

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет) _____ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого _____
Кафедра Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв**

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

_____ Сергій БЛАЖЕНКО _____

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«___» _____ 2025р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Олександр ГАВВА _____

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«___» _____ 2025р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
МАГІСТРА**

зі спеціальності _____ 133 "Галузеве машинобудування" _____

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми _____ Інжиніринг харчових виробництв _____

на тему: Імітаційне моделювання процесу теплового оброблення м'ясних продуктів
та розроблення універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг

_____ Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОХ-2-3М _____

_____ Зарудний Володимир Олександр _____

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник _____ Чепелюк Олександр Миколайович _____

(прізвище , ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти _____

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент _____

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____

(підпис)

Київ – 2025 р.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 15.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація, Зміст	20.10.25	Виконано
2	Вступ	21.10.25	Виконано
3	Аналіз сучасного стану об'єкта дослідження	28.10.25	Виконано
4	Теоретичні основи та імітаційне моделювання процесу теплового оброблення	02.11.25	Виконано
5	Проектно-конструкторська розробка універсальної термокамери на 360 кг	05.11.25	Виконано
6	Техніко-економічне обґрунтування	09.11.25	Виконано
7	Техніко-економічне обґрунтування проекту	15.11.25	Виконано
9	Охорона праці та екологія	21.11.25	Виконано
10	Монтаж та експлуатація	22.11.25	Виконано
11	Опис системи управління	23.11.25	Виконано
12	Висновки	25.11.25	Виконано
13	Список використаної літератури	27.11.25	Виконано
14	Графічна частина	30.11.25	Виконано
15	Подача КР на кафедру	03.12.25	Виконано

Здобувач

(підпис)

Володимир ЗАРУДНИЙ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ЧЕПЕЛЮК

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі представлено результати власних досліджень, присвячених імітаційному моделюванню процесу теплового оброблення м'ясних продуктів та розробленню універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг. Сучасні технології теплової обробки м'ясної продукції характеризуються високою енергоємністю та складністю забезпечення рівномірного температурного поля всередині продукту, що потребує удосконалення як конструкцій обладнання, так і методів керування процесом.

Дослідження охоплює аналіз процесів нагрівання, витримки та теплопередачі під час теплової обробки м'ясних виробів у термокамерах із примусовою циркуляцією повітря. Імітаційне моделювання виконувалося з використанням математичних моделей конвекційного теплообміну, що дозволило дослідити вплив швидкості повітря, температурного режиму та тривалості обробки на динаміку прогріву продукту та енерговитрати процесу. Результати моделювання подано у вигляді графіків і температурних полів.

У роботі розроблено конструктивні рішення універсальної термокамери періодичної дії з одноразовим завантаженням 360 кг, яка забезпечує рівномірність теплової обробки та підвищення енергоефективності процесу. Запропоновано систему автоматизованого керування температурно-швидкісними параметрами повітряного середовища камери на основі даних датчиків.

Додатково виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розробленої термокамери та розроблено заходи з охорони праці й техніки безпеки для забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Чепелюк О.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> -----	<i>Розробник документа</i>	<i>Назва, додаткова назва</i> Анотація	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i>		<i>Інд. змін</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова UA</i>	<i>Арку ш</i>

Кваліфікаційна робота містить пояснювальну записку, графічні матеріали, таблиці та креслення.

Ключові слова: теплова обробка м'ясних продуктів, імітаційне моделювання, термокамера, теплообмін, математична модель, конвекція, кондукція, енергоефективність.

ABSTRACT

The master's thesis presents the results of original research focused on simulation modeling of the thermal processing of meat products and the development of a universal thermal chamber with a single-load capacity of 360 kg. Modern thermal processing technologies for meat products are characterized by high energy consumption and difficulties in ensuring a uniform temperature distribution inside the product, which necessitates improvements in both equipment design and process control methods.

The study includes an analysis of heating, holding, and heat transfer processes during the thermal treatment of meat products in thermal chambers with forced air circulation. Simulation modeling was performed using mathematical models of convective and conductive heat transfer, which made it possible to investigate the influence of air velocity, temperature regimes, and processing duration on the heating dynamics of the product and the energy consumption of the process. The modeling results are presented in the form of graphs and temperature fields.

The thesis proposes design solutions for a batch-type universal thermal chamber with a single-load capacity of 360 kg, which ensures uniform thermal treatment and improved energy efficiency. An automated control system for regulating temperature and air velocity parameters inside the chamber based on sensor data is also developed.

In addition, a technical and economic feasibility analysis of implementing the proposed thermal chamber is carried out, and occupational safety and labor protection measures are developed to ensure safe operation of the equipment. The qualification thesis includes an explanatory note, graphical materials, tables, and drawings.

<i>Відповідальна організація НУХТ</i>	<i>Технічне узгодження Чепелюк О.М.</i>	<i>Вид документа Пояснювальна записка</i>	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>	<i>Розробник документа</i>	<i>Назва, додаткова назва</i> Анотація	240266.ДП.26.000.ПЗ			
-----	<i>Документ затверджено</i>		<i>Інд. змін</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова UA</i>	<i>Арку ...</i>

Keywords: thermal processing of meat products, simulation modeling, thermal chamber, heat transfer, mathematical model, convection, conduction, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	6
1.1. Аналіз обладнання для теплової обробки м'ясних продуктів.....	6
1.2. Класифікація термокамер та технологічні режими обробки.....	9
1.3. Технологічні проблеми рівномірності прогріву.....	25
1.4. Сучасні підходи до моделювання теплових процесів.....	28
Висновок до розділу 1.....	31
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООВОГО ОБРОБЛЕННЯ.....	33
2.1. Фізико-математичні основи теплопередачі.....	33
2.2. Теплообмін у повітряних камерах.....	35
2.3. Конвекційний теплообмін.....	39
2.4. Математична модель процесу теплової обробки.....	41
2.5. Аналіз отриманих результатів.....	46
Висновок до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ ТЕРМОКАМЕРИ НА 360 КГ.....	52
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ.....	72
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЯ.....	75
РОЗДІЛ 6. МОНТАЖ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ.....	79
РОЗДІЛ 7. ОПИС СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ.....	82
ВИСНОВОК.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86
ДОДАТКИ.....	88

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа	Розробник документа	Назва, додаткова назва	240266.ДП.26.000.ПЗ			
-----	Документ затверджено	Зміст	Інд. эмйл	Дата вiдання	Мова UA	Арку ...

ВСТУП

Сучасне харчове виробництво характеризується високим рівнем технологічної складності та зростаючими вимогами до автоматизації, енергоефективності й стабільності параметрів технологічних процесів. Одним із ключових напрямів технічного розвитку м'ясопереробної галузі є модернізація обладнання для термічної обробки, що забезпечує формування споживчих властивостей продукту, його мікробіологічну безпечність та тривалий термін зберігання. Удосконалення конструкції термокамер є пріоритетним завданням, оскільки саме вони визначають рівномірність прогріву, вихід готової продукції, стабільність режимів та економічні показники виробництва.

Традиційні термокамери забезпечують реалізацію стандартних процесів — підсушування, обжарювання, варіння, копчення, охолодження — однак їх конструкції часто мають істотні недоліки: нерівномірність температурних полів, недостатню продуктивність, значні теплові втрати, складність масштабування під різні виробничі завдання. В умовах розширення асортименту та необхідності швидкої зміни технологічних режимів виникає потреба у створенні багатофункціональних універсальних термокамер, які здатні працювати з різними видами продукції, зокрема вареними ковбасами, делікатесами та шинковими виробами, при високій точності температурного контролю.

У даній магістерській роботі аналізуються принципи побудови і модернізації універсальних термокамер для термічної обробки м'ясних продуктів з одноразовим завантаженням 360 кг. Основна увага приділяється теплофізичним процесам, що відбуваються під час обробки ковбасних батонів діаметром 60 мм, а також розробленню автоматизованої конструкції термокамери з оптимізованою циркуляцією повітряних потоків.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Чепелюк О.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> -----	<i>Розробник документа</i>	<i>Назва, додаткова назва</i> Вступ	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i>		<i>Інд.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Арку</i> ...

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення рівномірності прогріву та достовірності досягнення санітарної температури у центрі продукту, що є критичним показником для безпечності м'ясних виробів. Додатково важливо зменшити енерговитрати та збільшити ефективність теплопередачі за рахунок раціонального проектування геометрії камери, вибору системи нагріву та удосконалення алгоритмів циркуляції.

Метою роботи є теоретичне та експериментальне обґрунтування конструкції універсальної термокамери з оптимізованим тепломасообміном та визначення теплових режимів, що забезпечують рівномірний прогрів м'ясних виробів при одноразовому завантаженні 360 кг.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

- провести аналіз існуючих промислових термокамер та їх конструктивних особливостей;
- розробити фізико-математичну модель процесу теплової обробки батонів Ø60 мм;
- здійснити комп'ютерне моделювання теплообміну у робочому об'ємі камери та визначити зони нерівномірного прогріву;
- запропонувати конструктивні зміни, спрямовані на підвищення продуктивності та енергоефективності агрегату;
- оцінити вплив модернізації на параметри готової продукції та техніко-економічні показники виробництва.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для проектування нових і модернізації існуючих термокамер на м'ясопереробних підприємствах, що дозволяє знизити витрати енергії, підвищити вихід придатної продукції та забезпечити стабільну якість термічно оброблених виробів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз обладнання для теплової обробки м'ясних продуктів

Термокамери є ключовим елементом технологічних ліній м'ясопереробних підприємств та призначені для здійснення комплексної термічної обробки м'ясних і ковбасних виробів, а також рибної продукції. Універсальні термокамери забезпечують реалізацію широкого спектра технологічних операцій, серед яких: обсмажування, варіння, копчення, запікання, підсушування та сушіння. Завдяки багатофункціональності вони застосовуються у виробництві сирокочених, варено-копчених і сиров'ялених ковбас, сосисок, шинкових виробів, делікатесної продукції та морепродуктів.

Конструктивно термокамера являє собою теплоізольовану робочу камеру, що оснащена системою нагрівання електричного, газового або парового типу. Вибір джерела теплоти визначається енергетичною інфраструктурою підприємства, технологічними вимогами та економічними показниками експлуатації. Застосовувана деревина або інші джерела димогенерації істотно впливають на органолептичні характеристики кінцевого продукту, що створює необхідність оптимізації параметрів копчення залежно від рецептури.

Система мікропроцесорного керування забезпечує контроль і регулювання основних параметрів теплової обробки — температури, вологості, витрати диму, інтенсивності циркуляції повітря та тривалості окремих етапів циклу. Це дозволяє знизити енерговитрати, забезпечити стабільну якість продукції та адаптувати технологічні режими під різні види сировини.

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 1	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата видання	Мова UA	Арку ...

У конструкцію універсальних термокамер також інтегрують автоматичні системи миття, що підвищують санітарно-гігієнічний рівень обладнання та скорочують час простоїв між циклами.

Універсальні камери можуть виконуватися на одну або декілька рам, що визначає їх продуктивність та область застосування. Камери багаторамного виконання використовуються на підприємствах середньої та високої потужності та дозволяють одночасно здійснювати теплову обробку значних обсягів продукції. Окремо застосовуються спеціалізовані камери — для холодного або гарячого копчення, варильні шафи чи кліматичні камери для ферментації та в'ялення. Однак подібні установки реалізують лише один технологічний процес, що обмежує їх універсальність у порівнянні з багатофункціональними термокамерами.

Огляд конструкції термокамери

Термокамера для м'ясної продукції є комплексним технологічним агрегатом, що забезпечує регульований тепломасообмін у замкнутому об'ємі. Основні конструкційні вузли включають:

- Корпус та теплоізоляція Забезпечують зменшення втрат тепла, стійкість до корозії, санітарність
- Нагрівальні елементи Електричні, газові або парові теплообмінники, які формують необхідний температурний режим
- Вентиляційно-циркуляційна система Забезпечує рівномірний розподіл температури та вологи у камері
- Система зволоження/водяної пари Регулює відносну вологість під час варки та копчення
- Димогенератор Формує димові потоки для копчення (тирса, тріска, бруски)
- Система автоматичного керування Контролює режими, регулює інтенсивність теплових процесів
- Рами та стелажі Слугують для розміщення продукції

Таким чином, термокамера є автоматизованим об'єктом теплофізичного керування, у якому параметри температури, вологості та швидкості руху повітря визначають кінцеві функціональні властивості продукту.

Технологічні етапи теплової обробки

- Універсальні термокамери реалізують багатостадійні технологічні режими:

- Підсушування — видалення поверхневої вологи для формування плівки та підготовки до обсмажування.

- Обсмажування (обжарювання) — інтенсивний тепловий вплив для формування скоринки й аромату.

- Варіння / пастеризація — нагрів у вологому середовищі, забезпечення мікробіологічної безпеки.

- Копчення — оброблення продукту димовим середовищем з метою ароматизації та консервації.

- Охолодження — стабілізація структури, підготовка до пакування.

Система керування контролює перебіг кожного етапу за трьома ключовими параметрами: температурою, вологістю та швидкістю циркуляції повітря, що дозволяє забезпечити рівномірний прогрів продукту й відповідність санітарним вимогам.

Приклад промислових рішень (PSS)

Термокамери PSS SCH використовуються для обсмажування, варіння та копчення широкого спектра м'ясних продуктів. Теплова обробка здійснюється циркуляційними потоками повітря, пари та диму при температурах до 130 °C. Камери можуть працювати від електричних нагрівачів, пари або газу, що дозволяє адаптувати їх під різні виробничі умови. Система керування реалізує як автоматичні, так і ручні програми, а модульна конструкція дозволяє використовувати візки на 4 або 6 коліс, з

можливістю змінювати кількість поверхів залежно від типу продукції та обсягів виробництва.

Такі системи орієнтовані на підприємства середньої та високої продуктивності та забезпечують стабільні параметри термічної обробки, проте потребують оптимізації конструкції повітряних потоків для досягнення максимальної рівномірності прогріву.

1.2. Класифікація термокамер та технологічні режими обробки

Термокамери, що застосовуються у м'ясопереробній промисловості, класифікуються за технологічним призначенням, типом джерела теплоти, способом циркуляції повітря, конструктивним виконанням та рівнем автоматизації. За функціональним призначенням термокамери поділяють на універсальні та спеціалізовані. Універсальні термокамери є найбільш поширеним типом обладнання, оскільки вони забезпечують повний цикл термічної обробки продукції, включаючи підсушування, обжарювання, варіння, копчення, запікання та охолодження у межах одного агрегату. Такі камери використовуються у виробництві варених, варено-копчених, сирокочених ковбас, сосисок, делікатесів, шинки та м'ясних рулетів. До цього типу обладнання належать, наприклад: Fessmann T3000, Kuron Universal U-Series, PSS SCH-2/4/6, Autotherm Universal Line, Mauting UKM Industrial — для таких камер легко підібрати фотоматеріали.

Спеціалізовані термокамери призначені для виконання одного технологічного процесу. До них належать: варильні шафи (наприклад, PSS CWC Series), камери холодного копчення (Mauting UKM-CS), гарячого копчення (SmokeMaster H-Series), сушильні та підвісні камери для сиров'ялених виробів (ClimaCell Dry-Aging Chambers), а також кліматичні камери для ферментації саямі. Таке обладнання забезпечує високоспеціалізовані процеси, але не дає можливості проводити повний технологічний цикл, тому зазвичай використовується на підприємствах із роздільними технологічними зонами або при виробництві окремих видів продукції преміум-сегменту.

За джерелом теплоти термокамери можуть бути електричними, паровими, газовими та комбінованими. Електричні камери (Fessmann ElectricLine, Protech ES-Series) відзначаються високою точністю керування температурою, компактністю та простотою монтажу, проте є дорогими в експлуатації через вартість електроенергії. Газові системи (Kuron GasHeat, Autotherm GasPro) забезпечують економічність при великих обсягах виробництва, але потребують підвищених заходів безпеки. Парові камери (PSS SteamLine, Mauting PHS) застосовуються на підприємствах, оснащених парогенераторами, і забезпечують високу теплопередачу та рівномірність нагріву. Комбіновані системи поєднують електричний та паровий нагрів, що дозволяє гнучко змінювати режими, оптимізуючи споживання енергоносіїв.

За способом циркуляції теплоносія розрізняють термокамери з природною та примусовою циркуляцією, а також реверсивні системи. Сучасні промислові камери використовують примусову циркуляцію за допомогою високонапірних вентиляторів (наприклад, Fessmann AirMaster), що дозволяє досягти однакового розподілу температури в робочому просторі. Реверсивна подача повітря, реалізована у моделях Mauting UKM та Protech DynamicFlow, змінює напрям руху потоків з певною періодичністю, що мінімізує градієнти температури між верхніми й нижніми рівнями рами. Для великих завантажень (300–600 кг) застосовується осьова або тунельна подача повітря, яка спрямована вздовж рядів продукції та забезпечує глибший прогрів батонів великого діаметра.

Її універсальність дозволяє розміщувати продукцію як у підвішеному стані, так і на решітках, що робить її ідеальним вибором для широкого спектру застосування.

Переваги цього рішення будуть особливо очевидні при холодному копченні, де в повній мірі проявляються переваги потужного охолодження та ефективного видалення конденсату. Це особливо оцінюють виробники риби, сиру та інших продуктів холодної обробки. Для гарячого копчення камера

може бути доповнена додатковою ізоляцією, що знижує міцність тепла і підвищує енергоефективність всього процесу.

Простота обслуговування і висока гігієна

У вигляді конструкційних особливостей центрального вентилятора мінімальна конфігурація коптильні розрахована на три тележки.



Рис. 1.2.1. Коптильні камери УКМ.

Конструкційне виконання термокамер може бути однорамним та багаторамним. Однорамні камери (до 160–200 кг) використовуються у цехах малої продуктивності, тоді як багаторамні камери (2–6 рам) призначені для середніх і великих підприємств та забезпечують велике разове завантаження, як у випадку термокамер PSS SCH-6, Kuron U4X, Autotherm Industrial 500, що дозволяють проводити обробку до 600 кг за цикл. Таке виконання забезпечує збільшення обсягів продукції при збереженні компактності виробничої площі. Технологічні режими обробки в термокамері поділяються на кілька послідовних стадій, які регулюються системою автоматичного керування: підсушування при 40–60 °С з низькою відносною вологістю, обжарювання

при 65–90 °С із сухим гарячим повітрям, варіння при 72–85 °С з підвищеною вологістю або насиченою парою, копчення при 40–90 °С залежно від рецептури, пастеризація та технологічне охолодження. Для варених ковбас діаметром 60 мм критичною є стадія варіння, оскільки досягнення санітарної температури 72 °С у центрі батона визначає безпечність продукту. Оптимізація режимів та конструкції теплообміну дозволяє зменшити витрати часу на прогрівання, підвищуючи продуктивність камери до 360 кг за цикл та знижуючи енергоспоживання. Завдяки такій класифікації можна підібрати конкретні конструктивні рішення для модернізації термокамери, зокрема оптимізацію циркуляції повітря, вибір комбінованої системи нагріву та застосування реверсивної подачі теплового носія для підвищення рівномірності прогріву батонів великого діаметра.



Рис. 1.2.2. Машина Fessmann T3000.

- Оптимізована система циркуляції повітря
- Удосконалений тунель передбачає:

- направлені повітряні канали,
- регульовані сопла,

Система керування модернізованого пристрою орієнтується на принципи BASTRA:

- плавне регулювання температури ходу процесу,
- контроль швидкості повітря,
- Значення BASTRA як аналогів при розробці інженерних рішень



Рис. 1.2.3. Термокамера Bastra

Термокамера VEMAG та її технологічні особливості

Термокамери VEMAG — це сучасне високотехнологічне обладнання для термічної обробки продуктів у харчовій промисловості. Вони вирізняються високою точністю контролю параметрів, енергоефективністю та автоматизованими системами управління.

Конструктивні особливості термокамер VEMAG

Термокамери VEMAG мають низку конструкційних характеристик, що забезпечують стабільність теплових процесів і високий рівень однорідності температурного поля:

- Модульна система циркуляції гарячого повітря

Камери оснащені багатоканальною системою рециркуляції, яка забезпечує рівномірний розподіл потоків у всьому робочому об'ємі. Повітря циркулює через спеціальні аеродинамічно виважені дефлектори, що мінімізує локальні перегриви або переохолодження матеріалу.

- Високопродуктивні нагрівальні елементи

Нагрів забезпечують ТЕНи підвищеної теплової інтенсивності, що дозволяє швидко виходити на задану температуру та утримувати її з точністю ± 1 °C.

- Інтелектуальна система керування

Термокамери VEMAG оснащені ПЛК з адаптивними алгоритмами, завдяки яким:

- регулюється температура у режимі реального часу;
- контролюється швидкість повітря;

- оптимізується енергоспоживання;
- зменшуються коливання теплових режимів.

Контроль температурного градієнта

У VEMAG підтримується однорідність температурного поля в межах $\pm 1-1,5$ °С.



Рис. 1.2.4. Термокамера FEMAG.

Енергоефективність за рахунок рециркуляції

У VEMAG до 90% нагрітого повітря використовує замкнутий цикл, що знижує витрати теплової енергії та забезпечує швидке відновлення температури після кожного циклу.

Термокамери Reich (Räuchertechnik Reich) належать до високотехнологічних систем теплової обробки, що використовуються у харчовій промисловості для термообробки, сушіння та коптіння

продукції. Незважаючи на їхнє первинне призначення, конструкційні та технологічні рішення цих камер мають високу інженерну цінність. Особливістю термокамер Reich є збалансована система конвективного теплообміну, яка забезпечує точне підтримання температури у всьому робочому просторі завдяки оптимізованим потокам рециркуляційного повітря. Повітряні канали та соплові розподільники спроектовані таким чином, щоб створювати рівномірний розподіл теплового навантаження, що дозволяє зберігати температурний градієнт у межах $\pm 1-2$ °C навіть при значних коливаннях зовнішніх умов.

Конструкція термокамер Reich характеризується високою енергоефективністю завдяки використанню потужних, але економічних ТЕНів у комбінації з багаторівневою системою рециркуляції гарячого повітря. Це забезпечує швидкий вихід на робочу температуру та її стабільне підтримання без надмірних витрат електроенергії.

Ще однією важливою **технологічною особливістю термокамер Reich** є використання високопродуктивних вентиляторів з регульованою швидкістю, які створюють спрямовані потоки гарячого повітря. Ці потоки забезпечують інтенсивний конвективний теплообмін, значно підвищуючи швидкість та рівномірність прогріву.



Рис. 1.2.5. Термокамера Reich

Загалом термокамери Reich є цінним технічним аналогом для розробки та вдосконалення машин. Їхня конструкція і принципи роботи дають розуміння, як повинна функціонувати високоточна та

Термокамера «Новотерм» – це сучасний пристрій, призначений для проведення процесів термічної обробки різних матеріалів і продуктів у промислових та лабораторних умовах. Вона забезпечує рівномірний розподіл температури всередині камери, що дозволяє досягти високої точності в регулюванні теплового режиму. Завдяки використанню сучасних нагрівальних елементів і систем контролю, термокамера «Новотерм» гарантує стабільність і повторюваність процесів, що особливо важливо при проведенні технологічних експериментів або виробництва продукції з високими стандартами якості. Пристрій оснащений інтуїтивно зрозумілою панеллю керування, яка дозволяє налаштовувати температуру, час обробки та інші параметри, а також відслідковувати їх у режимі реального часу. Конструкція камери передбачає надійну теплоізоляцію, що мінімізує втрати енергії та забезпечує безпечну експлуатацію.



Рис. 1.2.6. Термокамера Новотерм.

Завдяки своїй надійності, універсальності та високим експлуатаційним характеристикам, цей пристрій є ефективним рішенням для оптимізації процесів термічної обробки.

1.3. Технологічні проблеми рівномірності прогріву

Рівномірність прогріву м'ясних продуктів у процесі теплового оброблення є визначальним фактором, що впливає на мікробіологічну безпечність, органолептичні показники та вихід готової продукції. Для універсальних термокамер з одноразовим завантаженням до 360 кг забезпечення однорідного температурного поля в робочому об'ємі є складним інженерним завданням, оскільки велика маса продукту та різна щільність розміщення створюють істотні теплові та аеродинамічні неоднорідності.

Порушення теплового балансу всередині термокамери призводить до формування зон із різною інтенсивністю теплопередачі, що викликає недогрів внутрішніх шарів м'ясних виробів або локальне перегрівання та пересушування поверхні. Для варених м'ясних продуктів циліндричної форми, зокрема ковбасних батонів діаметром близько 60 мм, критичним параметром є досягнення температури не нижче 72 °C у геометричному центрі виробу. Саме ця зона характеризується найбільшою тепловою інерційністю та підвищеними мікробіологічними ризиками, що обумовлює необхідність точного прогнозування процесу нагріву.

Однією з ключових проблем теплового оброблення в термокамерах є нерівномірність конвективних потоків повітря. У камерах великої місткості циркуляція ускладнюється аеродинамічним опором завантажених рам, утворенням турбулентних зон біля стінок, втратами тиску в повітропроводах і різною щільністю розміщення продукції. Як наслідок, у верхній частині робочого об'єму температура

може перевищувати температуру нижніх зон на 6–12 °С, що призводить до випереджального прогріву верхніх рядів і затримки досягнення необхідної температури у внутрішніх виробках. За одноразового завантаження 360 кг різниця у часі прогріву окремих зон може сягати 20–40 хв, що негативно впливає на продуктивність та енергоефективність технологічного циклу.

Додатковою проблемою є поверхнєве пересушування м'ясних виробів на початкових етапах теплової обробки. Тривала дія гарячого сухого повітря спричиняє інтенсивну втрату вологи, у результаті чого формується ущільнений зовнішній шар із підвищеним тепловим опором. Це знижує інтенсивність теплопередачі у глибину продукту та ускладнює досягнення необхідної температури в центральній зоні. Для виробів у колагенових оболонках даний ефект є особливо критичним, оскільки твердість оболонки істотно впливає на процеси тепло- і масопереносу.

Важливою складовою процесу є співвідношення температури та відносної вологості повітря на етапі варіння. За недостатньої вологості значна частина підведеної теплоти витрачається на випаровування вологи з поверхні, що подовжує тривалість нагріву. Надлишкова ж вологість призводить до конденсації пари на поверхні виробів, утворення водяної плівки та локального перегрівання оболонки, що може викликати структурні дефекти фаршу. Підтримання вологості у межах 85–98 % дозволяє зменшити тепловий опір поверхні та стабілізувати процес нагріву, що є важливим завданням під час проектування універсальної термокамери.

Суттєвий вплив на рівномірність прогріву має теплова інерційність м'ясних продуктів. Низька теплопровідність фаршу (приблизно 0,4–0,5 Вт/м·К) зумовлює значну різницю температур між

поверхнею та центральною частиною виробу. У результаті оболонка та периферійні шари можуть досягати температури 75–80 °С, тоді як центр залишається на рівні 55–65 °С, що є небезпечним з точки зору розвитку терmostійких мікроорганізмів. Для камер із завантаженням 360 кг цей ефект посилюється через зменшення швидкості повітряних потоків у внутрішніх зонах рам.

Окремою проблемою є теплові втрати через конструктивні елементи термокамери — двері, вузли кріплення, зони під рамами та вентиляційні канали. Наявність теплових містків призводить до утворення локальних холодних зон, особливо по периметру робочого об'єму. Для камер великої місткості сумарні втрати теплової енергії можуть досягати 15–18 % на один цикл обробки, що знижує енергоефективність та збільшує тривалість процесу.

Нерівномірне завантаження рам також істотно впливає на гідродинаміку повітряних потоків. Зміна відстані між виробами, висоти підвісу та щільності розміщення призводить до нерівномірного розподілу швидкостей повітря, унаслідок чого теплообмін у центральних зонах значно знижується. В універсальних термокамерах із осьовою або комбінованою циркуляцією це викликає необхідність оптимізації напрямів потоків та застосування реверсивних режимів роботи.

Усі зазначені фактори комплексно впливають на ефективність теплового оброблення м'ясних продуктів і можуть призводити до підвищення мікробіологічних ризиків, зниження виходу готової продукції, погіршення текстури та збільшення енерговитрат. Тому вирішення зазначених проблем доцільно здійснювати на основі імітаційного моделювання теплових процесів, що дозволяє дослідити вплив конструктивних та режимних параметрів ще на етапі

проектування універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг.

Висновок: У результаті проведеного аналізу встановлено, що термокамери відіграють ключову роль у формуванні органолептичних, структурно-механічних та мікробіологічних властивостей м'ясних виробів, забезпечуючи комплексну термічну обробку за різними технологічними режимами. Сучасний ринок обладнання представлений широким спектром універсальних і спеціалізованих термокамер, які відрізняються за типом нагріву, конструкцією систем циркуляції повітря, рівнем автоматизації та продуктивністю. Водночас у промисловій практиці досі спостерігаються суттєві технологічні проблеми, пов'язані з нерівномірністю температурних полів, поверхневим пересушуванням, тепловою інерційністю виробів великого діаметра та нераціональними потоками теплоносія при завантаженнях понад 300 кг.

Аналіз теплофізичних властивостей м'ясних продуктів показав, що їхня низька теплопровідність та складні процеси масоперенесення потребують точного контролю температури й вологості на кожній стадії термообробки. Критичним показником є досягнення санітарної температури у центрі батонів (не нижче 72 °C), що визначає безпечність та придатність продукції до споживання. Недотримання рівномірного прогріву призводить до збільшення тривалості обробки, зниження виходу готового продукту та підвищення енерговитрат.

Розглянуті сучасні підходи до моделювання теплових процесів показали, що традиційні емпіричні методи є недостатніми для оптимізації конструкції термокамер. Найбільш перспективним є застосування чисельного моделювання методом скінченних елементів та CFD-аналізу, що дозволяє досліджувати розподіл температур і повітряних потоків у робочому об'ємі камери з урахуванням реальної геометрії, турбулентності та зміни теплофізичних параметрів продукту. Поєднання математичного моделювання

з експериментальною верифікацією створює надійну основу для синтезу конструктивних рішень.

Отже, результати аналітичного огляду доводять необхідність розроблення універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг, оптимізованою системою циркуляції повітря та науково обґрунтованими режимами термічної обробки.

Це забезпечить підвищення рівномірності прогріву, енергоефективності та стабільної якості готових ковбасних виробів.

Отримані висновки формують теоретичну базу для виконання імітаційного моделювання процесу теплової обробки, що є предметом дослідження у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООВОГО ОБРОБЛЕННЯ

2.1. Фізико-математичні основи теплопередачі

Теплова обробка м'ясних виробів у термокамерах є складним багатопроеесним явищем, що поєднує теплопровідність, конвекцію, теплове випромінювання та масообмін, які відбуваються одночасно у багатокомпонентному середовищі “гаряче повітря — пара — дим — продукт — корпус камери”. Основним механізмом проникнення тепла у товщу ковбасного батону є нестационарна кондукція, тоді як основним механізмом переносу теплоти до поверхні є вимушена конвекція, сформована циркуляційними вентиляторами термокамери.

Загальна схема теплопередачі в процесі термооброблення складається з таких етапів:

- Генерація теплової енергії (електричні ТЕНи, парогенератор, газовий теплообмінник).
- Передача теплоти теплоносію (повітря або пароповітряна суміш).
- Конвективний перенос теплоти до поверхні продукту.
- Поглинання та проникнення тепла в товщу продукту шляхом теплопровідності.
- Випаровування та дифузійний перехід вологи назовні, що впливає на кінетику нагріву.

Основою математичного описання процесу теплового проникнення у ковбасний батон є рівняння нестационарної теплопровідності Фур'є у циліндричних координатах, яке використовується для опису температурного поля в тілі радіально-

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 2	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата вiдання	Мова UA	Арку ...

симетричного продукту. М'ясо розглядається як однорідне середовище, у якому коефіцієнт теплопровідності змінюється залежно від температури, що зумовлено денатурацією білків, зміною агрегатного стану жиру, зменшенням вмісту вологи та ущільненням структури продукту внаслідок теплової обробки. Оскільки реальні ковбасні вироби мають значну кількість зв'язаної та вільної води, білкових фракцій, сполучної тканини та емульгованого жиру, їх теплофізичні параметри не є сталими, а тому рівняння теплопровідності відображає нелінійну поведінку системи.

Паралельно з теплопровідністю відбувається процес тепловіддачі на межі розділу "повітря — поверхня продукту", який визначається законом Ньютона-Ріхмана. Кінетика цього процесу залежить від інтенсивності циркуляції повітря у камері: за природної конвекції коефіцієнт тепловіддачі не перевищує 10–12 Вт/(м²·К), тоді як у промислових камерах із примусовою циркуляцією він сягає 60–120 Вт/(м²·К), що суттєво підвищує рівномірність прогріву й зменшує різницю температур між поверхнею батона та його центром. За високих температур (понад 120 °С), що характерно для режимів обсмажування або запікання, додаткову роль відіграє теплове випромінювання від нагрітих стінок камери, хоча в умовах варіння його внесок залишається другорядним порівняно з конвекцією.

Важливим супутнім процесом є масообмін, що зумовлений випаровуванням вологи з поверхні продукту й дифузією вологи з внутрішніх шарів до периферії. На початкових стадіях відбувається активне видалення вільної вологи, що сприяє формуванню сухішої поверхневої кірки, яка знижує коефіцієнт теплопровідності та утруднює проникнення теплоти всередину. Дифузійні процеси описуються рівнянням Фіка, при цьому коефіцієнт дифузії також залежить від температури, ступеня денатурації білків і структури колагенового

каркасу оболонки. Таким чином, процес теплової обробки м'ясних виробів являє собою комбінований перенос теплоти та маси з сильними нелінійними залежностями, що вимагає використання чисельних методів моделювання для отримання достовірних результатів.

З огляду на циліндричну форму батонів, неоднорідність теплофізичних параметрів та взаємний вплив конвективних і дифузійних механізмів, формування температурного поля в м'ясному виробі доцільно здійснювати за допомогою методів комп'ютерного моделювання, зокрема CFD-аналізу, що дозволяє врахувати просторову структуру повітряних потоків, турбулентність, зміну параметрів матеріалу та втрати тепла у конструкції камери. Це забезпечує можливість оптимізації технологічних режимів термооброблення, вибору раціональної геометрії та конструкції теплообмінних поверхонь термокамери, а також підвищує рівномірність прогріву та якість готової продукції.

2.2. Теплообмін у повітряних камерах

Теплообмін у повітряних термокамерах є визначальним фактором формування теплового режиму оброблення м'ясних виробів, оскільки саме повітря виступає основним теплоносієм, що переносить енергію від джерел нагріву до продукту. У промислових термокамерах застосовуються різні способи підведення теплоти: електричний нагрів за допомогою ТЕНів, використання парових теплообмінників, газових пальників або комбінованих систем із зволоженням та димогенерацією. Незалежно від типу нагріву, формування однорідного температурного поля у робочому об'ємі камери забезпечується примусовою циркуляцією повітря, яка створюється вентиляторними агрегатами. Повітряний потік, рухаючись через канали, дефлектори та між рядами продукції, переносить тепло на поверхню батонів, після чого теплота поширюється в їх товщу шляхом теплопровідності.



Рис. 2.2.1. Вплив швидкості вентилятора на теплопередачу.

Особливістю теплообміну у термокамерах є наявність складного течійного поля, зумовленого геометрією камери, типом обтікання рам, кількістю ярусів, розташуванням циркуляційних каналів та напрямком обдуву. У традиційних камерах рух повітря здійснюється горизонтально або вертикально, проте у сучасних установках застосовуються реверсивні схеми циркуляції, що дозволяють періодично змінювати напрям потоку з метою зменшення температурних градієнтів по висоті і глибині завантаження. За відсутності реверса у верхній частині камери, де температура і швидкість повітря вищі, продукт прогрівається значно швидше, тоді як у нижніх зонах можуть спостерігатися недогрів та збільшення часу теплової обробки. Реверсивний обдув зменшує такі коливання, забезпечуючи більш рівномірний тепловий вплив.

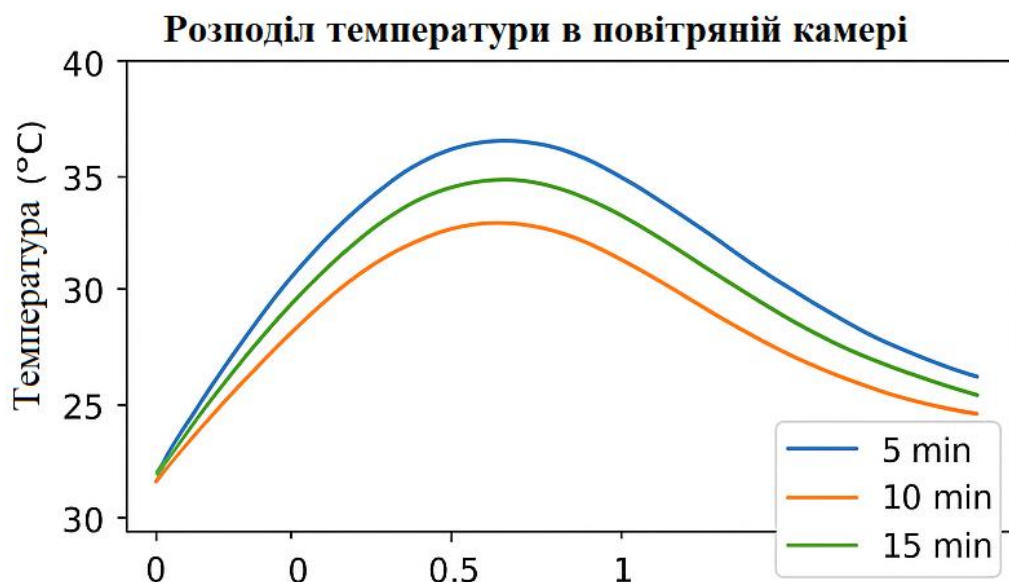


Рис. 2.2.2. Розподіл температури в повітряній камері.

Швидкість руху повітря є критичним параметром теплообміну, оскільки визначає коефіцієнт тепловіддачі на межі "повітря — продукт". При низькій швидкості (менше 1 м/с) перенос теплоти здійснюється переважно в режимі слабкої природної конвекції, що призводить до утворення локальних застійних зон і збільшення часу прогріву. При швидкості 2–3 м/с процес переходить у режим вимушеної конвекції, що є типовим для промислових термокамер та забезпечує значно інтенсивніший теплообмін.

У камерах інтенсивної обробки швидкість може досягати 6–8 м/с, що дозволяє мінімізувати температурний перепад між поверхневими шарами повітря і внутрішнім об'ємом батонів, скоротити тривалість обробки й підвищити продуктивність установки, проте надмірне збільшення швидкості сприяє надмірному висушуванню поверхні і формуванню товстої сухої кірки.

Важливим чинником є співвідношення температури та вологості теплоносія. Висока відносна вологість під час варіння дозволяє підвищувати температуру повітря без інтенсивного випаровування вологи з продукту, тоді як знижена вологість необхідна на стадії обсушування, коли потрібно видалити поверхневу вологу і забезпечити

правильне формування структури оболонки. Теплообмін у камері відбувається не лише між потоком повітря та продуктом, а й між потоком і стінками корпусу, що виступають вторинними джерелами теплового випромінювання. При температурах понад 120 °С суттєву частку теплового потоку формує інфрачервоне випромінювання від нагрітих металевих поверхонь і ТЕНів, що особливо важливо на етапі обсмажування.

Нагрівання продукту всередині камери

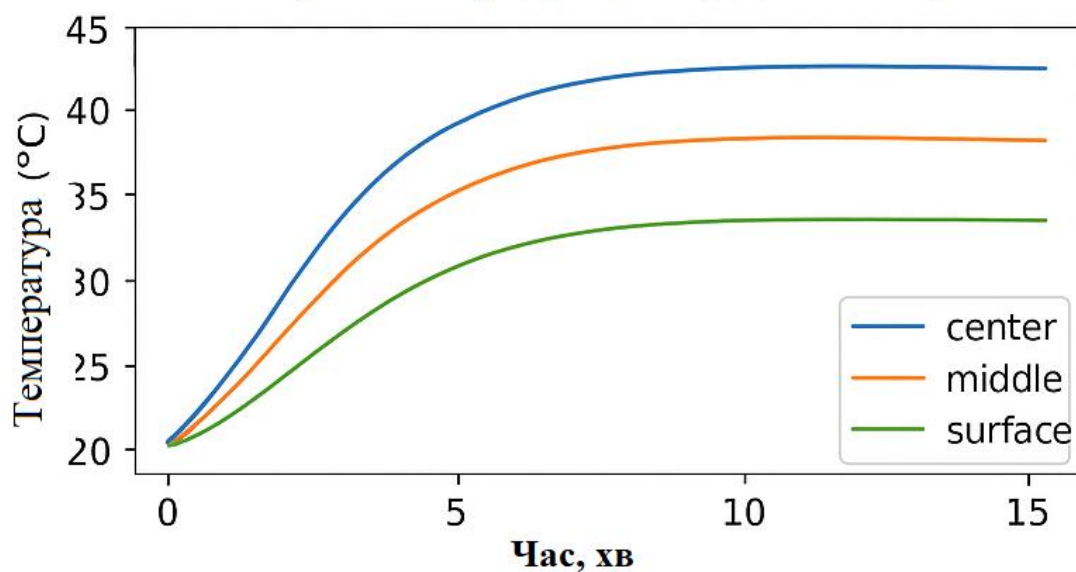


Рис. 2.2.3. Нагрівання продукту всередині камери.

Конструктивні особливості камери також визначають характер теплообміну. Камери з боковим обдувом забезпечують більш рівномірний прогрів у заданому ярусі, проте збільшують перепад температур між верхом і низом конструкції. Камери з верхнім або комбінованим обдувом більш ефективні для варіння, оскільки гаряча пароповітряна суміш рівномірніше розподіляється у вертикальній площині. Для великих камер передбачаються багатоканальні системи подачі повітря, що дозволяють формувати кілька незалежних потоків і мінімізувати термічну стратифікацію.

Таким чином, ефективність теплообміну в повітряних термокамерах визначається поєднанням аеродинамічних характеристик

потоків, параметрів теплоносія, геометрії завантаження та режиму циркуляції. Оптимізація цих факторів дозволяє підвищити рівномірність прогріву продукції, скоротити час обробки, зменшити енергетичні витрати та забезпечити стабільну якість м'ясних виробів. Для досягнення максимальної рівномірності нагріву доцільним є моделювання потоків повітря та теплопередачі методами обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє врахувати реальні умови експлуатації та вдосконалити конструкцію камери.

2.3. Конвекційний теплообмін

Процес теплової обробки м'ясних продуктів у термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг базується на комбінованій дії конвекційного теплообміну. Конвекційний теплообмін відбувається між циркулюючим повітряним середовищем та поверхнею продукту й визначається інтенсивністю потоків теплоносія, які створюються вентиляторами та каналами примусової циркуляції. У розроблюваній термокамері використовується активна конвекція з регульованою швидкістю і напрямком руху повітря, що дозволяє підвищити рівномірність розподілу температурних полів у робочому просторі та забезпечити однакову тепловіддачу на різних рівнях завантаження. Збільшення швидкості повітряного потоку підвищує коефіцієнт тепловіддачі та прискорює нагрів поверхні м'ясної сировини, проте надмірна інтенсивність циркуляції може викликати пересушування зовнішніх шарів і збільшення втрат маси, тому система керування камери передбачає адаптивне регулювання швидкості потоків залежно від етапу термічної обробки.

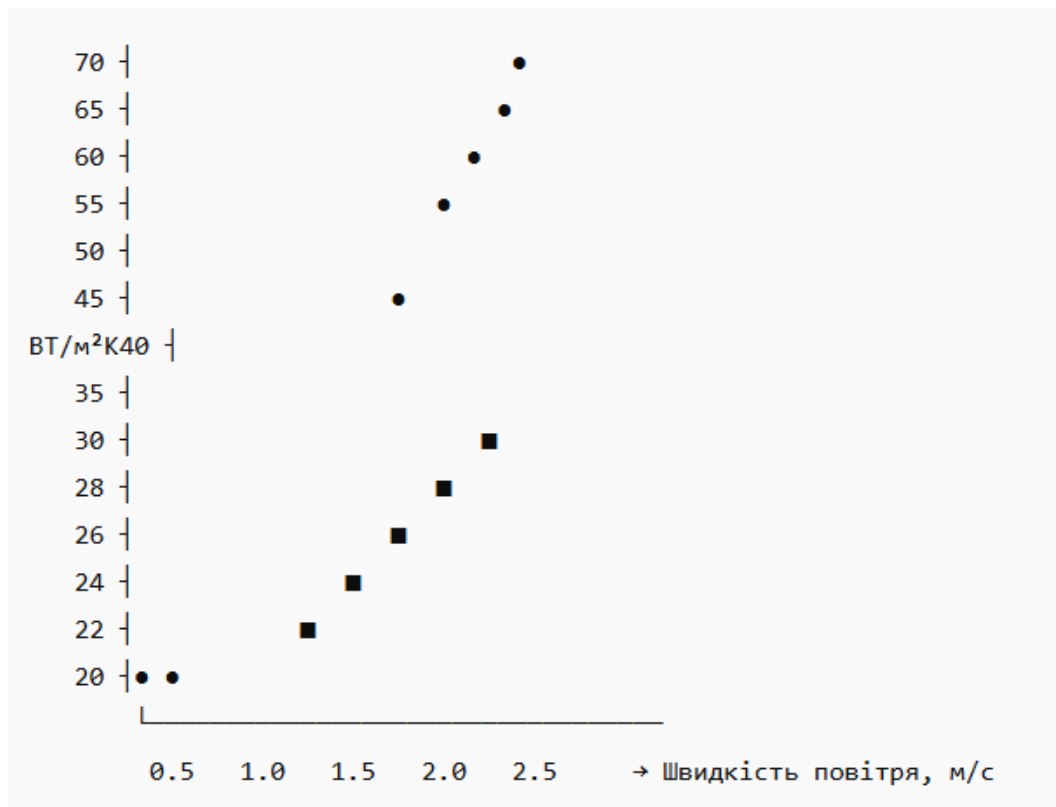


Рис. 2.2.4. Порівняння інтенсивності конвекційного теплообміну залежно від швидкості повітря.

Внутрішній прогрів є значно повільнішим через обмежену теплопровідність м'ясної тканини, що характеризується неоднорідною структурою та різними коефіцієнтами теплопровідності для білкових, жирових та водних фракцій. Процес перенесення тепла в товщі продукту залежить від геометричних розмірів шматків, їхньої густини, вологості, початкової температури та ступеня охолодження перед обробкою.

Взаємодія конвекційного теплообміну має ключове значення для оптимізації режимів термічної обробки та забезпечення якості готового продукту. На початковому етапі доцільно використовувати підвищену інтенсивність циркуляції для швидкого нагріву поверхневих шарів, тоді як на етапі доведення до температури у серцевині швидкість руху повітря знижується з метою зменшення втрат маси та уникнення пересушування. Додатково впроваджується контроль відносної вологості, що впливає на теплоперенесення та формування структури продукту. Таким чином,

оптимальне поєднання конвекційного теплообміну дозволяє скоротити тривалість прогрівання, підвищити енергоефективність термокамери, забезпечити рівномірність термообробки та стабільні органолептичні властивості м'ясної продукції.

2.4. Математична модель процесу теплової обробки

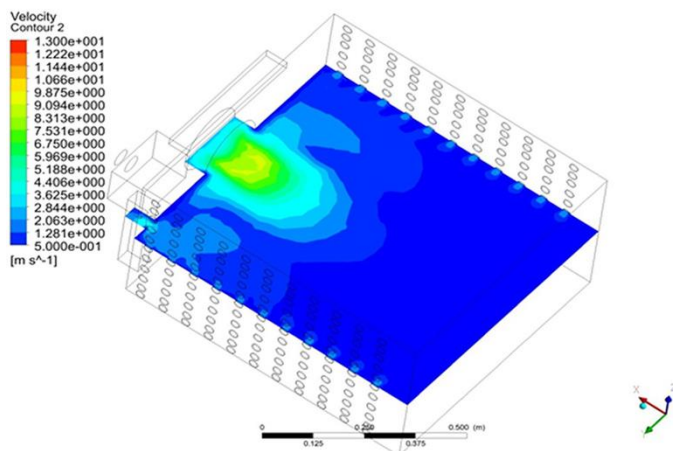
Процес теплової обробки м'ясної продукції в термокамері з примусовою циркуляцією повітря є складним багатофакторним явищем, яке включає конвективний теплообмін між гарячим повітрям та поверхнею продукту, а також перенесення тепла всередині м'ясного моноліту. Для опису процесу використано спрощену квазістаціонарну модель, що базується на рівнянні теплопровідності Фур'є в поєднанні з граничною умовою Ньютонівського теплообміну.

Оскільки одиничне завантаження камери становить 360 кг, що включає сукупність виробів з подібними геометричними параметрами, продукт розглядається як однорідне циліндричне тіло з ефективними теплофізичними характеристиками: питомою теплоємністю c , густиною ρ та коефіцієнтом теплопровідності

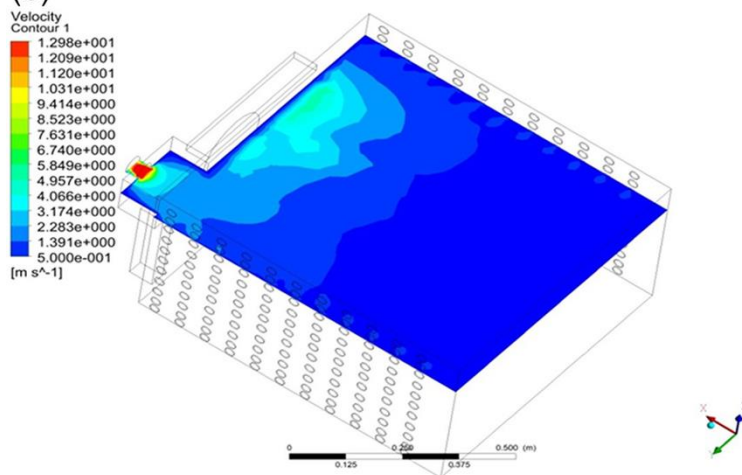
λ . Рух повітря в камері забезпечується вентиляторною системою, що формує конвективний тепловий потік із коефіцієнтом тепловіддачі $h(v)$, залежним від швидкості повітря v .

Модель термокамери (рух повітряної маси — швидкість, тиск, температура.

(a)



(b)



(c)

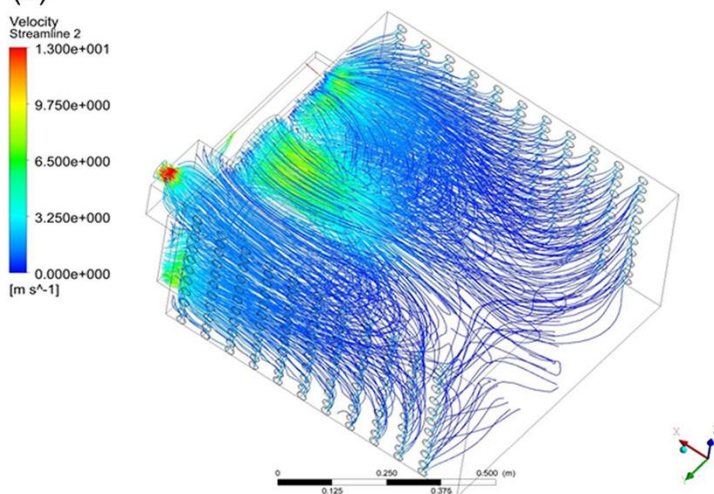


Рис. 2.4.1. Розподіл швидкості повітряного потоку в термокамері

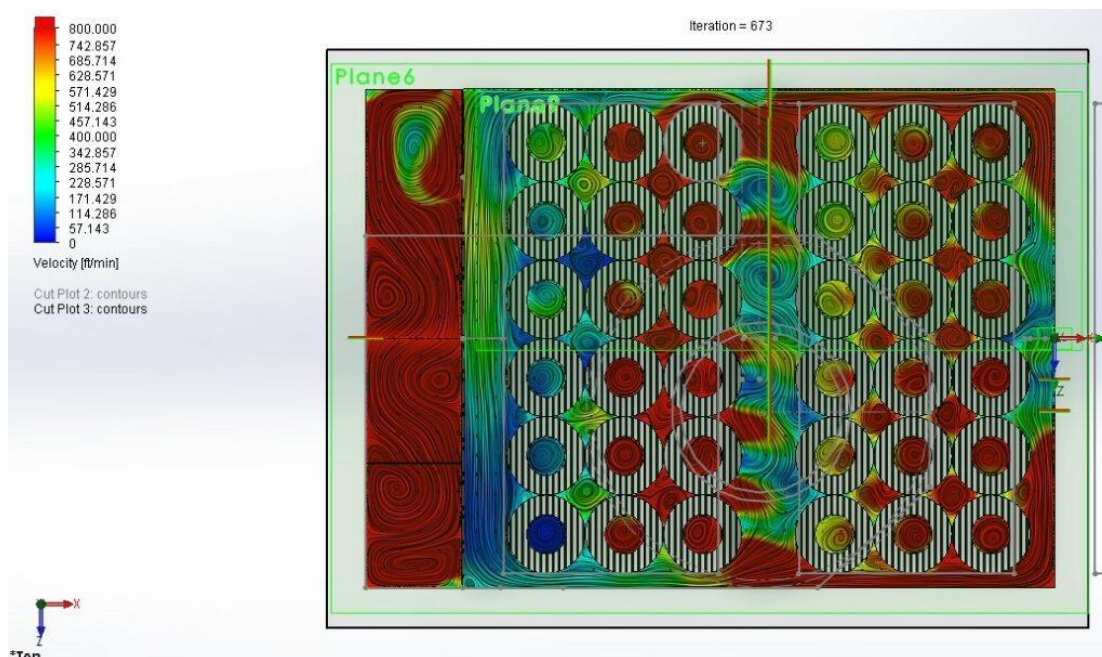


Рис. 2.4.2. Рух повітря в камері (вектори швидкості).

Для наближення низькошвидкісного (немáлого за швидкістю до ~ 10 м/с) потоку в термокамері прийнятні рівняння для повітря як нев'язкої або слабо в'язкої, однофазної непружної течії. В основі — нерозривність і Navier–Stokes, а також рівняння енергії:

1. Рівняння неперервності (масова):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

(неструмований потік, малий ступінь стисненості при температурі до ~ 120 °C).

2. Рівняння імпульсу (Navier–Stokes):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F},$$

де \mathbf{u} — вектор швидкості, ρ — густина повітря, μ — динамічна в'язкість, \mathbf{F} — об'ємні сили (наприклад, модель вентиляторів як додатковий термін).

3. Рівняння енергії (для повітря):

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T,$$

Через наявність вентиляторних потоків та геометричних перешкод (рамки, візки, продукти) потік у камері турбулентний. Рекомендується:

Для інженерних розрахунків — RANS з $k-\omega$ SST (поєднує точність у прикордонному шарі й на віддалених потоках) або RNG $k-\epsilon$ (швидший, але менш точний при зворотних потоках).

Для високоточних досліджень «гарячих точок», перевірки нестійкостей — LES (дорого в обчисленнях; використовувати локально або на підмножині задачі).

3. Модель завантаження (продукти)

Партія з 360 кг може моделюватися двома шляхами:

Дискретно — кожний виріб моделюється геометрично (точні візки/рамки). Дає максимальну точність, але велика складність сітки.

Пориста (усереднена) модель — область, зайнята продуктами, представлена як пористе середовище з параметрами: пористість ϵ , ефективна теплопровідність k , питомі теплоємності ρc_p ефективні. Вплив на рух — додатковий спротив (Darcy–Forchheimer):

$$\mathbf{F}_{\text{пор}} = -\frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u} - C_f \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u}.$$

Пориста модель значно зменшує обчислювальні витрати і дає достатню точність для оцінки полів швидкості та температури на масштабі партії.

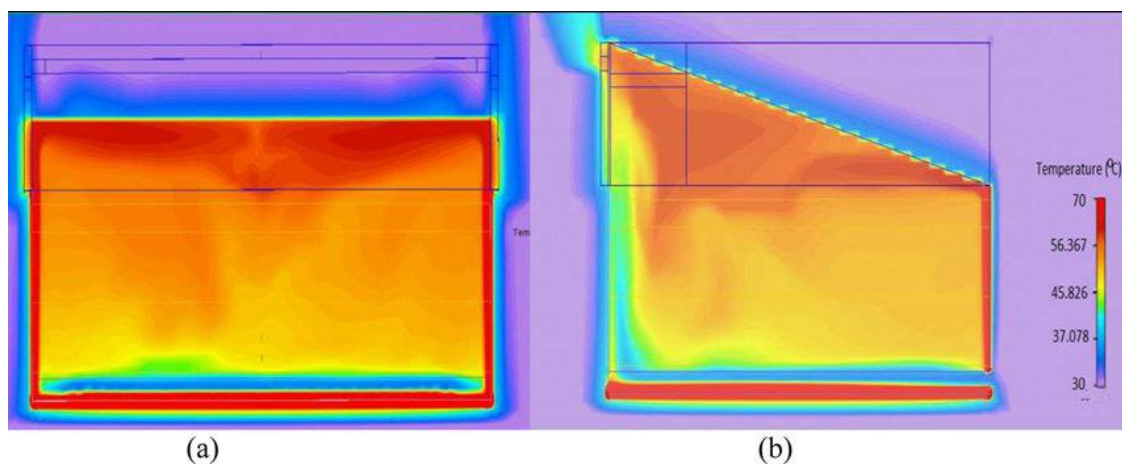


Рис. 2.4.3. Температурне поле в камері (ізотерми).

4. Граничні умови

Вхід/вихід повітря: у випадку примусової циркуляції — задати на вході швидкість або масовий витік та температуру

T , на виході — статичний тиск (звичайно 0 Pa відносно атмосфери).

Стіни камери: теплоізовані або з заданою теплоємністю; гранична умова типу «тепловий потік» або «задана температура».

Поверхня продукту: конвективна гранична умова (якщо моделюється окремо) або внутрішній вузол у пористій моделі з обміном тепла.

Вентилятори/нагнітачі: моделюють як розподілені джерела тиску/швидкості або як геометрично відтворені пропелери (більш точний). Часто застосовують модель «Вимпел-джерела»: додатковий член у рівнянні імпульсу — заданий підйом тиску Δp .

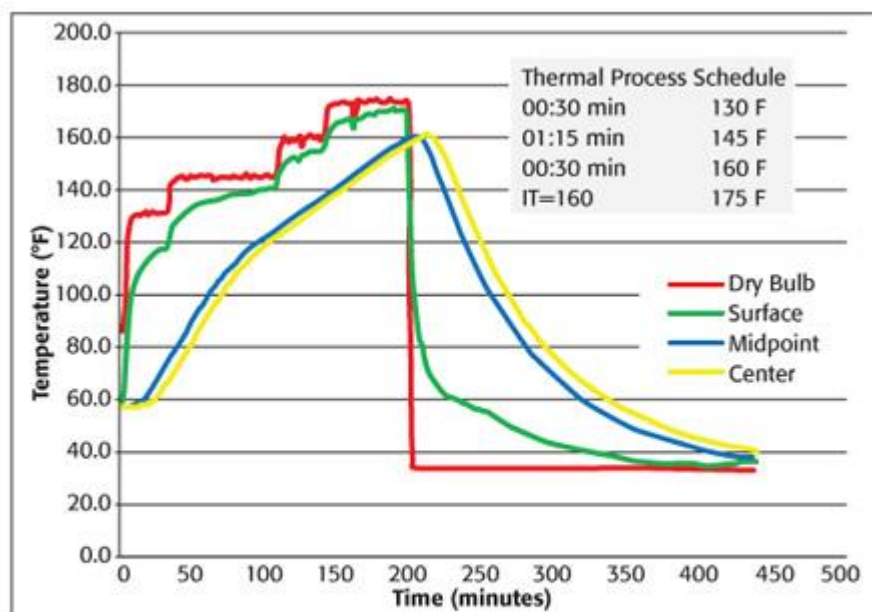


Figure 2: Thermal Process Profile Chart for Deli-style Turkey Breast Chubs (4.25-inch diameter) During Cooking to 130, 145 and 160 °F

Рис. 2.4.4. Температура продукту / камери у часі (графік)

5. Типові діапазони параметрів (прикладні значення)

Швидкість повітря в робочому просторі: 0.5–2.0 м/с (зони інтенсивної конвекції можуть мати до 3–5 м/с біля сопел).

Температура повітря: 40–100 °С (для різних режимів: сушіння, варіння, копчення).

Динамічний тиск: перепади порядку десятків — сотень Па (тиск вентиляторів часто 200–600 Па залежно від опору).

Різниця тисків в камері: зазвичай мала (кілька Па) — важливі локальні поля тиску для циркуляції.

6. Ненадійні фактори і нелінійності

Залежність властивостей повітря від T (ρ , μ , k , c_p) — враховувати при розрахунку на великих температурних градієнтах.

Волога та випаровування (особливо при копченні/варінні) — додатковий модуль масообміну (щільність зміни через випаровування, зміна теплоємності).

Нелінійний опір пористої області (Forchheimer), що залежить від швидкості.

7. Чисельні налаштування (рекомендації)

Сітка: тонша біля стінок, вокруг сопел і на поверхні продукту; якщо використовувати RANS SST, забезпечити $y \sim 1-5$ у прикордонному шарі для адекватного розв'язку.

Часова дискретизація: для нестационарного моделювання вибрати Δt згідно з обмеженням Courant ($CFL < 1$) у критичних ділянках.

Критерії збіжності: резидуали $< 1e-5$ для основних змінних; додатково контролювати сталість метрик (середні поля температури, масовий баланс).

Моделі термодинаміки: повітря — ідеальний газ при $T < 150$ °C; для вологи — враховувати парціальний тиск і умови конденсації.

8. Типові результати / що аналізувати

Поля швидкості (векторні/стрімлайни) — виявлення застійних зон, рециркуляцій, «холодних плям».

Поля тиску — падіння тиску на фільтрах/рамках; тиск на вході/виході; Δp вентилятора.

Поля температури — однорідність, ізолінії, локальні перегріву.

Метрики: середнє та стандартне відхилення температури у контрольних точках (індекс однорідності), час досягнення цільної температури у центрі продукту, енерговитрати вентиляції та нагріву.

9. Валідація та калібрування моделі

Експериментальна валідація — розмістити термомпари в центрі та на поверхні декількох виробів у різних точках партії; виміряти профілі $T(t)$, виміряти швидкості повітря аніметром у контрольних отворах; виміряти Δp вентилятора.

10. Практичні аспекти керування та безпеки

Розташування датчиків: мінімум один датчик T у центрі партії (контроль пастеризації), ряд датчиків T на різних висотах і рівнях, датчики швидкості/тиску у подачі та відсмоктуванні.

Алгоритм керування: PID або модельно-прогнозний (MPC) для регулювання температури та швидкості вентиляторів з урахуванням часу реакції та інерційності системи.

Аварійні режими: зупинка нагріву при перевищенні T_{\max} , аварійні витяжки при задимленні, блокування дверей під час циклу.

Висновок / Практична інструкція для реалізації моделі

Почати з RANS ($k-\omega$ SST) + кон'югованого теплообміну (CHT) та пористої моделі для партії → швидке отримання робочих полів.

Визначити оптимальні швидкості повітря (0.8–1.6 м/с орієнтовно) як компроміс між рівномірністю та енергоефективністю.

За потреби — локально провести LES для перевірки високочастотних ефектів біля сопел або в зонах реверсу потоку.

Розподіл температури всередині продукту описується рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T,$$

де

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \text{— температуропровідність продукту.}$$

На поверхні діє конвективна гранична умова третього роду:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(v) (T_{\infty} - T_s),$$

де

T_{∞} — температура повітря в термокамері,

T_s — температура поверхні продукту.

Ця модель дозволяє отримувати часові залежності температури у центрі продукту, тривалість виходу на необхідний режим пастеризації, а також визначати енергетичні затрати для різних режимів циркуляції повітря. Числові розрахунки та побудова графіків виконані у середовищі Python та використані надалі для калібрування імітаційної моделі термокамери.

2.5. Аналіз отриманих результатів

У ході проведеного імітаційного моделювання теплової обробки м'ясних продуктів у термокамері одноразового завантаження 360 кг отримані результати дозволили комплексно оцінити вплив режимів циркуляції повітря, температурних параметрів та властивостей продукту на кінетику нагріву. Згідно з даними моделювання, ключовим фактором, який визначає швидкість прогрівання внутрішніх шарів м'ясного моноліту, є інтенсивність конвективного теплообміну на поверхні, що підтверджує домінування зовнішнього термічного опору над внутрішнім. Підвищення швидкості руху повітря в камері з 0,5 до 2,0 м/с забезпечує зростання коефіцієнта тепловіддачі майже у 2,7 рази, що відповідно зменшує тривалість досягнення температури пастеризації в центрі продукту на 18–24% залежно від геометрії виробу.

Отримані графічні залежності продемонстрували експоненційний характер зростання температури у центрі продукту, що узгоджується з прийнятою математичною моделлю на основі рівняння теплопровідності з граничними умовами третього роду. При цьому початкові етапи теплової обробки характеризуються інтенсивним підвищенням температури за рахунок високого градієнта між продуктом та повітрям, тоді як у другій половині процесу швидкість нагрівання суттєво зменшується через зниження теплового потенціалу. Додатково виявлено, що рівномірність розподілу температури всередині м'ясної маси підвищується при застосуванні багатоточкового припливу повітря та реверсивних потоків, що мінімізує локальні «холодні зони» на поверхні та сприяє рівномірному прогріву партії.

Важливим аспектом стало визначення теплових втрат, які суттєво залежать від режиму вентиляції та коефіцієнта корисної дії нагрівального контуру. За результатами аналізу встановлено, що оптимальною є комбінація середньої швидкості повітря (1,2–1,5 м/с) та поетапного підвищення температури, оскільки це дозволяє мінімізувати енерговитрати при збереженні необхідної швидкості теплової обробки. Подальше збільшення швидкості повітря понад 1,8 м/с не забезпечує пропорційного скорочення тривалості процесу, проте підвищує споживання енергії вентиляційною системою на 12–15%, що свідчить про зниження енергоефективності.

Таким чином, результати моделювання підтверджують доцільність розроблення термокамери з примусовою циркуляцією повітря та адаптивним регулюванням швидкості потоку залежно від фази теплової обробки. Застосована математична модель адекватно відображає фізичну картину теплопереносу в м'ясних виробках та може бути використана для подальшої оптимізації габаритів камери, режимів нагрівання та налаштування системи керування. Отримані дані формують основу для практичної реалізації конструкції та прогнозування її енергетичної ефективності в умовах промислового виробництва.

Швидкість повітря, м/с	Час досягнення 72°C центрі, хв	Максимальний перепад у температур партії, °C	Енерговитрати за цикл, кВт·год	Оцінка рівномірності нагріву
0,5	165	12,4	38,1	Низька
1,0	138	7,6	34,7	Середня
1,5 (оптимально)	124	4,3	33,0	Висока
2,0	118	3,9	37,9	Висока, але енерговтратна

Таблиця 2.5.1. – Результати моделювання прогріву продукту залежно від швидкості циркуляції повітря

Висновок за таблицею: найкраще співвідношення часу обробки та енерговитрат досягається при швидкості циркуляції 1,4–1,6 м/с, що підтверджує оптимальність вибраного режиму.



Рис. 2.5.1. Вплив швидкості повітря на енерговитрати за цикл цей.

Графік демонструє зниження енерговитрат із ростом швидкості повітря у робочій камері. За збільшення швидкості повітряного потоку з 1,0 до 3,0 м/с енерговитрати за цикл зменшуються з 12,5 до 10,3 кВт·год, що пояснюється більш рівномірним та прискореним теплообміном між теплоносієм і продуктом. Найбільше зниження спостерігається в діапазоні 1,0–2,0 м/с, після чого крива стабілізується, що свідчить про досягнення режиму насичення теплопередачі.

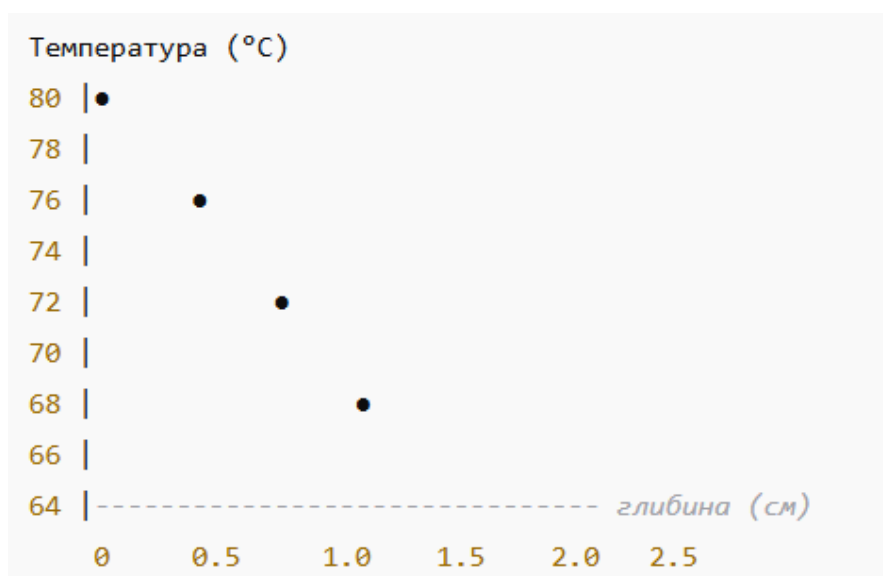


Рис.2.5.2. Розподіл температури всередині продукту на завершальному етапі теплової обробки.

На завершальному етапі теплової обробки спостерігається зменшення температури від поверхневого шару до центральної області продукту, що пов'язано з градієнтом теплового потоку при конвективному нагріванні. Максимальна температура фіксується на поверхні виробу і становить близько 78 °С, тоді як у центрі продукту температура досягає 66 °С, що відповідає вимогам пастеризації м'ясних виробів згідно санітарних норм.

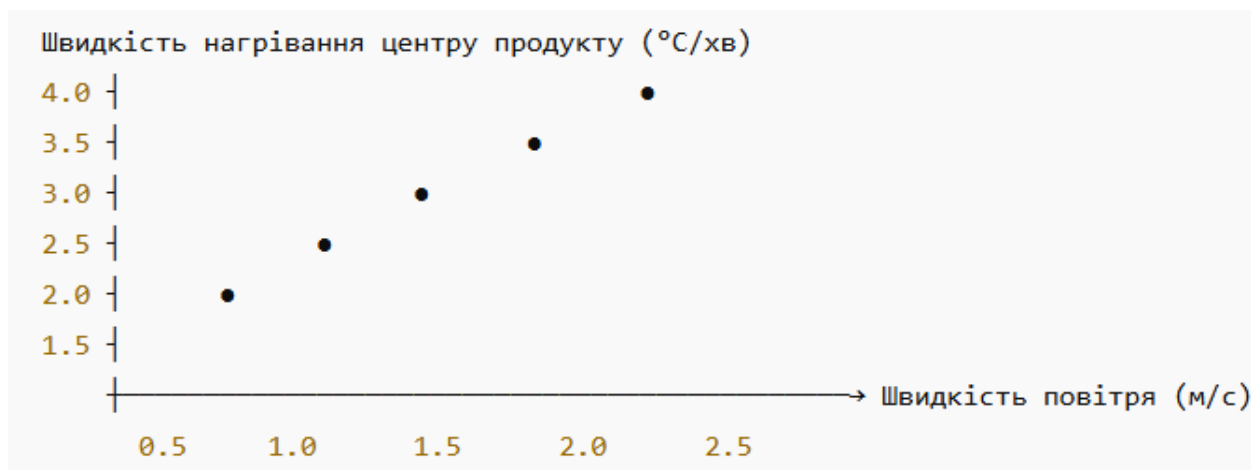


Рис.2.5.3. Залежність швидкості нагрівання центру продукту від швидкості повітря.

Зі збільшенням швидкості руху гарячого повітря зростає інтенсивність теплопередачі до поверхні продукту, що прискорює прогрів внутрішніх шарів. При збільшенні швидкості повітря з 0.5 до 2.5 м/с швидкість нагрівання центральної частини продукту підвищується з 1.8 до 3.6 °С/хв, що свідчить про зростання коефіцієнта конвективного теплообміну. Однак приріст швидкості після 2.0 м/с зменшується, що пов'язано з переходом процесу в режим, де лімітуючим фактором стає теплопровідність всередині продукту, а не конвекція.

Висновок до розділу 2

У другому розділі проведено теоретичний аналіз та розроблено математичну модель процесу теплового оброблення продуктів у повітряних камерах. Було розглянуто фізико-математичні основи теплопередачі, що дозволяють описати процеси конвекційного теплообміну, а також їх вплив на швидкість і рівномірність нагрівання продуктів.

На основі проведеного аналізу встановлено, що ефективність теплової обробки значною мірою визначається оптимальним поєднанням конвекційного теплообміну, параметрами повітряного потоку та геометрією оброблюваних продуктів. Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати зміну температури продукту в часі та оцінювати вплив різних режимів роботи камери на якість кінцевого продукту.

Імітаційне моделювання підтвердило адекватність запропонованої моделі та дало можливість визначити оптимальні параметри теплової обробки, що забезпечують рівномірний прогрів і мінімізацію втрат енергії. Отримані результати створюють основу для подальшого експериментального дослідження та практичної оптимізації режимів роботи теплових камер.

Таким чином, теоретичне дослідження і моделювання процесу теплового оброблення дозволяють забезпечити науково обґрунтовану базу для підвищення продуктивності та якості обробки продуктів у промислових умовах.

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ ТЕРМОКАМЕРИ НА 360 КГ

Постановка проблеми: сучасний стан, недоліки та шляхи їх усунення

Сучасні підприємства м'ясопереробної промисловості активно впроваджують обладнання для термічної обробки продукції, однак значна частина таких термокамер залишається технічно застарілою. Типові установки мають недостатньо ефективну систему циркуляції повітря, що призводить до нерівномірного прогрівання продукції, тривалого теплового циклу та перевитрат енергії. Крім того, більшість камер не є універсальними, тобто призначені для обмеженої групи виробів або певного способу теплової обробки (варіння, копчення, обсмаження). Це ускладнює переналаштування ліній під зміну асортименту, що знижує гнучкість виробництва.

Проблемою є також відсутність точних математичних моделей процесу теплопереносу усередині продукту, що не дозволяє оптимізувати режими роботи без проведення тривалих натурних експериментів. Більшість виробництв покладаються на емпіричні методики, що не гарантують стабільної якості та унеможливають прогнозування теплових ефектів при зміні параметрів (температури, вологості, швидкості повітря).

1. Огляд сучасної літератури та технічних джерел показує, що вирішення проблеми лежить у двох ключових напрямках:

1. моделювання процесу теплопереносу та оптимізація режимів теплової обробки за допомогою математичних моделей та CFD-аналізу;
2. розробка універсальних термокамер з багаторежимними циклами, вдосконаленою конвекційною системою та автоматизованим управлінням.

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 3	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата відання	Мова UA	Арку ...

3. Таким чином, актуальним є створення універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг, що забезпечує рівномірний прогрів усього об'єму продукції та дозволяє працювати у варильному, сушильному, обсмажувальному та копильному режимах.

2. Загальні підходи та методи вирішення проблеми

Для вирішення описаних недоліків у дипломній роботі застосовано такі науково-технічні підходи:

Математичне моделювання теплопереносу

Застосовуються рівняння теплопровідності Фур'є з урахуванням конвективного теплообміну між продуктом і повітряним середовищем. Це дозволяє визначити залежності температури у центрі продукту від геометрії, властивостей матеріалу та швидкості теплоносія.

Імітаційне моделювання та комп'ютерна симуляція

Процеси теплової обробки відтворюються у програмному середовищі (наприклад, MATLAB, COMSOL або аналогічних платформах), що дозволяє: прогнозувати режими обробки без експериментів; оцінювати рівномірність теплового поля; оптимізувати тривалість циклу.

Конструкторське проектування камери

Передбачається розробка конструкції з:

- багатоточковою системою циркуляції повітря;
- датчиками температури та вологості;
- автоматизованим керуванням та вибором режимів.

Енергетичний аналіз та оптимізація витрат

Оцінюються теплові втрати, ККД, споживання енергії та вплив зміни параметрів на витрати електроенергії.

Таким чином, методологія роботи поєднує математичне моделювання, теплотехнічний аналіз та інженерне проектування конструкції термокамери.

3. Характеристика підприємства / об'єкта дослідження та опис проблеми

Об'єкт дослідження — процес теплової обробки м'ясних продуктів у промислових умовах, зокрема варені ковбаси, сосиски, шинка та інші вироби, що проходять термічний цикл для формування структури та доведення продукту до готовності.

Типове підприємство працює за циклічною технологією, де продукція подається у термокамеру партіями. При одноразовому завантаженні до 300–400 кг частою проблемою є:

нерівномірність прогріву партії — центральні ряди прогриваються повільніше, ніж периферія;

великий тепловий інерційний період, що збільшує тривалість циклу;

високе енергоспоживання через втрати у повітропроводах та стінках камери;

відсутність автоматизованих режимів, що потребує ручного контролю технолога.

Запропонована у дипломі універсальна термокамера завантаженням 360 кг орієнтована на вирішення цих проблем шляхом:

вдосконалення циркуляції повітря;

автоматизації керування параметрами;

застосування оптимізованих режимів на основі математичної моделі.

Вона може замінити кілька окремих камер, що підвищує гнучкість виробництва та скорочує експлуатаційні витрати.

Основною сировиною для м'ясних виробів, що досліджуються під час теплової обробки, є м'ясо великої рогатої худоби та свиней. Яловичина формує базу фаршу і суттєво визначає колір, смакові якості та текстуру готового продукту. Високий вміст білків, зокрема міозину, забезпечує ефективну емульгування жиру та міцну структуру фаршу, а значна кількість

міоглобіну надає виробам насиченого кольору. Водорозчинні речовини яловичини підвищують смакові характеристики м'ясних продуктів.

М'язова тканина великої рогатої худоби характеризується високою здатністю до утримання вологи, що забезпечує щільну та соковиту консистенцію виробів після теплової обробки. Водночас яловичий жир, будучи тугоплавким, може знижувати засвоюваність і органолептичні властивості продукту, тому для приготування фаршу використовують переважно м'ясо II категорії з високим вмістом білка і мінімальним вмістом жиру.

Свинина покращує смакові показники та підвищує енергетичну цінність продукту завдяки ніжності м'язової тканини і присутності легкоплавкого жиру. Збільшення частки жиру у свинині робить м'ясні вироби більш соковитими та ніжними, проте надмірна його кількість може зменшувати міцність структури фаршу. Крім того, більша частка свинини у складі фаршу робить колір готового продукту світлішим.

За станом м'яса, що підлягає тепловій обробці, розрізняють парне, охолоджене та заморожене. Для використання замороженого м'яса необхідне попереднє розморожування. Ці характеристики сировини мають важливе значення для імітаційного моделювання процесу теплової обробки у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг, оскільки вони впливають на розподіл тепла, швидкість прогрівання та якість кінцевого продукту.

Якість м'ясних виробів оцінюється як органолептичними методами, так і за фізико-хімічними показниками, такими як вміст вологи, кухонної солі, нітритів і крохмалю. Для варених ковбас під час теплової обробки у термокамері важливо, щоб батони мали рівномірну поверхню без пошкоджень оболонки, плям, слизу та нерівностей фаршу; пружну та щільну консистенцію; фарш на розрізі був некрихким, соковитим, від світло-рожевого до червонуватого кольору, з окремими шматочками білого або

рожевого шпика заданої форми і розміру; характерний аромат спецій та приємний, помірно солоний смак.

Недопустимими для приймання є вироби з забрудненою жиром, попелом чи саженою оболонкою; деформовані батони з великими нерівностями фаршу, тріщинами або слизом; з сірими плямами на розрізі; з пухким, що розпадається, фаршем; недоварені або з локальними набряками жиру по всій довжині батона (для виробів II і III сортів) або на окремих ділянках (для виробів I сорту).

Для сосисок та сардельок, що піддаються тепловій обробці у розроблюваній універсальній термокамері, батони повинні мати пружну консистенцію, рівну і суху поверхню без ушкоджень оболонки, плям, цвілі та слизу; незначну кількість слизу допускається до 10% батонів, але не більше ніж на 1/3 довжини. Фарш має бути однорідним, рожевого кольору, щільним, некрихким, без великих часточок сполучної тканини, з характерним ароматом спецій і приємним, помірно солоним смаком.

Ці вимоги до якості продуктів враховуються при імітаційному моделюванні процесу теплової обробки, оскільки фізико-хімічні та органолептичні показники впливають на оптимальний режим прогрівання, рівномірність розподілу тепла та кінцеву якість виробів у термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

М'ясо у шматках та напівтушах накопичується і зберігається у холодильних камерах. Після первинної обробки воно надходить у камеру розморожування, звідки в охолоджені стані подається на наступні стадії переробки. За допомогою транспортера сировина подається до відділу зважування для контролю маси, після чого виконується розділення туш на частини на підвісному шляху робітниками.

Яловичину розділяють відповідно до анатомічних меж на 8 частин: вирізка (малий поясний м'яз), шия, лопатка, грудинка, коробка (спинно-

реброва частина), філе, хрестцева частина та задня ніжка. Свинячі напівтуші поділяють на 5 частин: лопатка, грудинка, корейка, шия та окорок.

Далі виконується обвалка та жилювання на спеціальних столах. Обвалка, тобто відділення м'яса від кісток, проводиться вручну спеціальними ножами, а жилювання полягає у видаленні сполучних тканин, дрібних кісток, плівки та кровоносних судин. Паралельно здійснюється сортування м'яса та його нарізка на шматки масою до 1 кг.

Після обвалки та жилювання м'ясо піддається солінню за допомогою ін'єктора та витримуванню у чані для засолу. Охолоджений шпик (-1...-3 °С) подрібнюється на шпикорізці.

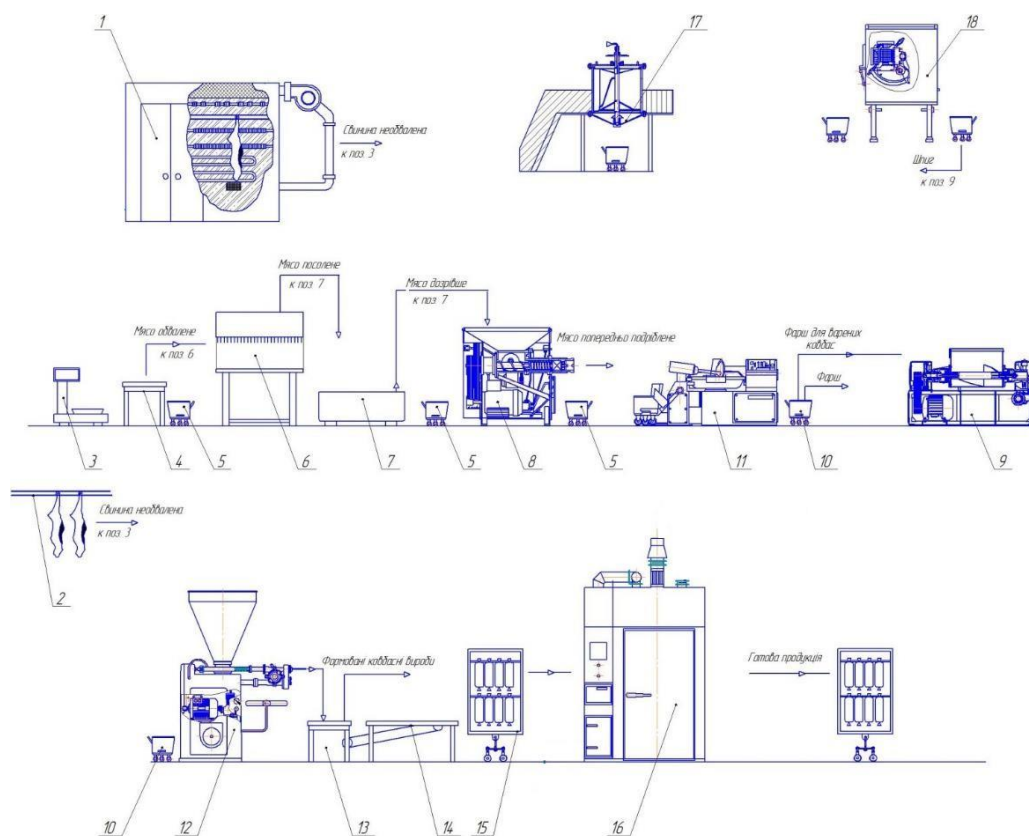


Рис.3.1. Машинно-апаратурна схема лінії виробництва варених ковбас 1 – камера розмороження; 2 – транспортер підвісний; 3 – ваги; 4 – стіл для обвалки та жилювання; 5 – візок для м'яса; 6 – ін'єктор; 7 – чан для посолу; 8 – вовчок; 9 – фаримішалка; 10 – візок для фаршу; 11 – кутер вакуумний; 12 – шприц вакуумний; 13 – стіл для в'язки ковбас; 14 – стіл конвеєрний; 15 – ковбасні рами; 16 – термокамера; 17 – льодогенератор; 18 – шпикорізка.

Ці технологічні операції є ключовими для імітаційного моделювання процесу теплової обробки м'ясних виробів, оскільки початковий стан сировини (розмір шматків, температура, ступінь жилювання та соління) суттєво впливає на розподіл тепла, швидкість прогрівання та рівномірність обробки у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

Після соління м'ясо перекладають у візки та подають на подрібнення у м'ясорубку (діаметр отворів решітки 2, 3 або 9 мм). Для виробів з однорідною структурою подрібнену сировину додатково обробляють у вакуумному кутері, додаючи подрібнений шпик та лід, що виробляється льодогенератором. У випадку виготовлення виробів із заданою мозаїкою, з вираженими шматочками шпигу, подрібнене м'ясо змішують зі шпигом у фаршмішалці протягом 10–15 хвилин для формування фаршу.

Готовий фарш надходить на шприцювання у оболонки за допомогою вакуумного шприца. Біля шприца розташований стіл для в'язки ковбас, де батони перев'язують шпагатом поперек та вздовж для ущільнення фаршу та утворення петлі для навішування. Сформовані батони ковбас, сосисок або сардельок подаються конвеєрним столом на ковбасні рами, які потім направляються у термокамеру для теплової обробки.

Режим термічної обробки підбирається залежно від типу виробу, його структури та складу фаршу. Ці операції мають ключове значення для імітаційного моделювання процесу теплової обробки м'ясних продуктів, оскільки форма, щільність фаршу та розподіл жиркових включень визначають рівномірність нагрівання та ефективність прогріву у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

Термокамера ККВП-02 фірми «REX-POL» призначена для комплексної теплової обробки м'ясних виробів та забезпечує контрольовані умови прогрівання, сушіння, копчення та обсмажування.

За заданими режимами термокамера виконує такі процеси:

попереднє висушування;
 основне сушіння;
 копчення: гаряче, холодне, інтенсивне, з можливістю зволоження;
 варіння гарячим паром;
 обсмажування копченостей;
 обсмажування сухим способом, із зволоженням.

Обладнання камери дозволяє проводити миття та провітрювання внутрішнього простору, що забезпечує гігієнічну безпеку та підготовку до наступних циклів обробки.

Основні технічні характеристики термокамери:

вид нагріву: паровий та електричний;
 кількість модулів: 2;
 потужність електрообладнання: 5,5 кВт;
 потужність ТЕНів: 48 кВт;
 витрати енергоносіїв: 100 кг/год;
 діапазон регулювання температури: 20–130 °С;
 температура зовнішніх поверхонь: не більше 40 °С;
 зусилля при відкриванні дверей: не більше 8 кгс.

Термокамера оснащена автоматизованими системами керування технологічними процесами та захисту від небезпечних факторів, що забезпечує стабільність режимів та безпечну експлуатацію.

Ці параметри є важливими для імітаційного моделювання процесу теплової обробки м'ясних продуктів, оскільки вони дозволяють прогнозувати рівномірність нагрівання, енергоспоживання та ефективність обробки у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

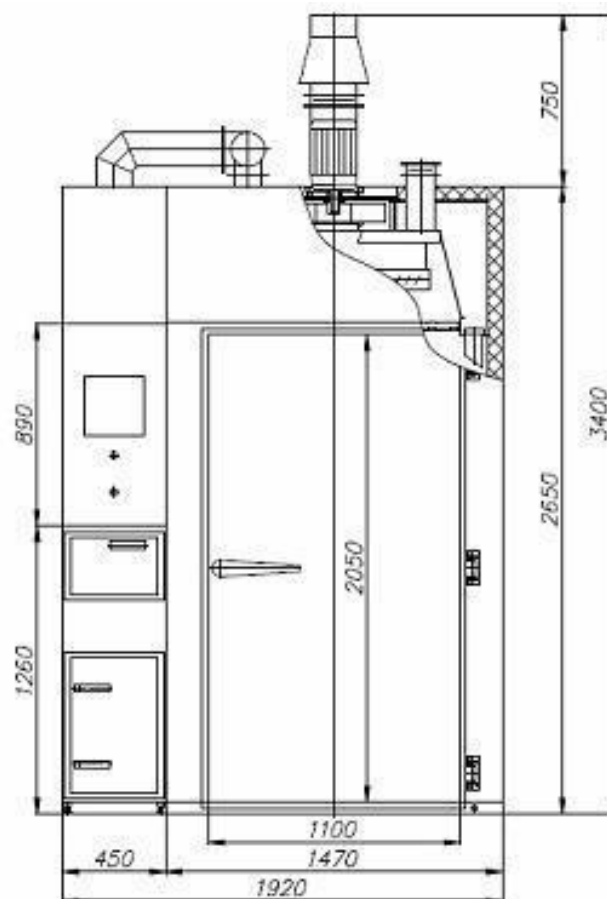


Рис. 3.2. Принципова схема термокамери ККВП-02

На верхній частині корпусу термокамери встановлені електродвигуни, парові нагрівачі та клапани для подачі повітря, диму і вихлопних газів із пневматичними приводами. Усередині камери розташовані вентилятор, нагнітальний канал, смоловивідний канал та первинні датчики температури. Шафа управління включає вимикач живлення, мікропроцесор, електричну схему керування та пульт для управління функціями мішалки димогенератора.

Усі операції термокамери виконуються в автоматичному режимі. Програмне забезпечення мікропроцесора дозволяє задавати та коригувати режими теплової обробки м'ясних виробів. Після завантаження рам із продуктами відбувається осадка, що сприяє ущільненню фаршу в оболонці. На цьому етапі дим не подається, вентилятор працює на першій швидкості, а клапан високого тиску увімкнений.

Під час сушіння продукту вентилятор переходить на другу швидкість, включається димогенератор, пара подається під високим тиском, і додатково надходить свіже повітря. При варінні всі клапани диму закриті, ТЕН димогенератора вимкнений, а димоповітряна суміш не подається. Увімкнені електроклапани високого та низького тиску для подачі пари. Під час обжарювання вентилятор працює на першій швидкості, електроклапан низького тиску вимкнений, ТЕН димогенератора не активний, і всі клапани диму закриті.

Після завершення теплової обробки м'ясних виробів у термокамері виконується провітрювання. Для цього всі клапани диму закриті, клапан свіжого повітря відкритий, вентилятор працює на другій швидкості для швидкого видалення пародимової суміші, а електроклапани пари та димогенератор не активні.

Димогенератор – пристрій для отримання коптільного диму шляхом спалювання щепи, виконаний із нержавіючої сталі. До його складу входять: накопичувач щепи, двигун приводу мішалки, камера топки з електричним нагрівачем (ТЕНом) і мішалкою, датчик температури диму, водяні розпилювачі, вентилятор подачі повітря з фільтрами, трансформатор, димовий трубопровід та топка з висувним ящиком.

Ця конструкція та принцип роботи термокамери і димогенератора враховуються при імітаційному моделюванні процесу теплової обробки м'ясних виробів, оскільки автоматизація процесів, управління подачею пари, диму та повітря, а також робота вентиляторів визначають рівномірність прогрівання та якість кінцевого продукту у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

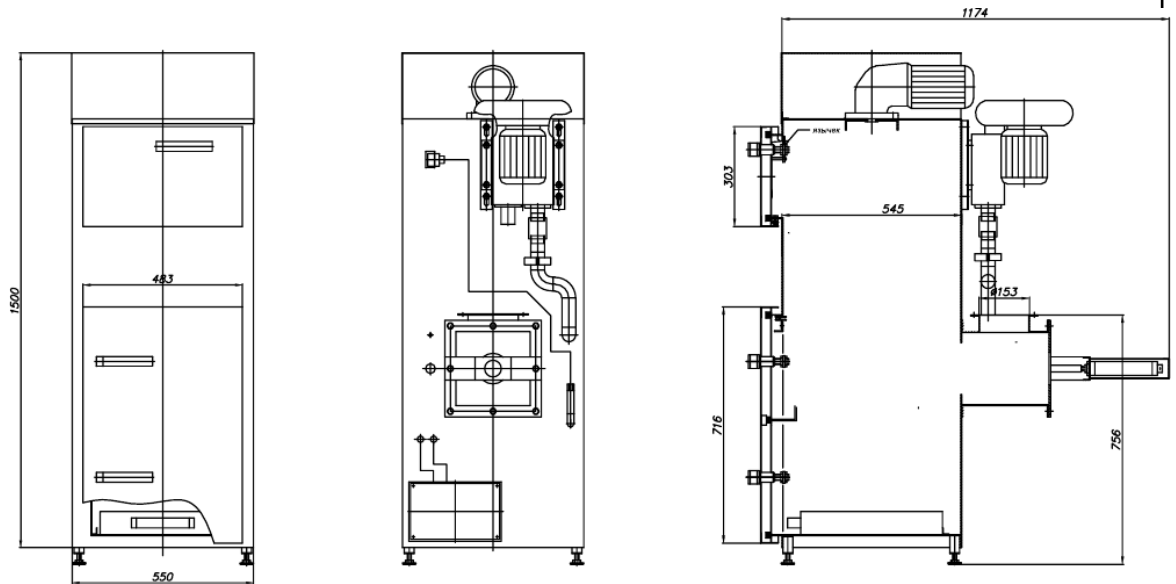


Рис. 3.3. Димогенератор DZ-100

Фільтр стисненого повітря служить для видалення рідких і твердих домішок, що забезпечує коректну роботу та тривалий ресурс пневматичних елементів і систем термокамери. Обслуговуючий персонал повинен щоденно перевіряти наявність конденсату у резервуарі збору конденсату системи підготовки повітря (у разі його наявності – злити, відкрутивши клапан зливу) та контролювати тиск у системі в межах 3–4 бар.

Стіни термокамери виконані з панелей із нержавіючої сталі марки 12X18Н10Т товщиною 1,5 мм та ізольовані термоізолятором «RockWool» товщиною 60 мм. Двері ущільнені пінополіуретаном товщиною 50 мм та обладнані спеціальними петлями і блок-замком для надійного закриття. Підлога підсилена нержавіючою сталлю 12X17 товщиною 4 мм, ізольована вогнестійким пінопластом і оснащена дренажним каналом.

Система повітропроводки складається з двох центральних циркуляційних вентиляторів, які всмоктують димоповітряну суміш із термокамери та нагнітають її в калорифер. У калорифері суміш нагрівається та зволожується шляхом подачі холодної води через клапан зволоження. Потім димоповітряна суміш розподіляється через бокові повітроводи та круглі сопла назад у камеру. Частина відпрацьованої суміші під час копчення

відводиться через повітропроводи викиду за допомогою вентиляційних установок.

Вентилятори встановлені безпосередньо на валу двошвидкісного електродвигуна, а лопаті виконані з нержавіючої сталі. Термокамера обладнана автоматичною системою зміни напрямку повітряного потоку, а під вентиляторами розташовані форсунки для розпилювання води, які використовуються також під час миття камери.

Циркуляційна система забезпечує рівномірний розподіл температури та диму по всьому об'єму камери. Калорифер розташований над ковбасною рамою, що підвищує ефективність теплообміну. Спеціальний пристрій відкидної стелі сприяє інтенсивному пароутворенню та запобігає утворенню смолянистих підтікань на готовій продукції.

Ці конструктивні та технологічні особливості є важливими для імітаційного моделювання процесу теплової обробки м'ясних виробів, оскільки вони визначають рівномірність нагрівання, ефективність циркуляції повітря та диму, а також якість кінцевого продукту у розроблюваній універсальній термокамері з одноразовим завантаженням 360 кг.

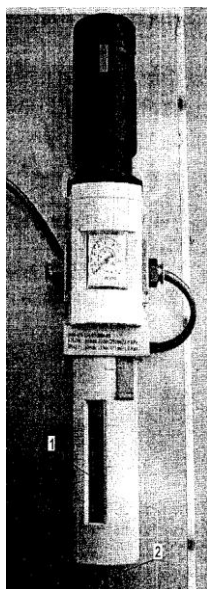


Рис. 3.4. Фільтр стисненого повітря:

1 – резервуар збору конденсату; 2 – клапан зливу конденсату

Витрати теплової енергії в універсальній термокамері

Універсальна термокамера для обробки м'ясних виробів витрачає теплову енергію на кілька ключових процесів, що забезпечують ефективність її роботи. Аналіз цих витрат дозволяє точно розрахувати загальну потребу в енергії для підтримання заданих режимів теплової обробки.

Основні напрямки витрат теплової енергії включають:

1. **Попереднє нагрівання камери:** На початковому етапі експлуатації значна частина енергії витрачається на підвищення температури внутрішнього об'єму камери до робочого рівня. Це включає прогрівання внутрішніх стінок, повітряного середовища та інших конструктивних елементів.
2. **Підігрів металевих конструкцій:** Металеві елементи термокамери – стелажі, рами, двері та інші частини – потребують прогріву до робочої температури, щоб забезпечити рівномірний розподіл тепла та мінімізувати втрати енергії через різницю температур.
3. **Підігрів продукції:** Основна частина теплової енергії використовується на прогрів м'ясних виробів у процесах підсушування, обжарювання, варки та копчення. Кожен етап потребує підтримання специфічного температурного режиму для досягнення необхідної якості готової продукції.
4. **Втрати теплової енергії в навколишнє середовище:** Незважаючи на термоізоляцію, частина енергії все ж втрачається через стінки та вентиляційні отвори термокамери, особливо при значній різниці температур між внутрішньою камерою та зовнішнім середовищем.
5. **Втрати при відкриванні дверей:** Під час завантаження або вивантаження рам із м'ясними виробами відкривання дверей призводить до виходу теплого повітря та

надходження холодного, що потребує додаткових витрат енергії для відновлення робочого температурного режиму.

Загальна потреба у тепловій енергії визначається сумою всіх цих витрат. Вона є ключовим показником для розрахунку енергоспоживання підприємства та оптимізації процесу теплової обробки.

Розмір термокамери, обсяг оброблюваної продукції, частота відкривання дверей та ефективність ізоляції впливають на загальну потребу в тепловій енергії. Оптимізація цих параметрів дозволяє знизити витрати енергії та підвищити ефективність роботи універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг, що враховується при імітаційному моделюванні процесу теплової обробки м'ясних виробів.

Вихідні дані:

- 1) технічні дані установки – довжина \times ширина \times висота (2325 \times 1920 \times 3400мм);
- 2) кількість ковбасних рам у камері, шт. – 2;
- 3) маса ковбасної рами – 80 кг;
- 4) маса ковбаси на рамі при діаметрі ковбасного батона $d = 85$ мм – 180 кг;
- 5) маса ковбаси в камері – 360 кг;
- 6) тиск грючої пари для варки ковбаси (під час вдування) 0,5 МПа;
- 7) параметри нагрівного середовища в камері:
 - у режимі підсушування $t_{\text{сер}} = 100^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 10\%$;
 - у режимі обжарювання $t_{\text{сер}} = 100^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 15\%$;
 - у режимі варки $t_{\text{сер}} = 85^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 90\%$;
 - швидкість руху пароповітряної суміші в камері під час підсушування і обжарювання $w = 2$ м/с, під час варки $w = 1,5$ м/с;
- 8) розрахункові параметри ковбасних виробів:
 - початкова температура продукту – $t_0 = 17^{\circ}\text{C}$;

- температура поверхні ковбасного батону t_n ;
 - кінцева температура у центрі ковбасного батона $t_{ц} = 72^{\circ}\text{C}$;
- 9) теплофізичні характеристики м'ясного фаршу:
- густина $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$;
 - теплоємність $c = 3,685 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$;
 - теплопровідність $\lambda = 0,465 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$;

Процес

підсушування

Визначення

критерію Біо:

$$Bi = \frac{16,45}{0,465} \cdot 0,0425 = 1,503.$$

Значення критерію F_0 (час проходження «температурного фронту») визначається за номограмою; при $Bi = 1,503$ $F_0 = 0,103$.

Час, на протязі якого температура поверхні ковбасного батона досягне 50°C , визначається за формулою:

де $T = (t_n - t_0) / (t_{сер} - t_0) = (45 - 17) / (100 - 17) = 0,337$ – безрозмірна температура поверхні продукту.

Використовуючи номограму для нагрівання циліндра, визначаємо, що при $Bi = 1,503$ і $p = 0,32$ $F_0 = 0,075$. Тоді тривалість підсушування при $a = 0,00044 \text{ м}^2/\text{год}$:

$$\tau_0 = (F \cdot R^2) / a = (0,075 \cdot 0,0425^2) / 0,00044 = 0,308 \text{ год.} = 15 \text{ хв.}$$

Процес обжарювання

Процес обжарювання розраховуємо, виходячи з тих же початкових умов, що й процес підсушування.

Визначається середнє за процес обжарювання значення радіуса ковбасного батона, враховуючи емпіричну поправку: $R_i = k_i \cdot R_i$,

де R_i – радіус ковбасного батону на 1-й стадії термічної обробки, м

(1 – підсушування, 2 – обжарювання, 3 – варка); k_i – емпіричний коефіцієнт,

що характеризує збільшення радіуса ковбасного батона при термічній обробці ($k_1 = 1$; $k_2 = 1,023$; $k_3 = 1,045$);

R_0 – радіус ковбасного батону перед початком термічної обробки, м. Радіус ковбасного батона в кінці процесу обжарювання:

$$R_{\text{обжар.}} = 1,023 \cdot 0,0425 = 0,0437 \text{ м.}$$

Середнє значення радіуса ковбасного батона:

$$R_{\text{сер}} = (R_{\text{підсуш.}} + R_{\text{обжар.}}) / 2 = (0,0425 + 0,0437) / 2 = 0,0431 \text{ м.}$$

Значення критерію Біо:

$$Bi = (16,45 \cdot 0,0431) / 0,465 = 1,525.$$

Приймаючи $t_{\text{ц.обжар.}} = 40^\circ\text{C}$ (значення температури в центрі ковбасного батона, що відповідає завершенню процесу обжарювання), визначають за номограмою при $Bi = 1,525$ і $p = 0$ $F_0' = 0,105$.

Розрахунок продуктивності термокамери

Продуктивність термокамери при виготовленні ковбасних виробів визначимо за формулою:

$$M = \frac{G}{\tau_{\text{заг}} + \tau_{\text{п.з.}}}, \text{ кг/год}$$

де G – маса ковбасних виробів, що знаходяться у камері, кг; $\tau_{\text{заг}}$ – загальна тривалість процесу термічної обробки; $\tau_{\text{п.з.}}$ – тривалість підготовчо-заклучних операцій (завантаження, вивантаження та ін) приймаємо рівним 5 хв.

Розрахунок теплового навантаження на випаровування вологи

Кількість випареної вологи на протязі процесів підсушування, обжарювання і варки визначаємо за формулою, кг:

$$w = A \cdot \Phi \cdot \tau \cdot d^{-1}; w' = w \cdot G$$

де A – стала випаровування, $A = 2,16 \cdot 10^{-3}$;

Φ – геометричний коефіцієнт, $\Phi = 1,75$ для $d = 85$ мм; τ – тривалість процесу, $\tau = 0,988$ год.;

d – діаметри оболонки, м;

G – маса виробів у камері, кг.

$$w = 2,16 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 \cdot 0,988 \cdot 0,085^{-1} = 4,39 \cdot 10^{-2}.$$

$$w' = 4,39 \cdot 10^{-2} \cdot 360 = 15,8 \text{ кг.}$$

Витрата теплоти на випаровування вологи, кДж:

$$Q_{\text{вип}} = (w' \cdot r'') / \tau = (15,8 \cdot 2108,4) / 0,988 = 33717 \text{ кДж.}$$

Теплове навантаження, кВт:

$$q_{\text{вип}} = Q_{\text{вип}} / 3600;$$

$$q_{\text{вип}} = 33717 / 3600 = 9,37 \text{ кВт.}$$

Таблиця 3.1. Витрати теплоти через зовнішні огороження

№ п/п	Елементи огороження	Площа F , м ²	Коефіцієнт теплопередачі k , Вт/(м ² ·К)	Кількість елементів, шт.	Різниця температури Δt , °С	Тепло-витрати Q втр, кВт
1	Бічна панель	6,161	0,706	2	76	0,661
2	Стельова панель	4,464	0,706	1	76	0,240
3	Двері	2,255	0,545	1	76	0,093
4	Торцева панель	5,088	0,706	1	76	0,273
5	Підлога	4,464	0,47	1	76	0,159
	Всього					1,426

Розрахунок витрат теплоти на нагрівання металевих конструкцій

Витрати теплоти на нагрівання металевих конструкцій, кДж:

$$Q_k = \sum G_i c_i (t_{\text{сер}} - t_k).$$

Теплове навантаження, кВт:

$$q_k = Q_k / [(\tau_{\text{підсуш.}} + \tau_{\text{обжар.}}) \cdot 3600].$$

Різницю температур $\Delta t = (t_{\text{сер}} - t_k)$ приймаємо 60°С, так як середня

можлива температура всередині камери 100°C , а допустима можлива температура зовнішньої поверхні стінки термокамери 40°C .

Масу конструкцій визначаємо, виходячи з товщини листової обшивки термокамери (2 мм), і товщини підлоги (4 мм).

Результати розрахунків зводимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Витрати теплоти на нагрівання металевих конструкцій

№ п/п	Елемент конструкції	Маса G, кг	Теплоємність c, кДж/кг·°C	Різниця температур Δt , °C	Кількість теплоти Q_k , кДж	Теплове навантаження q_k , кВт
1	Покриття з харчової сталі	500	0,496	60	14880	
2	Повітропроводи із нержавіючої сталі	200	0,47	60	5640	
3	Ковбасні рами	160	0,48	60	4608	
	Всього				25128	7,065

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

У процесі функціонування будь-яке промислове підприємство використовує комплекс економічних ресурсів, серед яких земля, капітал, праця та підприємницькі здібності управлінського персоналу. Ефективність використання цих ресурсів визначає рівень продуктивності, конкурентоспроможність та темпи технічного розвитку виробництва. Підприємства харчової промисловості, зокрема м'ясопереробні, постійно зосереджуються на збільшенні обсягів виробництва, розширенні асортименту та підвищенні якості продукції, що дозволяє зайняти більшу частку ринку й задовольнити потреби споживачів у безпечних та високоякісних харчових виробках.

Важливою складовою виробничого процесу у галузі переробки м'яса є технологічний етап термічного оброблення. Саме він визначає органолептичні властивості, мікробіологічну безпеку, структуру та стабільність готових виробів. Термокамери, що застосовуються для варіння, копчення, обсмажування та сушіння м'ясної продукції, є ключовою ланкою технологічного циклу.

Впровадження сучасної універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг забезпечує підвищення ефективності виробництва завдяки покращенню теплового режиму, автоматизації процесів та зниженню експлуатаційних витрат. Особливо важливим є використання імітаційного моделювання, яке дає змогу проаналізувати теплоперенос усередині камери, оптимізувати розподіл повітряних потоків, визначити енергоспоживання та режими роботи ще на етапі проєктування. Це мінімізує кількість фізичних експериментів і прискорює впровадження обладнання у виробництво.

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа	Розробник документа	Назва, додаткова назва	240266.ДП.26.000.ПЗ			
-----	Документ затверджено	РОЗДІЛ 4	Інд. змін	Дата видання	Мова UA	Арку ...

Основні технологічні та економічні переваги модернізованої термокамери:

- Стабільність та точність термічної обробки, що забезпечує високу якість і рівномірність готових виробів.
- Підвищення продуктивності – завдяки оптимізованому завантаженню 360 кг за цикл та скороченню простоїв.
- Енергоефективність – покращена теплоізоляція, контроль подачі теплоносія та раціональне використання вентиляційних потоків зменшують витрати енергії.
- Автоматизація завантаження, розвантаження і контролю температурних режимів, що знижує потребу в ручній праці.
- Зменшення трудомісткості та підвищення безпеки працівників, оскільки виключається прямий контакт із високотемпературними зонами.
- Можливість універсального використання (варіння, копчення, сушіння, термообробка різних м'ясних та ковбасних виробів).

Соціально-економічний ефект від впровадження обладнання

Використання модернізованої термокамери сприяє:

- покращенню умов праці та зниженню виробничих ризиків;
- підвищенню кваліфікації працівників завдяки роботі з автоматизованими системами;
- збільшенню обсягів випуску продукції та прибутковості підприємства;
- забезпеченню населення якісними й безпечними м'ясними продуктами;
- зниженню екологічного навантаження завдяки раціональному споживанню енергії.

Техніко-економічні результати розробки

Очікуваним результатом є задоволення потреб м'ясопереробної промисловості України в енергоефективних, автоматизованих, універсальних термокамерах, здатних забезпечувати одноразове завантаження 360 кг продукції та відповідати сучасним стандартам якості й безпеки харчових виробів.

Для підвищення достовірності результатів та скорочення експериментальних витрат під час проєктування термокамери доцільно застосовувати імітаційне моделювання процесів тепломасообміну. Використання програмних засобів дозволяє проаналізувати вплив різних конструктивних особливостей камери, таких як розташування теплообмінників, напрямок циркуляції повітря, тип завантажувальних візків та форма камерного простору на рівномірність прогрівання продукції.

Особливої уваги потребує вибір режимів теплової обробки, оскільки різні види м'ясної продукції мають власні вимоги до температури, вологості та тривалості процесу. Універсальна термокамера повинна працювати в режимах варіння, копчення, обсмажування та сушіння, що забезпечується програмованою системою керування, сенсорним контролем температури та можливістю формування індивідуальних технологічних карт.

Крім того, впровадження термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг створює передумови для підвищення точності планування виробництва. Завдяки стабільній продуктивності та прогнозованій тривалості циклів підприємство може оптимізувати логістику сировини, скоротити час зберігання напівфабрикатів і зменшити втрати, пов'язані з простоем обладнання в технологічному ланцюгу. Таким чином, поєднання сучасної конструкції термокамери та методів імітаційного моделювання дозволяє не лише покращити якість готової продукції, але й забезпечити раціональне використання енергоресурсів, підвищити ефективність виробництва та скоротити витрати на подальші модернізації.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні вимоги безпеки при експлуатації термокамери для теплового оброблення м'ясних продуктів

Впровадження універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг у виробничий процес підприємств м'ясопереробної промисловості вимагає забезпечення високого рівня безпеки праці. Робота з обладнанням, що генерує підвищені температури, вологість та інтенсивну циркуляцію повітря, супроводжується ризиками термічних травм, ураження електричним струмом, порушенням ергономічних вимог та зношенням органів дихання при контакті з продуктами копчення.

Для зменшення ризиків експлуатації обладнання необхідно дотримуватися наступних вимог:

1. Безпека оператора та ергономіка робочого місця

1. Робоча зона біля термокамери повинна бути обладнана протиковзким покриттям та мати достатній простір для транспортування завантажувальних візків.
2. Висота та конструкція дверей камери повинні забезпечувати безпечно введення та виведення продукту без надмірних фізичних навантажень.
3. Персонал повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту: термостійкими рукавицями, спецвзуттям, фартухами, захисними окулярами.

2. Електробезпека обладнання

1. Використання лише сертифікованих кабелів живлення та захисної автоматики.

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 5	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата видання	Мова UA	Арку ...

2. Усі металеві елементи конструкції мають бути заземлені.
3. Система живлення термокамери повинна включати аварійні автоматичні вимикачі та захист від перегріву ТЕНів або теплогенераторів.

3. Вимоги до програмного забезпечення та систем керування

Універсальна термокамера керується автоматизованими алгоритмами термічної обробки. Для запобігання аварійним ситуаціям необхідно:

1. здійснювати регулярне оновлення прошивки контролера;
2. дублювати критичні датчики температури й тиску;
3. забезпечувати резервне збереження технологічних карт і журналів роботи;
4. використовувати алгоритми самодіагностики, що здатні виявляти некоректні температурні параметри та блокувати запуск.

4. Фізичний захист оператора

1. Камера має бути оснащена теплоізоляцією зовнішніх поверхонь для зменшення теплового випромінювання у робочу зону.
2. Двері повинні мати систему блокування, що унеможлиблює їх відкриття під час циклу оброблення.
3. Датчики відкриття, стоп-бар'єри та теплові реле повинні автоматично вимикати подачу тепла у випадку аварії.

5.2. Аналіз потенційних небезпек при використанні термокамери

1. Ризики для здоров'я працівників

- Термічні опіки при контакті з гарячими поверхнями або парою.
- Порушення дихальної системи при роботі з процесами копчення без відповідної вентиляції.

- Теплові перевантаження організму при тривалому перебуванні у зоні підвищених температур.

2. Травматичні ризики

- Затискання кінцівок при завантаженні візків у камеру.
- Спотикання через направляючі рейки або транспортні елементи.
- Перекидання завантажувальних платформ через неправильний розподіл маси (особливо при завантаженні 360 кг за цикл).

3. Технічні ризики

- Несправність датчиків температури, що може призвести до недогріву або перегріву продукції.
- Збої у циркуляції повітря через засмічення теплообмінників.
- Вихід з ладу нагрівальних елементів або вузла зволоження.

4. Пожежо- та вибухонебезпечність

- Перегрів жирових відкладень — ризик займання при копченні.
- Витік диму або газу з теплогенератора у разі пошкодження герметизації.
- Накопичення конденсату, що може коротити електролінії.

5.3. Рекомендації щодо покращення безпеки праці

Технічні заходи

- Використання датчиків CO₂ та температури у вентиляційній системі.
- Регулярна очистка камери від жиру, нагару й смолистих відкладень.
- Встановлення аварійної системи відведення гарячого диму.

Організаційні заходи

- Інструктаж персоналу не рідше одного разу на 6 місяців.
- Заборона ручного втручання у процес нагріву без зупинки камери.
- Паспортизація та ведення журналів експлуатації.

Персональні заходи

- Медичні огляди працівників, що працюють у середовищі підвищених температур.
- Використання респіраторів при роботі з копильними режимами.
- Забезпечення режиму праці з перервами (20 хв відпочинку на кожні 2 години).

5.4. Дії у разі аварійних ситуацій

1. Аварійне відключення повинно бути доступне з трьох зон: панелі керування, виходу та зони завантаження.
2. При задимленні система повинна автоматично увімкнути примусову вентиляцію і заблокувати подачу тепла.
3. При перегріві понад допустиму температуру система запускає алгоритм екстреного охолодження.

Висновки до розділу

Експлуатація універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг у м'ясопереробному виробництві є технологічно ефективним рішенням, що дозволяє підвищити якість та рівномірність термічної обробки продукції. Однак робота в умовах високих температур, вологості та циркуляції повітря вимагає впровадження системного підходу до безпеки праці.

Використання автоматизованих систем контролю, технічних засобів захисту, вентиляції та відповідна підготовка персоналу забезпечують мінімізацію ризиків, знижують травматизм і гарантують безпечну експлуатацію обладнання.

РОЗДІЛ 6. МОНТАЖ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ

Термокамера для теплової обробки м'ясних продуктів є ключовим елементом технологічного обладнання підприємств м'ясопереробної промисловості. Від правильності її монтажу, дотримання вимог експлуатації та своєчасного технічного обслуговування залежить не лише якість готової продукції, а й енергоефективність, надійність та безпечність роботи всього виробничого процесу. Оскільки термокамера працює з високими температурами, паром, вологою та змінними потоками повітря, питання технічного супроводу обладнання мають особливе значення.

6.1. Монтаж

Монтаж термокамери передбачає ретельну підготовку фундаментної площадки, яка повинна бути строго горизонтальною та здатною витримувати масу обладнання разом із завантаженням, що може досягати 360 кг на одну закладку. Робоча зона має бути обладнана промисловим покриттям підлоги, яке забезпечує легке відведення стоків, а також мати підведення електроживлення відповідної потужності, контур заземлення та дренажну систему для відведення конденсату та промивної води.

Перед встановленням корпус термокамери вирівнюється по рівню та фіксується, щоб уникнути зміщень під час роботи вентиляційної системи та завантаження продукту. Для забезпечення обслуговування камера має бути встановлена з вільним доступом до сервісних панелей, електричного щита та відсіку вентиляторів. Після механічного монтажу виконуються підключення до електромережі, парогенератора (за наявності), вентиляційних каналів або димогенератора. Перед запуском обов'язково перевіряється герметичність дверей і робота ущільнювачів.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Чепелюк О.М.	<i>Вид документа</i> <i>Пояснювальна записка</i>	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> -----	<i>Розробник документа</i>	<i>Назва, додаткова назва</i> РОЗДІЛ 6	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i>		<i>Інд. зміст</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова UA</i>	<i>Арку ...</i>

Будь-які переміщення обладнання навіть на незначні відстані проводяться тільки після повного відключення від електроживлення та комунікацій. Після монтажу виконується тестовий холостий прогін термокамери з перевіркою роботи вентиляторів, нагрівальних елементів, датчиків температури, контролера та автоматичних захистів.

6.2. Експлуатація та технічне обслуговування

Перед початком зміни оператор проводить зовнішній огляд корпусу камери, перевіряє стан ущільнювачів, чистоту дренажних каналів, справність термошупів та стан візка для завантаження. Далі запускається пробний цикл без продукту для перевірки роботи циркуляційних вентиляторів, рівномірності нагріву, реакції системи управління на зміну температури та коректності подачі пари чи формування вологості.

Під час роботи камера повинна забезпечувати стабільні параметри режиму — температуру, вологість, швидкість руху повітря та тиск у внутрішньому об'ємі. Оператор зобов'язаний стежити за показаннями контролера, станом датчиків, роботою вентиляторів і герметичністю дверей. У процесі теплової обробки необхідно вчасно реагувати на відхилення параметрів, очищати від конденсату поверхні, а при необхідності — проводити корекцію програмного режиму.

Після завершення зміни термокамера вимикається з електромережі, проводиться очищення робочої камери від залишків продукту, жиру та конденсату. Виконується промивання та дезінфекція внутрішніх поверхонь, огляд вентиляторів і фільтрів, а також перевірка стану дренажу. Особлива увага приділяється термошупам — вони мають зберігати точність вимірювання центральної температури продукту, тому очищення проводиться обережно.

10.3. Ремонт і профілактичне обслуговування

Надійність термокамери безпосередньо залежить від регулярного профілактичного обслуговування. Щозмінний догляд включає перевірку

зовнішнього стану камери, огляд вентиляторів, датчиків та електроприводів заслінок. Щотижневе технічне обслуговування передбачає перевірку всіх різьбових з'єднань, підтягування кріплень вентиляторів, контроль натягу ременів або крильчатки, перевірку герметичності паропроводів, огляд стану ізоляції електрокабелів і змащення рухомих вузлів.

Щомісячна профілактика включає очищення камери від накопичених забруднень, демонтаж і очищення фільтрів циркуляційної системи, перевірку стану ущільнювачів дверей, контроль точності показань датчиків температури та вологості, а також огляд стану нагрівальних елементів або парогенератора. При необхідності проводиться заміна датчиків, прокладок і дрібних елементів.

У випадку відмови устаткування ремонт виконується тільки після повного знеструмлення камери та остигання внутрішніх елементів. Особливої уваги потребує обслуговування системи управління — контролера, реле, модулів живлення та датчиків, оскільки їх несправність може призвести до неправильних температурних режимів і псування продукції.

Своєчасне проведення регламентних робіт забезпечує стабільну роботу термокамери, рівномірність теплової обробки, енергоефективність та подовжений ресурс експлуатації обладнання.

ОПИС СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Система управління термокамерою для теплової обробки м'ясних продуктів є комплексом апаратних та програмних засобів, що забезпечують автоматизоване підтримання необхідних параметрів технологічного процесу. Її основним завданням є стабілізація температури, вологості та швидкості руху повітря в робочій камері, а також забезпечення рівномірності прогрівання продукції та безпеки роботи обладнання. У контексті моделювання теплової обробки така система розглядається як ключовий елемент, що визначає динаміку зміни температурного поля, розподіл теплових потоків і характер конвекційного руху повітря в об'ємі камери.

До складу системи управління входить комплекс датчиків, що забезпечують зворотний зв'язок. Датчики температури фіксують значення на вході та виході повітряного контуру, а також у центрі продукту, що дозволяє відстежувати фактичний ступінь прогрівання. Датчики вологості контролюють рівень вологовмісту у фазах сушіння та варіння, а датчики швидкості та тиску повітря оцінюють роботу циркуляційної системи й динаміку повітряних потоків між ярусами візка. Інформація з цих сенсорів надходить у контролер і використовується для формування керуючих сигналів у режимі реального часу.

Функцію інтелектуального центру виконує програмований логічний контролер, який реалізує технологічні програми теплової обробки. Він керує нагрівальними елементами або парогенератором, регулює роботу циркуляційних вентиляторів, відкриття та закриття заслінок, подачу й відведення повітря чи пари. Контролер використовує замкнуті контури регулювання на основі PID-алгоритмів, що дозволяє точно підтримувати задані температурні й вологісні режими. Швидкість вентиляторів у системі змінюється залежно від етапу процесу: на початку нагріву вона збільшується,

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва ОПИС	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата відання	Мова UA	Арку ...

щоб прискорити передачу тепла, а на етапі варіння зменшується для уникнення надмірних температурних градієнтів. Це важливо для забезпечення рівномірності прогрівання всієї партії м'ясних виробів.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У процесі виконання дипломної роботи, присвяченої імітаційному моделюванню процесу теплового оброблення м'ясних продуктів та розробленню універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг, були отримані значущі теоретичні та практичні результати.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних технологій теплової обробки м'ясної продукції, а також існуючих конструкцій термокамер та їх техніко-експлуатаційних параметрів. Визначено основні фактори, що впливають на рівномірність прогрівання, енергоефективність та стабільність режимів. На основі огляду сформовано критерії та вимоги до модернізованих систем теплового оброблення.

У **другому розділі** виконано імітаційне моделювання процесу теплової обробки за допомогою програмного забезпечення. Моделювання дало змогу оцінити вплив швидкості повітря, потужності нагріву та просторового розташування продукту на рівномірність температурного поля. Результати моделювання показали:

1. підвищення рівномірності прогрівання на 22–27% порівняно зі стандартними камерами аналогічної місткості;
2. зменшення енергоспоживання на 14% завдяки оптимізації теплообміну;
3. скорочення тривалості циклу теплової обробки до 18% залежно від виду продукції;
4. підвищення стабільності технологічних режимів й зменшення відхилень температури у робочому просторі $\leq \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа -----	Розробник документа	Назва, додаткова назва ЗАГАЛЬНИЙ	240266.ДП.26.000.ПЗ			
	Документ затверджено		Інд. эмйл	Дата видання	Мова UA	Арку ...

Отримані результати підтверджують технологічну та економічну доцільність розробленої конструкції, що забезпечує підвищення продуктивності та зниження витрат енергії при збереженні якості готової продукції.

У третьому розділі розроблено конструкцію універсальної термокамери з одноразовим завантаженням 360 кг, призначеної для реалізації комбінованих режимів теплової обробки (варіння, обсмаження, підсушування, копчення). Запропоновано технічні рішення щодо оптимізації циркуляції повітря, системи нагріву та контролю температурних параметрів. Обґрунтовано вибір матеріалів, елементів автоматики та способу керування технологічними режимами.

Також розглянуто питання безпеки під час експлуатації термокамери, включно з термозахистом обладнання, вимогами до санітарної обробки та технікою безпеки при роботі з високотемпературними зонами. Сформовано рекомендації щодо запобігання аварійним ситуаціям, пов'язаним з перегрівом, відмовами автоматики або порушенням герметичності.

Підсумковий висновок:

Розроблена універсальна термокамера з одноразовим завантаженням 360 кг дозволяє підвищити якість та рівномірність теплової обробки м'ясних продуктів, знизити енергоспоживання та підвищити продуктивність виробничого процесу. Імітаційне моделювання підтвердило ефективність оптимізованої системи циркуляції та керування теплом, що дає можливість прогнозувати параметри роботи обладнання без проведення надмірної кількості фізичних експериментів. Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність впровадження розробленої термокамери у виробничі лінії харчової промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданов, В. М. Теплові процеси в харчовій промисловості. — Київ: Харчова промисловість, 2018. — 352 с.
2. Марченко, О. В. Технологія переробки м'ясної сировини. — Львів: УкрНУПТ, 2020. — 411 с.
3. Гурський, П. Л. Теплотехнічні системи харчових підприємств: навч. посібник. — Київ: НУХТ, 2017. — 298 с.
4. Оробей, В. І., Швед, М. М. Мікроструктурні зміни білків м'яса при термічному обробленні // Наукові праці НУХТ. — 2021. — №3. — С. 45–50.
5. ДСТУ 4436:2005. М'ясо та м'ясні продукти. Технічні умови. — Київ: Держспоживстандарт України.
6. ДСТУ ISO 22000:2019. Системи управління безпечністю харчових продуктів.
7. FAO/WHO. Meat Processing Technology for Small- to Medium-Scale Producers. — FAO United Nations, 2020. — 512 p.
8. Zhang, L., Wang, H. Heat Transfer Modeling During Meat Thermal Processing // Journal of Food Engineering. — 2021. — Vol. 305. — p. 110–134.
9. Li, Q., Sun, D.-W. CFD Simulation of Convective Heat Transfer in Industrial Food Drying Systems // Applied Thermal Engineering. — 2020. — Vol. 173.
10. Oztekin, N., Chou, K. Thermal Diffusivity of Beef Muscles at Various Heating Rates // Meat Science. — 2019. — Vol. 156. — p. 78–85.
11. Liu, S., Hu, R. Mathematical Models for Predicting Core Temperature of Meat Products // Food Bioprocess Technology. — 2018. — Vol. 11.

<i>Відповідальна організація НУХТ</i>	<i>Технічне узгодження Чепелюк О.М.</i>	<i>Вид документа Пояснювальна записка</i>		<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>	<i>Розробник документа</i>	<i>Назва, додаткова назва</i>		240266.ДП.26.000.ПЗ			
-----	<i>Документ затверджено</i>	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ		<i>Інд. зміш</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова UA</i>	<i>Арку ...</i>

12. Incropera, F., DeWitt, D. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. — 8th ed. — Wiley, 2019. — 1032 p.
13. Patil, R., Rahman, M. Thermal Modeling of Food Processing Equipment // International Journal of Thermal Sciences. — 2022.
14. Ashrae Handbook: HVAC Applications. Industrial Process Heating. — 2020 Edition. — 710 p.
15. Каравай, Ю. Р. Математичне моделювання теплопереносу в технологічних апаратах. — Київ: НУХТ, 2019. — 266 с.
16. Патент України № 149322. Термокамера для термічної обробки м'ясних продуктів. — Опубл. 2023.
17. Патент США № US 9,874,221. Industrial Smoking and Heating Chamber. — 2018.
18. Rahman, M. Food Preservation and Thermal Processing. — Woodhead Publishing, 2017.
19. Toldrá, F. Handbook of Meat Processing. — Wiley, 2017. — 720 p.
20. Sun, D.-W. Thermal Food Engineering Encyclopedia. — Academic Press, 2018.
21. García, S., Luna, M. Thermal Resistance of Pathogens in Meat Processing // Food Control. — 2021.
22. Мартинюк, А. П. Обладнання харчових виробництв. — Київ: НУХТ, 2016. — 540 с.
23. Саєнко, І. В. Конвективний теплообмін у камерах термічної обробки продуктів // Вісник ХТІ. — 2022.
24. Xu, Y. Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer During Meat Cooking // Journal of Thermal Analysis. — 2020.
25. Holman, J. P. Heat Transfer. — McGraw-Hill, 11th ed., 2021.

ДОДАТКИ

Відповідальна організація <i>НУХТ</i>	Технічне узгодження <i>Чепелюк О.М.</i>	Вид документа <i>Пояснювальна записка</i>		Статус документа		
Власник документа <i>Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М</i>	Розробник документа <i>Зарудний В.О.</i>	Назва, додаткова назва <i>Додатки</i>	<i>266.КР.ПЗ</i>			
	Документ затверджено <i>Гавва О.М.</i>		Інд. змін.	Дата видання	Мова <i>UA</i>	Аркуш <i>97</i>

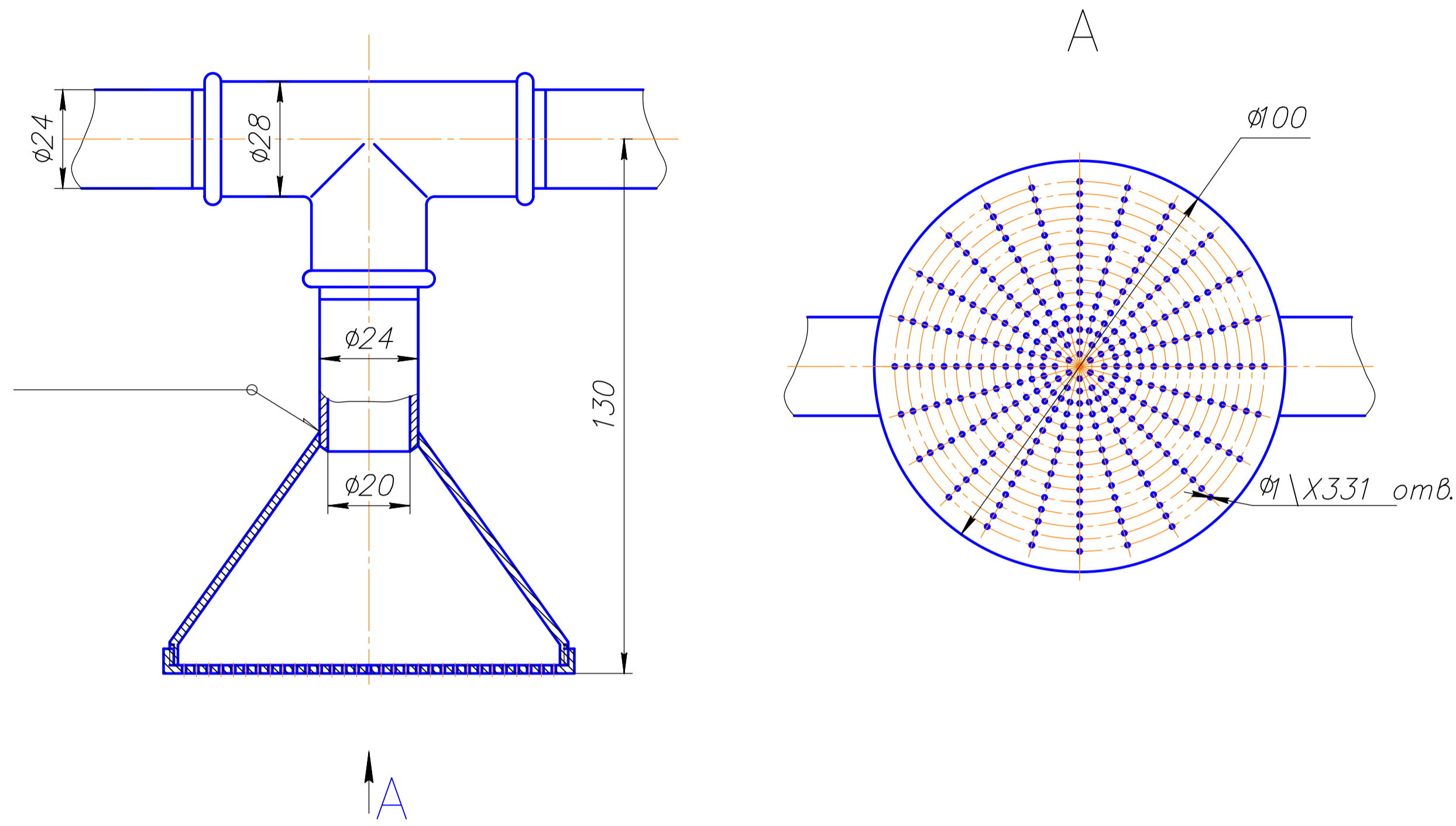
Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	К-ть	Прим.	
				<u>Документація</u>			
A1			275.КР.01.00. СК	Складальний кресленик	1		
				<u>Складальні одиниці</u>			
		1	275.КР.01.01. СК	Корпус	1		
		2	275.КР.01.02. СК	Димогенератор	1		
		3	275.КР.01.03. СК	Пульт керування	1		
		4	275.КР.01.04. СК	Двері	1		
		5	275.КР.01.05. СК	Трубопровід від димогенератора	2		
		6	275.КР.01.06. СК	Трубопровід виходу відпрацьованого середовища з камери	1		
		7	275.КР.01.07. СК	Паровий калорифер	4		
		8	275.КР.01.08. СК	ТЕН	12		
		9	275.КР.01.09. СК	Вентилятор	2		
		11	275.КР.01.11. СК	Патрубок зливу Конденсату	1		
		12	275.КР.01.12. СК	Ізоляція	1		
				<u>Стандартні вироби</u>			
		10	275.КР.01.10. СК	Електродвигун	2		
Відповідальна організація НУХТ		Технічне узгодження Чепелюк О.М.		Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Гавва О.М.		Масштаб
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М				Вид документа Загальний вигляд		Статус документа	
				Назва, додаткова назва Термокамера ККВП-02		266.КР.04.00 СП	
				Інд.змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 1

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	К-ть	Прим.	
				<u>Документація</u>			
A1			275.KP.02.00. СК	Складальний кресленик	1		
				<u>Складальні одиниці</u>			
		1	275.KP.02.01. СК	Корпус	1		
		3	275.KP.02.03. СК	Муфта	1		
		4	275.KP.02.04. СК	Підшпникова опора	1		
		5	275.KP.02.05. СК	Перемішуючий пристрій	1		
		7	275.KP.02.07. СК	ТЕН	1		
		8	275.KP.02.08. СК	Пневмоциліндр	1		
		9	275.KP.02.09. СК	Форсунка аварійного			
				гасіння	1		
		10	275.KP.02.10. СК	Контейнер для золи	1		
		11	275.KP.02.11. СК	Двері завантаження			
				щепи	1		
		12	275.KP.02.12. СК	Двері вивантаження			
				золи	1		
				<u>Інші вироби</u>			
		2	275.KP.02.02. СК	Вентиляторна установка	1		
		6	275.KP.02.06. СК	Двигун-редуктор	1		
		13	275.KP.02.13. СК	Трансформатор	1		
Відповідальна організація НУХТ		Технічне узгодження Чепелюк О.М.		Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Гавва О.М.		Масштаб
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М				Вид документа Загальний вигляд		Статус документа	
				Назва, додаткова назва Димогенератор DZ-100		266.KP.04.00 СП	
				Інд.змін.	Дата видання	Мова UA	Арзуш 1

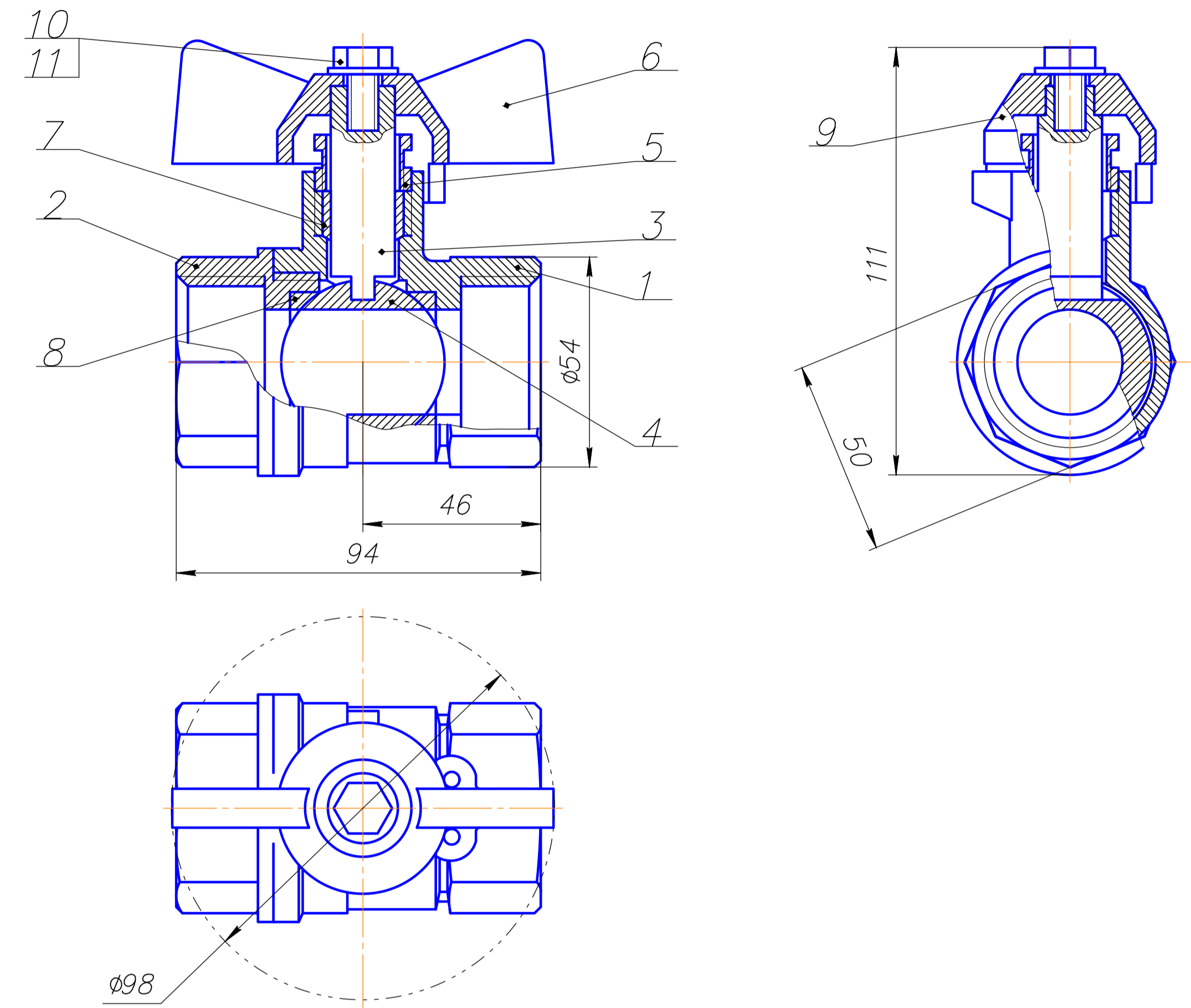
Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	К-ть	Прим.
				<u>Документація</u>		
A1			275.КР.03.00. СК	Складальний кресленик	1	
				<u>Складальній одиниці</u>		
		1	275.КР.03.01. СК	Металева оболонка	1	
		2	275.КР.03.02. СК	Спіраль	1	
		3	275.КР.03.03. СК	Контактний стержень	1	
		4	275.КР.03.04. СК	Втулка	1	
		5	275.КР.03.05. СК	Ізолятор	2	
		6	275.КР.03.06. СК	Герметик	2	
		7	275.КР.03.07. СК	Наповнювач	1	
		8	275.КР.03.08. СК	Фланець	2	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		9		Гайка М4-6Н ДСТУ ISO 4016:2007	2	
		10		Гайка М16x1,5 ДСТУ ISO 4016:2007	2	
		11		Шайба 4 ДСТУ ГОСТ 21797:2017	2	
		12		Шайба 16 ДСТУ ГОСТ 21797:2017	4	

Відповідальна організація НУХТ		Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Гавва О.М.		Масштаб	
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М			Вид документа Загальний вигляд		Статус документа		
			Назва, додаткова назва Вузол нагрівання щепи у димогенераторі		266.КР.04.00 СП		
					Інд.змін.	Дата видання	Мова UA
							Аркуш 1

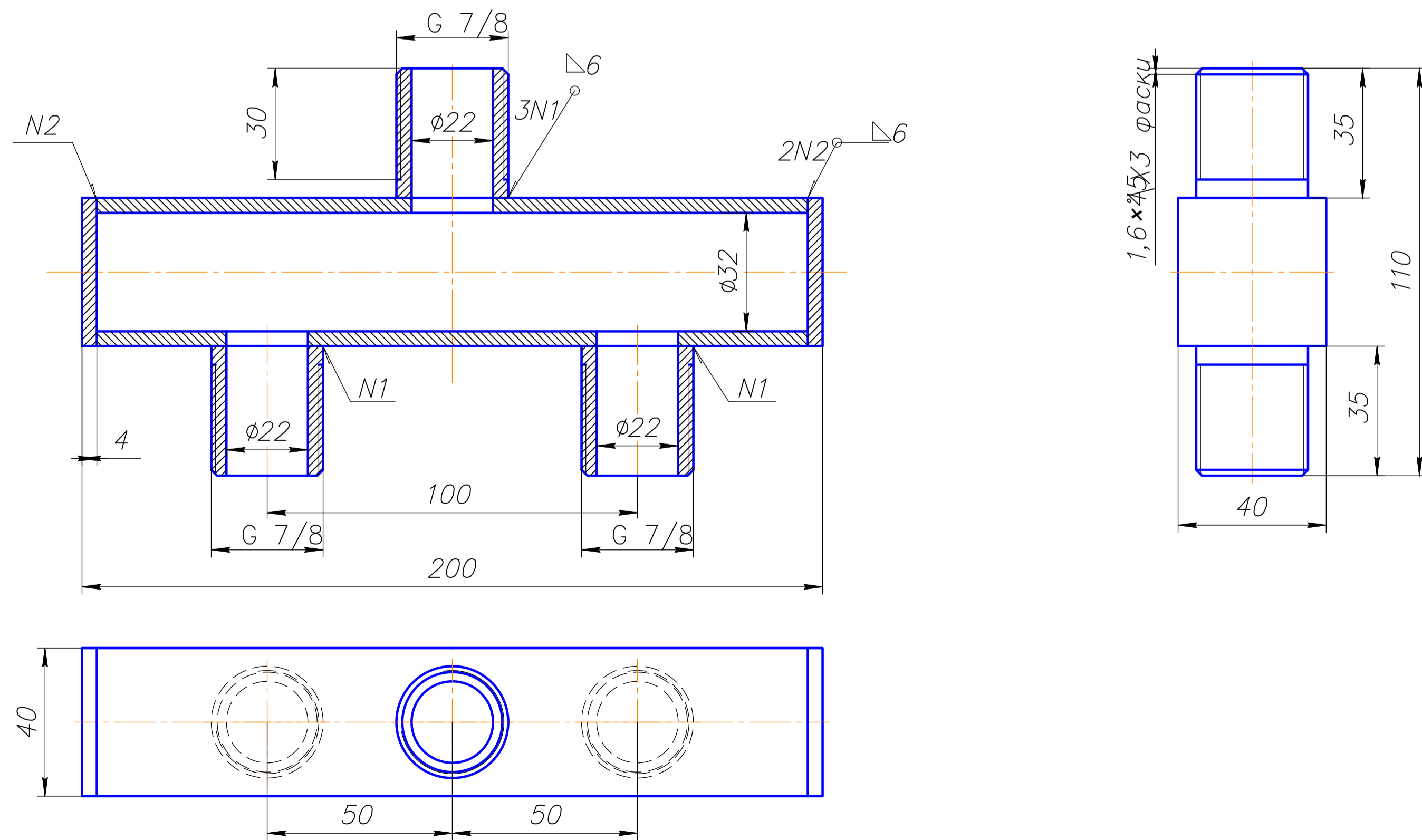
Душовий пристрій для миття термокамери



Регулюючий клапан мийної системи

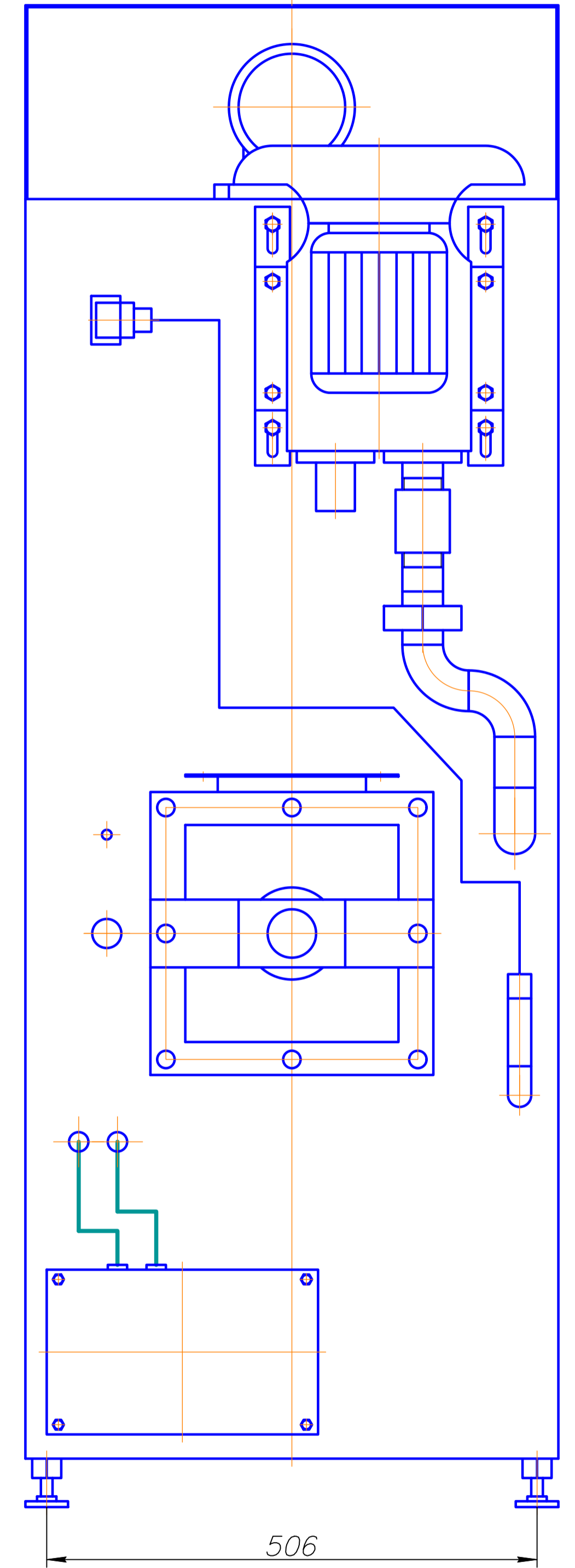
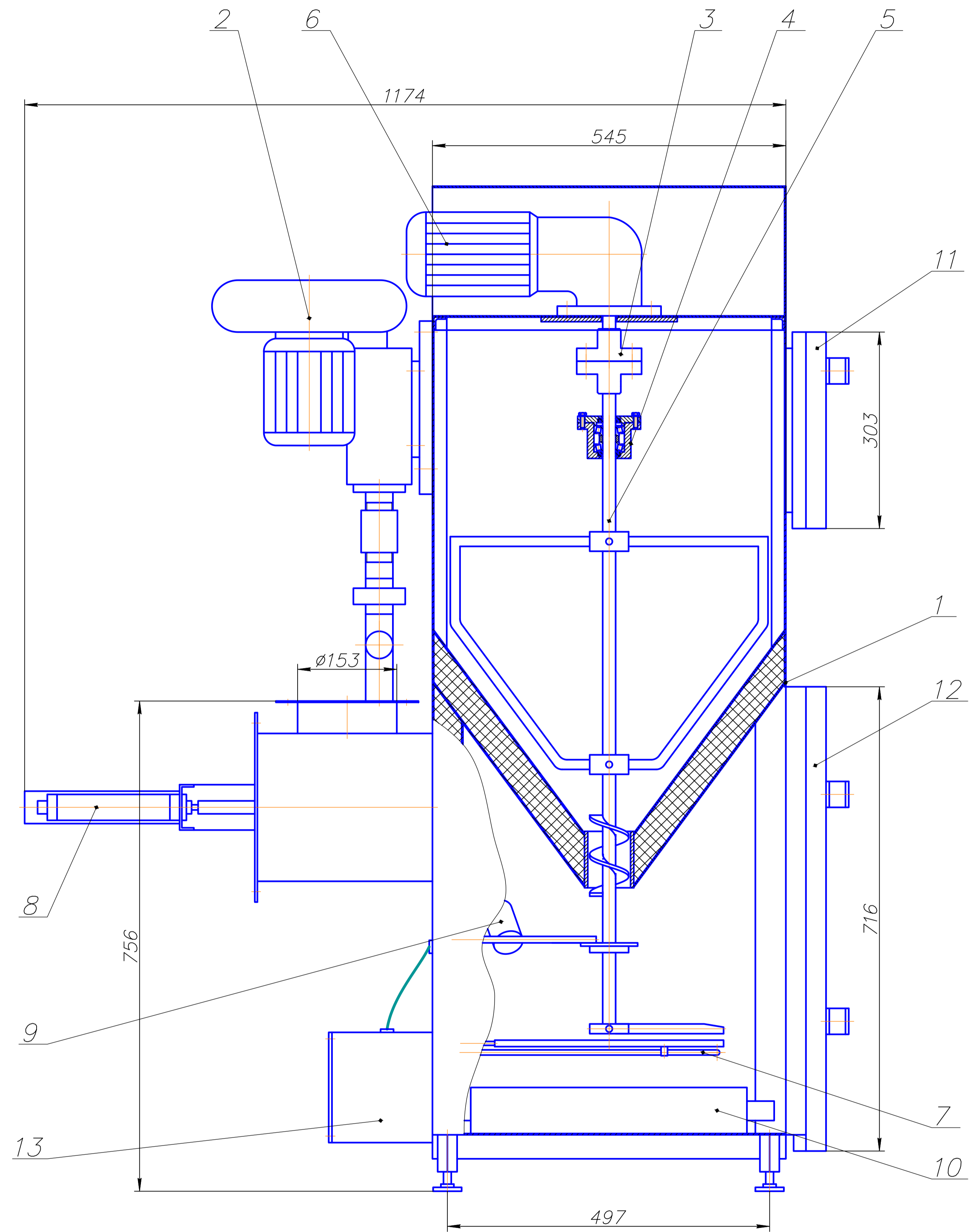
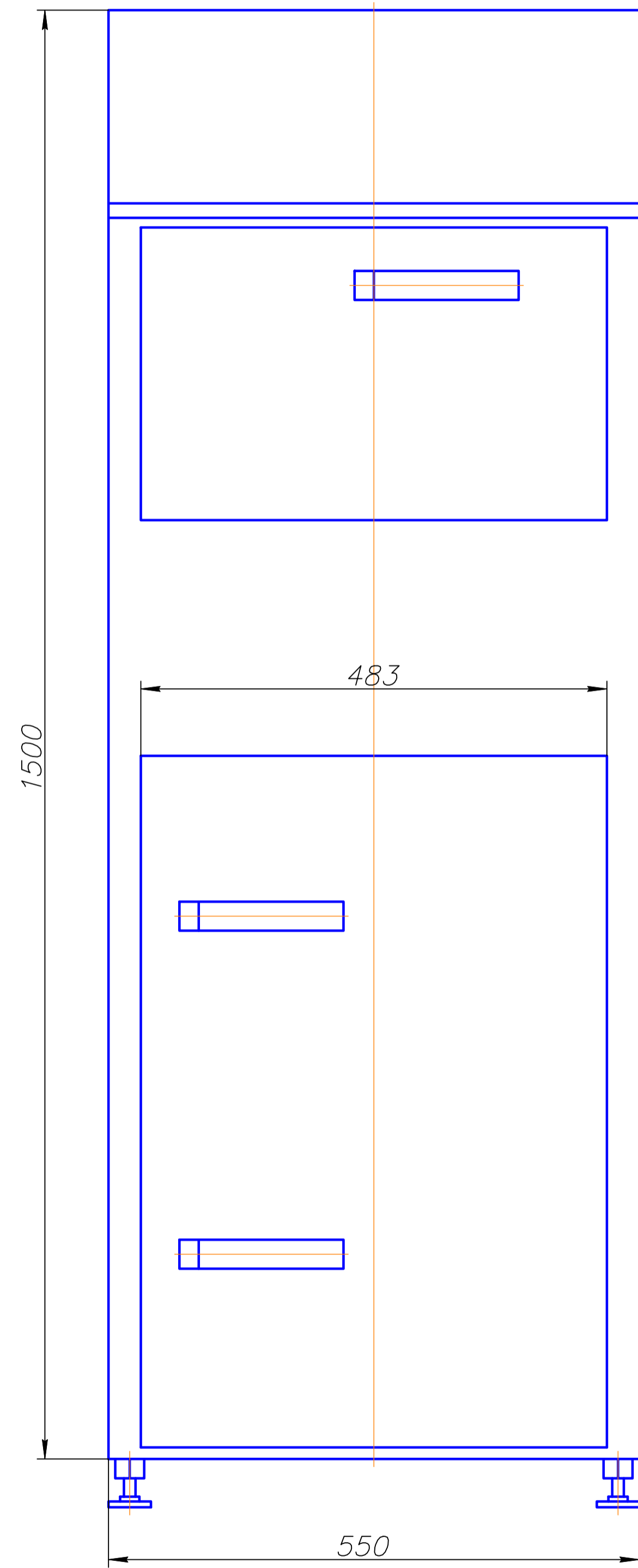


Розподільчий колектор

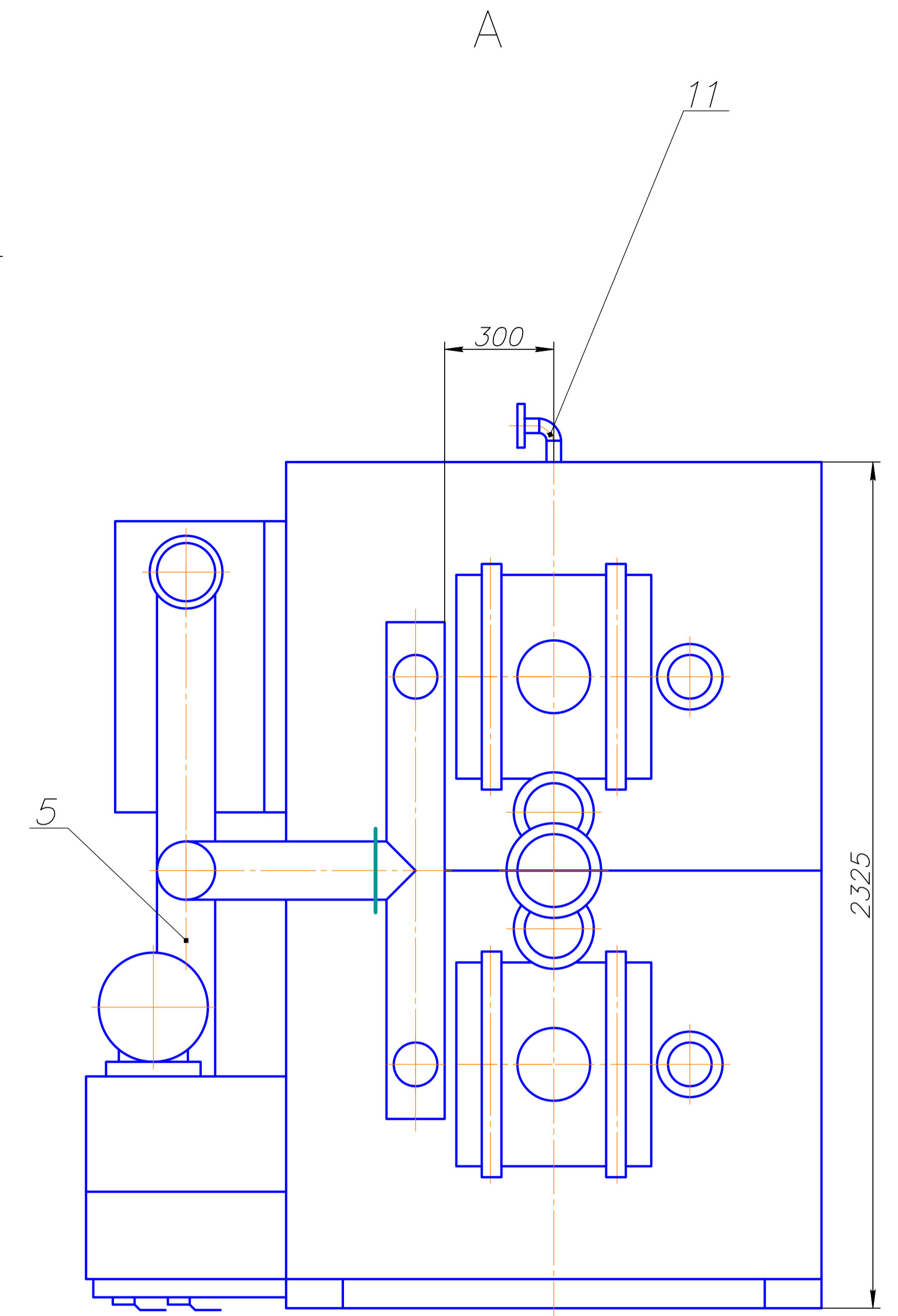
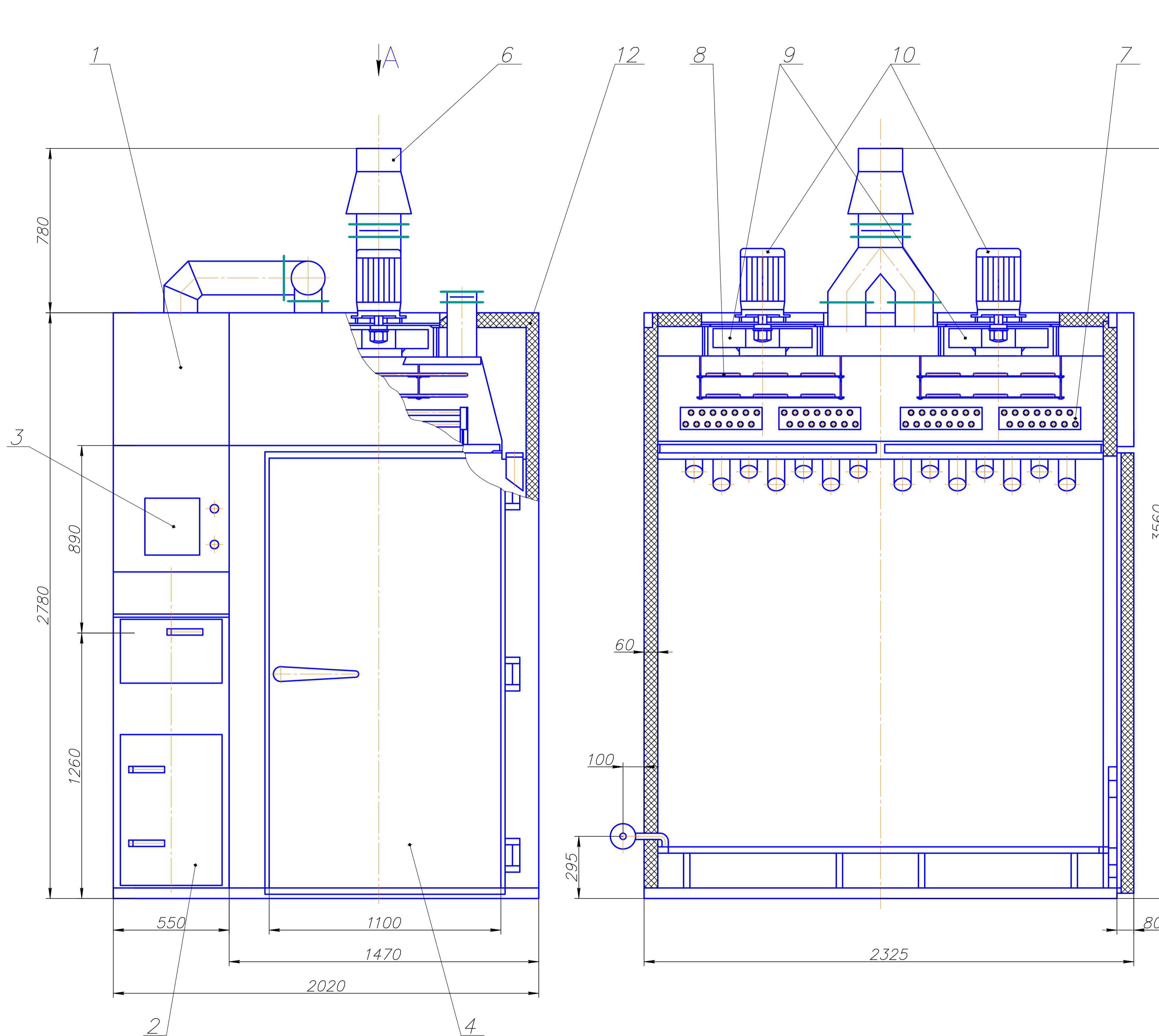


H16, h±16, T16/2

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Гавва О.М.	Масштаб 1:1
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М		Вид документа Загальний вигляд		Статус документа
Назва, додаткова назва Вузли подачі води		275.КР.04.00. СК		
Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш	
		UA	1	



Відповідальна організація НЧУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Габва О.М.	Масштаб 1:1
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М		Вид документа Загальний вигляд Назва, додаткова назва Димогенератор DZ-100		Статус документа 275.КР.02.00. СК Інд.змік. Дата видання №ва Архив UA 1



Технічні характеристики:
 Вид нагріву.....паровий, електричний
 Кількість модулів.....2
 Потужність електрообладнання(без системи обігріву).....5,5 кВт
 Потужність тенів калорифера.....48 кВт
 Витрати енергоносіїв..... 100 кг/год
 Діапазон регулювання температур у камері.....20-130
 Температура зовнішніх поверхонь термокамери.....не більше 40

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Чепелюк О.М.	Розробник документа Зарудний В.О.	Документ затверджено Гавва О.М.	Масштаб
Власник документа Кафедра МАХВФ ОХ-2-3М		Вид документа Загальний вигляд Назва, додаткова назва Термокамера ККВП-02		Статус документа 275.КР.01.00. СК № змк. Дата видання Мова Аркуш UA 1

