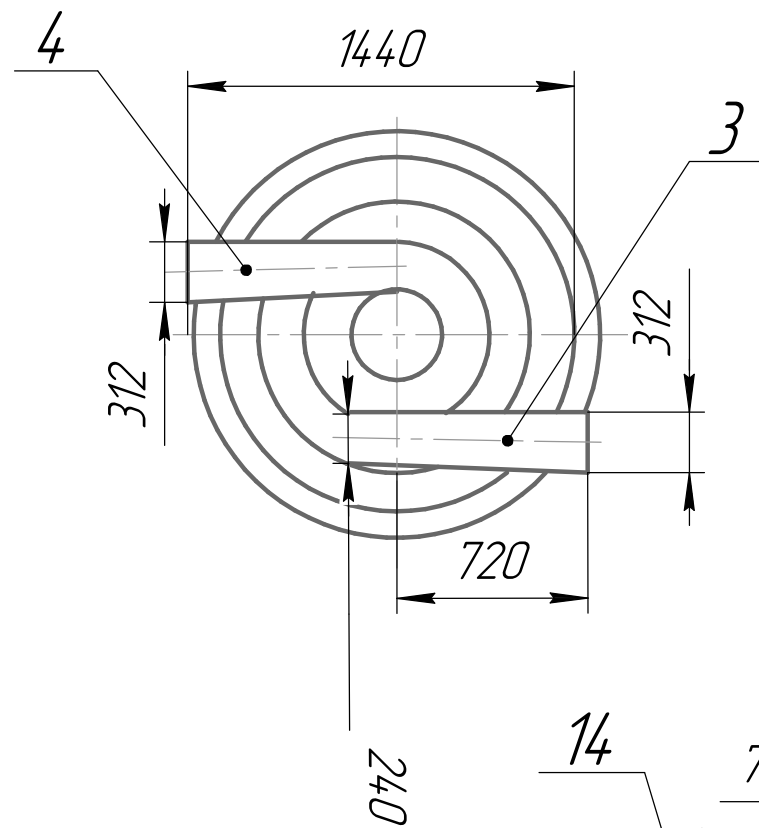
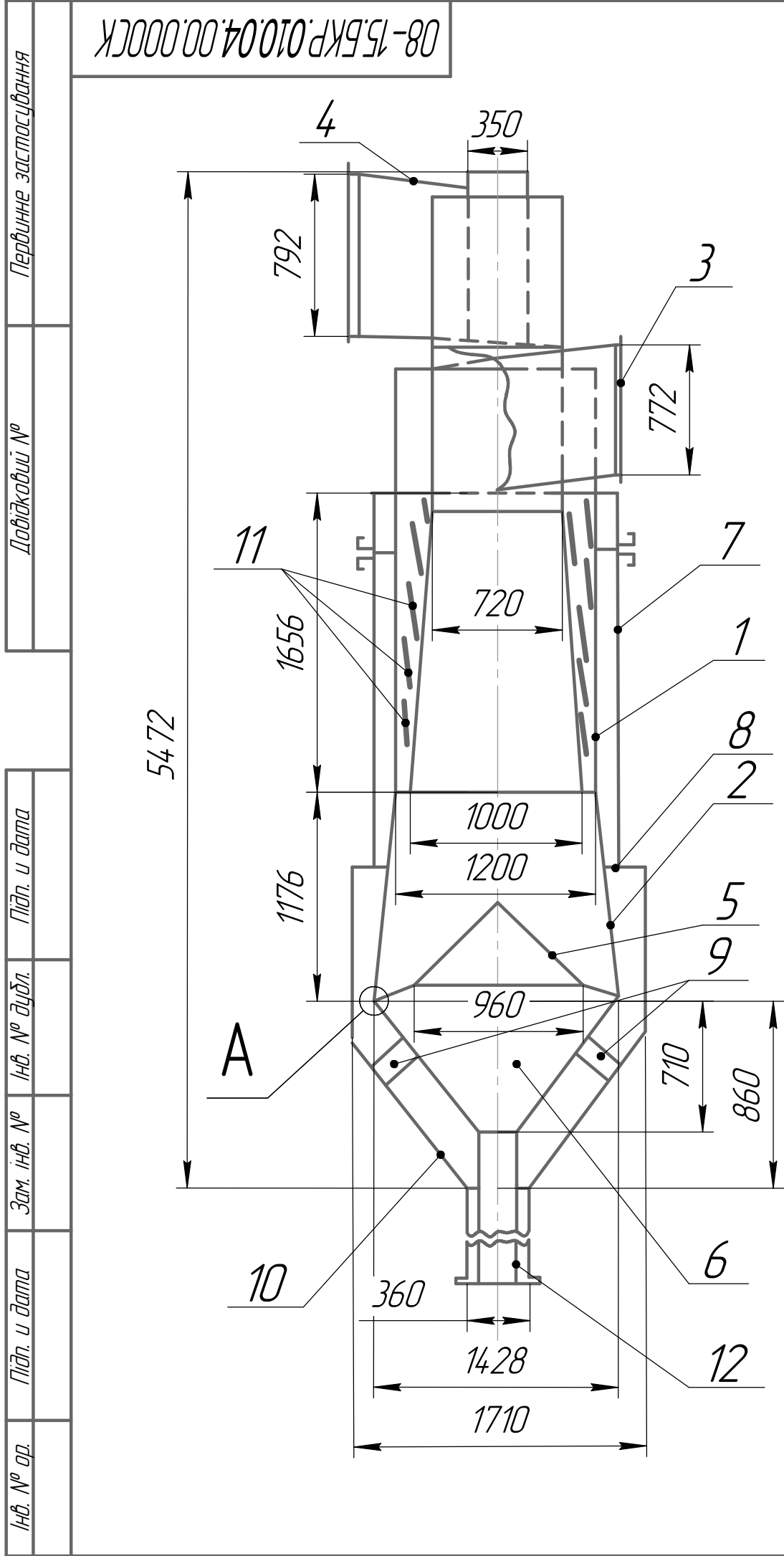


Технічна характеристика

- | | | |
|----|---|------|
| 1. | Теплова потужність, кВт..... | 8500 |
| 2. | Температура відпрацьованого повітря на виході з теплообмінника, °С..... | 17 |
| 3. | Температура відпрацьованого повітря на вході в теплообмінник, °С..... | 70 |
| 4. | Температура мережної води на виході з теплообмінника, °С..... | 66 |
| 5. | Температура мережної води на вході в теплообмінник, °С..... | 14 |
| 6. | Витрати мережної води, кг/с..... | 39 |
| 7. | Витрата відпрацьованого повітря, кг/с..... | 22,3 |

					08-15.БКР.010.03.00.000 СК				
					Конденсаційний теплообмінник для утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента Складальне креслення	Лист		Маса	Масштаб
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					1:10
Розроб.	П'ятак А.С.								
Керівник	Співак О.Ю.								
Т.контр.									
Н.контр.	Боднар Л.А.					Лист		Листів	
Реценз.	Попович М.М.					ТЕ-23мс			
Затверд.	Степанов Д.В.								

[illegible]



Технічні характеристики:

1. Об'ємна видатність 1 елемента $18000 \text{ м}^3/\text{год}$
2. Кількість елементів 8
3. Ефективність очищення 1 елемента 96,67%

* Зварні шви виконати з попереднім зачищенням ручним дуговим зварюванням за ДСТУ EN ISO 9692-1:2014

					08-15.БКР.010.04.00.000СК						
					Циклон СТФ-Ц-1200 Складальне креслення			Літ.	Маса	Масштаб	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							1:50
Розраб.		П'ятак А.С.									
Перев.		Співак О.Ю.									
Т.контр.								Арк.		Аркушів	
Реценз.		Попович М.М.						ТЕ-23МС			
Н.контр.		Боднар Л.А.									
Затв.		Степанов Д.В.									

Копіював

Додаток Д
(довідниковий)
Розрахунок топки

Таблиця Д.1 – Геометричні параметри стін топки

Величина		Формула або спосіб визначення	Роз- мір- ність	Числові значення
Найменування	Позна- чення			
1	2	3	4	5
Фронтowa стіна 1	$a_{\phi 1} \times b_{\phi 1}$	креслення	мм	1975×490
Задня стіна	$a_3 \times b_3$	креслення	мм	1975×490
Бокова стіна 1	$a_{61} \times b_{61}$	креслення	мм	1180×490
Бокова стіна 2	$a_{62} \times b_{62}$	креслення	мм	1180×490
Стеля	$a_c \times b_c$	креслення	мм	1210×1975
Вихід з топки	d_b	креслення	мм	240
Площа фронтowej стіни 1	$F_{\phi 1}$	$a_{\phi 1} \times b_{\phi 1}$		$1,975 \cdot 0,49 = 0,97$
Площа задньої стіни	F_3	$a_3 \times b_3$		$1,975 \cdot 0,49 = 0,97$
Сумарна площа бічної стіни	F_6	$a_{61} \times b_{61} + 0,5 \cdot (a_{62} \times b_{62})$		$1,18 \cdot 0,49 + 1,18 \cdot 0,49 \cdot 0,5 = 0,87$
Сумарна площа стелі	F_c	$a_c \times b_c - \pi \cdot d^2$		$1,21 \cdot 1,975 - \pi \cdot 0,24^2 = 2,21$
Товщина кладки фронтowej стіни шамотна цегла силікатна цегла	$\delta_{ш1\phi}$	З креслення	мм	120
	$\delta_{с1\phi}$		мм	380
Товщина кладки задньої стіни: шамотна цегла силікатна цегла	$\delta_{ш3}$	З креслення	мм	65
	$\delta_{с3}$		мм	120
Товщина кладки бічної стіни і стелі: шамотна цегла силікатна цегла	$\delta_{шб}$	З креслення	мм	65
	$\delta_{сб}$		мм	200

Таблиця Д.2 – Розрахунок втрат теплоти і витрати палива

Величина		Формула або спосіб визначення	Розмірність	Числові значення
Найменування	Позначення			
1	2	3	4	5
Теплопровідність матеріалів стін топки: шамотна цегла силікатна цегла азбест сталь	$\lambda_{ш}$ $\lambda_{с}$ $\lambda_{а}$ $\lambda_{с}$	З таблиці теплофізичних характеристик	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	1,14 0,82 0,116 45
Температура газів на виході з топки	ϑ_a	Із завдання	°С	1600
Наявна теплота	$Q_H = Q^p_H$	Попередньо розраховано	кДж/кг	27400
Втрати теплоти від хімічної неповноти згорання	q_3	Приймаємо	%	0,5
Втрати теплоти від механічної неповноти згорання	q_4	Приймаємо	%	0,5
Температура повітря навколишнього середовища	$t_{н.с.}$	Приймаємо	°С	10
Температура стінки топки ззовні,	$t_{с.т}$	Приймаємо	°С	50
Ентальпія холодного повітря	$I^0_{х.п.}$	$I^0_{хп} = V^0 (c\theta)_{хп}$	кДж/кг	$5,75 \cdot 20 = 115$
Потужність топки	Q_T	Задано	МВт	8,5
Температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря	β	$\frac{1}{273 + t_{н.с}}$	1/К	$\frac{1}{273 + 10} = 3,5 \cdot 10^{-3}$
Усереднений критерій Грасгофа	Gr	$\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \ell^3}{\nu^2}$	-	$\frac{9,81 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 0,49^3}{(1,31 \cdot 10^{-6})^2} = 9,42 \cdot 10^{10}$

Продовження таблиці Д.2

1	2	3	4	5
Критерій Релея	Ra	Gr·Pr	-	$9,42 \cdot 10^{10} \cdot 9,52 = 8,97 \cdot 10^{11}$
Критерій Нуссельта	Nu	$0,15 Ra^{0,333}$	-	$0,15 \cdot (8,97 \cdot 10^{11})^{0,333} = 1\,433,4$
Коефіцієнт тепло- віддачі до повітря	α_n	$\frac{Nu \cdot \lambda_n}{\ell}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{1433,4 \cdot 0,028}{0,49} = 81,91$
Температура внутрішньої поверхні стін	t ₁	Приймаємо	°C	1600
Коефіцієнт тепло- передачі через фронткову стіну	k _ф	$\left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{шлф}}{\lambda_{шлф}} + \frac{\delta_{слф}}{\lambda_{слф}} \right)^{-1}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\left(\frac{1}{81,91} + \frac{0,12}{1,14} + \frac{0,38}{0,82} \right)^{-1} = 1,72$
Втрати теплоти фронтовою стін- кою	K _ф	$k_{\phi} \cdot \Delta t \cdot F_{\phi} \cdot$		$1,72 \cdot 1590 \cdot 0,97 = 2\,652,8$
Коефіцієнт тепло- передачі через задню стіну	k _{зд}	$\left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{шз}}{\lambda_{шз}} + \frac{\delta_{сз}}{\lambda_{сз}} \right)^{-1}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\left(\frac{1}{81,91} + \frac{0,065}{1,14} + \frac{0,12}{0,82} \right)^{-1} = 4,64$
Втрати теплоти за- дньою стіною	Q _{зд}	$k_{зд} \cdot \Delta t \cdot F_{зд} \cdot$	Вт	$4,64 \cdot 1590 \cdot 0,97 = 7\,156,27$
Коефіцієнт тепло- передачі через бо- кову стіну	k _б	$\left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{шб}}{\lambda_{шб}} + \frac{\delta_{сб}}{\lambda_{сб}} \right)^{-1}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\left(\frac{1}{81,91} + \frac{0,065}{1,14} + \frac{0,2}{0,82} \right)^{-1} = 3,19$
Втрати теплоти бо- ковою стіною	Q _б	$k_{\phi} \cdot \Delta t \cdot F_{\phi} \cdot$	Вт	$3,19 \cdot 1590 \cdot 0,87 = 4\,412,7$
Коефіцієнт теплопередачі через стелю	k _с	$\left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{шс}}{\lambda_{шс}} + \frac{\delta_{сс}}{\lambda_{сс}} \right)^{-1}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\left(\frac{1}{81,91} + \frac{0,065}{1,14} + \frac{0,2}{0,82} \right)^{-1} = 3,19$
Втрати теплоти стелею	Q _с	$k_c \cdot \Delta t \cdot F_c \cdot$	Вт	$3,19 \cdot 1590 \cdot 2,21 = 11\,209,3$

Продовження таблиці Д.2

1	2	3	4	5
Сумарна потужність втрат теплоти від огорожень топки	ΣQ	$Q_a + Q_3 + 2 Q_6 + Q_c$	Вт	$2652,8 + 7156,27 + 2 \cdot 4412,7 + 11209,3 = 29\,846,47$
Коефіцієнт втрат теплоти в топці від механічної і хімічної неповноти згорання	η_{mf}	$100 - q_3 - q_4$	%	$100 - 0,5 - 0,5 = 99$
Повна витрата палива	B	$\frac{Q_t + \Sigma Q}{Q_n \cdot \eta_{mf}}$	кг/с	$\frac{8,5 + 0,0298}{17,77 \cdot 0,99} = 0,49$
Розрахункова витрата палива	B_p	$B \cdot (100 - q_4) / 100$	кг/с	$\frac{0,49 \cdot (100 - 0,5)}{100} = 0,488$
Втрати теплоти через огороження	Q_5	$\Sigma Q / B_p$	кДж/кг	$29,847 / 0,488 = 61,2$
Відсоткові втрати теплоти від огорожень	q_5	$Q_5 / Q_n \cdot 100$	%	$(0,061 / 17,77) \cdot 100 = 0,34$
Сумарні втрати теплоти в топці	$\eta_{втр}$	$100 - q_3 - q_4 - q_5$	%	$100 - 0,5 - 0,5 - 0,34 = 98,66$
Ентальпія газів на виході з топки з врахуванням втрат	I''	$Q_n \cdot \eta_{втр}$	кДж/кг	$17770 \cdot 0,9866 = 17531,9$
Температура газів на виході з топки	ϑ''	Табл. 4.4	°C	1638
Визначення похибки розрахунку	ε_ϑ	$(\vartheta'' - \vartheta_a) / \vartheta''$	-	$(1638 - 1600) / 1638 = 0,023$ або 2,3%
Сумарна площа стін топки	F	$\Sigma F_\phi + F_3 + F_6 + F_c$	м²	$0,97 + 0,97 + 0,87 + 2,21 = 5,02$
Коефіцієнт теплопередачі між газами і повітрям	K	$\frac{Q}{\Delta t \cdot F}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{29846,47}{(1638 - 10) \cdot 5,02} = 3,65$

Продовження таблиці Д.2

1	2	3	4	5
Середній термічний опір стін топкової камери	$\bar{R}$	$\frac{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{n}$	$\frac{m^2 \cdot K}{B_T}$	$0,12/1,14+0,38/0,82+0,5/1,14+0,0025/45+0,1/0,116)/3+(0,065/1,14+0,2/0,82) \cdot 4)/5=0,31$
Коефіцієнт тепловіддачі від газів	α_0	$\frac{1}{K^{-1} - \bar{R} - \alpha_1^{-1}}$	$\frac{B_T}{m^2 \cdot K}$	$\frac{1}{3,65^{-1} - 0,3 - 81,91^{-1}} = 261,5$
Середня температура внутрішніх стін топкової камери	$t_{ст}$	$t_1 - \frac{Q}{\alpha_0 \cdot F}$	$^{\circ}C$	$1638 - \frac{29846,47}{5,02 \cdot (261,5)} = 1615$
Похибка	ε_c	$\frac{t_c - t_1}{t_c}$	-	$\frac{1615 - 1600}{1615} 100\% = 0,93\%$

Таблиця Д.3 – Геометричні характеристики повітряного тракту

Величина		Тракт	Розмірність	Числові значення витрати $m^3/год$	Діаметр
Найменування	Позначення				
1	2	3	4	5	
Основний трубопровід з топки	ℓ_1	Відхідні гази	м	1,26	0,5
Трубопровід свіжого повітря	ℓ_2	Первинне повітря	м	1,22	0,4
Трубопровід подачі суміші	ℓ_3	Суміш	м	2,48	0,6

Таблиця Д.4 – Аеродинамічний розрахунок повітряного тракту

Величина		Формула або спосіб визначення	Розмірність	Числові значення
Найменування	Позначення			
1	2	3	4	5
Коефіцієнт запасу по продуктивності	β_1	Вибираємо [38]	-	1,1
Коефіцієнт запасу по тиску	β_2	Вибираємо [38]	-	1,2

Продовження таблиці Д.4

1	2	3	4	5
Коефіцієнт запасу по споживаній потужності	β_3	Вибираємо [38]	-	1,05
Кількість повітря, яке всмоктується вентиляторами	V_{xp}	$B_p \cdot \beta_1 \cdot V^0 \cdot \alpha \cdot \frac{t_x + 273}{273}$	$\frac{m^3}{c}$	$0,488 \times 1,1 \times 5,75 \times 1,4 \cdot 283/273 = 4,48$
Витрата первинного повітря (60%)	$V_{пп}$	$V_x \cdot 0,6$	$\frac{m^3}{c}$	$4,48 \cdot 0,6 = 2,7$
Витрата вторинного повітря (40%)	$V_{вп}$	$V_x \cdot 0,4$	$\frac{m^3}{c}$	$4,48 \cdot 0,4 = 1,8$
Площі перерізів трубопроводів:	f_1	$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	m^2	0,196
	f_2	-	m^2	0,125
	f_3	-	m^2	0,283
Витрата первинного повітря через кожний патрубок	$V_{пп1}$	$V_{пп}/2$	$\frac{m^3}{c}$	$2,7/2 = 1,35$
Витрата вторинного повітря через кожний колектор	$V_{вп1}$	$V_{вп}/2$	$\frac{m^3}{c}$	$1,8/2 = 0,9$
Швидкість повітря 1	w_1	$V_{пп}/f_1$	m/c	$2,7/0,196 = 13,8$
Швидкість повітря 2	w_2	$V_{пп1}/f_2$	m/c	$1,8/0,125 = 14,4$
Швидкість повітря 4	w_3	$V_{вп1}/f_4$	m/c	$0,9/0,283 = 1,92$
Критерії Рейнольдса	Re_1 Re_2 Re_3	$\frac{w \cdot d}{\nu}$	-	$13,8 \cdot 0,5/16 \cdot 10^{-6} = 4,3 \cdot 10^5$ $14,4 \cdot 0,4/16 \cdot 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^5$ $1,92 \cdot 0,6/16 \cdot 10^{-6} = 7,2 \cdot 10^4$
Відносна шорсткість трубопроводу 1	d_1/k_e	d_1/k_e	-	$500/0,2 = 2500$

Продовження таблиці Д.4

1	2	3	4	5
Відносна шорсткість трубопроводу 2	d_2/k_e	d_2/k_e	-	$400/0,2=2000$
Динамічний тиск повітропроводу 1	$h_{д1}$	Номограма VII-2 [38]	мм вод. ст.	5,95
Динамічний тиск повітропроводів 2	$h_{д2}$	Номограма VII-2 [38]	мм вод. ст.	3,1
Динамічний тиск повітропроводу 3	$h_{д4}$	Номограма VII-2 [38]	мм вод. ст.	1
Коефіцієнт гідравлічного тертя повітропроводу 1	λ_1	Рисунок VII-3 [38]	-	0,017
Коефіцієнт гідравлічного тертя повітропроводів 2	λ_2	Рисунок VII-3 [38]	-	0,018
Коефіцієнт гідравлічного тертя повітропроводу 3	λ_3	Рисунок VII-3 [38]	-	0,018
Сумарні втрати напору в трубопроводі 1	h_1	$h_{д1} \cdot (\lambda_1 \cdot \ell_1 / d_1 + \sum \xi)$	м вод. ст.	$0,00595 \cdot (0,017 \times \times 1,26 / 0,5 + + 1,8) = 0,011$
Сумарні втрати напору в трубопроводі 2	h_2	$h_{д2} \cdot (\lambda_2 \cdot \ell_2 / d_2 + \sum \xi)$	м вод. ст.	$0,0031 \cdot (0,018 \times \times 1,22 / 0,4 + + 1 \cdot 5 + 2 \cdot 1,1) = 0,023$
Сумарні втрати напору в трубопроводі 3	h_3	$h_{д3} \cdot (\lambda_3 \cdot \ell_3 / d_3 + \sum \xi)$	м вод. ст.	$0,0027 \cdot (0,018 \times \times 2,48 / 0,6 + + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 1,8 \cdot 2) = 0,025$

Продовження таблиці Д.4

1	2	3	4	5
Необхідний напір під колосниковою решіткою	Δh	Таблиця VII-7 [38]	мм вод. ст.	80
Сумарний опір тракту повітря	$\sum h_{п.п}$	$(h_1 + h_2 + \Delta h) \cdot \beta_2$	мм вод. ст.	$(11+23+80) \cdot 1,2 = 137$
Тип вентилятора первинного повітря	-	Рисунок VII-35 [38]	-	ВДН-9
Номінальна продуктивність	$Q_{н1}$	Рисунок VII-35 [38]	м ³ / с	94
Номінальний напір	$H_{н1}$	Рисунок VII-35 [38]	мм вод. ст.	150
Частота обертів	n_1	Рисунок VII- 35 [38]	об/хв	980
ККД при розрахунковій продуктивності і тискові	η_v	Рисунок VII-70 [38]	%	81
Температура, при якій складена характеристика	$t_{хар}$	Рисунок VII-35 [38]	°С	30
Перехідний коефіцієнт	K_p	$\frac{1,295(273 + t_x)0,101}{\rho_{п}^0(273 + t_{хар})V_d}$		$\frac{1,295(273+10)0,101}{1,295(273+30)0,096} = 0,98$
Тип вентилятора вторинного повітря	-	Рисунок VII-35 [38]	-	ВДН-8
Номінальна продуктивність	$Q_{н2}$	Рисунок VII-35 [38]	м ³ / с	306
Номінальний напір	$H_{н2}$	Рисунок VII-35 [38]	мм вод. ст.	115
Частота обертів	n_2	Рисунок VII- 35 [38]	об/хв	980

Продовження таблиці Д.4

1	2	3	4	5
ККД при розрахунковій продуктивності і тискові	η_v	Рисунок VII-69 [38]	%	71
Барометричний тиск	P_b	барометр	МПа	0,096
Необхідна потуж- ність двигуна вен- тилятора первин- ного повітря	$N_{в\text{ пп}}$	$\frac{\beta_3 \cdot Q_{в1} \cdot H_{p1}}{\eta_v \cdot K_p \cdot 10^3}$	кВт	$\frac{1,05 \cdot 1,812 \cdot 1343}{0,98 \cdot 1 \cdot 10^3} =$ $= 2,6$
Необхідна потуж- ність двигуна вен- тилятора вторин- ного повітря	$N_{в\text{ вп}}$	$\frac{\beta_3 \cdot Q_{в2} \cdot H_{p2}}{\eta_v \cdot K_p \cdot 10^3}$	кВт	$\frac{1,05 \cdot 1,208 \cdot 952}{0,98 \cdot 1 \cdot 10^3} =$ $= 1,23$
Тип привода вен- тилятора первин- ного повітря	-	Таблиця 21.3 [39]	-	AIP 112MB6
Номінальна потужність	$P_{н1}$	Таблиця 21.3 [39]	кВт	4,0

Додаток Е

(ДОВІДНИКОВИЙ)

Лістинг програми розрахунку видів палива

3.1 Аналіз доцільності використання твердого біопалива

Початкові дані

Параметри сировини

Параметри сушильного агента

Склад
палива

$$G_m := 23000$$
$$t_0 := 12$$

C=1; H=2; S=3; O=4; N=5; W=6

$$W_n := 13$$
$$\varphi_0 := 0.7$$
$$W_k := 7$$

t := 65

ORIGIN := 1

Хімічний склад палива

Вугілля := 1

$$\text{МазуТ} := 2$$

Паливо пічне := 3

Пелети соняшникові := 4

Газ природный := 5

$$\underline{C} := F1^{\langle 1 \rangle}$$
$$\underline{H} := F1^{\langle 2 \rangle}$$
$$\mathbf{S} := \mathbf{F1}^{\langle 3 \rangle}$$
$$O := F1^{\langle 4 \rangle}$$
$$\underline{N} := F1^{\langle 5 \rangle}$$
$$\underline{W} := F1^{\langle 6 \rangle}$$
$$\underline{A} := F1^{\langle 7 \rangle}$$
$$\text{F1} := \begin{pmatrix} 74 & 4.4 & 2 & 5.1 & 2.7 & 8 & 4.8 \\ 84 & 10.1 & 0.9 & 1.1 & 0.8 & 3 & 0.05 \\ 86 & 13.7 & 0.2 & 0.05 & 0.05 & 0 & 0 \\ 50 & 6.1 & 0.01 & 36.1 & 0.1 & 10 & 2.6 \end{pmatrix}$$

Ціна палива

$$v := \begin{pmatrix} \text{Вугілля} \\ \text{Мазут} \\ \text{Паливо_пiчне} \\ \text{Пелети_соняшниковi} \\ \text{Газ_природний} \end{pmatrix} \quad \Psi := \begin{pmatrix} 6700 \\ 18500 \\ 20000 \\ 4700 \\ 21000 \end{pmatrix}$$

Вища теплота згоряння
палива

$$Q_b := 0.339 \cdot C + 1.25H - 0.109(O - S)$$
$$Q_b =$$

	1
1	30.25
2	41.08
3	46.3
4	20.64

Нижча теплота згоряння
палива

$$Q_n := Q_b - 2.5 \cdot \left(\frac{9H + W}{100} \right)$$

	1
1	29.06
2	38.73
3	43.21
4	19.02

$Q_n =$

Теоретична кількість повітря для спалювання 1 кг палива

$$L_0 := 0.115C + 0.345H - 0.043(O - S)$$

Ентальпія водяної пари в сушильному агенті

$$h_n := 2500 + 1.84t = 2619.6$$

	1
1	9.89
2	13.14
3	14.62
4	6.3

$L_0 =$

Кількість випарованої води

$$W := G_m \cdot \frac{1}{3600 \cdot 12} \cdot \frac{W_n - W_k}{100 - W_k} = 0.034$$

Параметри свіжого повітря та теплоносія на вході в робочу камеру

$$\eta := 0.9 \quad C_T := 2.2 \quad C_{sa} := 1.006$$

– тиск насичення

$$P_n := e^{[(1500.3 + 23.5 \cdot t_0) \div (234 + t_0)]}$$

$$P_n = 1.401 \times 10^3$$

– парціальний тиск

$$P_p := \varphi_0 \cdot P_n$$

$$P_p = 980.877$$

– вологовміст свіжого повітря, $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$

$$d_0 := 622 \cdot \frac{P_p}{101325 - P_p}$$

$$d_0 = 6.1$$

– теплота пароутворення, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$r := -2.362 \cdot t_0 + 2501 = 2.473 \times 10^3$$

—ентальпія свіжого повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

$$h_0 := C_{sa} \cdot t_0 + (r + C_{sa} \cdot t_0) \cdot \frac{d_0}{1000} = 27.2$$

Коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha := \frac{Q_b \cdot \eta \cdot 1000 + C_T \cdot t_0 - \left(\frac{9H + W}{100} \right) h_n - \left(1 - \frac{9H + W + A}{100} \right) \cdot C_{sa} \cdot t}{L_0 \cdot \left(\frac{d_0 \cdot h_n}{1000} - h_0 + C_{sa} \cdot t \right)}$$

Вологовміст сушильного агента на вході в робочу камеру сушарки

$$d_1 := 2.14 + \frac{10(9H + W) + \alpha \cdot L_0 \cdot d_0}{\alpha \cdot L_0 + \left(1 - \frac{9H + W + A}{100} \right)}$$

Параметри відпрацьованого теплоносія

Теплота пароутворення

$$r_1 := -2.362 \cdot t + 2501 = 2.347 \times 10^3$$

Ентальпія сушильного агента на вході в робочу камеру сушарки

$$h_1 := C_{sa} \cdot t + 7 + (r_1 + C_{sa} \cdot t) \cdot \frac{d_1}{1000}$$

—тиск насичення

$$\varphi_2 := 0.4$$

$$P_n := e^{[(1500.3 + 23.5 \cdot t) \div (234 + t)]}$$

$$P_n = 2.499 \times 10^4$$

—парціальний тиск

$$P_p := \varphi_2 \cdot P_n$$

$$P_p = 9.998 \times 10^3$$

—вологовміст відпрацьованого теплоносія, $\frac{\text{кг}}{\text{кг}}$

$$d_2 := 622 \cdot \frac{P_p}{101325 - P_p} = 68$$

$$\Omega := \frac{1000}{d2 - d1}$$

$$\text{Витрата повітря, кг/с} \quad L1 := \Omega \cdot W$$

Різниця ентальпій

$$\Delta h := h1 - h0 \quad \Delta h := \Delta h^T$$

$$\Delta h = (65.49 \quad 66.06 \quad 66.43 \quad 65.66)$$

$$\text{Теплова потужність, витрачена на сушіння} \quad \Delta h := \Delta h^T$$

$$\text{Корисна теплота} \quad Q1 := W \cdot r = 84.9 \quad Qk1 := \overrightarrow{(L1 \cdot \Delta h)}$$

$$Qk := \begin{pmatrix} Qk1_1 \\ Qk1_2 \\ Qk1_3 \\ Qk1_4 \\ 27 \end{pmatrix} \quad Qk1 = \begin{pmatrix} 37.684 \\ 38.171 \\ 38.48 \\ 37.829 \end{pmatrix} \quad Qn := \begin{pmatrix} Qn_1 \\ Qn_2 \\ Qn_3 \\ Qn_4 \\ 33.5 \end{pmatrix}$$

$$\text{ККД сушарки} \quad \eta := \frac{Qk}{Q1} \cdot 100$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 44.369 \\ 44.942 \\ 45.307 \\ 44.54 \\ 31.79 \end{pmatrix}$$

$$\text{Витрата палива, кг/с} \quad B := \frac{Q1}{Qn \cdot 1000} \quad B := B^T$$

$$B = (2.923 \times 10^{-3} \quad 2.193 \times 10^{-3} \quad 1.965 \times 10^{-3} \quad 4.466 \times 10^{-3} \quad 2.535 \times 10^{-3})$$

$$\text{Затрати на паливо,} \quad \Psi := \Psi^T$$

грн/год

$$\Sigma := \overrightarrow{(B \cdot \Psi)} \cdot \frac{3600}{1000} = (70.5 \quad 146.044 \quad 141.513 \quad 75.561 \quad 191.67)$$

$$\Sigma := \Sigma^T \quad B := B^T \quad B := B \cdot 3600$$