

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота  
другий магістерський  
(рівень вищої освіти)

на тему «Аналіз ефективності сушки матеріалів в сушильному барабані ділянки помелу глини ЗАТ «Мінірал»»»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1449  
спеціальності 144 Теплоенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

Погосова С. В.

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, к. т. н. Каюков Ю. М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент професор, д. т. н. Чейлитко А. О.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетик  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 144 Теплоенергетик  
(код та назва)  
Освітня програма Теплоенергетик  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Чейлитко А. О.

« 15 » грудня 2020 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Погосовій Світлані Вікторівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) «Аналіз ефективності сушки матеріалів в сушильному барабані ділянки помелу глини ЗАТ «Мінірал»»

керівник роботи Каюков Юрій Миколайович, доц., к. т. н.

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

затверджені наказом ЗНУ від «25» 05 2020 року № 601-с

2 Строк подання студентом роботи 01.12.2020 р.

3 Вихідні дані до роботи конструкція барабанної прямої сушарки продуктивністю 12.0 т/год, діаметр барабану  $\varnothing$  2200 мм, довжина  $L = 14.0$  м. Матеріал, що висушується – каолінова глина з 24 % вологості до 12 %. Сушильний агент – суміш продуктів згоряння природного газу з повітрям. Характеристики природного газу. Початкова температура сушильного агента – 750 °С. Матеріал для дослідження кінетичних закономірностей сушки – річний пісок, каолінова та жовта глини.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз об'єкту дослідження. Експериментальні дослідження кінетики сушіння наступних матеріалів: річного піску, жовтої та каолінової глини. Розрахунок горіння палива, розрахунок часу сушіння каолінової глини заданого гранулометричного складу. Розрахунок теплового та матеріального балансу. Побудова процесу сушіння на I-х діаграмі.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- 1) графічні залежності кінетичних властивостей піску, жовтої та каолінової глини:
  - а) крива сушіння; б) крива швидкості сушіння в залежності від часу; в) крива швидкості сушіння в залежності від вологовмісту;
- 2) зображення процесу сушіння каолінової глини в дійсній сушарки.
- 3) розрізи сушильної установки.

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|---|----------------|------------------|
|               |   | завдання видав | завдання прийняв |
| загальний     | Каюков Ю. М. доц., к. т. н.               | 01.06.20       |                  |
| спеціальний   | Каюков Ю. М. доц., к. т. н.               | 01.06.20       |                  |
| охорона праці | Каюков Ю. М. доц., к. т. н.               | 01.06.20       |                  |

7 Дата видачі завдання 01.06.2020

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз об'єкту дослідження   | 01.06.20 –<br>01.07.20        |          |
| 2     | Експериментальні дослідження кінетики сушіння річного піску                | 01.07.20 –<br>15.07.20        |          |
| 3     | Експериментальні дослідження кінетики сушіння жовтої глини                 | 15.07.20 –<br>29.07.20        |          |
| 4     | Експериментальні дослідження кінетики сушіння каолінової глини             | 29.07.20 –<br>12.08.20        |          |
| 5     | Розрахунок горіння палива та параметрів сушильного агента                  | 12.08.20 –<br>21.08.20        |          |
| 6     | Розрахунок часу сушіння каолінової глини заданого гранулометричного складу | 21.08.20 –<br>11.09.20        |          |
| 7     | Розрахунок геометричних розмірів барабанної сушарки                        | 11.09.20 –<br>01.10.20        |          |
| 8     | Розрахунок теплового та матеріального балансу                              | 01.10.20 –<br>01.11.20        |          |
| 9     | Охорона праці і техніка безпеки  | 01.11.20 –<br>15.11.20        |          |
| 10    | Оформлення пояснювальної записки та креслень                               | 15.11.20 –<br>06.12.20        |          |

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

С. В. Погосова  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ю. М. Каюков  
(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**  
Нормоконтролер \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ю. М. Каюков  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Погосова С. В. аналіз ефективності сушки матеріалів в сушильному барабані ділянки помелу глини ЗАТ «Мінірал».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник доцент Каюков Ю. М. Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

Сушка глини, піску, вапняку, гіпсового каменю, доломіту, крейди перед їх помелом знижує витрату електроенергії на помел. Сушка цих матеріалів також необхідна як для отримання виробів з певною залишковою вологістю, так і для досягнення температури, необхідної для технічної переробки сировини.

В роботі були вивчені потреби підприємства, до сушіння глини. Проаналізовані конструкція та режими барабанної сушильної установки, які забезпечують потреби користувача. Визначені режимні параметри сушіння глини.

Ключові слова: сушіння, волога, сушарка, сушильний агент, барабан, вологовміст, крива сушіння, температура.

## ANNOTATION

Pohosova S. V. analysis of the efficiency of drying materials in the drying drum of the area of grinding clay JSC "Mineral".

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 144 – Thermal Power Engineering, Supervisor Associate Professor Kayukov Y. M. Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporozhье National University, Department of Thermal Power and Hydropower, 2020.

Drying of clay, sand, limestone, gypsum stone, dolomite, chalk before grinding reduces the consumption of electricity for grinding. Drying of these materials is also necessary both to obtain products with a certain residual humidity, and to achieve the temperature required for technical processing of raw materials.

The needs of the enterprise before drying of clay were studied in the work. The design and modes of the drum drying unit, which meet the needs of the user, are analyzed. The mode parameters of clay drying are determined.

Key words: drying, moisture, dryer, drying agent, drum, moisture content, drying curve, temperature.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП   | 8  |
| 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ  | 10 |
| 1.1 Призначення і класифікація процесів сушіння   | 10 |
| 1.2 Класифікація і конструкція сушарок  | 13 |
| 1.3 Барабанні сушарки   | 16 |
| 1.4 Класифікація стану матеріалу в процесі сушіння  | 23 |
| 1.5 Основи кінетики процесу конвективного сушіння   | 26 |
| 1.6 Загальна методика розрахунку сушильних установок  | 35 |
| 1.6.1 Матеріальний баланс сушарки   | 36 |
| 1.6.2 Тепловий баланс сушарок   | 37 |
| 1.6.3 Розрахунок кількості теплоносія   | 40 |
| 2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШКИ МАТЕРІАЛІВ В СУШИЛЬНОМУ БАРАБАНИ ДІЛЯНКИ ПОМЕЛУ ГЛИНИ ЗАТ «МІНІРАЛ» | 44 |
| 2.1 Експериментальна частина  | 44 |
| 2.2 Розрахунок сушильного барабану  | 67 |
| 2.2.1 Теоретичний процес сушіння  | 75 |
| 2.2.2 Дійсний процес сушіння  | 76 |
| 2.2.3 Матеріальний баланс сушарки   | 85 |
| 2.2.4 Тепловий баланс сушарки   | 85 |
| 2.2.5 Розрахунок часу сушки матеріалу і частота обертання барабана                              | 87 |
| 3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ   | 89 |
| 3.1 Опис шкідливих речовин, джерела виникнення, вплив на людину і пропоновані засоби захисту    | 90 |
| 3.1.1 Недостатня освітленість в робочій зоні  | 90 |
| 3.1.2 Рівень шуму в робочих приміщеннях   | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.1.3 Підвищення або зниження температури повітря<br>навколишнього середовища | 95  |
| 3.2 Характеристика небезпечних факторів на виробництві                        | 96  |
| 3.2.1 Небезпечність ураження електричним струмом                              | 96  |
| 3.2.2 Небезпека від рухомих машин та механізмів                               | 99  |
| 3.2.3 Небезпека вибуху і пожежі   | 99  |
| 3.3 Екологічна безпека  | 100 |
| 3.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях  | 101 |
| 3.4 Пожежна і вибухова безпека  | 102 |
| ВИСНОВКИ  | 104 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ   | 106 |

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** У різних галузях промисловості по переробці і використанню мінеральної сировини (вугілля, руди, чорні і кольорові метали, торф, пісок, глина, і ін.) широко застосовується теплова сушка.

Постійно зростаючі вимоги до якості керамічних виробів, з одночасною економією витрат на організацію процесу сушки призводять до необхідності експлуатації сушильного обладнання з урахуванням останніх досягнень. Сушка – один з найважливіших і складних елементів виробництва керамічних виробів. Неєфективний сушильний агрегат може стати слабкою ланкою в підвищенні продуктивності або рентабельності будь-якого виробництва. В даний час найбільш ефективною є сушка глини в барабанних сушарках, вбудованих в автоматичні лінії підготовки сировини для напівсухого пресування керамічних виробів [1].

Сушка глини, піску, вапняку, гіпсового каменю, доломіту, крейди перед їх помелом знижує витрату електроенергії на помел та усуває замазування транспортних, змішувальних та пристроїв що просіюють. Сушка цих матеріалів також необхідна як для отримання виробів з певною залишковою вологістю, так і для досягнення температури, необхідної для технічної переробки сировини.

Для кожного матеріалу встановлюється певний режим сушіння, тобто допустима інтенсивність сушки, температура матеріалу, температура і відносна вологість сушильного агента, швидкість його руху і зміна зазначених параметрів в різні періоди процесу сушіння. Як місцеві, так і привізні концентрати мають вологість (12...15) %. Переробляти такий концентрат безпосередньо в металургійному концентраті без попереднього підсушування не раціонально тому виникають певні проблеми:

- виникнення труднощів з транспортуванням і завантаженням в піч;
- знижується питома продуктивність металургійного агрегату;
- збільшуються відхідні гази [2].



**Мета і завдання дослідження.** Визначення потреб підприємства, до сушіння глини. Проаналізувати конструкцію та режими барабанної сушильної установки, які забезпечують потреби користувача. Визначити режимні параметри сушіння глини.

*Об'єкт дослідження.* Процеси сушки вологих матеріалів.

*Предмет дослідження:*

- кінетика сушки сипучих матеріалів;
- особливості конструкції барабанної сушарки та режимні параметри сушіння глини.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у магістерській роботі завдань виконано комплексний аналіз та обґрунтовано вибір теоретичних методів, приладів та методик досліджень.

**Практичне значення роботи:** Обумовлена актуальністю даної проблеми для підприємства. Реалізація запропонованих рішень дозволить отримати продукт потрібної якості з максимальною продуктивністю використання енергоносіїв.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні дослідження, представлені в магістерській роботі, виконані безпосередньо автором. Експериментальні дослідження виконано спільно із науковим керівником.

**Апробація результатів магістерської роботи.**

Положення роботи викладені на XII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ЗНУ «Молода наука-2019» та на XIII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ЗНУ «Молода наука-2020».

**Структура магістерської роботи.** Магістерська робота містить вступ, 3 розділи, висновки, перелік джерел посилань з 41 найменування. Загальний обсяг роботи – 109 сторінок, 13 таблиць, 43 рисунка, 113 формул.

## 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Призначення і класифікація процесів сушіння

У виробничих процесах на підприємствах керамічної промисловості, харчової, деревообробної, хіміко-фармацевтичній та інших сферах промисловості, доводиться видаляти частину вологи з твердих і сипучих матеріалів, напівфабрикатів, продуктів і всіляких паст, випаровувати розчинники з пофарбованих виробів. В одних випадках вологу видаляють з метою підвищення якості напівфабрикатів або природних матеріалів, наприклад твердого палива для збільшення його теплоти згорання, в інших - для полегшення і підвищення якості обробки, наприклад деревини для збільшення тривалості зберігання продуктів, для зменшення маси при транспортуванні і т. п.

На основі численних робіт, проведених О. В. Ликовим, П. О. Ребиндером і іншими вченими, створена теорія сушки капілярнопористих колоїдних тіл. В основу її покладено інтенсивність зв'язку вологи з матеріалом [3].

Процес сушки вологих дисперсних матеріалів є процесом, при якому змінюються структурно механічні, технологічні та біохімічні властивості матеріалу. Зміна цих властивостей обумовлено тим, що у процесі сушки відбувається зміна форм зв'язку вологи з матеріалом та часткове її видалення шляхом випаровування [6]. Тому процес сушки є одним з найбільш енергоємних процесів хімічної промисловості і достатньо енергоємний процес у інших видах промисловості. У зв'язку з цим, особлива увага повинна бути приділена вибору режиму сушіння, схеми процесу і конструкції сушарки [4].

Волога з матеріалу може віддаватися механічним і тепловим способами.

Механічні способи зневоднення – відсмоктування, фільтрування, центрифугування і при зміні тиску можливі в тих випадках, коли допускаються деяка деформація матеріалів і досить високу кінцеву вологовміст в них. Таким способом видаляється лише частина вологи, яка не

має міцного зв'язку з матеріалом [3]. У деяких випадках механічний спосіб видалення вологи поєднують з тепловим.

Іноді зневоднення досягається поглинанням вологи гігроскопічними речовинами: хлористим кальцієм, сірчаною кислотою і т. п., Але цей спосіб порівняно дорогий. Його застосовують головним чином для осушення газів, зневоднення цінних порід деревини і т. п.

Теплові способи видалення вологи з матеріалів і розчинів набули найбільшого поширення.

З підвищенням температури сушильного агента інтенсивність випаровування вологи збільшується за рахунок збільшення теплообміну між матеріалом, що висушують і сушильним агентом, а тривалість сушіння скорочується. Однак температура в кінці сушіння не повинна бути вище критичної для висушується [7].

Сушку матеріалів з використанням теплоти можна виробляти природним і штучним способами. Природна сушка проходить на відкритому повітрі, під навісами або в спеціальних приміщеннях. Сушильним агентом і джерелом теплоти, необхідними для випаровування вологи, є атмосферне повітря і сонячна енергія. Такий спосіб застосовується для сушіння великих мас матеріалів, які не потребують спеціальних режимних умов по температурі і вологості навколишнього середовища, тобто деревини, торфу, трави і т. п. До недоліків природної сушки в порівнянні зі штучною відносяться: велика тривалість; залежність інтенсивності сушіння і кінцевої вологості від кліматичних умов і пори року в даній зоні; для розміщення матеріалу потрібна велика територія, що іноді досягає декількох квадратних кілометрів, і громіздка транспортно-вантажна система. Тому, незважаючи на уявну простоту і дешевизну, природна сушка в виробничих умовах виявляється досить дорогою і неповноцінною.

Штучна сушка матеріалів проводиться в спеціальних пристроях із застосуванням примусової циркуляції газового середовища, що поглинає водяні пари з поверхні матеріалу, що висушується. За способом підведення

теплоти ці установки підрозділяються на конвективні, контактні, радіаційні та радіаційно-конвективні, установки для сушіння в електричному полі високої або промислової частоти.

У конвективних установках тепло, необхідне для нагрівання і випаровування вологи, передається матеріалу від попередньо нагрітого робочого середовища шляхом безпосереднього зіткнення (конвекцією) при суміщенні процесів тепло- і масообміну на поверхні матеріалу, що висушується. Робоче середовище, що бере участь в перенесенні теплоти і маси водяної пари, називається сушильним агентом.

Кондуктивну і комбіновану кондуктивно-конвективну сушки зазвичай об'єднують під загальною назвою - контактна.

Кондуктивним сушінням називається процес сушіння матеріалу на нагрітій металевій поверхні. Теплота, необхідна для нагрівання матеріалу і випаровування вологи, передається від нагрітої поверхні до матеріалу теплопровідністю. Водяна пара, що виходить з матеріалу, змішується з навколишнім середовищем, найчастіше з повітрям, і видаляється з цеху або сушильної камери через систему припливно-витяжної вентиляції.

Під комбінованим кондуктивно-конвективним сушінням розуміють процес, в якому підведення теплоти до матеріалу, що висушують здійснюється як через нагріту металеву поверхню, так і від сушильного агента. Передбачається, що в такій системі існують конвективні і кондуктивні ділянки сушіння. На конвективній ділянці сушіння створюються умови для контакту матеріалу з сушильним агентом. Сушка відбувається завдяки теплоті, що акумулюється матеріалом при його зіткненні з нагрітою поверхнею, а також за рахунок теплоти, що передається матеріалу сушильним агентом.

В радіаційному і радіаційно-конвективному сушінні необхідну кількість теплоти для нагрівання матеріалу і випаровування вологи передається на поверхню виробу або матеріалу спеціальними випромінювачами або випромінюючими поверхнями. Масообмінні процеси з навколишнім

середовищем відбуваються на кордоні матеріалу, що висушується при природному або примусовому русі сушильного агента.

Сушка в електричному полі високої або промислової частоти супроводжується підвищенням температури всередині виробу, завдяки чому створюються умови для ефективного поширення вологи, до поверхні, де відбувається випаровування її в навколишнє середовище [3].

## 1.2 Класифікація і конструкція сушарок

З різноманітності можливих методів сушіння слід безліч конструкцій сушарок для здійснення тих чи інших методів. За технологічними ознаками сушарки можна класифікувати наступним чином (див. табл. 1.1).

Існуючі сушарки можуть бути розділені на групи по ряду ознак. Найбільш характерними з них є: спосіб переміщення матеріалу і циклічність роботи, спосіб передачі тепла до матеріалу, що висушується, характер руху сушильного агента, вид теплоносія, технологічне призначення та конструктивні відмінності [8].

Типові конструкції сушарок: шафові, камерні, тунельні, шахтні, стрічкові, барабанні, вальцеві (контактні), пневматичні, розпилюючі, з киплячим шаром, вібраційні.

В камерних сушарках висушуваний матеріал знаходиться нерухомо на полицях, встановлених всередині сушильної камери. Засмоктуваний вентилятором і нагріте в калорифери повітря проходить між полицями над матеріалом. Сушарки працюють періодично при атмосферному тиску і застосовуються в малотоннажних виробництвах для матеріалів з невисокою температурою сушки [9].

Найпростіший варіант тунельної сушарки являє собою суцільний прямолінійний канал з рейковим шляхом. По дорозі в напрямку теплоносія просуваються вагонетки з заготовками для сушки. Тунельна сушарка працює по досить простим принципом. За допомогою прямолінійного каналу

продукти переміщуються по ділянках, на які впливають високі температури [10].

Основною частиною пневматичної сушарки є вертикальна труба або батарея труб, в якій відбувається сушка матеріалу в газовому потоці на швидкості витання часток матеріалу. Час сушіння визначається секундами, тому їх застосовують для сушіння дрібношматкового матеріалу [1].

Вибір тиску в сушарках визначається хімічним складом продукту, умовами його окислення і розкладання, що допускається температурою нагріву. В атмосферних сушарках тиск або атмосферний, або трохи вище його. Ці сушарки використовуються для сушки в більшості сфер промисловості.

Вакуумні сушарки застосовуються при сушінні хімікатів для обробки кольорової кіноплівки, барвників, крихти смоли лавсан, поліамідної крихти смоли капрон і т. д. У хімічній технології в якості сушильного агента широко використовується повітря (сушка калійних солей, анілінових барвників), топкові гази (сушка суперфосфату натрію і т. д.), інертні гази (сушка поликапроаміда в потоці азоту).

Найбільш економічними по витраті тепла є протиточні сушарки. Прямоточні сушарки застосовуються в тих випадках, коли висушуваний матеріал не витримує високої температури в кінці сушіння. Як видно з наведеної класифікації, за конструктивними особливостями сушарки вельми різноманітні [4].

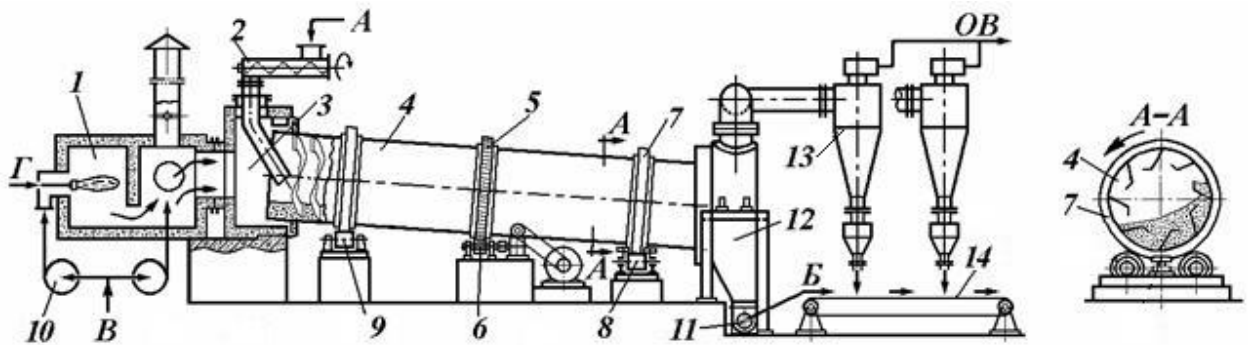
Таблиця 1.1 – Класифікація сушарок

| Ознака класифікації                            | Типи сушарок  |
|--|---|
| Способи підведення тепла до матеріалу          | Конвективні, контактні, радіаційні, електричні  |
| Тиск в робочому просторі                       | Атмосферні, вакуумні  |
| Спосіб дії                                     | Періодичного або безперервної дії   |
| Сушильний агент                                | Повітря, топкові гази, суміш повітря з топковим газом, перегрітий пар і інертні гази  |
| Напрямок руху сушильного агента щодо матеріалу | З прямиотечею, протитечею, перехресною течією і реверсні  |
| Характер циркуляції сушильного агента          | З природною і примусовою циркуляцією  |
| Спосіб нагріву сушильного агента               | З паровими повітряпідігрівачами, вогневими повітряпідігрівачами, шляхом змішування з топковим газом, з електричним підігрівом |
| Схема нагріву сушильного агента                | З центральним підігрівом, з підігрівом індивідуальними агрегатами і з проміжним підігрівом                                    |
| Кратність використання сушильного агента       | Одноразові і з рециркуляцією  |
| Спосіб видалення вологи з сушарки              | З повітрообміном, конденсаційні, з хімічним поглинанням вологи  |
| Конструкції сушарки                            | Коридорна, камерна, шахтна, стрічкова, конвеєрна, барабанна, трубчаста і т. п.  |

### 1.3 Барабанні сушарки

Одним із найпоширеніших видів апаратів для процесу сушки є сушильні апарати з обертовими барабанами, що представляє собою встановлений похило обертовий барабан, на який вдягнуто два бандажі і зубчастий вінець приводу. Бандажими барабан спирається на чотири ролика, встановлені на рамах. Два опорних ролика обмежують осьове зміщення корпусу барабана. На торцях барабана є камери: в одній передбачено введення газів і завантаження вологого матеріалу, в іншій - вивід сухого продукту і відпрацьованого сушильного агента. За рахунок установки барабана під невеликим нахилом (до  $6^\circ$ ) матеріал поступово пересувається до розвантажувальної камери.

Типова конструкція барабанної конвективної сушарки приведена на рисунку 1.1



Потоки: А – вологий матеріал; Б – висушений продукт; В – повітря атмосферне; Г – паливо; ОВ – відпрацьоване повітря

Рисунок 1.1 – Барабанна сушарка

Будова сушарки:

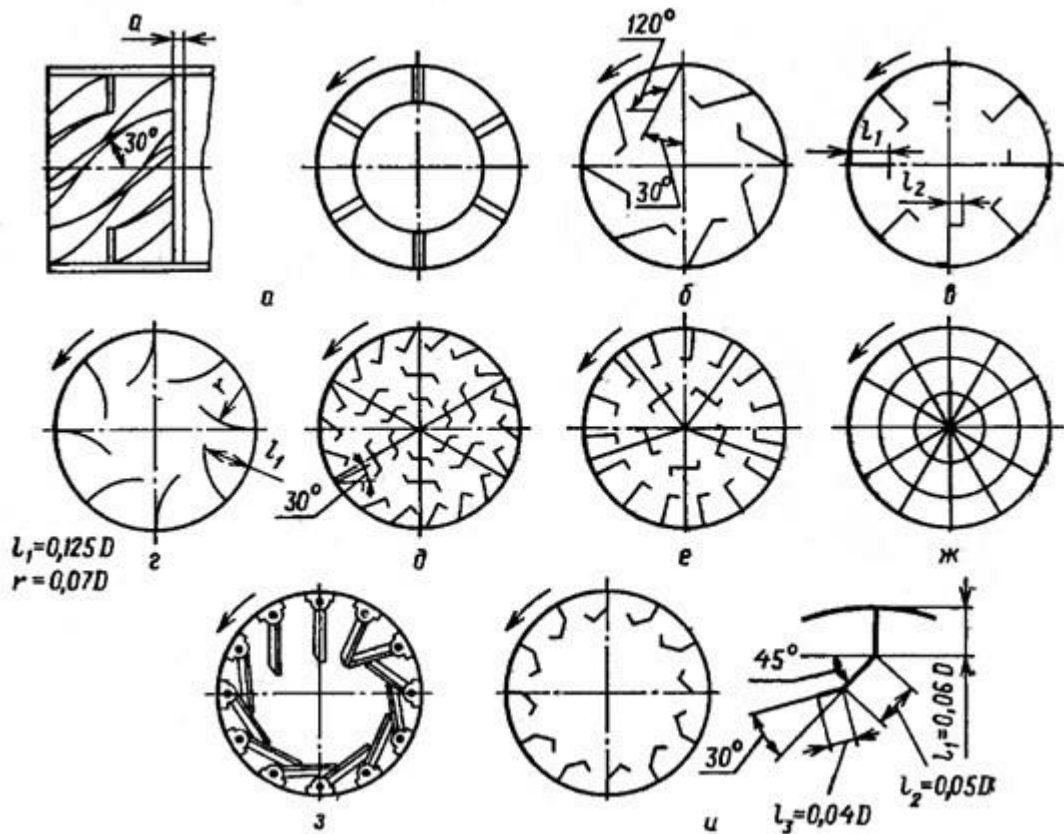
1. Топка;
2. Живильник;
3. Камера завантажувальна;



4. Барабан;
5. Вінець зубчастий;
6. Станція приводна;
7. Бандаж опорний;
8. Станція упорно-опорна;
9. Станція опорна;
10. Вентилятори;
11. Шнек транспортний;
12. Камера вивантажувальна;
13. Пилоочисна установка;
14. Транспортер.

Всередині барабана встановлюють спеціальні насадки, конструкція яких залежить від властивостей матеріалу, що висушується. Зі сторони загрузочної камери розміщена багаторазова гвинтова насадка з числом спіральних лопатей від 6 до 16 в залежності від діаметра барабана. При сушінні матеріалів з великою адгезією до поверхні барабану на початковій ділянці барабану закріплюють ланцюги, за допомогою яких руйнуються грудки та очищаються стінки барабану. Для цієї цілі можуть бути використані ударні пристосування, розташовані з зовнішньої сторони барабану. На рисунку 1.2 показані деякі типи внутрішніх насадок.

В сушарках діаметром (1000...1600) мм для матеріалів з хорошою сипучістю і середнім розміром часток до 8 мм встановлюють секторну насадку. У тих же сушарках для матеріалів, з високою адгезією, або сипучих матеріалів із середнім розміром більше 8 мм – лопатеву насадку. В сушарках діаметром (1000...3500) мм для матеріалів, схильних до налипання, але відновлюючих сипучі властивості у процесі сушки – лопатеву, а після неї – секторну [7].



а – гвинтова розподільна; б, в, г, и – периферійно підйомно – лопатна з лопатками різних видів; д, е – секторні; ж – для матеріалів з хорошою сипучістю; з – самоочисна з прямими поворотними лопатками

Рисунок 1.2 – Насадки для сушильних барабанів

Коміркова насадка застосовується для сушіння матеріалу, здатного до пилоутворення. Принцип роботи: перед насадкою встановлюють лопаті, які розподіляють матеріал по комірках. Далі матеріал при обертанні барабана рухається і пересипається тільки в своїй комірці і проходить весь барабан, не потрапляючи в інші комірки. При такому русі, наприклад глини, висота її падіння в комірках менше ніж в барабані без них, тому кількість утвореною пилу значно зменшується.

Проміжний тип доцільно використовувати при сушінні матеріалу типу піску, більшого в порівнянні з глиною. Тут матеріал вже рухається по своєму сектору, що займає за площею  $\frac{1}{4}$  барабана. У секторі матеріал затримується на

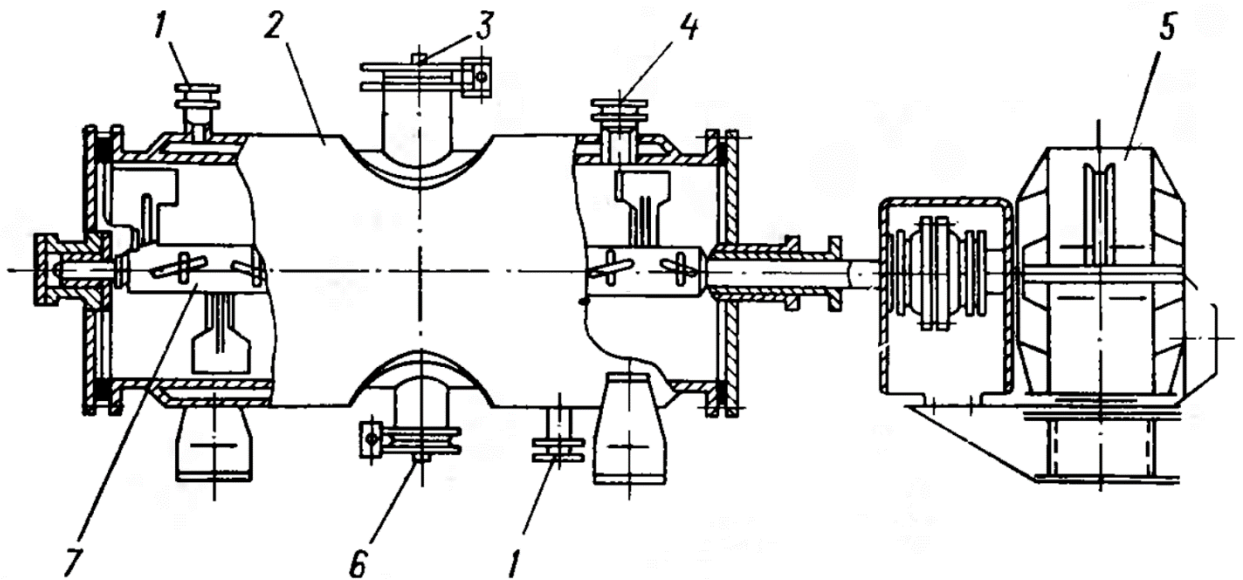
лопатках, піднімається при повороті барабана, падає вниз сектора. Такий рух дозволяє сушильному агенту омивати всю поверхню частинок матеріалу. Підйомно – лопатна насадка розрахована для кускового матеріалу. Лопатки насадок піднімають матеріал при обертанні і поступово скидають його вниз.

При сушінні матеріалів в барабані основна кількість теплоти від сушильного агента передається матеріалу конвекцією під час пересипання. При збільшенні ступеня завантаження барабана матеріалом можливість пересипання його скорочується. Разом з цим зменшується поверхня матеріалу, що омивається сушильним агентом, і зменшується інтенсивність сушки. Тому оптимальним умовою завантаження, за експериментальними даними, вважають заповнення обсягу барабана матеріалом не більше ніж на (15...20) %. Крім того, матеріал отримує теплоту від нагрітих пристроїв барабана за рахунок теплопровідності. Конструкції барабана і поверхня матеріалу отримують теплоту за рахунок випромінювання.

В залежності від властивостей матеріалу та умов до готової продукції використовують сушили середнього (надлишкового тиску (3...13) кПа) або глибокого (залишковий тиск до 133,3 Па) вакууму.

Вакуумні барабанні сушили використовують в основному у виробництві ядохімікатів, гербіцидів, деяких полімерних матеріалів, а також в медичній, харчовій та фармацевтичній промисловості.

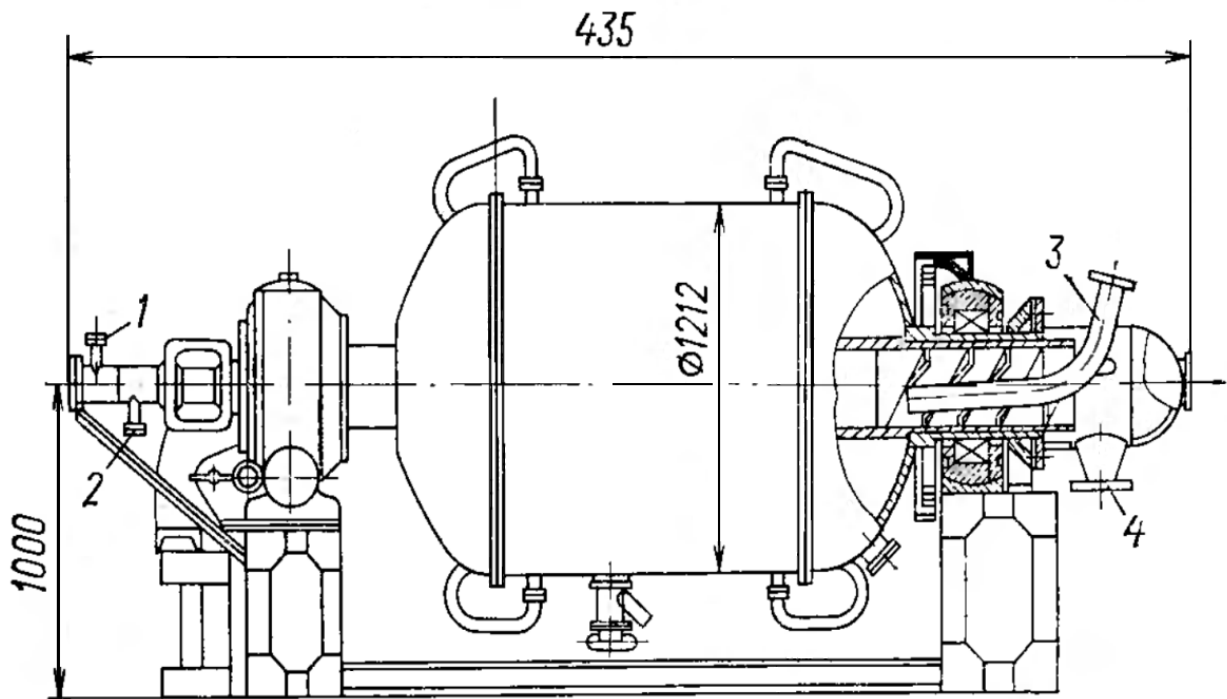
Барабанна вакуумна гребкова сушарка (див. рис. 1.3) з реверсивним обертанням ротора представляє собою горизонтальний циліндричний барабан з рубашкою, всередині якої встановлено лопатевий перемішувачий пристрій. Реверсивне обертання валу – автоматичне. В таких сушарках можуть бути встановлено перемішувачі прилади різних конструкцій: гребкова мішалка без підігріва, лопатева мішалка з валом, що обігрівається або мішалка з додатковими трубчастими поверхнями теплообміну. Сушка продукту відбувається при контакті з нагрітими поверхнями в умовах вакууму. Залишковий тиск в апараті до 5.3 кПа.



1 – штуцер для вводу гріючого пара та відводу конденсату; 2 – корпус; 3 – загрузочний штуцер; 4 – штуцер для відводів парів; 5 – електродвигун; 6 – розвантажувальний штуцер; 7 – лопатевий вал.

Рисунок 1.3 – Барабанна вакуумна гребкова сушарка з реверсивним обертовим ротором

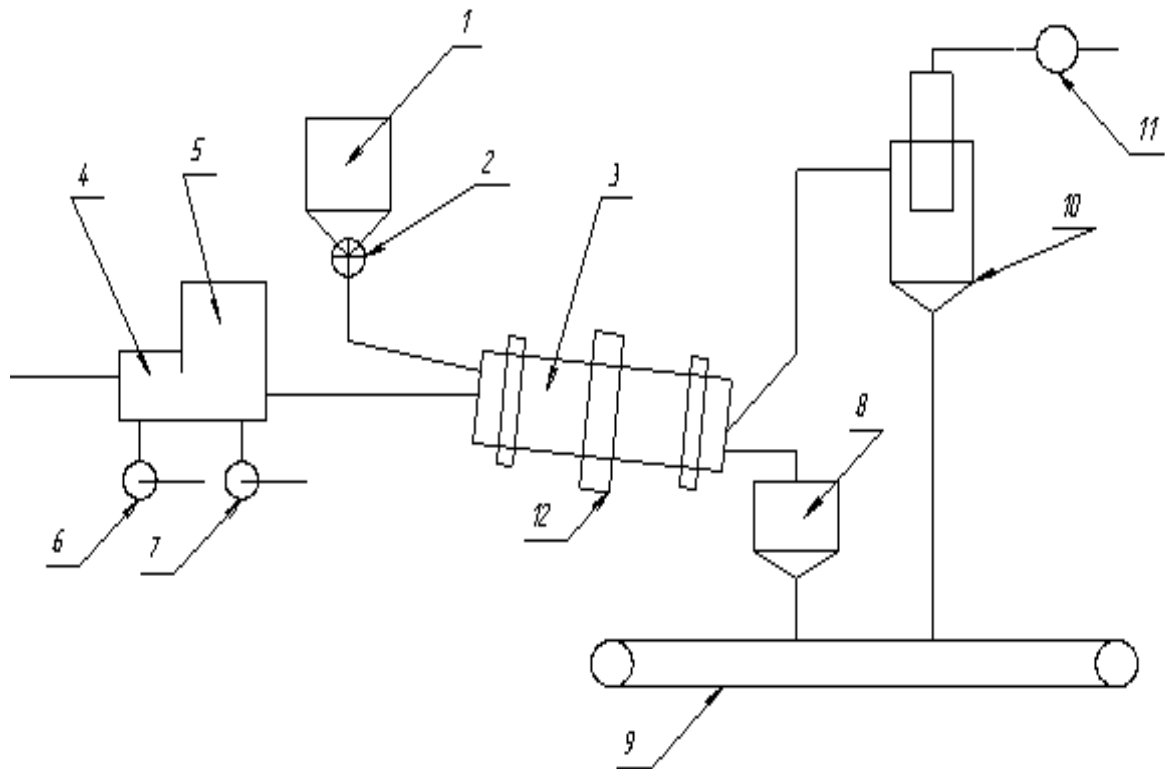
Барабанні вакуумні сушарки з обертовим корпусом (див. рис. 1.4) відрізняються доброю герметичністю, що дозволяє використовувати їх для сушки токсичних сипучих матеріалів [8]. Така сушарка містить ряд вбудованих один в інший циліндрів, що обігріваються паром низького тиску або водою. Для захисту висушених матеріалів від взаємодії з киснем повітря вивантажують та охолоджують матеріал під вакуумом. По одній цапфі підводять пар до парових рубашок циліндрів і відводять конденсат, по іншій – за допомогою шнека завантажують початковий матеріал і вивантажують готовий продукт. Для створення вакууму в установці використовують механічні або пароструменеві вакуум-насоси.



1 – штуцер для вводу гріючого пара; 2 – штуцер для відводу конденсату;  
3 – патрубок для підключення сушарки до вакуум-насосу; 4 – патрубок для вивантаження матеріалу.

Рисунок 1.4 – Барабанна вакуумна сушарка з обертовим корпусом

На рисунку 1.5 представлено принципову схему барабанної сушарки. Вологий матеріал з бункера 1 за допомогою живильника 2 потрапляє в обертовий сушильний барабан 3. Паралельно матеріалу в сушарку подається сушильний агент, що утворюється від згоряння палива в топці 4 і змішання газів в камері змішувача 5. Повітря в топку і змішувальну камеру подається вентиляторами 6, 7. Висушений матеріал з протилежного кінця сушильного барабана 8 потрапляє на транспортувальний пристрій 9.



1 - барабан; 2 - живильник; 3 - сушильний барабан; 4 - топка; 5 - змішувач-ва камера; 6, 7, 11. - вентилятори; 8 - проміжний бункер; 9 - транспортёр; 10 циклон; 12 - зубчастий передача

Рисунок 1.5 - Принципова схема барабанної сушарки

Відпрацьований сушильний агент перед викидом в атмосферу очищається від пилу в циклоні 10. При необхідності проводиться додаткове, мокре пиловловлювання.

Транспортування сушильного агента через сушильну камеру відбувається за допомогою вентилятора 11. Для того щоб запобігти виток сушального агента через нещільні з'єднання в конструкції в сушарці створюється невелике розрядження. Барабан приводиться в обертання електродвигуном через зубчасту передачу 12.

Недоліками такої барабанної сушарки є низька якість готової продукції через низький коефіцієнта тепло- і масообміну, невисока продуктивність, складність конструкції сушарки [11].

Барабанні сушарки поширені завдяки високій продуктивності, простоті конструкції і можливості безперервно сушити при атмосферному тиску дрібношматкові і сипучі матеріали (глина, колчедан, вугілля, фосфорити, мінеральні солі та ін.) [5].

#### 1.4 Класифікація стану матеріалу в процесі сушіння

При сушінні нагрітим повітрям з певними параметрами ( $t_c$ ,  $\varphi$ ,  $v$ ) не можна видалити всю вологу. Процес може бути проведений лише до рівноважної вологи, відповідної даним параметрами повітря [6]. Тому у сушильній техніці вводиться поняття видаленого вологовмісту  $W_y$ . Це вологовміст матеріалу  $W$  за вирахуванням рівноважного вологовмісту  $W_p$ , тобто

$$U_y = U - U_p \text{ або } W_y = W - W_p. \quad (1.1)$$

Тому у розрахунках процесу сушіння нагрітим повітрям необхідно знати рівноважний вологовміст матеріалу так само, як у розрахунках охолодження твердих тіл необхідно знати температуру навколишнього середовища, яку прийме тіло в кінці процесу охолодження.

З ізотерм сорбції та десорбції випливає, що якщо вологовміст матеріалу більше максимального гігроскопічного  $U_{г.м}$ , та тиск пари рідини матеріалу  $p_m$  дорівнює тиску насиченого пара вільної рідини  $p_n$  при температурі матеріалу і не залежить від вологовмісту, тобто

$$U > U_{г.м}; p_m = p_n = \text{const}. \quad (1.2)$$

При цьому необхідно уточнити, що ми розглядаємо безкінечно повільну сушку. В такому випадку перепади вологовмісту і температури всередині матеріалу мізерно малі, тому середньо інтегральні їх значення дорівнюють локальним, у тому числі і їх значення на поверхні матеріалу.

Якщо вологовміст матеріалу менше максимального гігроскопічного ( $U < U_{г.м}$ ), то тиск пари рідини в матеріалі менше за тиск насиченого пара вільної рідини і є функцією вологовмісту і температури матеріалу

$$U < U_{г.м}; p_m = f(U, t), \quad (1.3)$$

де  $t$  – температура матеріалу.

У зв'язку з цим розрізняють область вологого стану матеріалу ( $U > U_{г.м}$ ) та область гігроскопічного стану матеріалу ( $U < U_{г.м}$ ).

Ця класифікація стану матеріалу з точки зору процесу сушіння схематично зображена на рисунку 1.6.

Необхідно відмітити, що цей розподіл носить умовний характер. Реальний процес сушки відбувається при наявності градієнта вологовмісту або градієнта температури, тому вологовміст матеріалу на поверхні матеріалу не дорівнює середньому вологовмісту. Часто при середньому вологовмісті матеріалу  $U > U_{г.м}$  вологовміст на його поверхні близький до рівноважного.

На рисунку 1.6 видно, що процес сушіння як термічний процес зневоднення матеріалу є більш загальним процесом. Десорбція є процес, зворотний процесу сорбції, при якому також відбувається сушка матеріалу в межах зони гігроскопічного вологовмісту. Отже, процес сушіння включає в себе як частину його і процес десорбції.



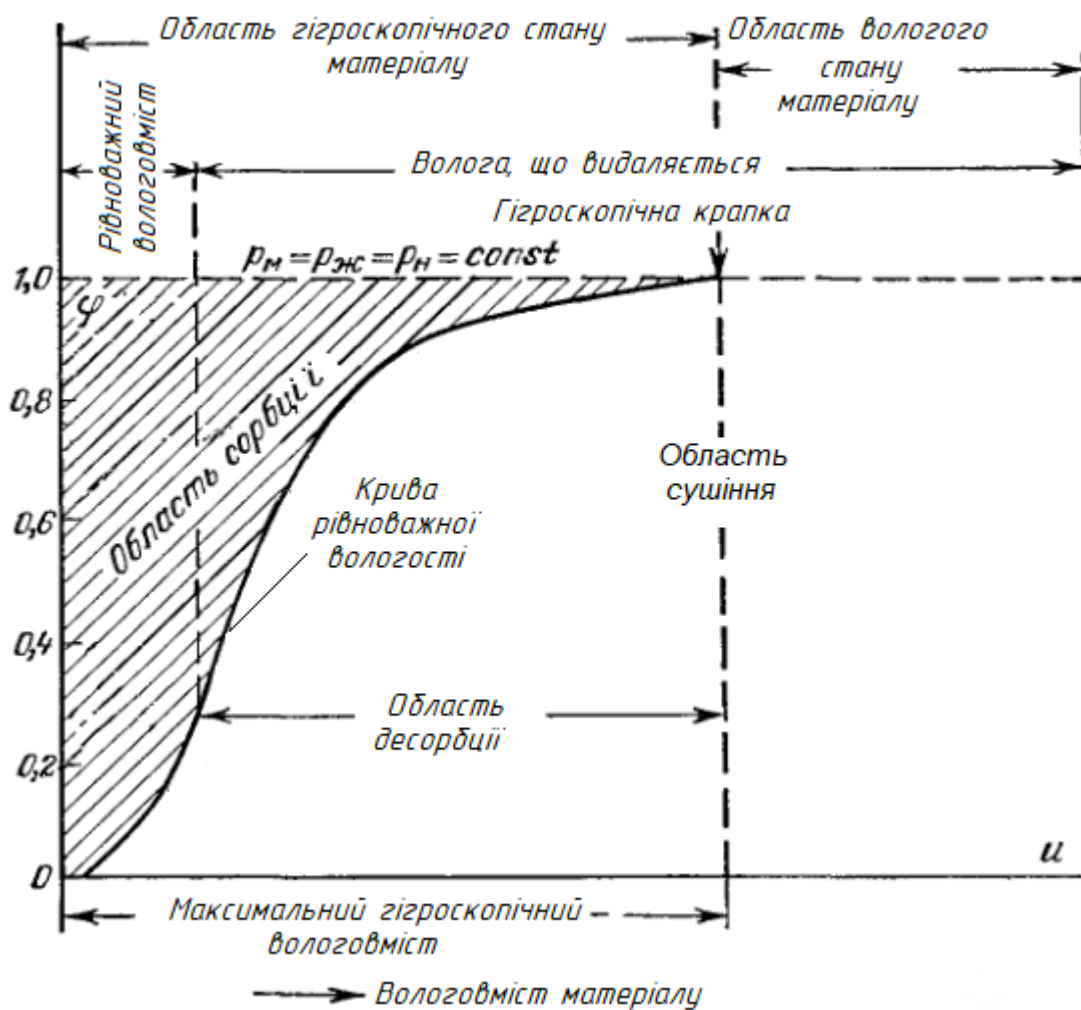


Рисунок 1.6 – Схема класифікації стану матеріалу з точки зору процесу сушіння

На відміну від вологовмісту тіла вологість матеріалу дорівнює вмісту рідини  $m_{ж}$ , віднесеної до одиниці маси вологого матеріалу (відносна вологість матеріалу), тобто

$$W_{от} = \frac{m_{ж}}{m_0 + m_{ж}}, \quad (1.4)$$

де  $m_0$  – маса абсолютно сухого матеріалу, кг;

–  $W_{от}$  – вологість матеріалу вологого тіла, кг/кг або %.

Отже, залежність між вологовмістом та вологістю матеріалу

$$W_{от} = \frac{W}{1 + W}. \quad (1.5)$$

Таким чином, вологовміст  $W = 1$  кг/кг (100 %) відповідає вологості матеріалу  $W_{от} = 0,5$  кг/кг (50 %) [12].

### 1.5 Основи кінетики процесу конвективного сушіння

Під кінетикою процесу сушіння зазвичай розуміють зміну середнього вологовмісту  $\hat{u}(\tau)$  і середньої температури  $t(\tau)$  тіла з плином часу. Ці закономірності кінетики процесу сушіння дозволяють розрахувати кількість води, що випаровувалась з матеріалу і витрату тепла на сушку.

Зміна локального вмісту води  $u$  й локальної температури  $t$  з плином часу залежить від взаємопов'язаного механізму перенесення води і тепла всередині вологого матеріалу і масо- і теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем. Механізм волого- і теплопереносу всередині вологих тіл в свою чергу дуже складний, він визначається характером зв'язку води з вологими тілами, тому кінетика процесу сушіння в значній мірі визначається фізико-хімічними властивостями самого матеріалу, що висушується.

Форми зв'язку води з матеріалом в значній мірі визначають механізм і швидкість сушіння: чим цей зв'язок міцніше, тим важче протікає процес. При сушінні зв'язок води з матеріалом порушується. Розрізняють такі форми зв'язку (в порядку убутання її енергії): хімічну, фізико-хімічну, механічну [13].

Знаходження полів вологовмісту  $u(x, y, z, \tau)$  і температури  $t(x, y, z, \tau)$  зв'язано з вирішенням системи диференціальних рівнянь масо-і теплопереносу при відповідних граничних умовах, що відображають спосіб і режим сушіння (сушка нагрітими газами, інфрачервоними променями і т. д.). Ця система рівнянь є системою нелінійних диференціальних рівнянь, і її вирішення можливе шляхом лінеаризації рівнянь або методами машинної техніки.

Таким чином, нестационарні поля вологовмісту і температури (динаміка процесу сушіння) визначаються закономірностями волого- і теплопереносу всередині тіла, а також зовнішнім волого- і теплообміном з навколишнім середовищем.

Зміни середніх вологовмісту і температури тіла з плином часу (кінетика процесу сушіння) в першу чергу виділяються закономірностями взаємодії тіла з навколишнім середовищем, тобто зовнішнім тепло- і масообміном.

Для того щоб описати дійсний процес масо- і теплообміну тіл з навколишнім середовищем, необхідно знати основні закономірності протікання процесу сушіння вологих тіл. Крім того, для інженерних розрахунків і різноманітних додатків необхідно знати наближені співвідношення між середнім вологовмістом  $W$  і часом  $\tau$ , а також формули для розрахунку витрати тепла, тобто рівняння балансу [14].

Кінетика періодичної сушки характеризується зменшенням в часі середньої за обсягом вологості матеріалу (швидкістю сушки) і визначається властивостями матеріалу і вологи, його розміром і формою, параметрами сушильного агента і його швидкістю, конструкцією сушарки. Отримання такої залежності теоретично можливо шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь руху, нерозривності, нестационарної конвективної дифузії і теплопровідності для газової і твердої фаз з подальшим усередненням вологості матеріалу за об'ємом. Однак в силу надзвичайної складності даного завдання її спрощують, застосовуючи різні моделі структури потоку як, наприклад, при описі адсорбції, а ще частіше використовують експериментальні кінетичні криві [15].

Кінетичні криві процесу сушіння отримують на основі експериментальних досліджень сушіння матеріалу.

Кривою сушки називають залежність зміни вологості матеріалу  $w^c$  від часу сушіння  $t$  [15]. У загальному випадку крива сушіння складається з декількох ділянок, що відповідають різним періодам сушки (див. рис. 1.7).

Після невеликого проміжку часу – періоду прогріву матеріалу (початковий період), протягом якого вологість знижується незначно від її початкового значення (ділянка АВ), настає період постійної швидкості сушіння (I-й період), коли вологість матеріалу інтенсивно зменшується за лінійним законом (ділянка ВС). Таке зменшення вологості відбувається до значення першої критичної вологості  $w_{кр.1}^c$ , після чого починається період падаючої швидкості сушки (II-й період), коли зменшення вологості відповідає кривій СЕ, яка в загальному випадку складається з двох ділянок різної кривизни (відрізки CD і DE). Точка перегину D відповідає другій критичній вологості  $w_{кр.2}^c$ , крапка Е – кінцевій вологості матеріалу  $w_{кон}^c$ . В кінці другого періоду вологість матеріалу асимптотично наближається до рівноважної  $w_p^c$  (крапка К); при досягненні рівноважної вологості припиняється подальше випаровування вологи з матеріалу.

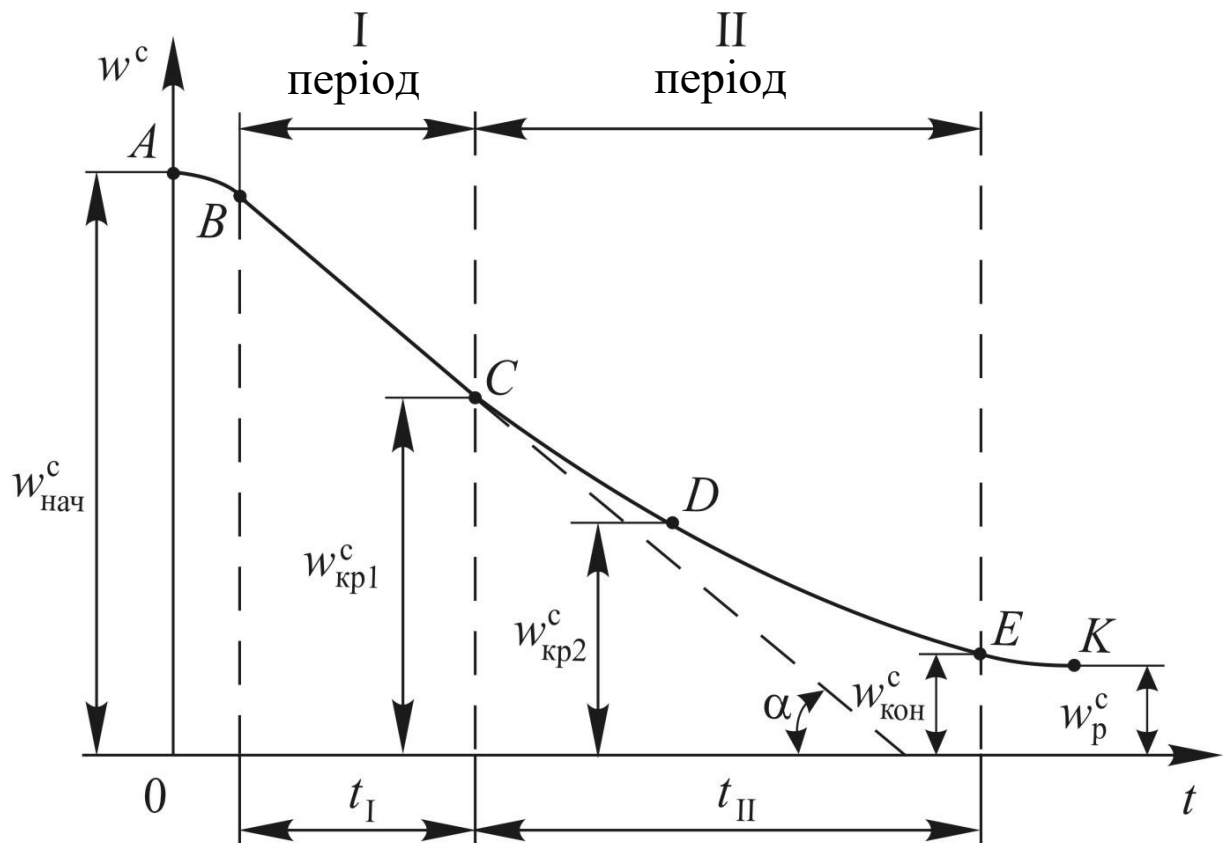


Рисунок 1.7 – Крива сушки

Крива швидкості сушіння представляє залежність швидкості сушіння  $N$  від вологості матеріалу  $w^c$ . Швидкість сушіння визначається зменшенням вологості матеріалу  $dw^c$  за нескінченно малий проміжок часу  $dt$  і виражається відношенням [15]

$$N = -\frac{dw^c}{dt} \quad (1.6)$$

Швидкість сушіння може бути визначена за допомогою кривої сушки шляхом її графічного диференціювання, тобто буде виражатися тангенсом кута нахилу дотичної, проведеної до точки кривої, що відповідає вологості матеріалу. На рисунку 1.8 показана крива швидкості сушки, що відповідає кривій сушки на рисунку 1.7. Так в початковому періоді сушки А–В при прогріванні матеріалу швидкість сушки зростає. Для I-го періоду швидкість сушіння буде постійною, і відповідати  $tg \alpha = \text{const}$  на рисунку 1.7 (горизонтальний відрізок В–С на рисунку 1.8). Відрізок С–Е характеризує період падаючої швидкості сушки (II-й період). У перший період відбувається інтенсивне поверхнєве випаровування вільної вологи. У точці С ( $w_{кр.1}^c$ ) вологість на поверхні матеріалу стає рівною гігроскопічній. З цього моменту починається випаровування зв'язаної вологи, і швидкість сушіння починає зменшуватися, так як на неї впливає швидкість внутрішнього перенесення вологи з глибини матеріалу до його поверхні.

Вид кривих швидкості сушіння в другому періоді дуже різноманітний. На рисунку 1.8 зображена крива, типова для капілярно-пористих матеріалів складної структури. Точка перегину D, відповідна  $w_{кр.2}^c$ , може бути виражена не так чітко, а іноді і взагалі бути відсутня.

Для аналізу процесу сушіння, крім кривих швидкості, необхідно знати характер зміни температури матеріалу в залежності від вологості  $w^c$  (див. рис. 1.9).

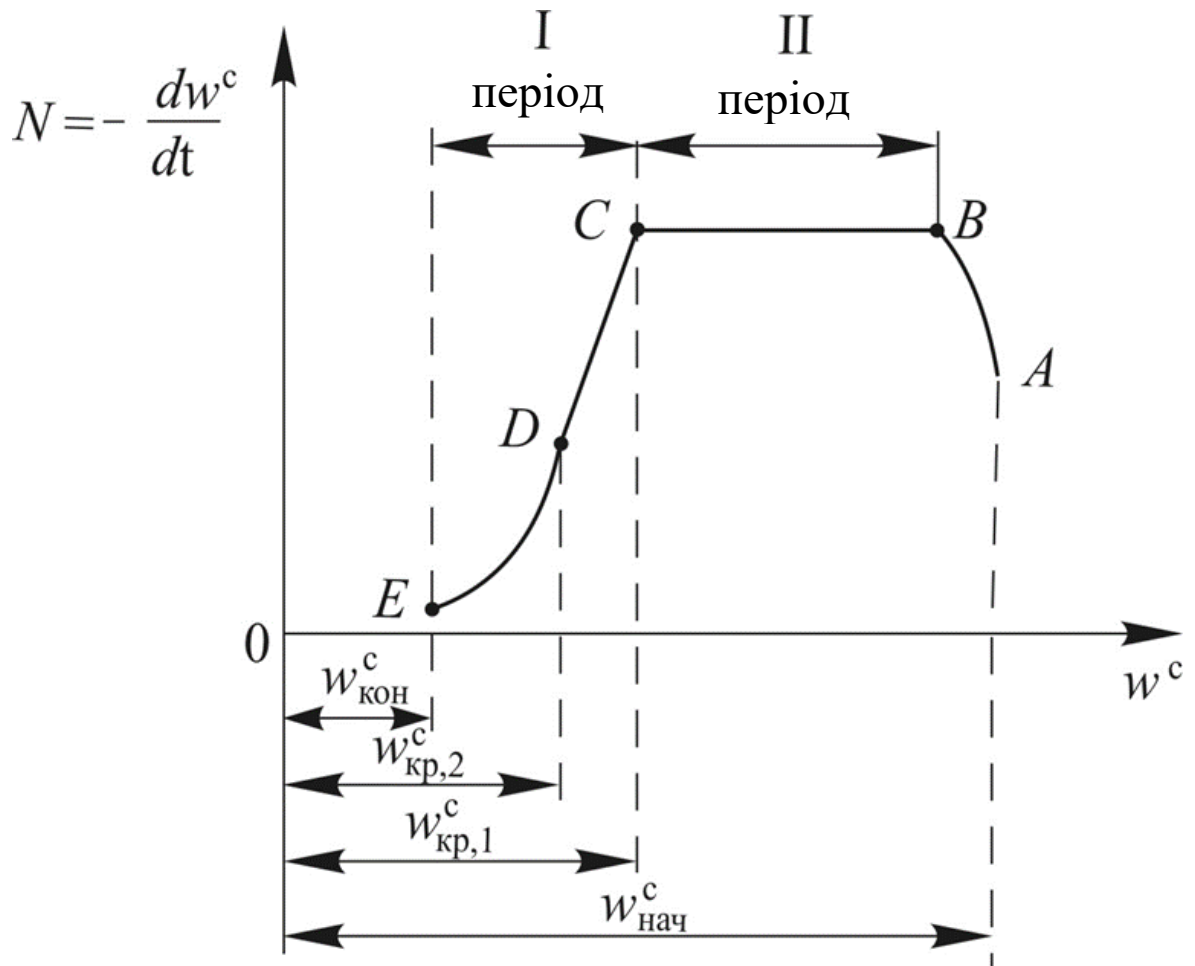
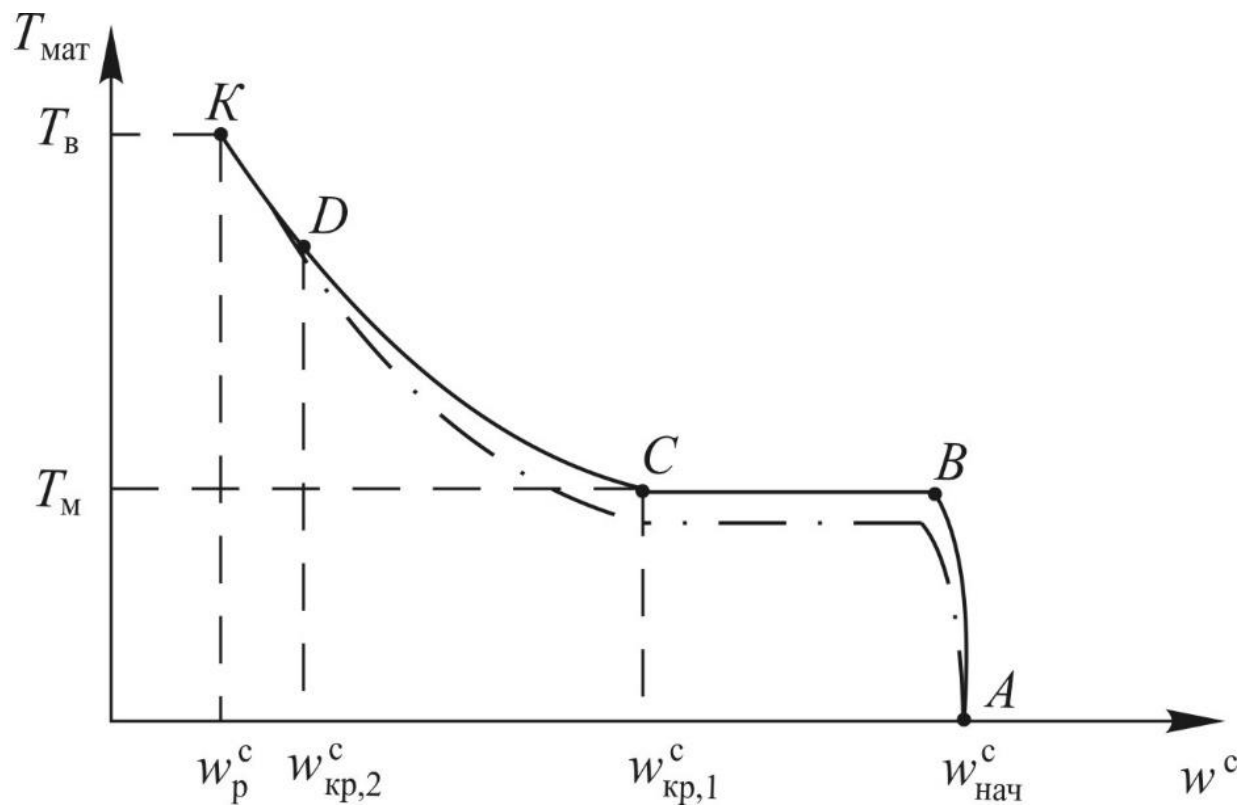


Рисунок 1.8 – Крива швидкості сушки

За короткочасний період прогріву матеріалу А–В його температура швидко підвищується і досягає значення температури мокрого термометра  $T_m$ . У період постійної швидкості сушіння В–С все тепло, що підводиться до матеріалу, витрачається на випаровування вільної вологи (адіабатична сушка) і температура матеріалу залишається незмінною рівній температурі мокрого термометра ( $T_{\text{мат}} = T_m$ ). У період падаючої швидкості сушки С–К випаровування вологи з поверхні матеріалу сповільнюється і його температура починає підвищуватися ( $T_{\text{мат}} > T_m$ ). Коли вологість матеріалу зменшиться до рівноважної і випаровування вологи припиниться температура матеріалу досягає максимального значення рівного температурі сушильного агента. Суцільна лінія на рисунку 1.9 характерна для сушіння матеріалів в тонкому шарі [16].



Суцільна лінія – тонкостінні матеріали; штрихпунктирна лінія – товстостінні матеріали

Рисунок 1.9 – Температурна крива сушки

Для матеріалів значної товщини при конвективній сушці температура у внутрішніх шарах протягом, практично, всього процесу сушіння нижче, ніж на поверхні, отже, трохи нижче буде і середня температура матеріалу (штрихпунктирна лінія).

Інтенсивність випаровування вологи  $j$  є технологічним параметром процесу сушіння і показує, яка кількість вологи  $W$  випаровується з одиниці поверхні  $F$  матеріалу, що висушується, в одиницю часу  $t$  (потік вологи) [17]

$$j = \frac{W}{Ft}. \quad (1.7)$$

Інтенсивність випаровування вологи пов'язана з тепло- і масообміном вологого матеріалу з навколишнім середовищем. Механізм цього процесу дуже складний, тому що включає процеси переміщення вологи всередині матеріалу, її масовіддачу з поверхні матеріалу і отримання матеріалом тепла з навколишнього середовища. Кожен з цих процесів підпорядковується власним закономірностям і протікає з різною інтенсивністю в різні періоди сушки. Для спрощення математичного опису такого складного завдання, як правило, застосовують різні моделі. Розглянемо одну з них, найбільш поширену.

Передбачається, що в період постійної швидкості сушіння (I-й період) вона лімітується масовіддачею пари з поверхні матеріалу в ядро газової фази. Рушійною силою є різниця концентрацій або парціальних тисків пара біля поверхні матеріалу  $p_m$  і в навколишньому середовищі  $p_n$ . Вологість матеріалу більше гігроскопічної, пар у поверхні матеріалу є насиченим ( $p_m = p_n$ ) і відповідає температурі мокрого термометра  $T_m$ . Волога інтенсивно надходить з внутрішніх шарів до поверхні матеріалу. Швидкість випаровування вологи з його поверхні приймають рівною швидкості випаровування з вільної поверхні рідини, і описується рівнянням масовіддачі.

При випаровуванні вологи з поверхні матеріалу виникає градієнт вологості по його товщині і коли на поверхні матеріалу вологість досягає значення гігроскопічної вологості, починається II-й період сушіння. На поверхні матеріалу вологість стає менше гігроскопічної і продовжує зменшуватися, а швидкість процесу сушіння все більше визначається переносом вологи всередині матеріалу.

Для першого періоду сушки інтенсивність випаровування вологи  $j_1$  постійна

$$j_1 = \frac{W_1}{F \cdot t_1} = const. \quad (1.8)$$

де  $W_1$  – кількість вилученої вологи у перший період тривалістю  $t_1$ ;



–  $F$  – одиниця поверхні матеріалу, що висушується.

Позначимо швидкість сушіння в першому періоді, яка виражає число кілограмів вологи (на 1 кг сухої речовини), що випаровується, за 1 с

$$N_1 = -\frac{dw^c}{dt}. \quad (1.9)$$

Величина  $W_1$  може бути представлена у вигляді

$$W_1 = M_c (w_{\text{нач}}^c - w_{\text{кр.1}}^c), \quad (1.10)$$

де  $M_c$  – маса сухої речовини, кг. Тоді

$$j_1 = \frac{M_c (w_{\text{нач}}^c - w_{\text{кр.1}}^c)}{F t_1}. \quad (1.11)$$

Швидкість сушіння в першому періоді і його тривалість дорівнюватимуть:

$$N_1 = \frac{j_1}{M_c} F = \frac{(w_{\text{нач}}^c - w_{\text{кр.1}}^c)}{t_1}, \quad (1.12)$$

$$t_1 = \frac{(w_{\text{нач}}^c - w_{\text{кр.1}}^c)}{N_1}. \quad (1.13)$$

Для другого періоду сушіння розрахунок швидкості сушіння значно ускладнюється внаслідок більш складної і різної конфігурації кривих швидкості сушіння (див. рис. 1.10). Тривалість сушіння в цей період визначають наближено за допомогою коефіцієнта швидкості сушки  $K_c$ .

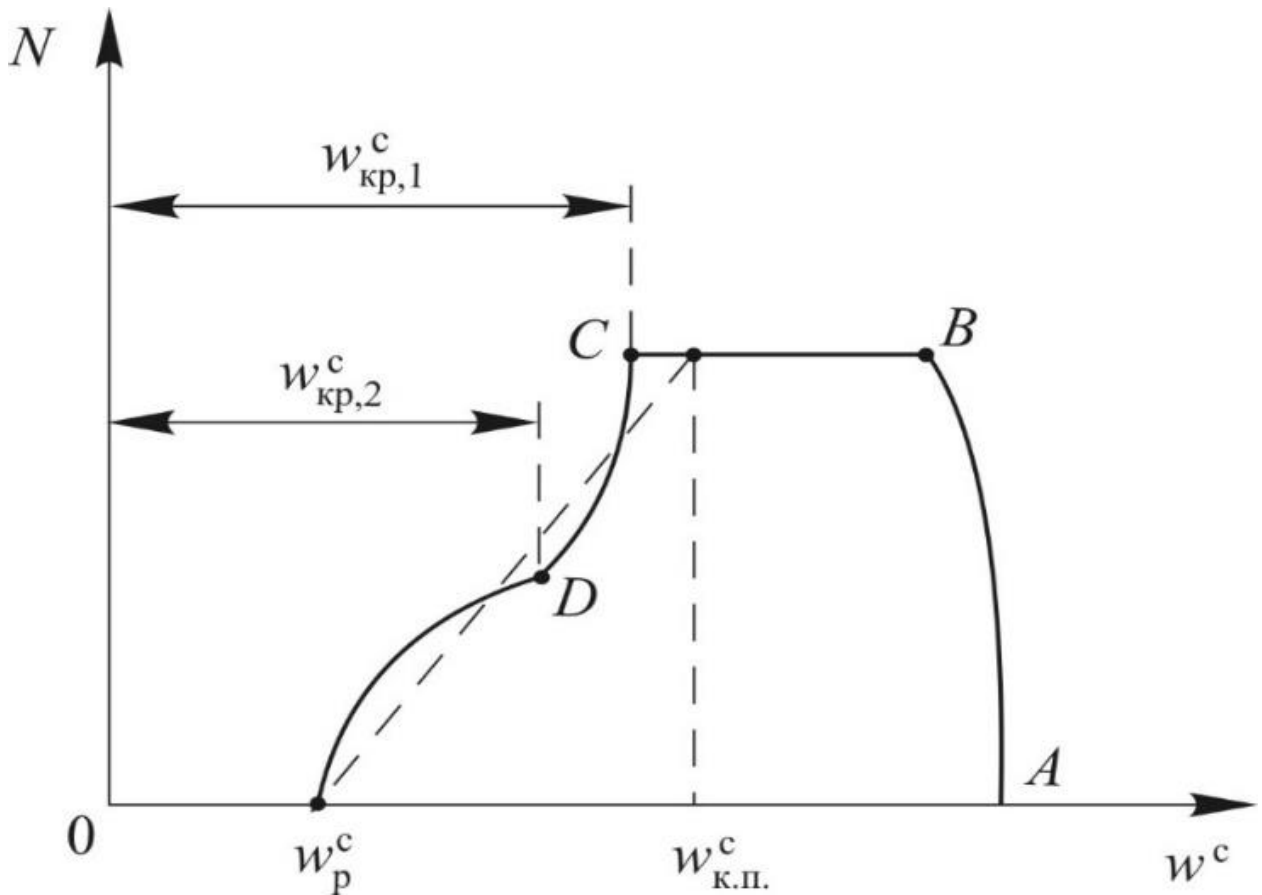


Рисунок 1.10 – Визначення зведеної критичної вологості  $w_{к.п.}^c$ .

Для розрахунку  $K_c$  користуються експериментальною кривою швидкості сушіння даного матеріалу, наближаючи в ній криволінійний відрізок (відповідний другому періоду сушіння) похилій прямій, проведений з крапки  $w_p^c$  до горизонтальної прямолінійної ділянки, що відповідає періоду постійної швидкості (пунктирна лінія на рисунку 1.10). Верхній кінець цієї прямої відповідає зведеній критичній вологості  $w_{к.п.}^c$ , якою замінюють в першому наближенні першу критичну вологість  $w_{кр.1}^c$ .

При цьому рівняння швидкості сушки для другого періоду може бути представлено у вигляді:

$$-\frac{dw^c}{dt} = K_c(w^c - w_p^c); \quad (1.14)$$

$$K_c = \frac{N_1}{(w_{к.п.}^c - w_p^c)}. \quad (1.15)$$

В результаті інтегрування рівняння (1.15) в межах від  $w_{к.п.}^c$  до  $w_{кон}^c$  (кінцева вологість матеріалу після сушіння) отримуємо

$$\frac{(w_{кон}^c - w_p^c)}{(w_{к.п.}^c - w_p^c)} = \exp(-K_c t_2). \quad (1.16)$$

Звідки тривалість другого періоду сушіння  $t_2$  буде

$$t_2 = \frac{1}{K_c} \ln \frac{(w_{к.п.}^c - w_p^c)}{(w_{кон}^c - w_p^c)} = \frac{1}{N_1} (w_{к.п.}^c - w_p^c) \ln \frac{(w_{к.п.}^c - w_p^c)}{(w_{кон}^c - w_p^c)}. \quad (1.17)$$

Загальна тривалість сушіння становить

$$t = t_1 + t_2. \quad (1.18)$$

Описаний метод розрахунку тривалості сушіння з використанням коефіцієнта швидкості сушки  $K_c$  запропонований А. В. Ликовим [6] і використовується при розрахунку сушарок [18].

### 1.6 Загальна методика розрахунку сушильних установок

Розрахунок сушильних апаратів виконують в наступній послідовності:

- 1) по необхідній продуктивності складають матеріальний баланс сушарки і визначають кількість води, що випаровується, по зонам;
- 2) складають тепловий баланс і знаходять необхідну кількість тепла, витрату палива, пара, сушильного агента і т. д.;
- 3) визначають необхідну поверхню тепло- і масообміну, що забезпечує задану продуктивність сушарки;
- 4) за величиною

поверхневого тепло- і масообміну знаходять габарити сушильної камери та визначають необхідне число сушильних апаратів; 5) виходячи з розрахунків, обґрунтовують раціональний спосіб сушки і конструкцію апарату [19].

### 1.6.1 Матеріальний баланс сушарки

Матеріальний баланс має на меті визначення кількості (витрати) випареної вологи і витрати сушильного агента. Його складають для потоків, що висушується і газу [20].

Зазвичай при розрахунку сушильних установок задаються річним обсягом цеха або сушарки по готовому продукту. Тоді годинна продуктивність сушарки, кг/год

$$G_{\text{год}} = \frac{G}{a \cdot b}, \quad (1.19)$$

де  $G$  – річна продуктивність по готовому продукту, кг;

-  $a$  – число годин роботи сушарки на добу;

-  $b$  – число робочих днів у році.

Кількість вологи, що випаровується в процесі сушіння, визначають за рівнянням, кг/год

$$W = G_{\text{год}} \frac{w_{\text{н}} - w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{н}}}, \quad (1.20)$$

де  $w_{\text{н}}$  і  $w_{\text{к}}$  – початкова і кінцева вологість матеріалу, %.

Тоді продуктивність сушарки по вихідному матеріалу складе, кг/год

$$G_1 = G_2 + W, \quad (1.21)$$

де  $G_2$ – продуктивність по готовому продукту, кг/год.

У процесі сушіння маса абсолютно сухої речовини  $G_{абс.с}$ , кг/год, не змінюється, якщо немає виносу його частинок або інших втрат

$$G_{абс.с} = G_1 \frac{100 - w_H}{100} = G_2 \frac{100 - w_K}{100}. \quad (1.22)$$

Звідки

$$G_1 = G_2 \frac{100 - w_K}{100 - w_H}. \quad (1.23)$$

Вологовміст матеріалу початковий та кінцевий, кг/кг

$$U_H = \frac{w_H}{100 - w_H}, \quad (1.24)$$

$$U_K = \frac{w_K}{100 - w_K}. \quad (1.25)$$

### 1.6.2 Тепловий баланс сушарок

Для випаровування вологи і проведення спільно з сушінням інших термічних процесів до матеріалу необхідно підвести тепло. Його можна підводити по-різному, в залежності від способу сушіння. Якщо на основі досвідчених даних відомий режим процесу, то з теплового балансу можна визначити витрату тепла на сушку і витрату відповідно палива, електроенергії, пара. Для встановлення витрати тепла в сушильній установці складають теплової баланс сушильної камери. Для сталого процесу рівняння теплового

балансу характеризує рівність між кількістю тепла, що надходить в сушильну камеру, і кількістю тепла, що йде з неї. Сумарна витрата тепла в сушарці,

$$\sum Q = Q_{\text{вип}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{т}}, \quad (1.26)$$

де  $Q_{\text{вип}}$  і  $Q_{\text{м}}$  – витрата тепла відповідно на випаровування вологи і нагрівання матеріалу;

–  $Q_{\text{п}}$  і  $Q_{\text{г}}$  – втрати тепла, відповідно, в навколишнє середовище і з відхідними газами;

–  $Q_{\text{д}}$  – витрата тепла на дегідратацію, руйнування енергії зв'язку з матеріалом і інші ендотермічні процеси;

–  $Q_{\text{т}}$  – витрата тепла на нагрівання середовищ, що додатково вводяться (пара, стиснене повітря) і транспортних засобів.

Для безперервно діючих сушарок розраховують годинну витрату тепла, для сушарок періодичної дії – витрату тепла на один цикл сушіння. Витрата тепла на випаровування рідини, кДж/год

$$Q_{\text{вип}} = W(i_{\text{п}} + i_{\text{ж}}), \quad (1.27)$$

на випаровування води, кДж/год

$$Q_{\text{вип}} = 4,19W \left| (595 + 0,49t_2 - \theta_{\text{н}}) \right|, \quad (1.28)$$

де  $i_{\text{п}}$  – ентальпія перегрітого пара при температурі відхідних газів;

-  $W$  – кількість вологи, що випаровується в процесі сушіння, кг/год

-  $i_{\text{ж}}$  – ентальпія рідини при початковій температурі матеріалу;

-  $t_2$  – температура відхідних газів, °С;

-  $\theta_{\text{н}}$  – початкова температура матеріалу, °С.

Витрата тепла на нагрівання матеріалу, кДж/год

$$Q_M = G_2 c_M (\theta_K - \theta_H), \quad (1.29)$$

де  $\theta_K$  – температура матеріалу після сушки, °С;

–  $c_M$  – теплоємність висушеного матеріалу, кДж/(кг·К).

$$c_M = c_{абс.с} \frac{100 - w_K}{100} + \frac{w_K}{100} c_{ж}, \quad (1.30)$$

де  $c_{абс.с}$  – теплоємність абсолютно сухого матеріалу, кДж/(кг·К).

–  $c_M$  – теплоємність рідини, що випаровується, кДж/(кг·К) [7].

Питома витрата тепла на нагрівання матеріалу, кДж/кг

$$q_M = \frac{Q_M}{W} = \frac{G_2 c_M (\theta_K - \theta_H)}{W}. \quad (1.31)$$

Втрати тепла сушаркою у навколишнє середовище, кДж/год

$$Q_{п} = KF(\bar{t} - t_0). \quad (1.32)$$

де  $K$  – коефіцієнт теплопередачі через стінку сушарки, (Вт/м·К);

–  $F$  – зовнішня поверхня сушарки, м<sup>2</sup>;

–  $\bar{t}$  – середня температура в сушарці, °С;

–  $t_0$  – температура навколишнього середовища, °С

Теплоізоляцію сушарки обирають так, щоб температура зовнішньої стінки не перевищувала 40 °С. До визначення максимальної поверхні сушарки можна наближено прийняти питоми витрати тепла в навколишнє середовище  $q_n = (125...420)$  кДж на 1 кг вологи в залежності від вологості матеріалу (меншу величину приймають для високовологих матеріалів), тоді

$$Q_{п} = q_n W. \quad (1.33)$$

Втрати тепла з відхідними газами складають, кДж/год

$$Q_{\Gamma} = LI_2, \quad (1.34)$$

де  $I_2$  – ентальпія відхідних газів при  $t_2$ , кДж/кг;

–  $L$  – витрата сухого повітря, кг/год.

При розрахунках сушарок часто доводиться враховувати додаткову кількість повітря  $L_{nc}$ , яке надходить в сушарку. через завантажувальний отвір і інші нещільності. Зазвичай приймають

$$L_{nc\ max} \approx 0.1L. \quad (1.35)$$

Витрата тепла на дегідратацію і інші ендотермічні процеси, кДж/год

$$Q_d = \bar{q}_d G_2, \quad (1.36)$$

де  $\bar{q}_d$  – середня питома теплота дегідратації, віднесена до 1 кг готового (сухого) продукту.

Витрата тепла на нагрівання середовищ, що додатково вводяться і пристроїв  $Q_m$  визначається по відомим співвідношенням теплового балансу з урахуванням конкретних конструктивних особливостей сушарки [21].

### 1.6.3 Розрахунок кількості теплоносія

При конвективному сушінні витрата газоподібного теплоносія визначається з теплового балансу сушарки. Кількість тепла, що надходить в сушарку разом з нагрітим теплоносієм

$$\sum Q = LI_1, \quad (1.37)$$



де  $I_1$  – ентальпія газу, що надходить у сушарку.

Використовуючи рівняння (1.26) та (1.21), отримаємо, кг/год

$$L = \frac{Q_{\text{исп}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{т}}}{I_1 - I_2} = \frac{\Sigma Q - Q_{\text{г}}}{I_1 - I_2}. \quad (1.38)$$

Значення ентальпій повітря перед сушаркою  $I_1$  і після сушарки  $I_2$  визначають наступним чином. Приймають параметри зовнішнього повітря (температура  $t_0$  і відносна вологість  $\varphi_0$ ), що надходить у калорифер сушильної установки. З урахуванням цих параметрів визначають початковий вологовміст повітря  $X_0$  по співвідношенню, кг/кг

$$X_0 = 0,622 \frac{\varphi_0 p_{\text{нас}}}{B - \varphi_0 p_{\text{нас}}}, \quad (1.39)$$

де  $B$  – барометричний тиск, кПа;

–  $p_{\text{нас}}$  – тиск насиченого пара при температурі  $t_0$ , кПа.

Ентальпія зовнішнього повітря, кДж/кг

$$I_0 = c_r t_0 + (r_n + c_n t_0) X_0, \quad (1.40)$$

де  $c_r$  та  $c_n$  – відповідно питомі теплоємності сухого повітря та пари при  $t_0$ , кДж/(кг·К);

–  $r_n$  – питома теплота пароутворення при  $0^\circ\text{C}$ , кДж/кг.

Враховуючи, що абсолютний вологовміст повітря після нагрівання у калорифері залишається незмінним, тобто  $X_0 = X_1$ , знаходимо ентальпію нагрітого повітря на вході у сушарку при  $t_1$ , кДж/кг

$$I_1 = \bar{c}_{r_1} t_1 + (r_n + \bar{c}_{n_1} t_1) X_1, \quad (1.41)$$

де  $\bar{c}_{r_1}$  та  $\bar{c}_{п_1}$  – відповідно теплоємності повітря та пари при середній температурі  $t_{1,0} = 0,5(t_1 + t_0)$ , кДж/(кг·К).

Зміна сушильної здатності повітря (потенціалу повітря) відносно вологи, що випаровувалась, кДж/кг

$$\Delta = c_{ж}\theta_n - (q_m + q_d + q_n). \quad (1.42)$$

Ентальпія вологого повітря, що виходить з сушарки при температурі  $t_2$ , знаходиться з рівняння, кДж/кг

$$I_2 = \frac{\bar{c}_{r_2} t_2 \Delta + (X_1 \Delta - I_i)(r_n + \bar{c}_{n_2} t_2)}{\Delta - (r_n + \bar{c}_{n_2} t_2)}, \quad (1.43)$$

де  $\bar{c}_{r_2}$  та  $\bar{c}_{п_2}$  – відповідно теплоємності повітря та пари при середній температурі  $\bar{t}_{2,1} = 0,5(t_1 + t_2)$ .

Враховуючи слабку залежність теплоємності газів і парів від температури при  $t_1 \leq 200^\circ\text{C}$ , можна без великої похибки приймати

$$\bar{c}_{r_2} \approx \bar{c}_{r_1} \approx \bar{c}_r, \quad (1.44)$$

та

$$\bar{c}_{п_2} \approx \bar{c}_{п_1} \approx \bar{c}_п. \quad (1.45)$$

Підставляючи отримані значення  $I_1$  та  $I_2$  в рівняння (1.39), можна визначити масову витрату повітря  $L$ . Питому витрату повітря, що надходить до сушарки, кг/кг

$$l = L/W. \quad (1.46)$$

Абсолютний вологовміст повітря після сушарки

$$X_2 = X_1 + \frac{W}{L + L_{\text{пс}}}. \quad (1.47)$$

Середня об'ємна витрата повітря в сушарці, м<sup>3</sup>/год

$$\bar{V} = \frac{(L + L_{\text{пс}})(1 + \bar{X})}{\bar{p}_r}. \quad (1.48)$$

де  $\bar{X}$  та  $\bar{p}_r$  – вологовміст та щільність газу при середній температурі  $\bar{t}_{2,1} = 0.5(t_1 + t_2)$ .

Витрата тепла на підігрів повітря у калорифері, кДж/год

$$Q = L(I_1 - I_0). \quad (1.49)$$

Якщо для підігріву повітря використовується паровий калорифер, то витрата пари у ньому складає, кг/год

$$D = \frac{\sum Q}{\eta_c(i_n - i_k)}, \quad (1.50)$$

де  $\sum Q$  – сумарна витрата тепла в сушарці, що визначається по співвідношенню (1.27);

–  $\eta_c$  – коефіцієнт використання тепла у рубашці сушильного апарата.

При розрахунку будь-якої сушильної установки в якості вихідної інформації використовують такі дані:  $G_2$  – годинна продуктивність сушарки по висушеному матеріалу, кг/год;  $w_n$  та  $w_k$  – початкова і кінцева вологість матеріалу, %;  $\theta_n$  – початкова температура матеріалу, °С;  $\theta_{k \text{ max}}$  – максимально допустима кінцева температура матеріалу, °С;  $t_0, \varphi_0$  – температура і відносна вологість зовнішнього повітря, що поступає в нагрівальний пристрій сушарки;  $t_1$  – температура газу на вході в сушарку, °С;  $t_2$  – температура газу на виході з сушарки, °С. Крім цих даних, в залежності від конкретного типу апарату, потрібна додаткова інформація, зазначена у [23].

## 2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШКИ МАТЕРІАЛІВ В СУШИЛЬНОМУ БАРАБАНИ ДІЛЯНКИ ПОМЕЛУ ГЛИНИ ЗАТ «МІНІРАЛ»

### 2.1 Експериментальна частина

Експеримент – це найважливіша складова частина наукових досліджень. Його основою є науково поставлений досвід з точно враховуваними і керованими умовами.

Основною метою експерименту є виявлення властивостей досліджуваних об'єктів, перевірка справедливості гіпотез і на цій основі широкого і глибоке вивчення теми наукового дослідження [10].

В дипломному проекті було проведено експериментальну сушку піску, каоліну та жовтої глини, для дослідження механізмів та закономірностей видалення вологи в процесі сушіння.

Зміни в часі середніх за обсягом матеріалу, що висушується, вологовмісту  $\omega^c$  і температури  $t$  називають кінетикою сушіння. Закономірності  $\omega^c = f(\tau)$  і  $t = f(\tau)$  кладуть в основу визначення тривалості сушіння до заданого кінцевого вологовмісту, кількості випареної вологи і теплоти на сушку. Графічну залежність  $\omega^c = f(\tau)$  називають кривою сушки.

Зміна вмісту вологи в одиницю часу  $d\omega^c/d\tau$  називають швидкістю сушіння, а графічну залежність виду  $d\omega^c/d\tau = f(\omega^c)$ ,  $d\omega^c/d\tau = f(\tau)$  – кривими швидкості сушіння.

Як видно з рисунку 2.1, на кривій сушіння можна виділити ряд характерних періодів. Період прогрівання (ділянка  $0a$ ) характеризується збільшенням температури матеріалу від  $t_n$  до  $t_m$ , якщо  $< t_m$  (якщо  $t_n > t_m$ , то  $t_n$  знижується до  $t_m$ ), зменшенням середнього вологовмісту від  $\omega_n^c$  до проміжного значення і збільшення швидкості сушіння  $d\omega^c/d\tau$  від нуля до максимального значення  $N$ .

Ділянка  $ab$  носить назву періоду постійної швидкості або першого (I) періоду сушки. Зміна вмісту вологи в часі в цьому періоді відбувається лінійно

і залежить від умов теплообміну між сушильним і матеріалом, що висушується [11].

У періоді падаючої швидкості сушки або другий (II) період сушки при якому критичний вологовміст матеріалу тим більше гігроскопічного, чим більше його товщина. Температура матеріалу у II періоді (ділянка *бв*) безперервно підвищується, прагнучи до температури сушильного агента  $t_c$ , а швидкість сушіння безперервно знижується від свого максимального значення  $N$  до нуля. Швидкість сушіння приймає нульове значення при досягненні матеріалом рівноважного вологовмісту  $\omega^c_p$ , яке відповідає такій динамічній рівновазі, при якій потік вологи з матеріалу за рахунок випаровування і потік вологи до поверхні матеріалу з навколишнього середовища (конденсація) рівні, тобто кількість вологи в матеріалі залишається постійною у часі [11].

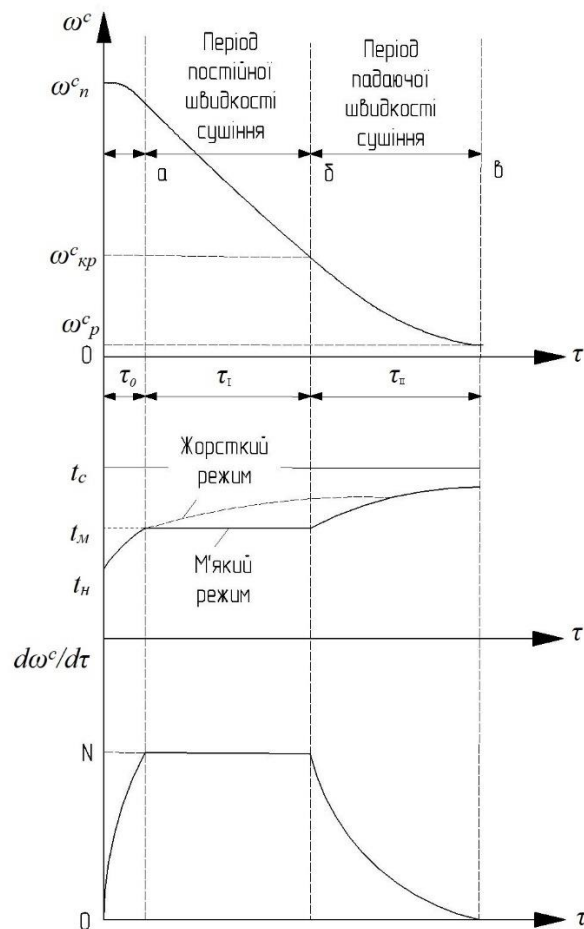


Рисунок 2.1 – Типові криві сушіння, швидкість сушіння та зміна температури матеріалу при конвективному способі підводу теплоти

Експеримент проводився при різних температурних режимах за допомогою сушильної шафи (див. рис. 2.2), електронного термометру та електронних ваг.

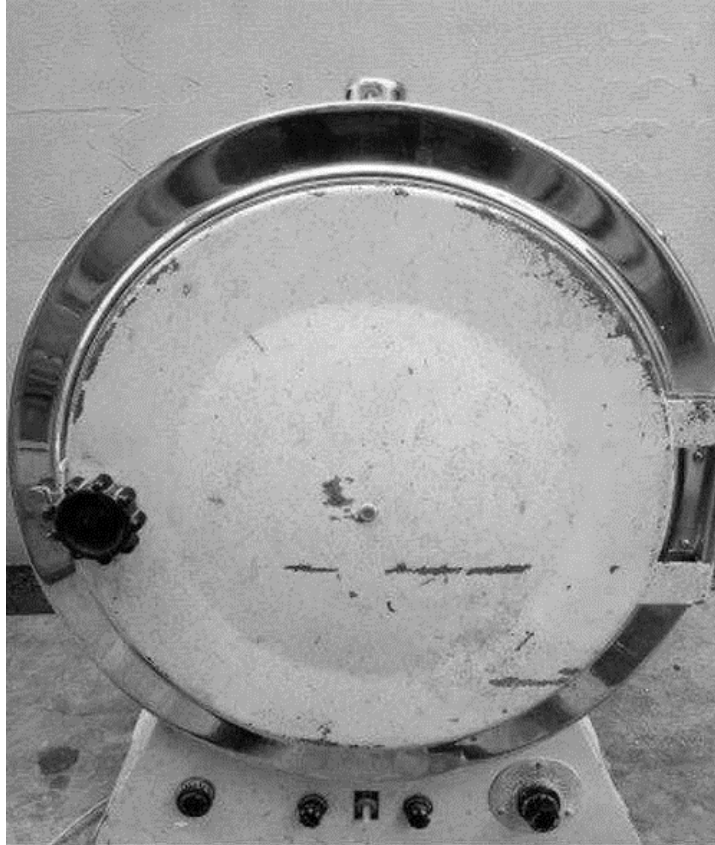


Рисунок 2.2 – Сушильна шафа

Сушильна шафа з терморегулятором призначена для сушки і стерилізації лабораторного посуду, для висушування різних матеріалів до постійної маси. Сушильну шафу виготовляють з термостійких матеріалів (металу і азбесту) і розраховують на діапазон температур в робочій камері від 40 °С до 200 °С. Тривалість розігрівання до граничної температури близько 1,5 години. Усередині шафа обладнана полками з дірчастих листів металу, на яких розміщують посуд або висушуваний матеріал [12].

Вимірювання проводились кожні 3 хвилини.

За даними вимірювань побудовані графіки кривих сушіння та швидкості сушіння.

Таблиця 2.1 – Дані вимірювань при  $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

| №  | Маса тигелю та матеріалу, г |        |             |
|----|-----------------------------|--------|-------------|
|    | Пісок                       | Каолін | Жовта глина |
| 0  | 31,854                      | 31,571 | 35,721      |
| 1  | 31,571                      | 31,286 | 35,504      |
| 2  | 31,08                       | 30,777 | 35,017      |
| 3  | 30,634                      | 30,286 | 34,47       |
| 4  | 30,337                      | 29,701 | 33,886      |
| 5  | 30,318                      | 29,23  | 33,387      |
| 6  | 30,316                      | 28,817 | 32,978      |
| 7  | 30,315                      | 28,39  | 32,596      |
| 8  | 30,308                      | 28,064 | 32,32       |
| 9  | 30,31                       | 27,806 | 32,157      |
| 10 | 30,305                      | 27,642 | 32,071      |
| 11 | 30,312                      | 27,572 | 32,011      |
| 12 | 30,308                      | 27,554 | 31,991      |
| 13 | 30,301                      | 27,54  | 31,979      |
| 14 | 30,306                      | 27,536 | 31,971      |
| 15 | 30,305                      | 27,533 | 31,969      |
| 16 | 30,311                      | 27,536 | 31,965      |
| 17 | 30,307                      | 27,528 | 31,965      |
| 18 | 30,311                      | 27,532 | 31,964      |

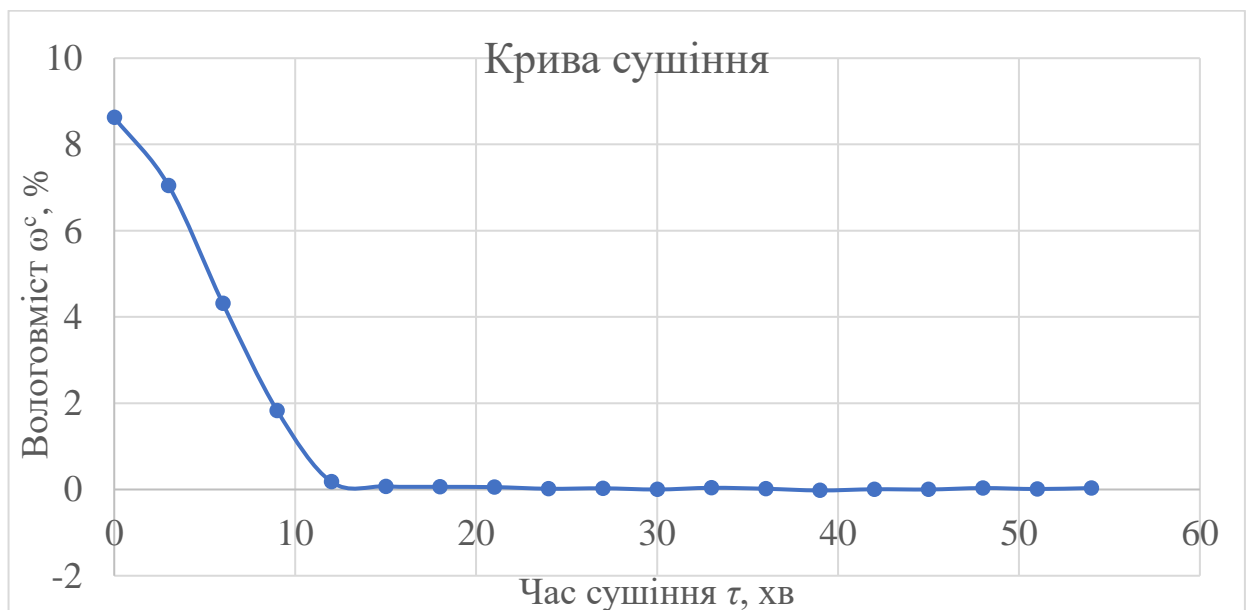
Рисунок 2.3 – Крива сушіння для піску при  $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рисунок 2.4 – Крива швидкості сушіння для піску при  $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$

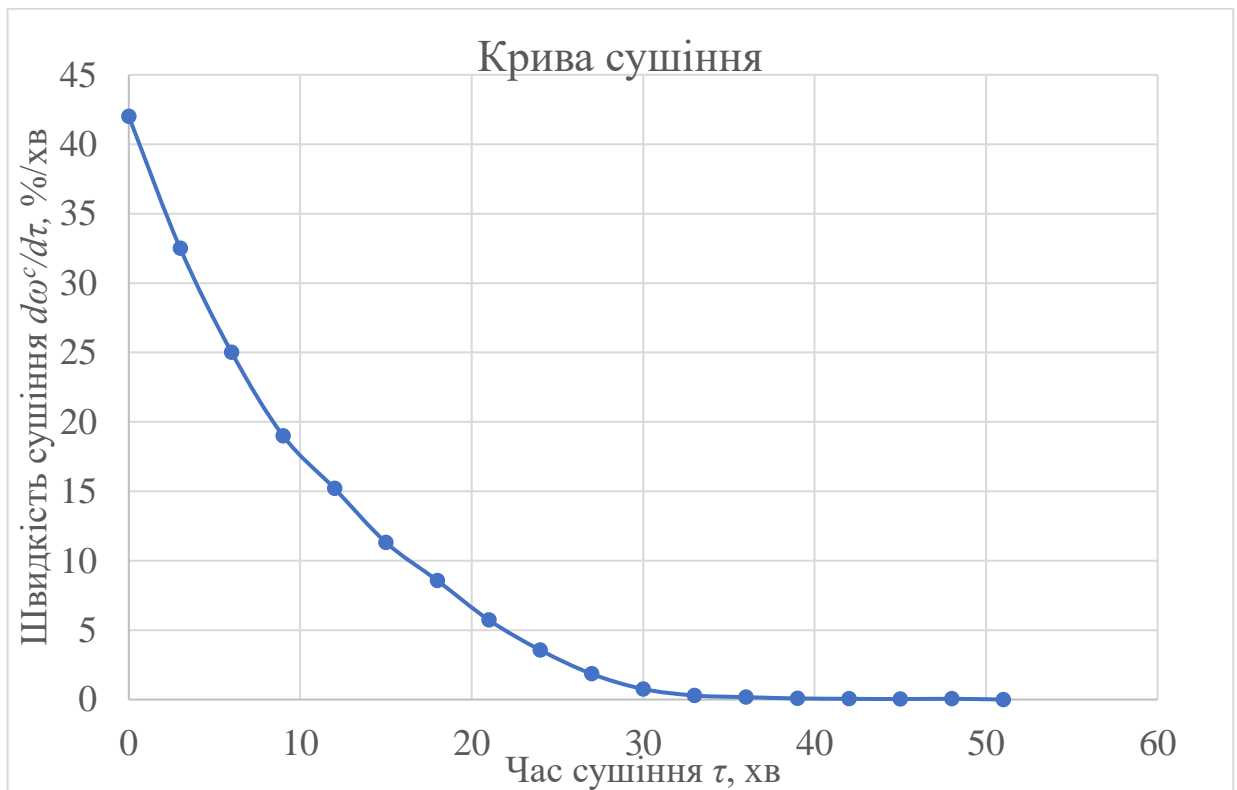


Рисунок 2.5 – Крива сушіння для каоліну при  $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$



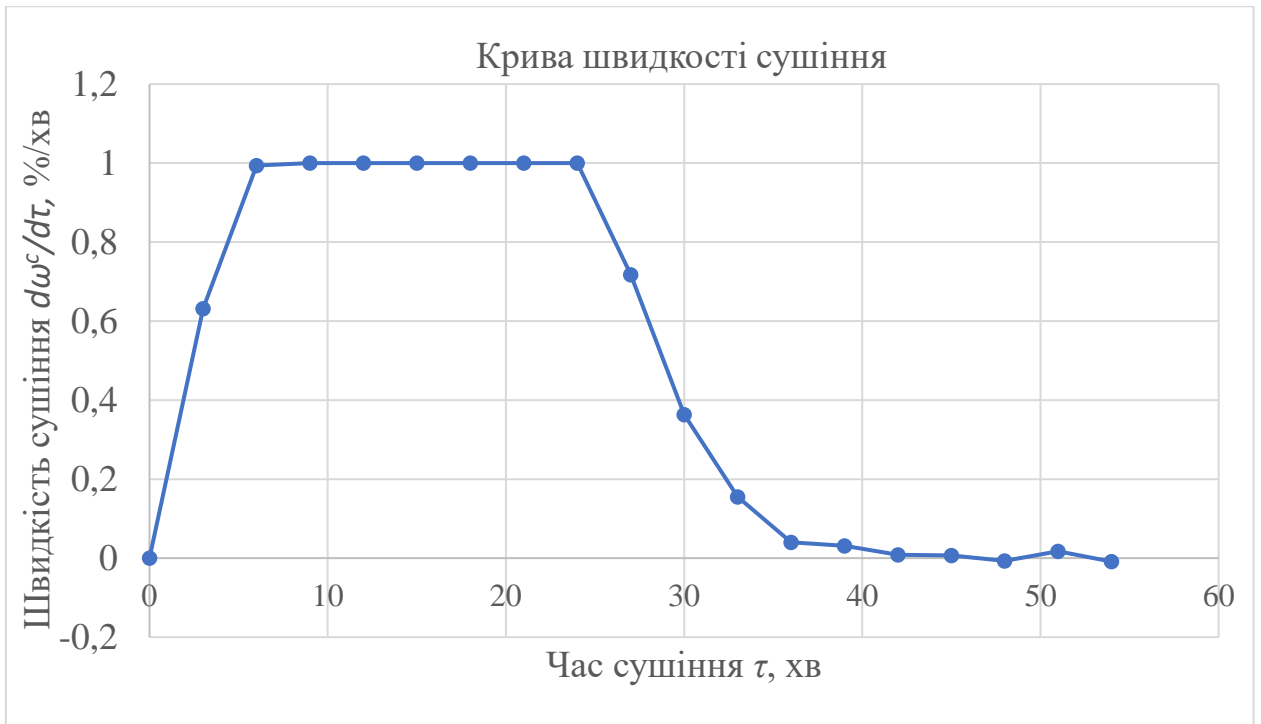


Рисунок 2.6 – Крива швидкості сушіння для каоліну при  $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$

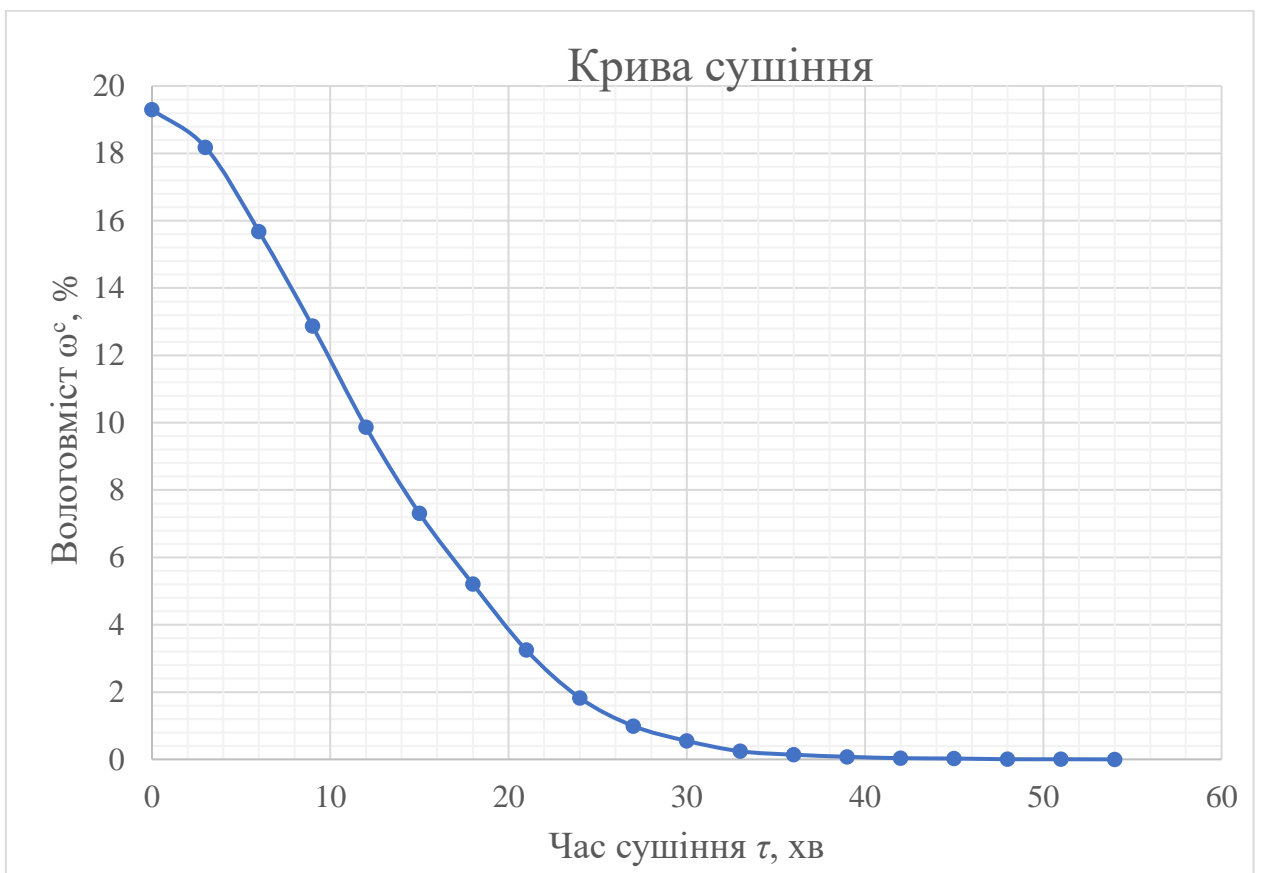


Рисунок 2.7 – Крива сушіння для жовтої глини при  $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$

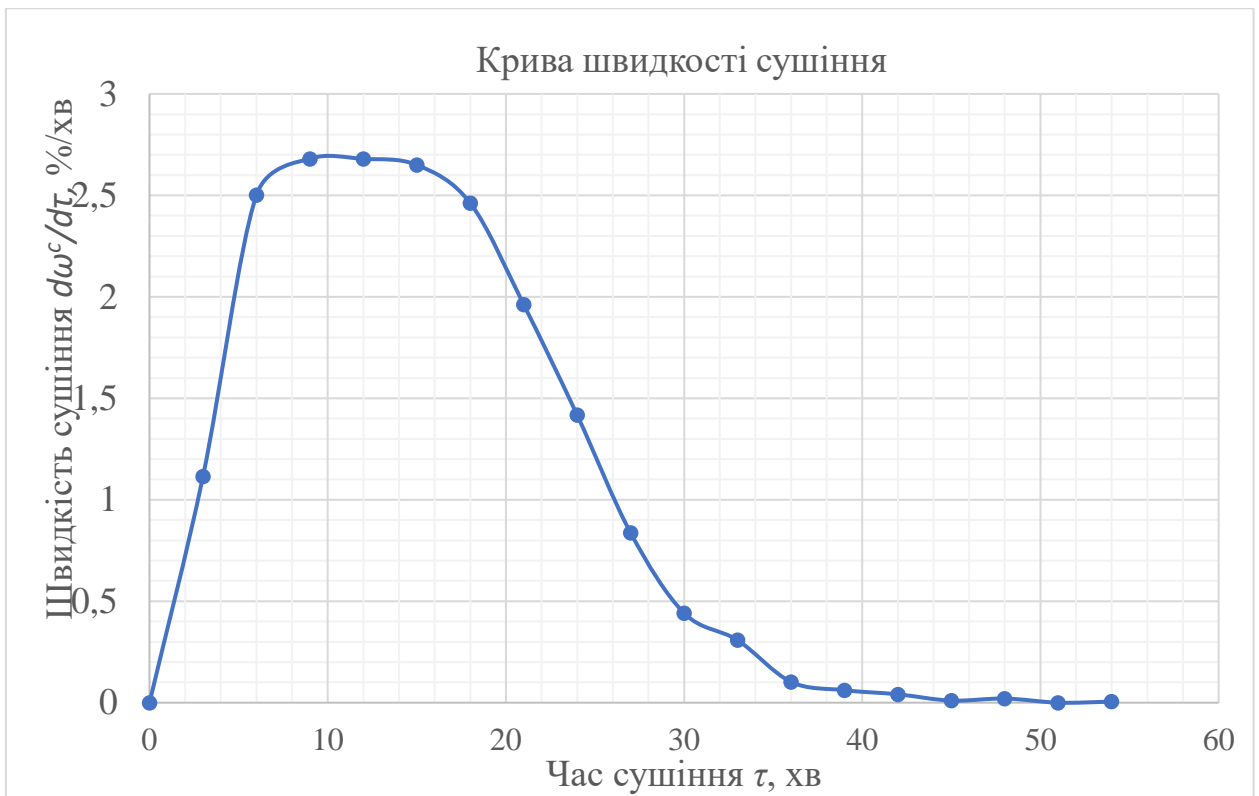


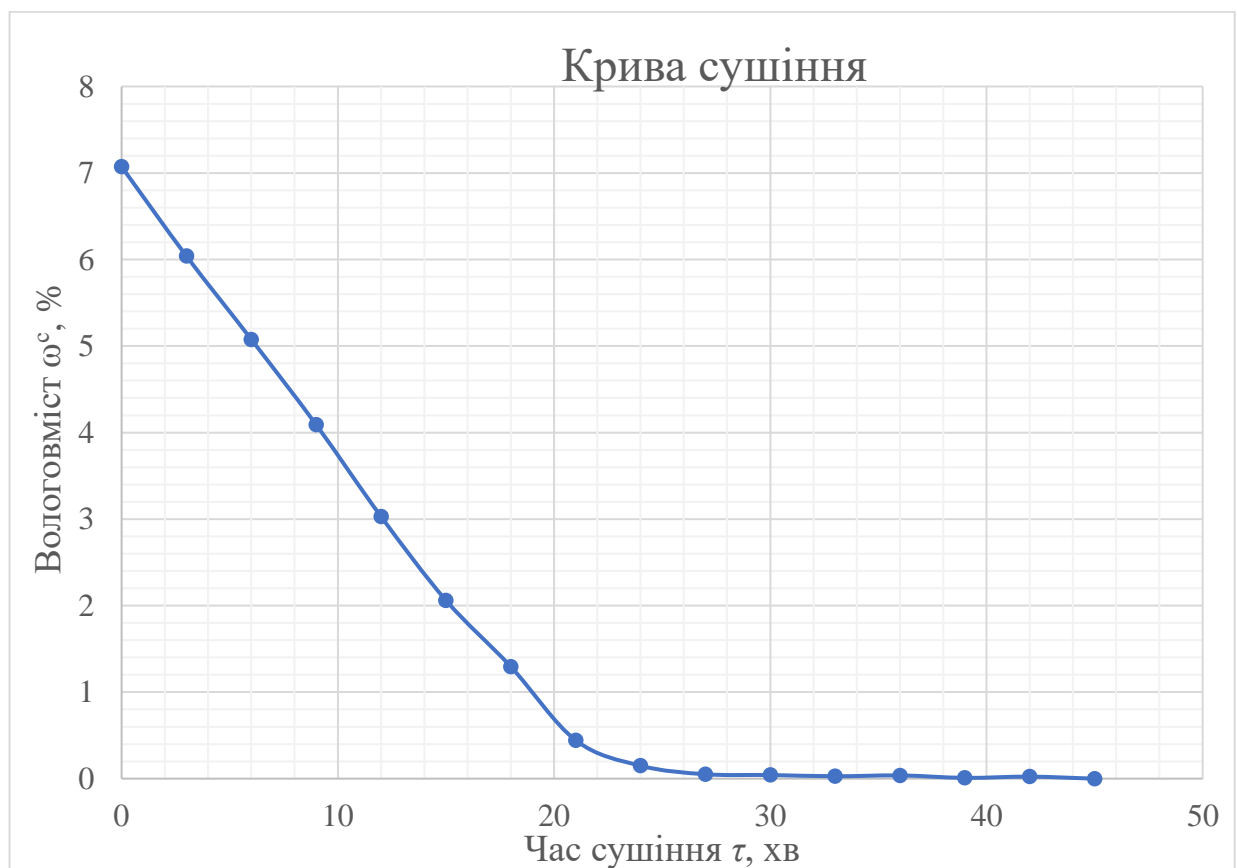
Рисунок 2.8 – Крива швидкості сушіння для жовтої глини при  $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$

Таблиця 2.2 – Дані вимірювань при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

| №  | Маса тигелю та матеріалу, г |        |             |
|----|-----------------------------|--------|-------------|
|    | Пісок                       | Каолін | Жовта глина |
| 1  | 2                           | 3      | 4           |
| 0  | 35,113                      | 27,809 | 34,7        |
| 1  | 34,892                      | 27,668 | 34,545      |
| 2  | 34,686                      | 27,44  | 34,312      |
| 3  | 34,475                      | 27,162 | 34,012      |
| 4  | 34,248                      | 26,879 | 33,697      |
| 5  | 34,041                      | 26,592 | 33,407      |
| 6  | 33,877                      | 26,315 | 33,117      |
| 7  | 33,695                      | 26,06  | 32,75       |
| 8  | 33,632                      | 25,757 | 32,442      |
| 9  | 33,611                      | 25,501 | 32,193      |
| 10 | 33,609                      | 25,272 | 31,978      |
| 11 | 33,606                      | 25,035 | 31,774      |

Продовження таблиці 2.2

| 1  | 2      | 3      | 4      |
|----|--------|--------|--------|
| 12 | 33,608 | 24,81  | 31,573 |
| 13 | 33,602 | 24,58  | 31,386 |
| 14 | 33,605 | 24,361 | 31,224 |
| 15 | 33,6   | 24,159 | 31,086 |
| 16 | –      | 24,058 | 30,976 |
| 17 | –      | 23,844 | 30,845 |
| 18 | –      | 23,688 | 30,785 |
| 19 | –      | 23,552 | 30,74  |
| 20 | –      | 23,427 | 30,708 |
| 21 | –      | 23,329 | 30,686 |
| 22 | –      | 23,267 | 30,669 |
| 23 | –      | 23,23  | 30,663 |
| 24 | –      | 23,211 | 30,657 |
| 25 | –      | 23,197 | 30,649 |
| 26 | –      | 23,191 | 30,645 |

Рисунок 2.9 – Крива сушіння для піску при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

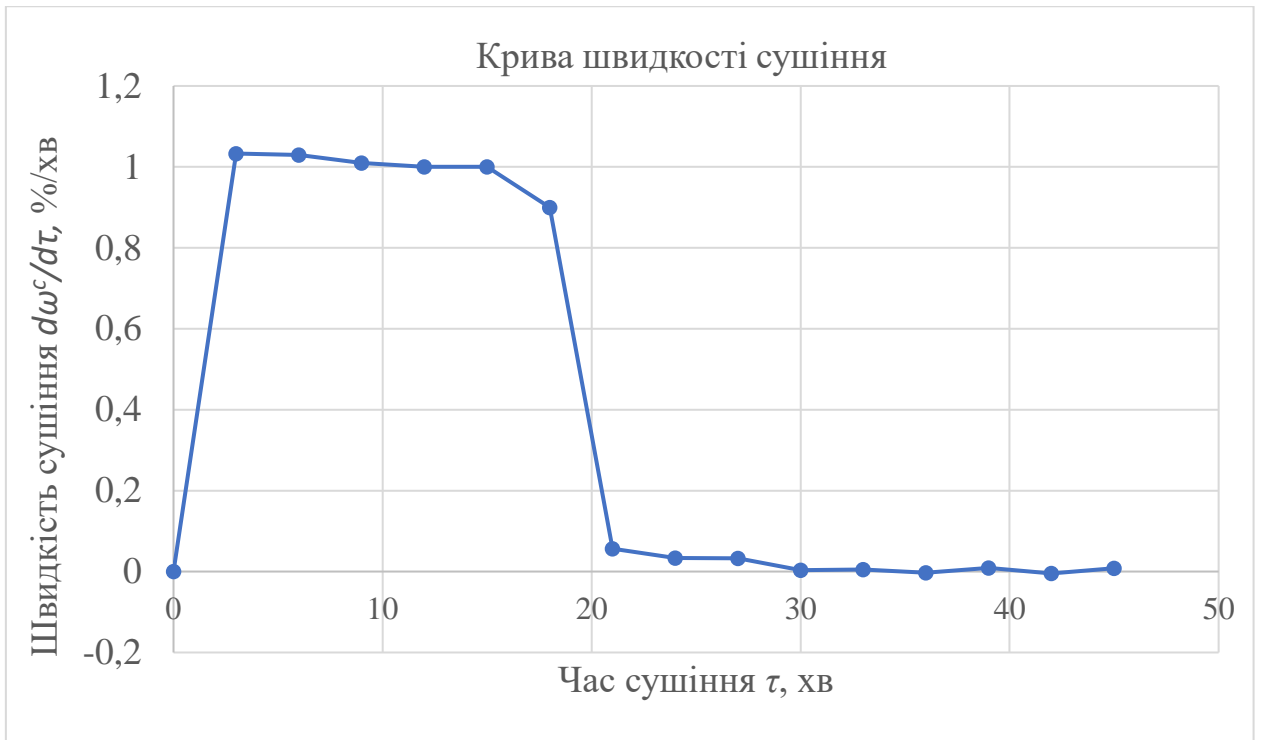


Рисунок 2.10 – Крива швидкості сушіння для піску при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

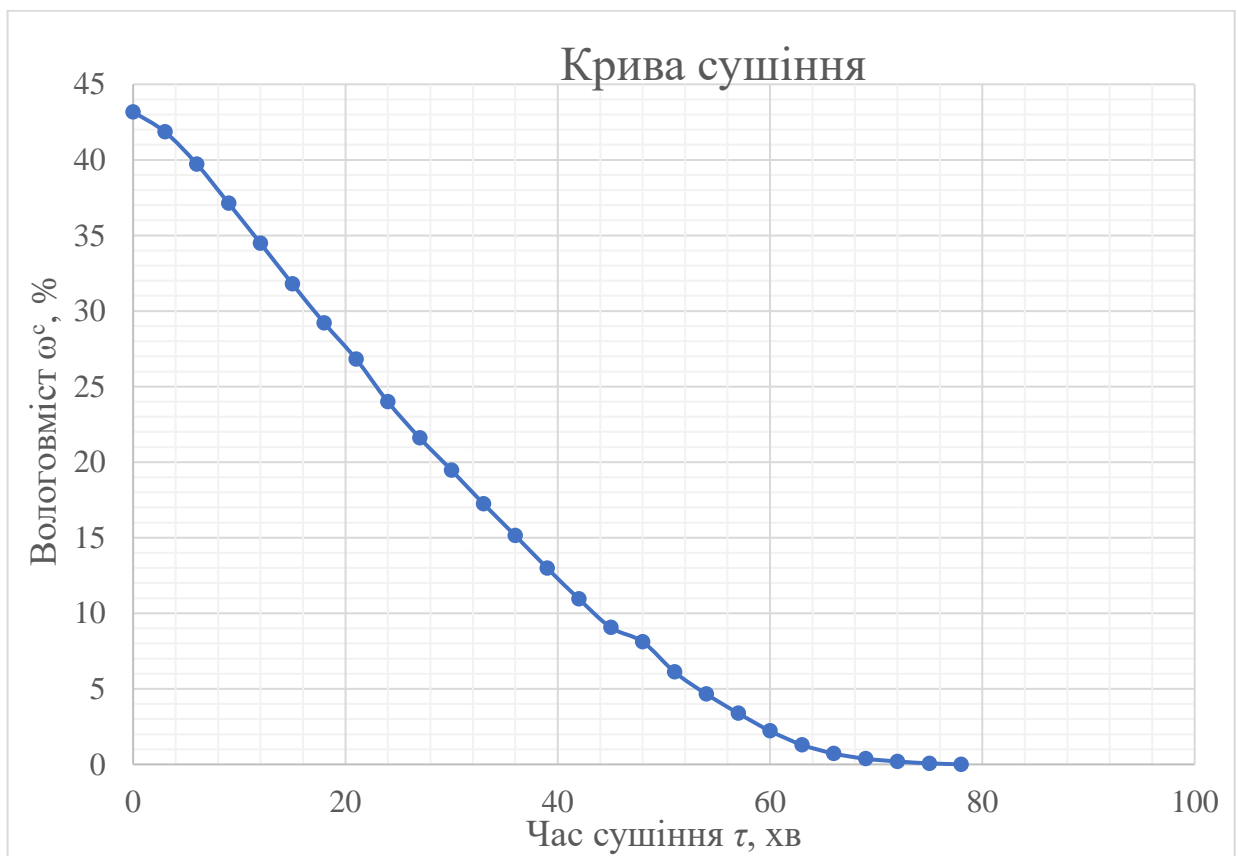


Рисунок 2.11 – Крива сушіння для каоліну при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

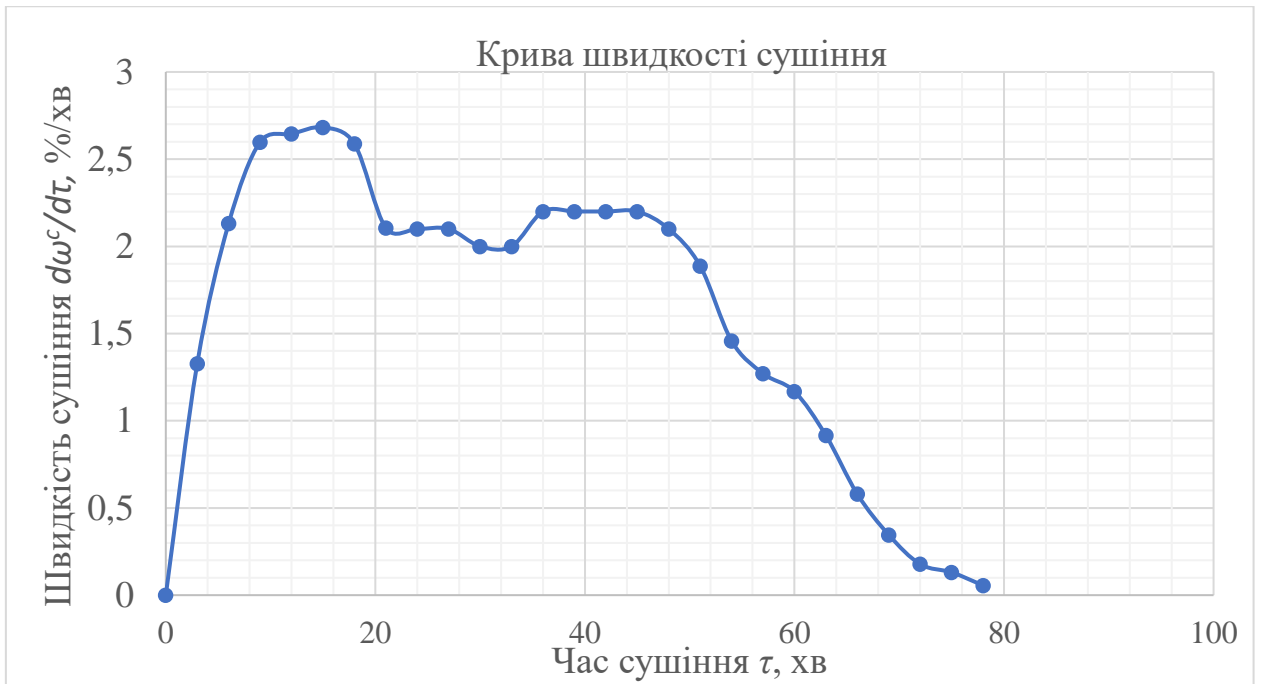


Рисунок 2.12 – Крива швидкості сушіння для каоліну при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

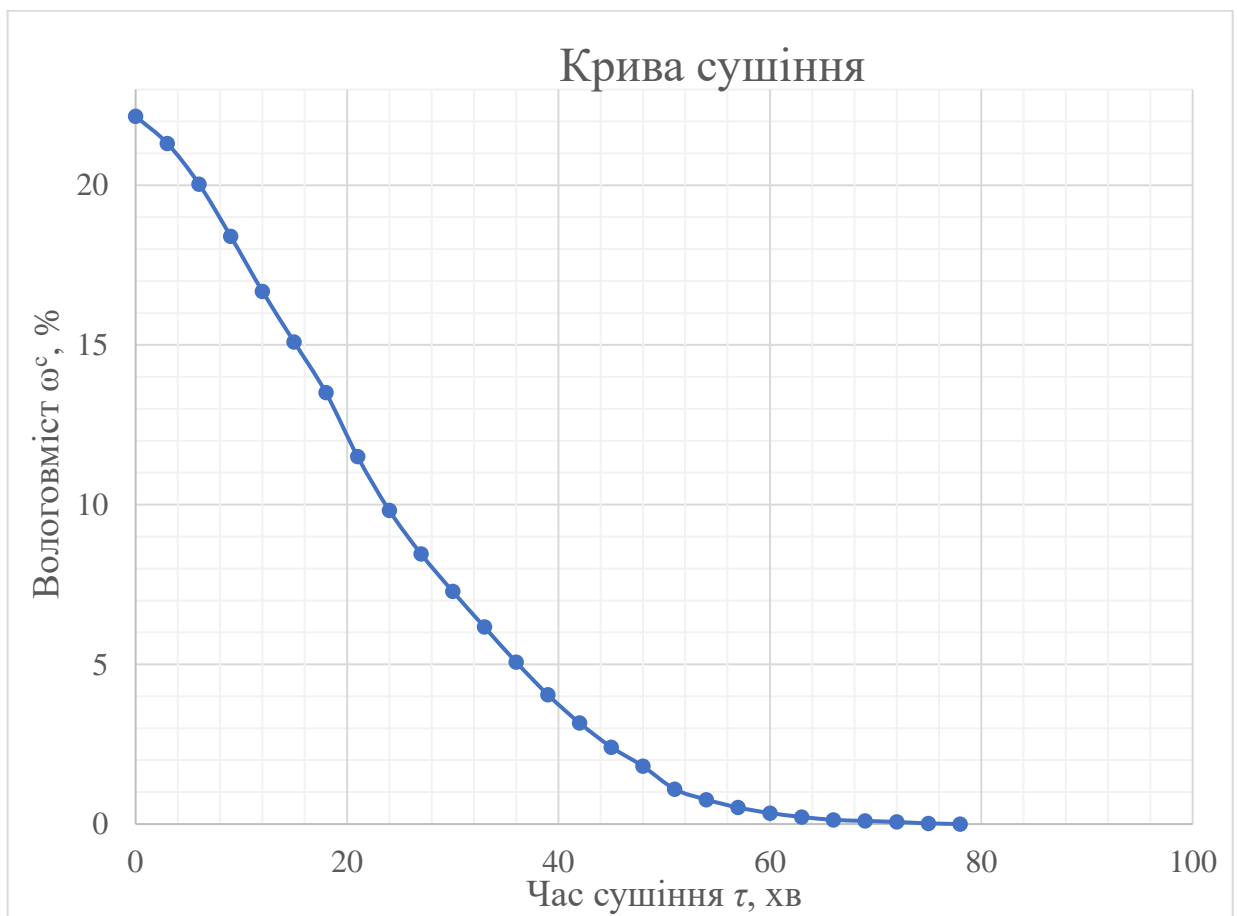


Рисунок 2.13 – Крива сушіння для жовтої глини при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

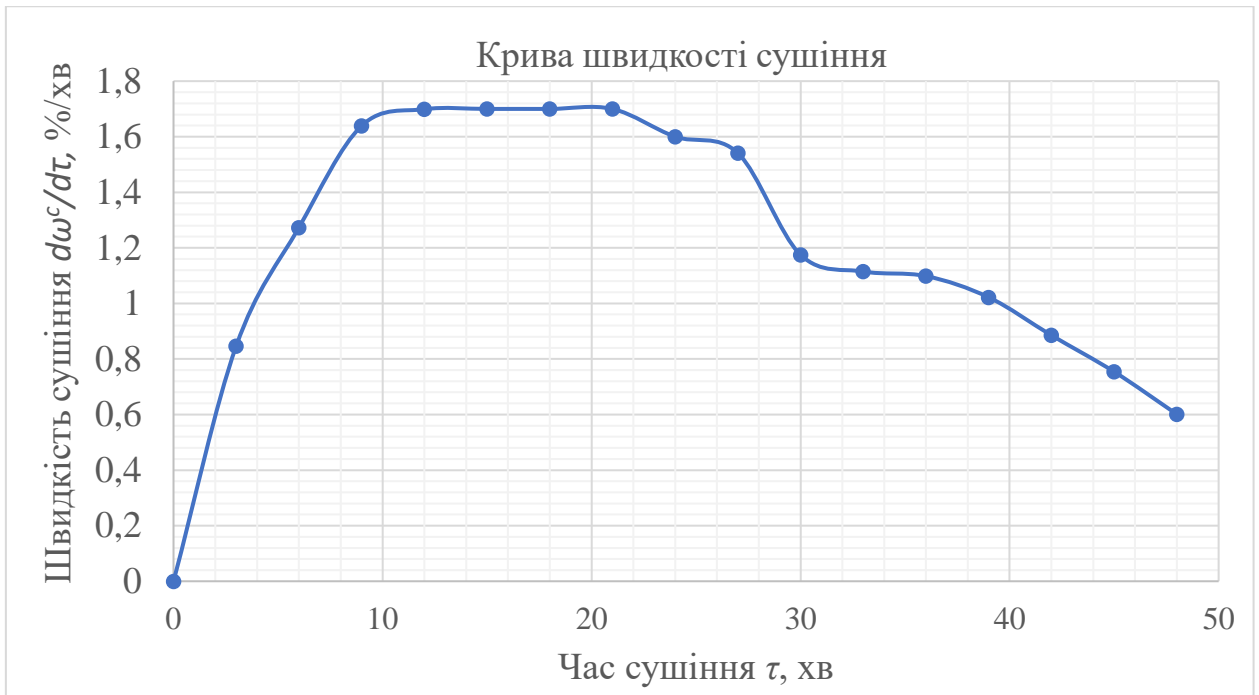


Рисунок 2.14 – Крива швидкості сушіння для жовтої глини при  $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$

Таблиця 2.3 – Дані вимірювань при  $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$

| № | Маса тигелю та матеріалу, г |        |             |
|---|-----------------------------|--------|-------------|
|   | Пісок                       | Каолін | Жовта глина |
| 1 | 2                           | 3      | 4           |
| 0 | 26,69                       | 31,12  | 32,295      |
| 1 | 26,544                      | 31,002 | 32,188      |
| 2 | 26,405                      | 30,814 | 32,02       |
| 3 | 26,269                      | 30,626 | 31,855      |
| 4 | 26,152                      | 30,427 | 31,688      |
| 5 | 26,002                      | 30,13  | 31,442      |
| 6 | 25,922                      | 29,876 | 31,255      |
| 7 | 25,884                      | 29,524 | 30,978      |
| 8 | 25,88                       | 29,297 | 30,807      |
| 9 | 25,846                      | 29,09  | 30,635      |

Продовження таблиці 2.3

| 1  | 2      | 3      | 4      |
|----|--------|--------|--------|
| 10 | 25,846 | 28,883 | 30,471 |
| 11 | 25,846 | 28,685 | 30,315 |
| 12 | –      | 28,504 | 30,169 |
| 13 | –      | 28,315 | 30,03  |
| 14 | –      | 28,136 | 29,901 |
| 15 | –      | 27,965 | 29,851 |
| 16 | –      | 27,801 | 29,715 |
| 17 | –      | 27,645 | 29,593 |
| 18 | –      | 27,492 | 29,477 |
| 19 | –      | 27,349 | 29,383 |
| 20 | –      | 27,228 | 29,287 |
| 21 | –      | 27,052 | 29,201 |
| 22 | –      | 26,866 | 29,127 |
| 23 | –      | 26,683 | 29,062 |
| 24 | –      | 26,525 | 29,006 |
| 25 | –      | 26,381 | 28,963 |
| 26 | –      | 26,177 | 28,928 |
| 27 | –      | 26,04  | 28,909 |
| 28 | –      | 25,881 | 28,884 |
| 29 | –      | 25,748 | 28,87  |
| 30 | –      | 25,624 | 28,866 |
| 31 | –      | 25,496 | 28,851 |
| 32 | –      | 25,346 | 28,845 |
| 33 | –      | 25,265 | 32,188 |
| 34 | –      | 25,177 | 32,02  |
| 35 | –      | 25,107 | 31,855 |
| 36 | –      | 25,061 | 31,688 |

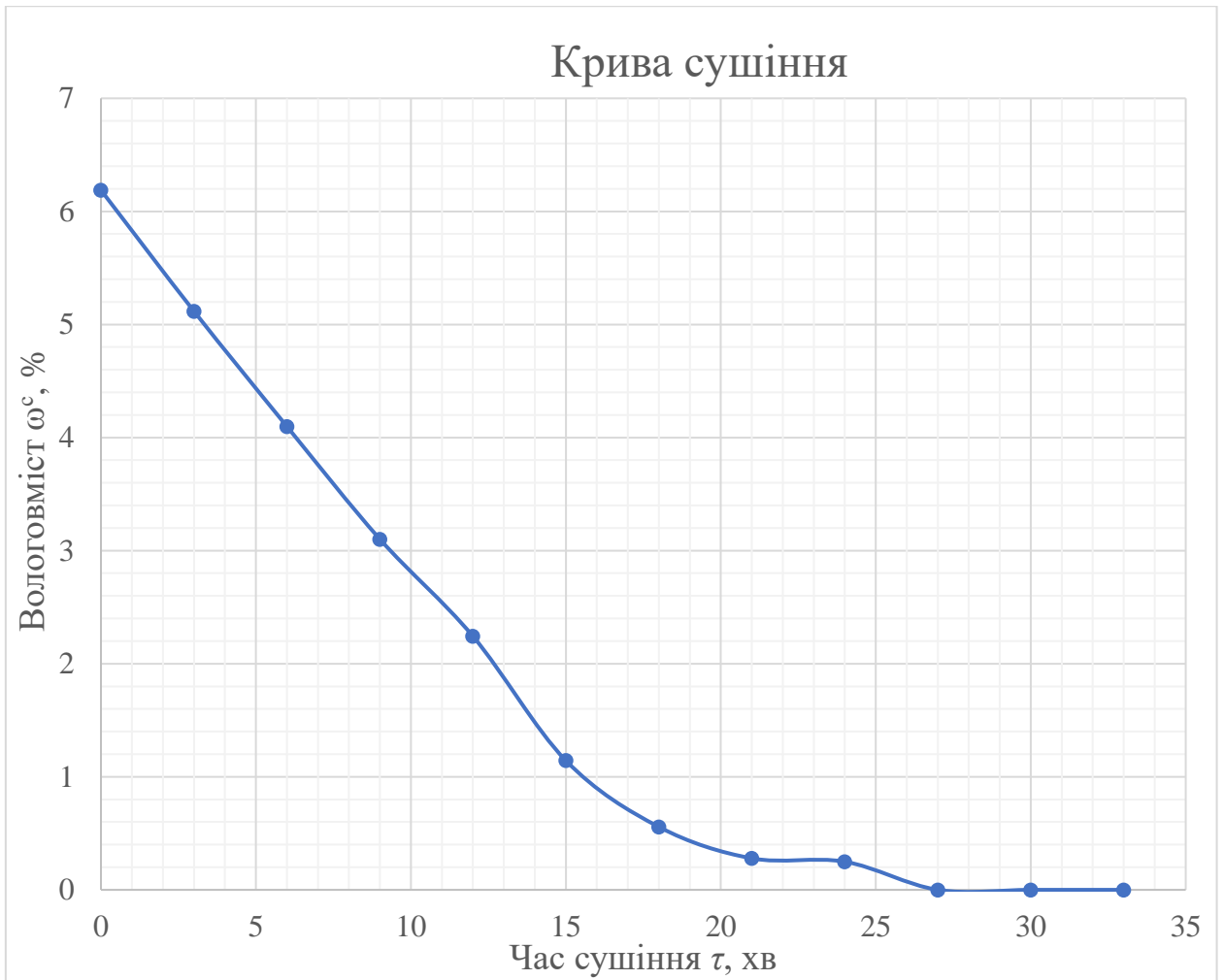


Рисунок 2.15 – Крива сушіння для піску при  $t = 80^\circ\text{C}$

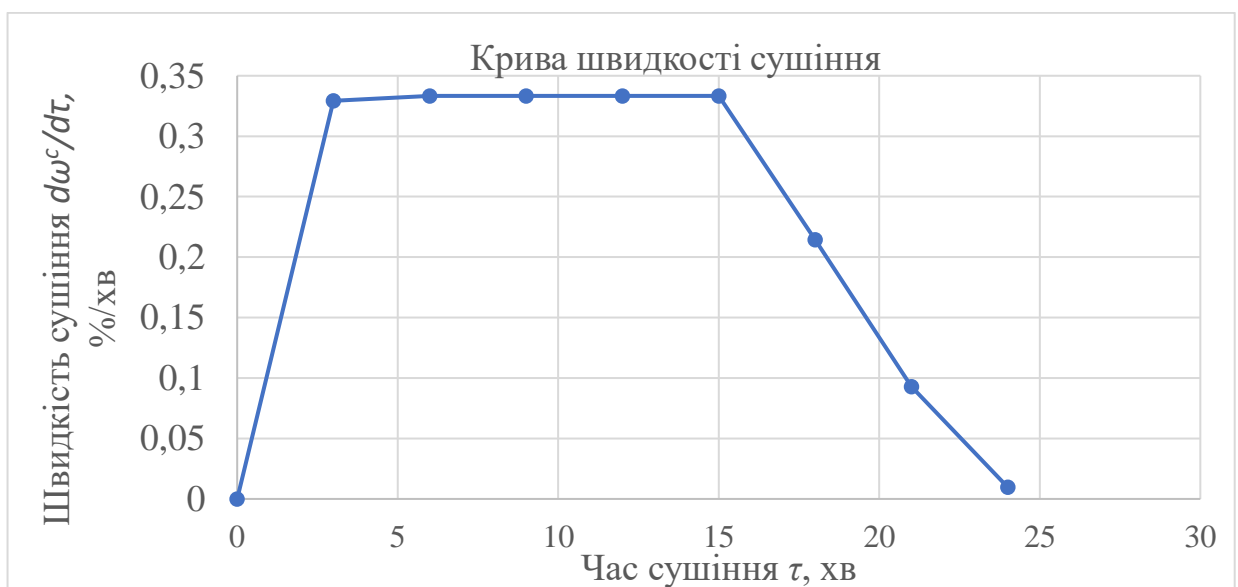


Рисунок 2.16 – Крива швидкості сушіння для піску при  $t = 80^\circ\text{C}$



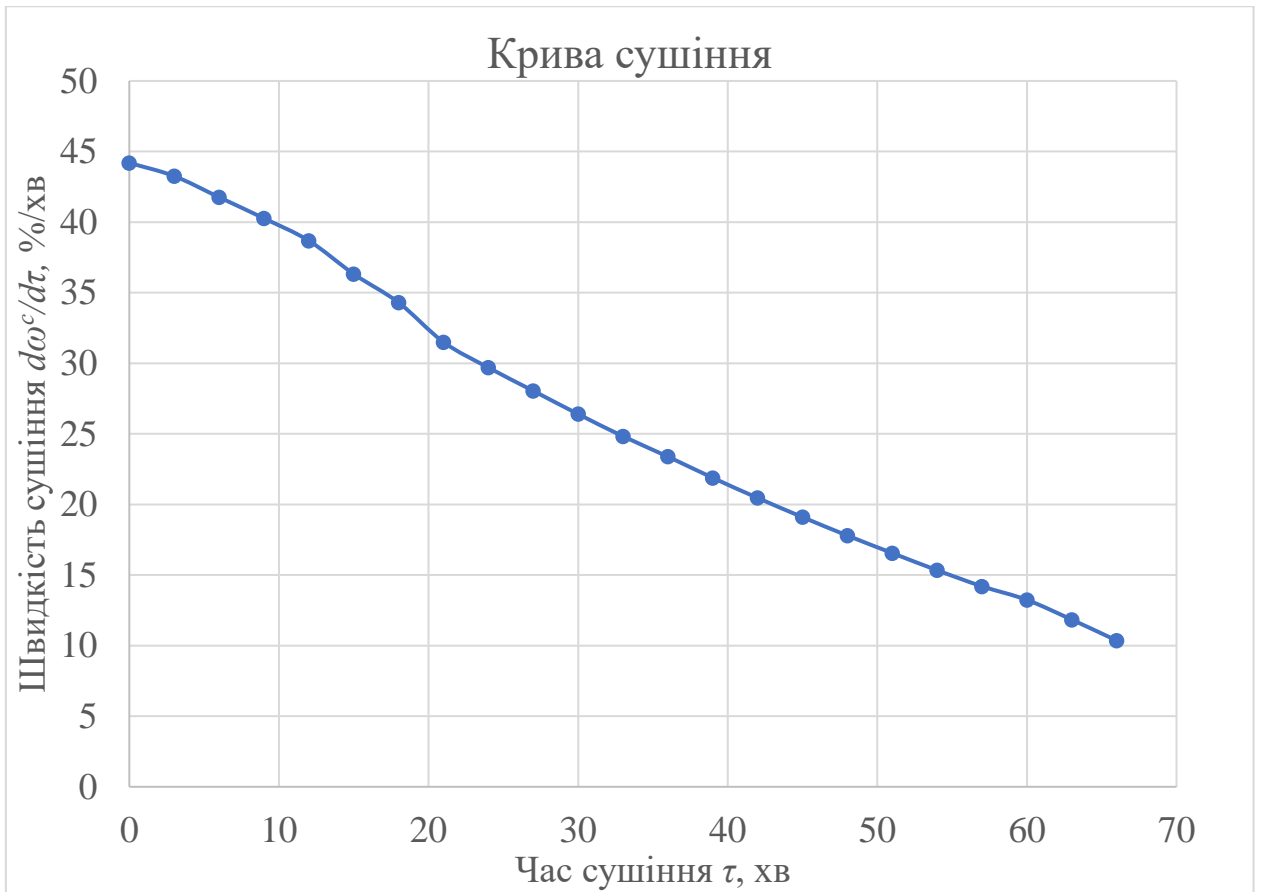


Рисунок 2.17 – Крива сушіння для каоліну при  $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$

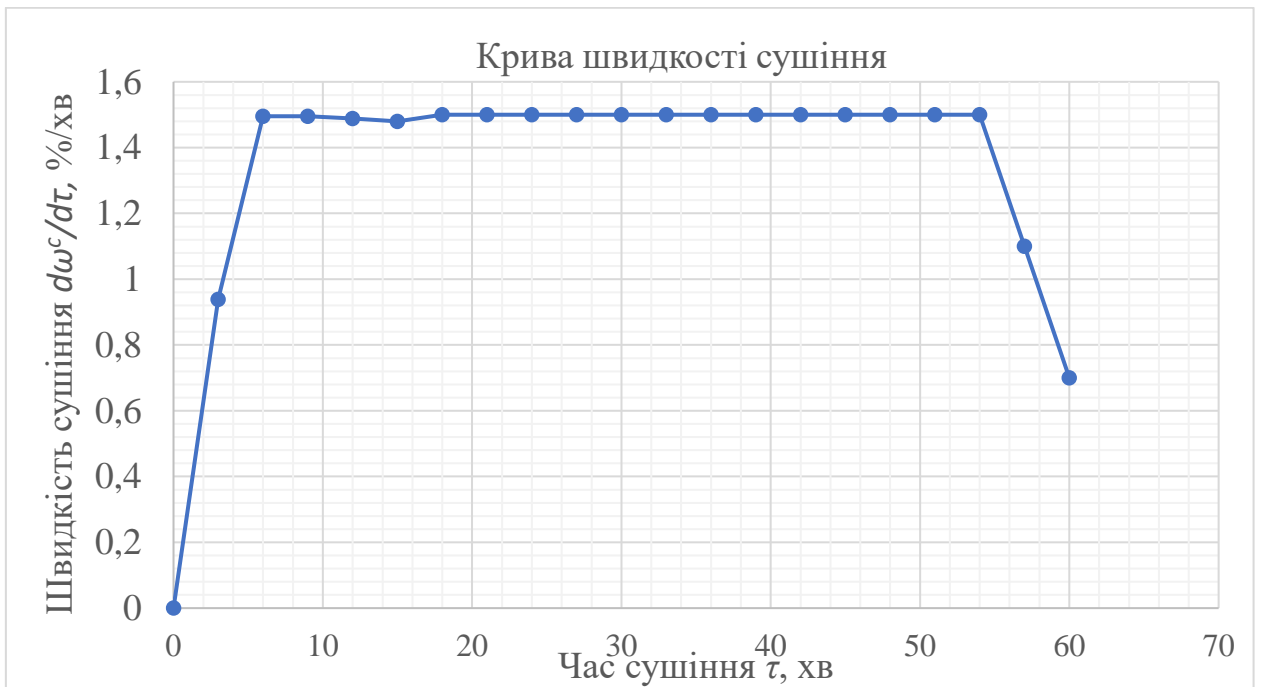


Рисунок 2.18 – Крива швидкості сушіння для каоліну при  $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$

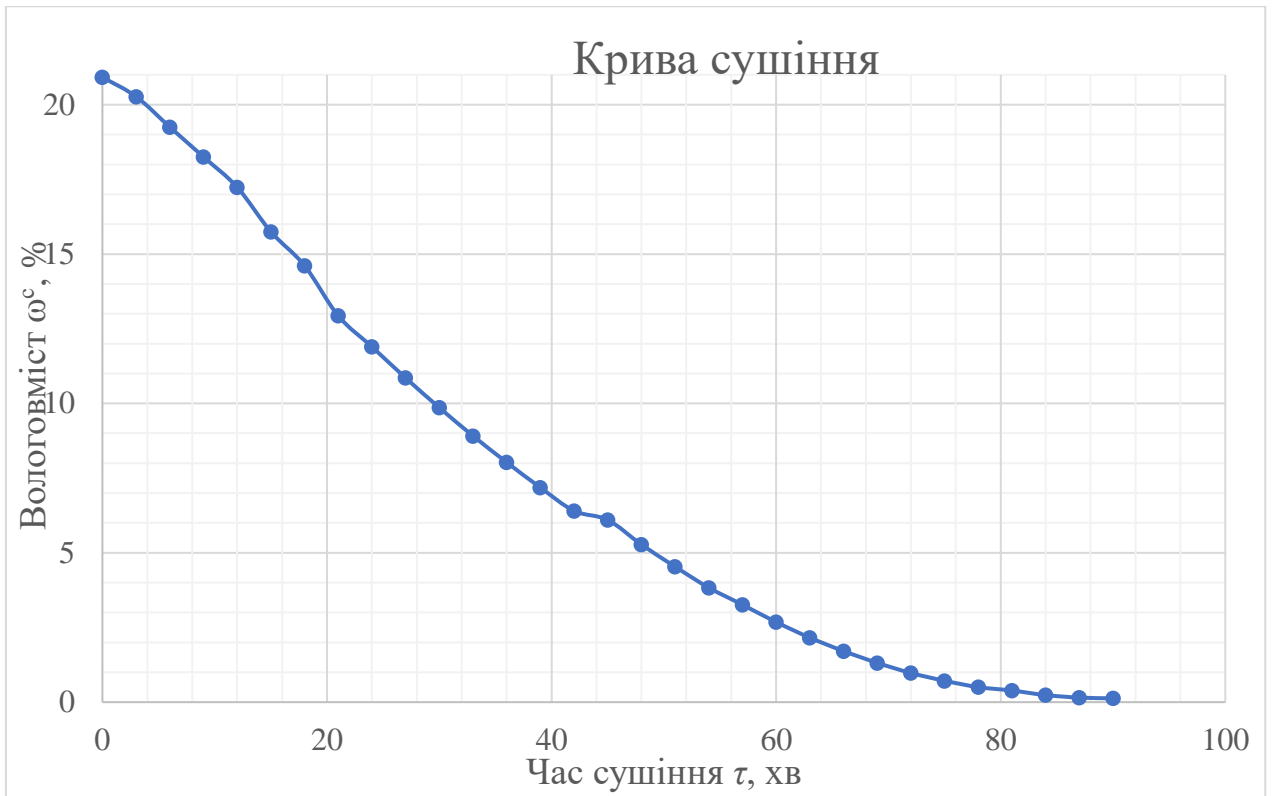


Рисунок 2.19 – Крива сушіння для жовтої глини при  $t = 80$  °C

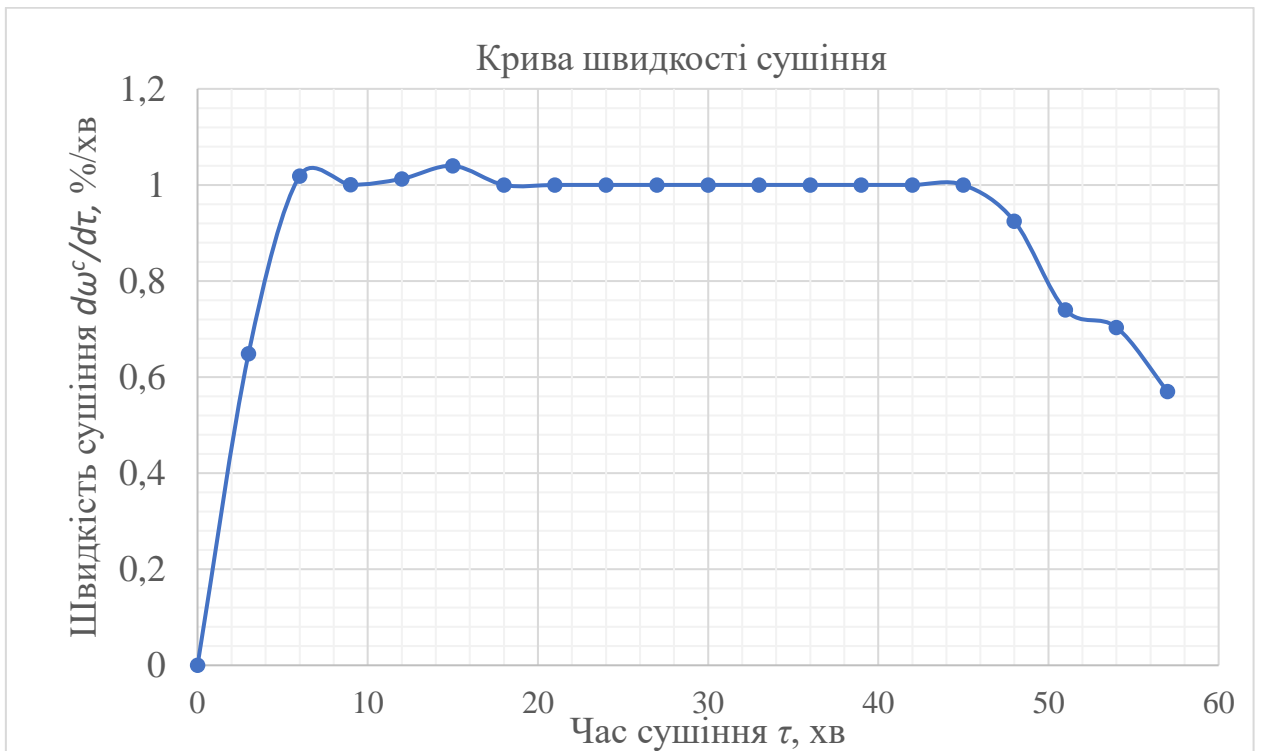


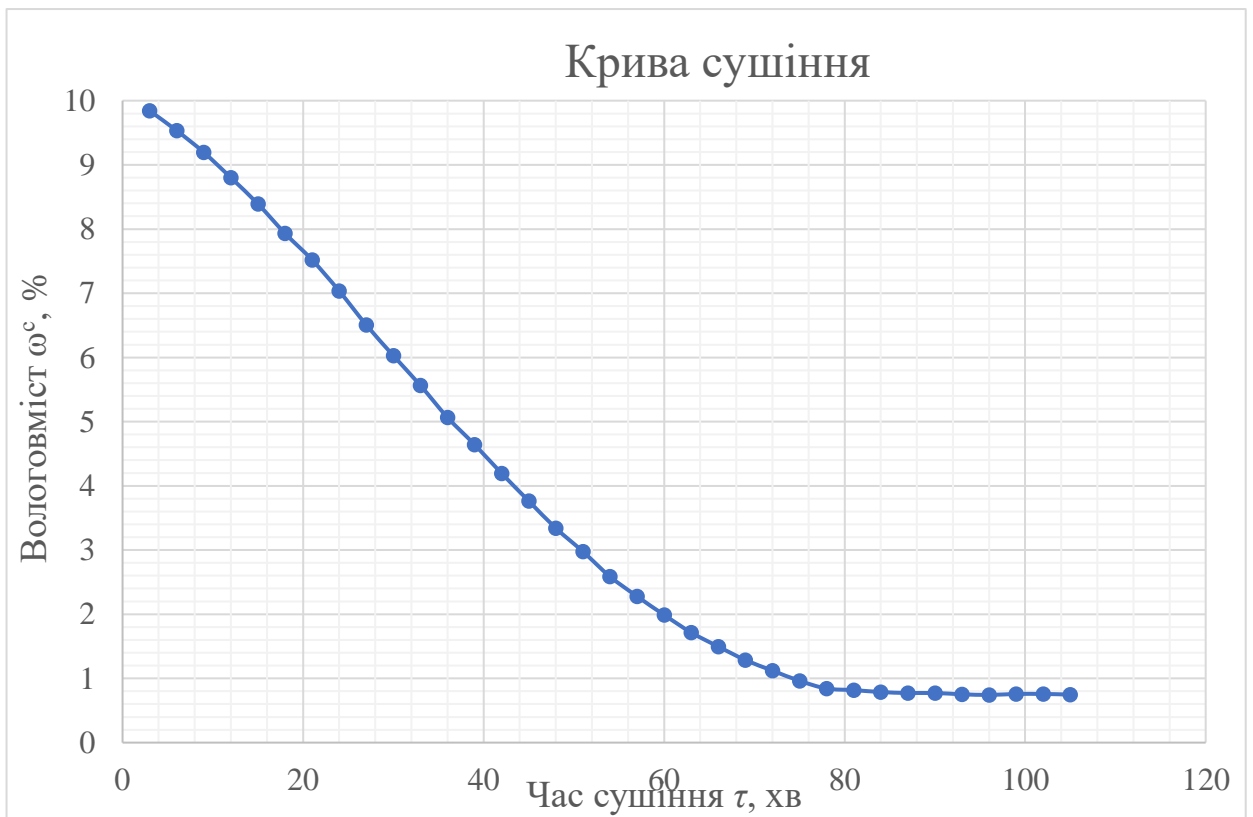
Рисунок 2.20 – Крива швидкості сушіння для жовтої глини у при  $t = 80$  °C

Таблиця 2.4 – Дані вимірювань при  $t = 60$  °С

| №  | Маса тигелю та матеріалу, г |        |             |
|----|-----------------------------|--------|-------------|
|    | Пісок                       | Каолін | Жовта глина |
| 1  | 2                           | 3      | 4           |
| 0  | 34,298                      | 29,265 | 32,01       |
| 1  | 34,236                      | 29,203 | 31,971      |
| 2  | 34,174                      | 29,147 | 31,906      |
| 3  | 34,106                      | 29,058 | 31,81       |
| 4  | 34,027                      | 28,967 | 31,727      |
| 5  | 33,945                      | 28,876 | 31,644      |
| 6  | 33,853                      | 28,784 | 31,562      |
| 7  | 33,77                       | 28,682 | 31,467      |
| 8  | 33,673                      | 28,583 | 31,375      |
| 9  | 33,567                      | 28,485 | 31,275      |
| 10 | 33,471                      | 28,382 | 31,179      |
| 11 | 33,378                      | 28,282 | 31,079      |
| 12 | 33,278                      | 28,187 | 30,986      |
| 13 | 33,193                      | 28,089 | 30,892      |
| 14 | 33,103                      | 27,989 | 30,8        |
| 15 | 33,017                      | 27,886 | 30,727      |
| 16 | 32,932                      | 27,78  | 30,617      |
| 17 | 32,859                      | 27,679 | 30,519      |
| 18 | 32,781                      | 27,578 | 30,426      |
| 19 | 32,719                      | 27,482 | 30,33       |
| 20 | 32,661                      | 27,376 | 30,236      |
| 21 | 32,606                      | 27,275 | 30,145      |
| 22 | 32,562                      | 27,175 | 30,057      |
| 23 | 32,52                       | 27,074 | 29,966      |
| 24 | 32,487                      | 26,964 | 29,881      |
| 25 | 32,455                      | 26,841 | 29,778      |
| 26 | 32,431                      | 26,733 | 29,696      |
| 27 | 32,426                      | 26,634 | 29,618      |
| 28 | 32,42                       | 26,529 | 29,546      |
| 29 | 32,417                      | 26,425 | 29,469      |
| 30 | 32,417                      | 26,325 | 29,401      |
| 31 | 32,413                      | 26,229 | 29,336      |
| 32 | 32,411                      | 26,133 | 29,269      |

Продовження таблиці 2.4

| 1  | 2      | 3      | 4      |
|----|--------|--------|--------|
| 33 | 32,414 | 26,038 | 29,206 |
| 34 | 32,414 | 25,943 | 29,155 |
| 35 | 32,412 | 25,849 | 29,1   |
| 36 | 34,236 | 25,765 | 29,048 |
| 37 | 34,174 | 25,678 | 29     |
| 38 | 34,106 | 25,584 | 28,96  |
| 39 | 34,027 | 25,504 | 28,918 |
| 40 | 33,945 | 25,423 | 28,882 |
| 41 | 33,853 | 25,337 | 28,843 |
| 42 | 33,77  | 25,263 | 28,816 |
| 43 | 33,673 | 25,182 | 28,785 |
| 44 | 33,567 | 25,107 | 28,756 |
| 45 | 33,471 | 25,017 | 28,734 |
| 46 | 33,378 | 24,938 | 28,713 |
| 47 | 33,278 | 24,872 | 28,693 |
| 48 | 33,193 | 24,803 | 28,675 |

Рисунок 2.21 – Крива сушіння для піску при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

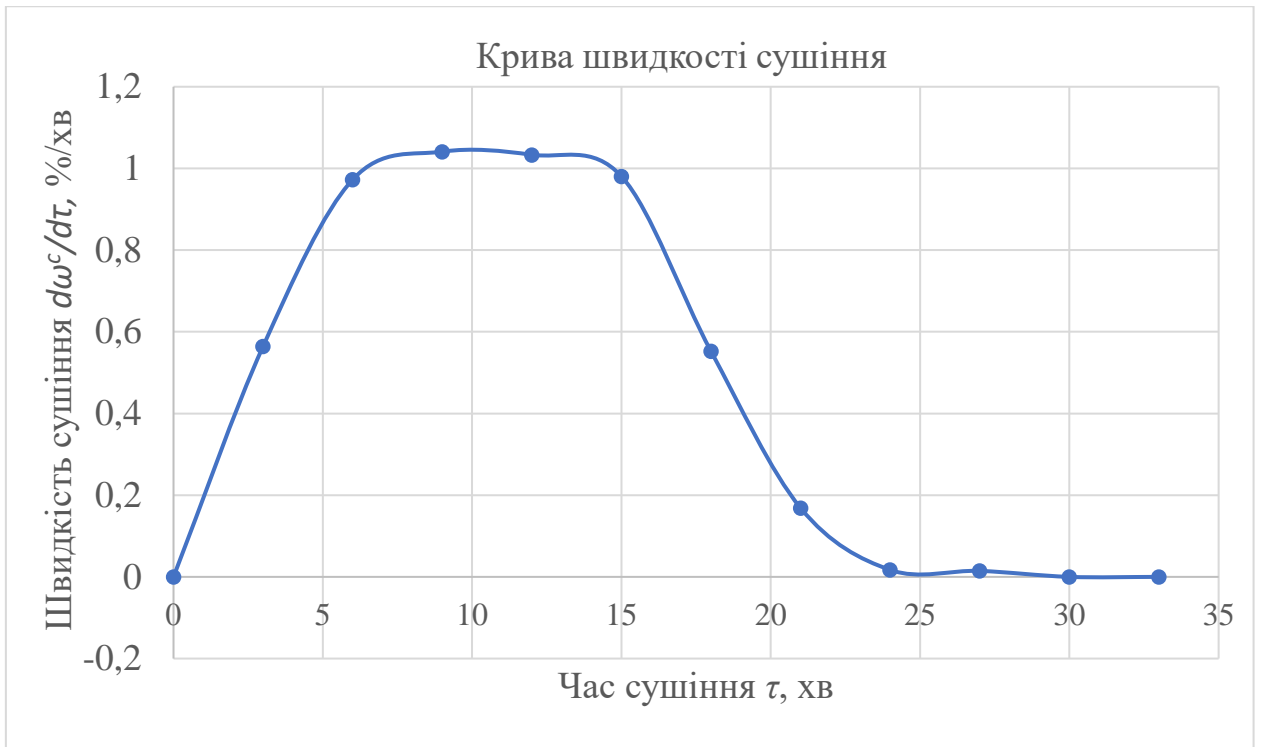


Рисунок 2.22 – Крива швидкості сушіння для піску при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

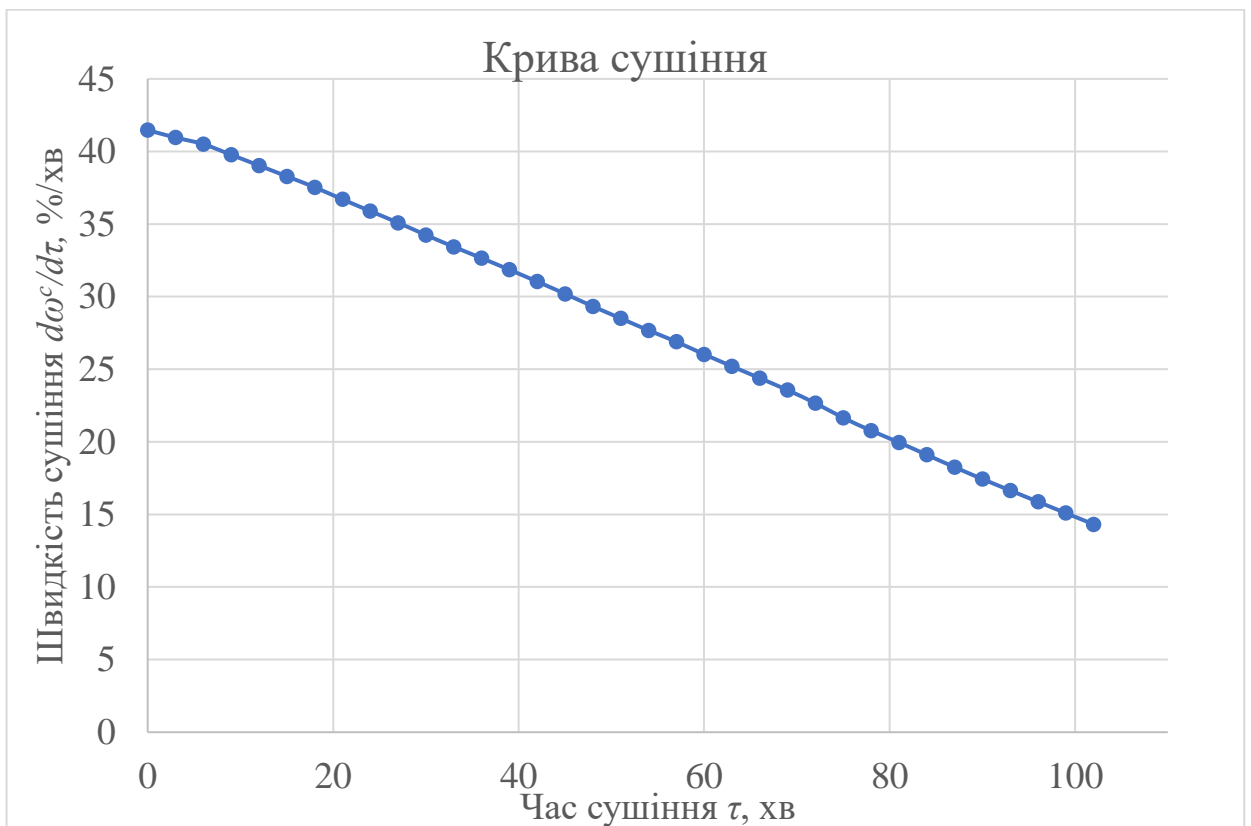


Рисунок 2.23 – Крива сушіння для каоліну при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

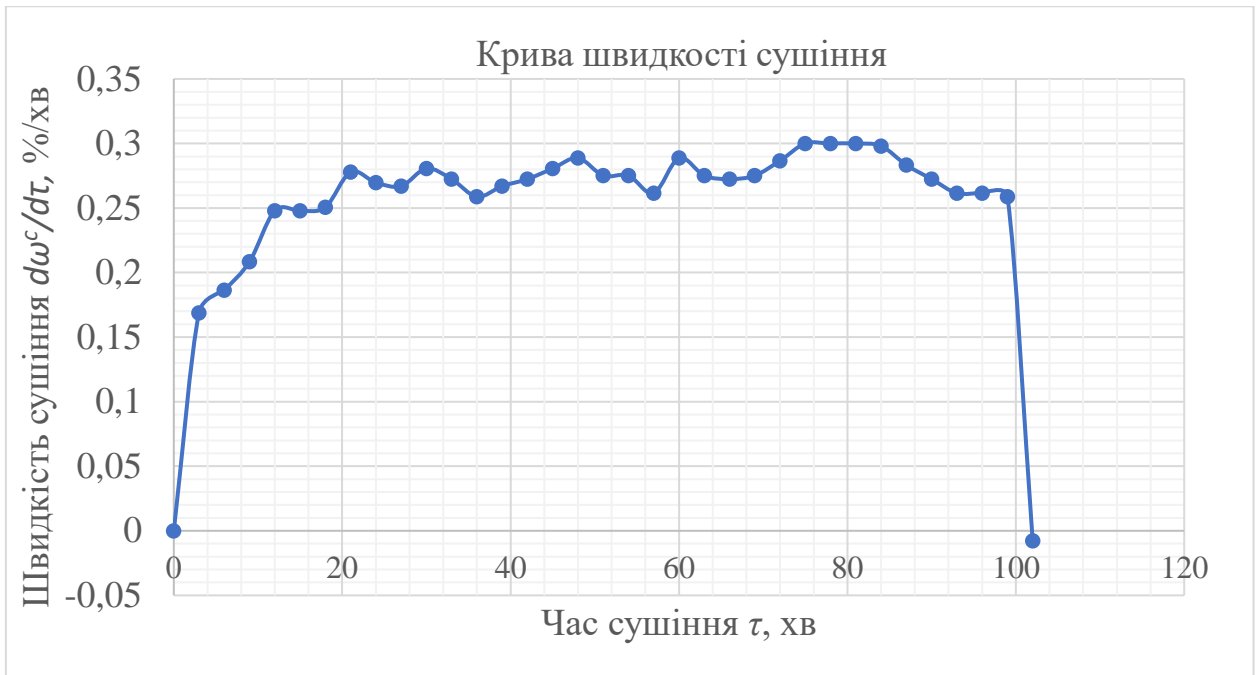


Рисунок 2.24 – Крива швидкості сушіння для каоліну при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

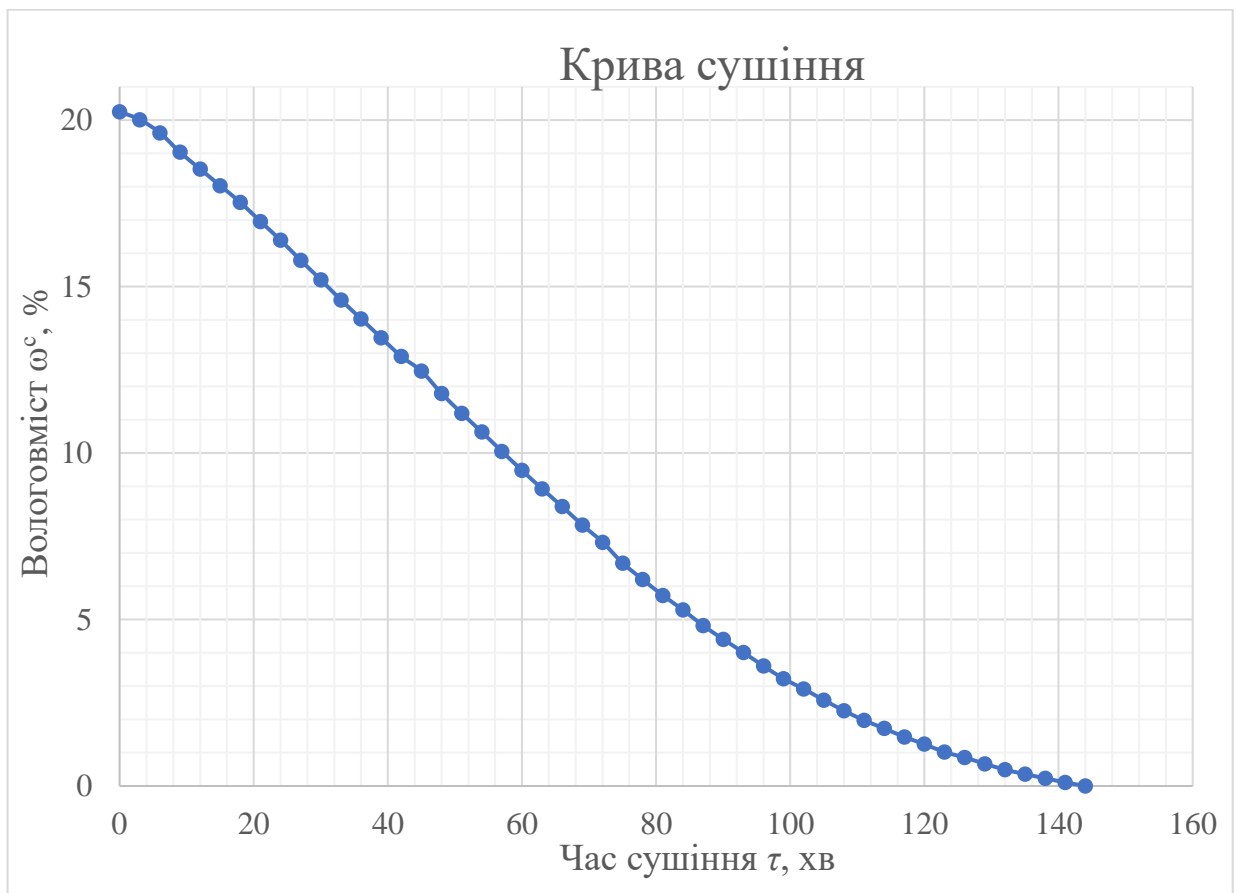


Рисунок 2.25 – Крива сушіння для жовтої глини при  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$

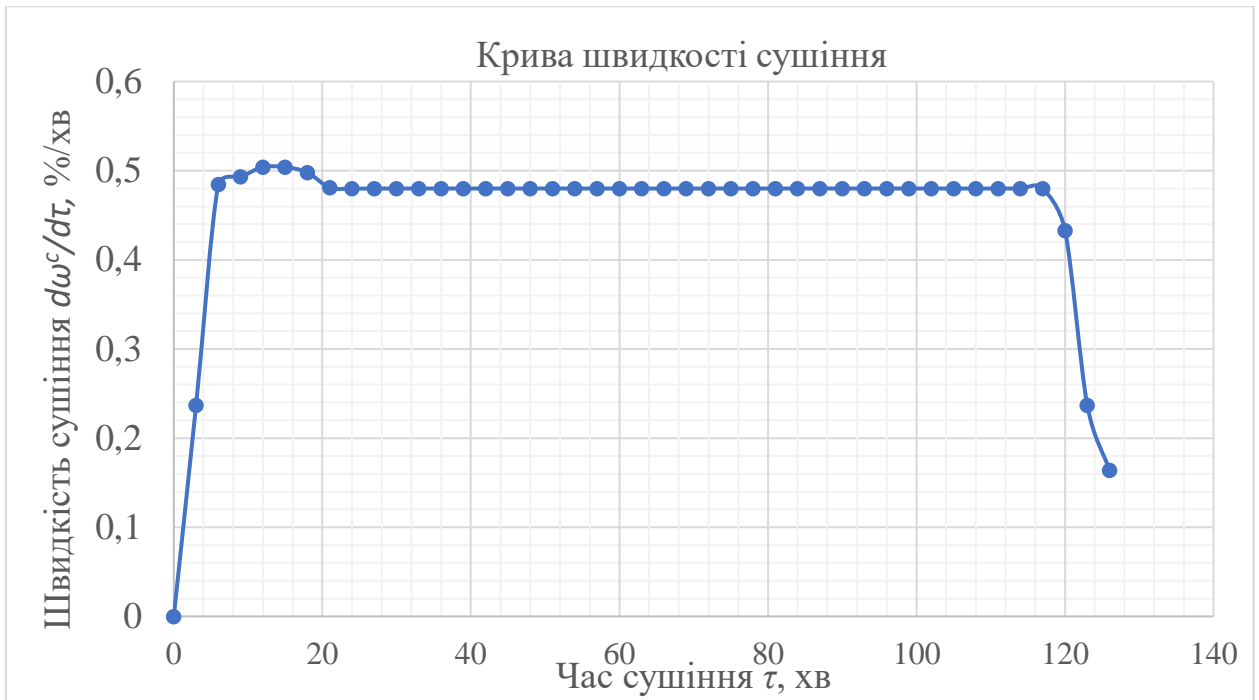


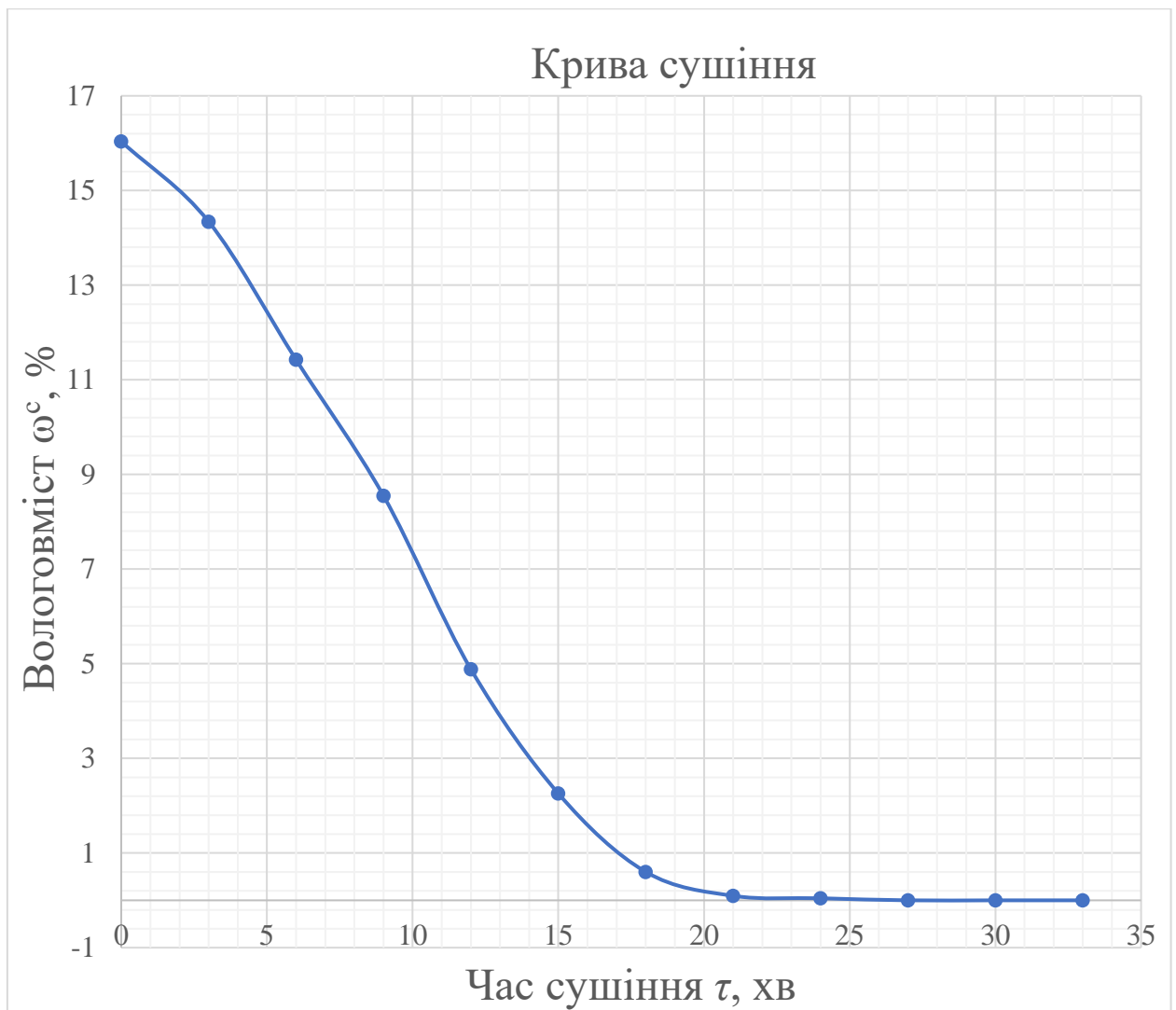
Рисунок 2.26 – Крива швидкості сушіння для жовтої глини при  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця 2.5 – Дані вимірювань при  $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$

| №  | Маса тигелю та матеріалу, г |        |             |
|----|-----------------------------|--------|-------------|
|    | Пісок                       | Каолін | Жовта глина |
| 1  | 2                           | 3      | 4           |
| 0  | 34,151                      | 30,87  | 30,812      |
| 1  | 33,92                       | 30,605 | 30,519      |
| 2  | 33,522                      | 30,221 | 30,152      |
| 3  | 33,13                       | 29,851 | 29,737      |
| 4  | 32,63                       | 29,39  | 29,247      |
| 5  | 32,272                      | 28,986 | 28,795      |
| 6  | 32,046                      | 28,614 | 28,406      |
| 7  | 31,977                      | 28,219 | 27,979      |
| 8  | 31,97                       | 27,846 | 27,596      |
| 9  | 31,964                      | 27,493 | 27,238      |
| 10 | 31,964                      | 27,095 | 26,833      |
| 11 | 31,964                      | 26,716 | 26,461      |
| 12 | –                           | 26,387 | 26,171      |
| 13 | –                           | 26,125 | 25,932      |
| 14 | –                           | 25,859 | 25,721      |

Продовження таблиці 2.5

| 1  | 2 | 3      | 4      |
|----|---|--------|--------|
| 15 | – | 25,607 | 25,539 |
| 16 | – | 25,439 | 25,405 |
| 17 | – | 25,332 | 25,323 |
| 18 | – | 25,3   | 25,3   |
| 19 | – | 25,294 | 25,292 |
| 20 | – | 25,291 | 25,29  |
| 21 | – | 25,289 | 25,283 |
| 22 | – | 25,289 | 25,283 |

Рисунок 2.27 – Крива сушіння для піску при  $t = 130\text{ }^\circ\text{C}$



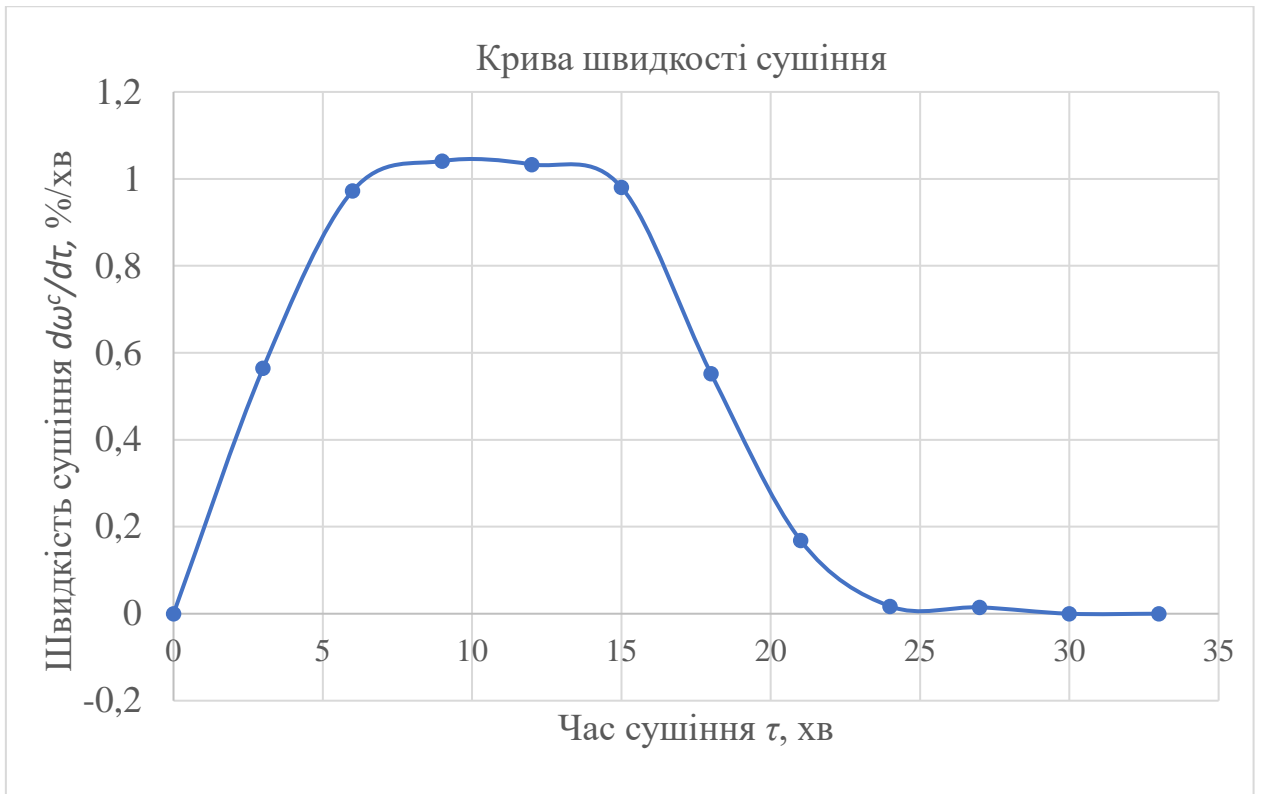


Рисунок 2.28 – Крива швидкості сушіння для піску при  $t = 130\text{ }^\circ\text{C}$

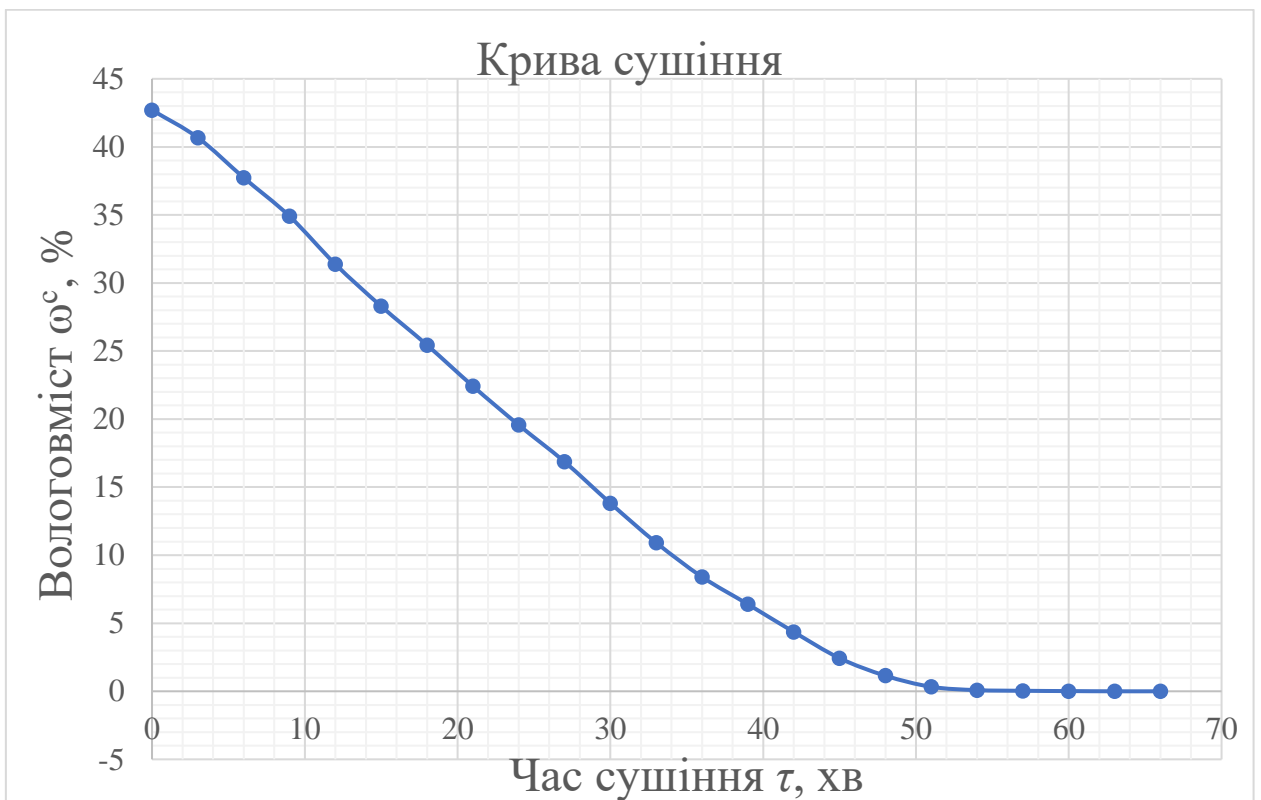


Рисунок 2.29 – Крива сушіння для каоліну при  $t = 130\text{ }^\circ\text{C}$

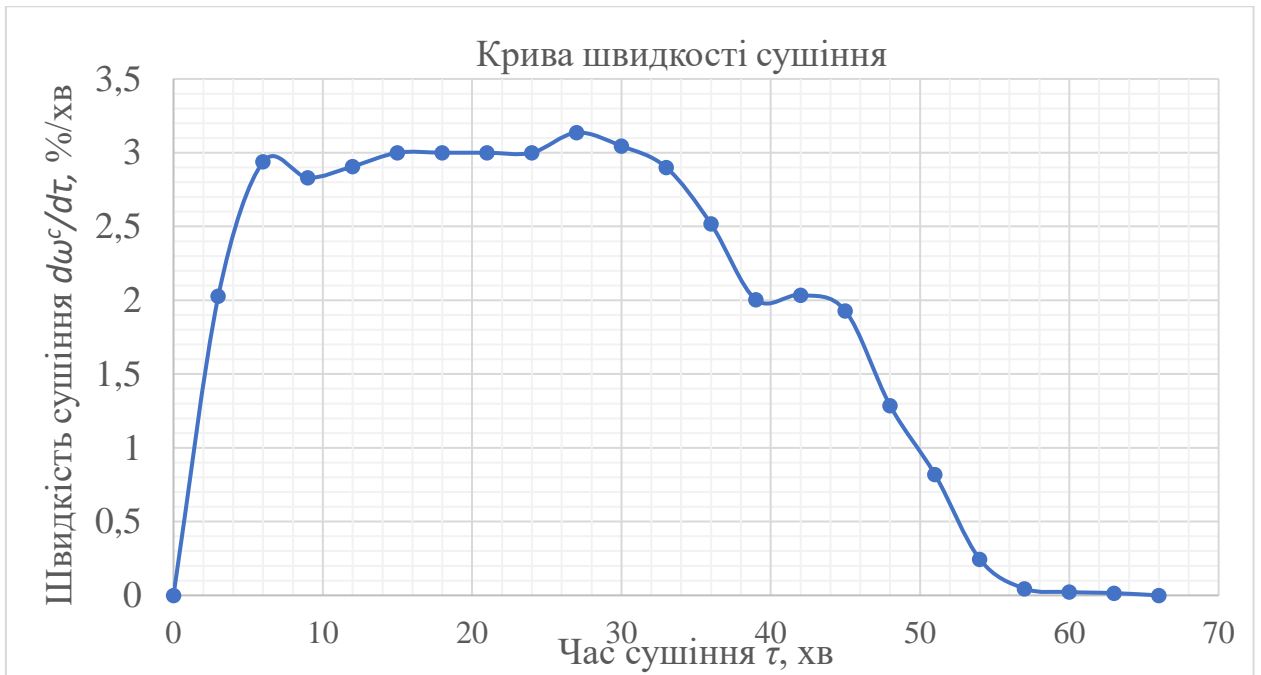


Рисунок 2.30 – Крива швидкості сушіння для каоліну при  $t = 130\text{ }^\circ\text{C}$

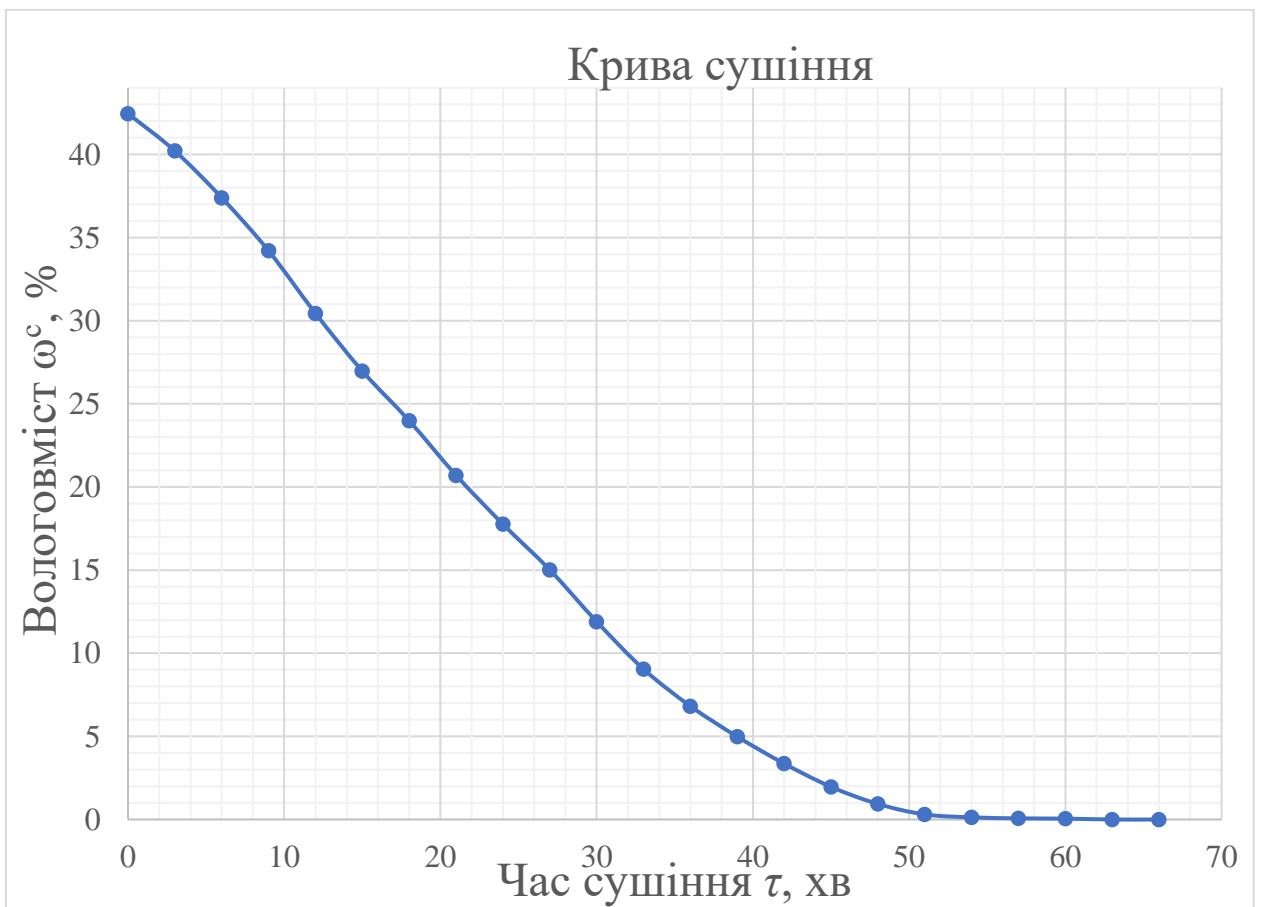


Рисунок 2.31 – Крива сушіння для жовтої глини при  $t = 130\text{ }^\circ\text{C}$



Рисунок 2.32 – Крива швидкості сушіння для жовтої глини при  $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2.2 Розрахунок сушильного барабану

В даному розділі дипломного проекту проведено: розрахунок горіння палива, обрані початкові параметри сушильного агента, побудований процес сушіння на I–x діаграмі, розрахований час сушіння матеріалу.

В даному розділі проведений теплотехнічний розрахунок барабанної сушарки БН 2.2 – 14НУ – 03 продуктивністю 12.0 т/год, прямоочного  $\varnothing 2200$  мм,  $L = 14.0$  м – для сушки каолінової глини з 24 % вологості до 12 %.

За технологічними вимогами виробництва, сушарки повинні забезпечити задану продуктивність, можливе гнучке регулювання процесу і дотримання оптимального режиму сушки, щоб отримати найкращу якість матеріалу, що висушується, при найменших витратах. При цьому велике

значення має рівномірність сушіння матеріалів або виробів по всьому об'єму робочого простору сушарки.

Барабанна сушарка призначена для сушки і дрібношматкових матеріалів розміром шматків до 50 мм. Барабан сушарки має довжину 14 м і діаметр 2.2 м, встановлений під кутом  $(4...6)^\circ$  до горизонту і обертається зі швидкістю  $(0.5...6)$  об/хв.

Рух матеріалів і топкових газів всередині сушарки – прямотечія.

Прямотечія забезпечує менше запилювання і винесення, вологі і пластичні матеріали легше віддають початкову вологу і швидко набувають необхідну сипкість. При цьому допускається висока початкова температура газів, що входять в барабан (до  $750^\circ\text{C}$ ), але матеріал при сушінні сильно не нагрівається. При температурі відхідних з барабана газів  $100^\circ\text{C}$  матеріал виходить з температурою  $(70...80)^\circ\text{C}$ . Швидкість руху газів в барабані не перевищує  $(2,5...3)$  м/с, щоб уникнути надмірного винесення пилу.

Зроблено теплотехнічний розрахунок барабана для сушки глини продуктивністю 12000 кг/год по глині, що висушена. Глина висушується від початкової вологості  $\omega_1 = 24\%$  до кінцевої  $\omega_2 = 12\%$ . Сушка проводиться димовими газами, розведеними атмосферним повітрям в камері змішувача перед входом їх у барабан. Паливо, що спалюється – природний газ. Спалювання газу проводиться за допомогою вихрових пальників, встановлених на фронті топки. Початкова температура глини  $t_{\text{п}} = 15^\circ\text{C}$ , кінцева –  $t_{\text{к}} = 80^\circ\text{C}$ . Щільність сухої глини  $\rho_{\text{с}} = 1450$  кг/м<sup>3</sup>. Параметри теплоносія:  $t_{\text{п}}^{\text{газ}} = 750^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{к}}^{\text{газ}} = 100^\circ\text{C}$ .

Параметри повітря до входу в топку:  $\phi_0 = 70\%$ ,  $t_0 = 200^\circ\text{C}$ ,  $d_0 = 10$  г/кг сухого повітря. Розмір шматків глини  $(40...50)$  мм. Кут нахилу барабана  $\alpha = (4...6)^\circ$ .

Режим роботи сушарки безперервний. Для сушки глини прийнята прямоточна схема руху теплоносія, щоб уникнути зниження пластичності глини внаслідок її перегріву і зменшити винесення пилу. Система внутрішніх пристроїв – лопатева.

Температура газів при вході в сушильний барабан  $t_{\text{г}}^{\text{газ}} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для отримання такої температури димові гази, що утворюються при горінні палива, необхідно розбавити атмосферним повітрям в камері змішування.

При процесі сушіння, що встановився, кількість вологи, що надходить в сушильний барабан з димовими газами і матеріалом, має дорівнювати кількості вологи, що залишається в матеріалі, і вологі, що йде з димовими газами.

На підставі розрахунків складено матеріальний баланс.

Тепловий баланс складений для визначення витрати тепла на сушку, а також для оцінки окремих статей надходжень і витрат тепла в сушильній установці. Для сушильного барабана складений єдиний баланс.

В результаті проведених розрахунків визначено обсяг топки змішання.

Топка, являє собою замкнуту камеру певного обсягу, призначену для спалювання палива. Топка визначена від робочого простору. Величина теплової напруги  $q = 1200 \text{ кВт/м}^3$ .

Розміри топки по довжині і ширині визначені в даному випадку конструктивно, виходячи з умов зручності їх обслуговування, тому обираємо такі розміри:

- довжина = 3,5 м;
- діаметр = 1,5 м.

Також визначена продуктивність вентилятора подачі повітря на горіння і для розведення димових газів. Температура димових газів в топці завжди буває вище, ніж потрібно в сушарці, а тому і в підсклепінний простір змішувальної камери, перед входом в сушильний агрегат, подають вентилятором атмосферне повітря.

Для уловлювання пилу з газів, що відходять використовують циклони. Найбільш часто застосовують циклон ЦН–15 з кутом нахилу вхідного патрубку  $\alpha = 15 \text{ }^{\circ}$ . Цей циклон забезпечує найбільший ступінь уловлювання

пилу при найменшому значенні коефіцієнта гідравлічного опору. До установки встановлено 4 циклони НІІОГАЗ ЦН–15 діаметром 700 мм.

Для видалення димових газів передбачена установка димососа, що забезпечує швидкість по масі в перерізі барабана (2...3) кг/см<sup>3</sup> з урахуванням підсосів по газовому тракту в розмірі (50...70) %.

Вхідні данні, для теплотехнічного розрахунку барабанної сушарки, зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 – Вхідні данні

| Найменування  | Умовні позначення         | Величина | Одиниці виміру    |
|---|---------------------------|----------|-------------------|
| 1   | 2                         | 3        | 4                 |
| Внутрішній діаметр барабана                           | $D_{\text{бар}}$          | 2.2      | м                 |
| Довжина барабана                                      | $L_{\text{бар}}$          | 14       | м                 |
| Товщина стінок циліндра                               | $S_{\text{бар}}$          | 0.014    | м                 |
| Обсяг сушильного простору                             | $V_{\text{бар}}$          | 53.2     | м <sup>3</sup>    |
| Температура газів при вході в сушильний барабан       | $T_{\text{н газ}}$        | 750      | °С                |
| Температура відхідних газів                           | $t_{\text{від}}$          | 100.00   | °С                |
| ККД топки   | $\eta$                    | 0.90     |                   |
| Вологість матеріалу початкова                         | $\omega^0_1$              | 24       | %                 |
| Вологість матеріалу кінцева                           | $\omega^0_2$              | 12       | %                 |
| Температура матеріалу на вході в сушильний барабан    | $t^{\text{п}}_{\text{м}}$ | 15       | °С                |
| Температура матеріалу на виході з сушильного барабана | $t^{\text{к}}_{\text{м}}$ | 70       | °С                |
| Насипна щільність                                     | $\rho_{\text{м}}$         | 1450     | кг/м <sup>3</sup> |
| Продуктивність суш. барабана по висушеній глині       | $y_2$                     | 12000    | кг/год            |

Кількість випареної вологи  $W$ , кг/год

$$W = y_2 \times \frac{\omega_1^0 - \omega_2^0}{100 - \omega_1^0}. \quad (2.1)$$

Кількість вологого матеріалу, що надходить на сушіння  $y_1$ , кг/год

$$y_1 = y_2 + W. \quad (2.2)$$

Кількість вологи, що міститься в матеріалі до сушки  $W_{вл.п}$ , кг/год

$$W_{вл.п} = \omega_1^0 \frac{y_1}{100}. \quad (2.3)$$

Кількість вологи, що міститься в висушеному матеріалі  $W_{вл.к}$ , кг/год

$$W_{вл.к} = \omega_2^0 \frac{y_2}{100}. \quad (2.4)$$

Об'ємна напруга барабана по волозі,  $A_v$ , кг/(м<sup>3</sup>·год)

$$A_v = \frac{W}{V_{бар}}. \quad (2.5)$$

Кількість матеріалу, що одночасно знаходиться у барабані  $G_m$ , кг

$$G_m = V_{бар} \cdot \rho_m \cdot \beta, \quad (2.6)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт заповнення барабану, приймаємо 0,19.

Теоретична кількість сухого повітря, що витрачається на спалювання  
1 кг палива  $L_0$ , м<sup>3</sup>/кг

$$L_0 = \frac{\rho_{\text{пов}}}{L_T}, \quad (2.7)$$

де:  $\rho_{\text{пов}}$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$L_T$  – табличне значення кількості сухого повітря, що витрачається на спалювання 1 кг палива, м<sup>3</sup>/кг.

Кількість вологи, що виділяється при спалюванні 1 кг палива, кг/кг

$$N_{\text{вол}} = \sum \frac{9n}{12m + n} C_m H_n, \quad (2.8)$$

де  $C_m H_n$  – масова частка компонентів, при згорянні яких утворюється вода (кг/кг).

Ентальпія водяної пари, кДж/кг

$$i_n = r_0 + c_n \cdot t_n, \quad (2.9)$$

де  $r_0$  – теплота випаровування води при 0 °С, кДж/кг;

–  $c_n$  – середня теплоємність водяної пари, кДж/(кг·К);

–  $t_n$  – температура парів, °С.

Ентальпія сухих газів, кДж/кг

$$i_{c2} = \alpha_{\text{гор}} \cdot t_n, \quad (2.10)$$

де  $\alpha_{\text{гор}}$  – коефіцієнт надлишку повітря, що подається на пальник.

Коефіцієнт надлишку повітря

$$\alpha_{\text{заг}} = \frac{Q \cdot \eta + c_T \cdot t_T - i_{\text{с.г.}} \cdot (1 - N_{\text{вол}}) - i_{\text{п}} \cdot N_{\text{вол}}}{L_0 \cdot (i_{\text{с.г.}} + i_{\text{п}} \cdot X_{\text{пов}} - I_{\text{пов}})}, \quad (2.11)$$



де –  $Q$  – кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 кг палива, кДж/кг;

–  $X_{\text{пов}}$  – вологовміст повітря, кг/кг;

–  $I_{\text{пов}}$  – ентальпія повітря, що надходить для змішування, кДж/кг;

Кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 м<sup>3</sup> газу, кДж/(м<sup>3</sup>·т)

$$Q_v = \sum r \cdot Q_{\text{еф}}, \quad (2.12)$$

де –  $r$  – долі компонентів, що входять у склад палива, %;

–  $Q_{\text{еф}}$  – тепловий ефект реакцій, кДж/м<sup>3</sup>;

Щільність газоподібного палива, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho = \frac{\sum C_m H_n M_i}{v_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_0}, \quad (2.13)$$

де –  $M_i$  – мольна маса палива, кмоль/кг;

–  $t_0$  – температура палива, дорівнює 20 °С;

–  $v_0$  – мольний об'єм, рівний 22,4 м<sup>3</sup>/кмоль;

–  $T_0$  – абсолютна температура газу в робочих умовах, рівна 273 К.

Кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 кг палива, кДж/кг

$$Q = \frac{Q_v}{\rho}. \quad (2.14)$$

Загальна дійсна кількість сухого повітря, кг/кг

$$L_a = L_0 \cdot \alpha_{\text{заг}}. \quad (2.15)$$

Загальна кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 кг палива та розведення димових газів до заданої температури, м<sup>3</sup>/кг

$$L''_{1\alpha} = \frac{L'_0 \cdot \alpha_{\text{заг}}}{\rho_{\text{пов}}}, \quad (2.16)$$

де –  $L'_0$  – кількість атмосферного повітря, при його вологовмісті  $d = 10$  г/кг.

Загальна кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 м<sup>3</sup> палива і розведення димових газів до заданої температури, м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>

$$L''_{\alpha} = \frac{L''_{1\alpha}}{\rho}. \quad (2.17)$$

Кількість сухого повітря при  $\alpha_{\text{п}}$

$$L_{\alpha\text{п}} = L_{\text{т}} \cdot \alpha_{\text{п}}, \quad (2.18)$$

де –  $\alpha_{\text{п}}$  – коефіцієнт надлишку повітря, що подається на пальник.

Кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 кг палива при  $\alpha_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>/кг

$$L'_{1\alpha\text{п}} = \frac{L'_0 \alpha_{\text{п}}}{\rho_{\text{пов}}}. \quad (2.19)$$

Кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 м<sup>3</sup> палива при  $\alpha_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>

$$L'_{\alpha\text{п}} = L'_{1\alpha\text{п}} \cdot \rho. \quad (2.20)$$

Загальна питома маса сухих газів отримується при спалюванні 1 кг палива та розведення топкових газів до  $t = 750$  °С, м<sup>3</sup>/кг

$$G_{\text{с.г.}} = \frac{1 + \alpha_{\text{заг}} \cdot L_0 - N_{\text{вол}}}{\rho}. \quad (2.21)$$

Питома маса водяної пари в газовій суміші при спалюючи 1 кг, кг/кг

$$G_n = N_{\text{вол}} + \alpha_{\text{заг}} \cdot X_{\text{нов}} \cdot L_0. \quad (2.22)$$

Вологовміст газів на вході в сушарку на 1 кг сухого повітря, кг/кг

$$X_1 = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{с.г.}}}. \quad (2.23)$$

Ентальпія газів на вході в сушарку, кДж/кг

$$I_1 = \frac{Q \cdot \eta + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot L_0 \cdot I_0}{G_{\text{с.г.}}}. \quad (2.24)$$

### 2.2.1 Теоретичний процес сушіння

Витрата сухих газів (по масі), кг/год

$$Y_{\text{газ}}^{\text{теор}} = \frac{W}{X_2 - X_1}, \quad (2.25)$$

де  $X_2$  – вологовміст відпрацьованого сушильного агента, кг/кг.

Питома теоретичний витрата теплоти, кДж/кг<sub>вологи</sub>

$$q'_T = \frac{I_1 - I_0}{X_2 - X_1}, \quad (2.26)$$

де  $I_0$  – ентальпія газів при  $t_m^H$  та  $X_1$ , кДж/кг.

### 2.2.2 Дійсний процес сушіння

Теплоємність висушеного матеріалу при кінцевій його вологості, кДж/(кг·К)

$$C_M = C_{M.C.} \frac{100 - \omega_2^0}{100} + \frac{4.2 \times \omega_2^0}{100}. \quad (2.27)$$

де  $C_{M.C.}$  – середня питома теплоємність каоліну, кДж/(кг·К).

Витрата тепла на нагрів матеріалу, кДж/год

$$Q_M = y_2 \cdot C_M \cdot (t_M^K - t_M^N). \quad (2.28)$$

Питома витрата тепла на нагрів матеріалу, кДж/кг

$$q_M = \frac{Q_M}{W}. \quad (2.29)$$

Середня температура матеріалу в барабані, °С

$$t_{ср.м.} = t_M^N + \frac{2}{3} \cdot (t_M^K - t_M^N). \quad (2.30)$$

Середня температура газів робочого простору барабану, °С

$$t_{\text{ср.газ}} = \frac{(T_{\text{H}}^{\text{газ}} - t_{\text{M}}^{\text{п}}) - (t_{\text{yx}} - t_{\text{M}}^{\text{к}})}{2,3 \lg \left( \frac{T_{\text{H}}^{\text{газ}} - t_{\text{M}}^{\text{п}}}{t_{\text{yx}} - t_{\text{M}}^{\text{к}}} \right)} + t_{\text{ср.м.}} \quad (2.31)$$

Питома втрата тепла в навколишнє середовище, кДж/кг

$$q_n = 0.05 \cdot q'_T \quad (2.32)$$

Витрати тепла в навколишнє середовище, кДж/год

$$Q_n = q_n \cdot W \quad (2.33)$$

Поправка для реального процесу, кДж/кг

$$\Delta = q_M + q_{\text{п}} - 4,19 \cdot t_{\text{M}}^{\text{п}} \quad (2.34)$$

Загальні витрати тепла в процесі сушіння, кДж/год

$$Q = Q_n + Q_M \quad (2.35)$$

Ентальпія для крапки D (див. рис. 2.33), кДж/кг

$$I_D = I_1 - \Delta \cdot (x - X_1), \quad (2.36)$$

де  $x$  – вологовміст сухого повітря, кг/кг.

Дійсна витрата сухого газу на сушіння, кг/год

$$Y_{\text{газ}} = \frac{W}{x_c - x_1}, \quad (2.37)$$

де  $x_c$  – вологовміст для крапки С (див. рис. 2.33), кг/кг.

Витрата тепла на сушіння, кДж/кг

$$Q_c = Y_{\text{газ}} \cdot (I'_n - I_{\text{пов}}) - 4.19 \cdot W \cdot t_m^{\text{п}}, \quad (2.38)$$

де  $I'_n$  – ентальпія суміші газів з повітрям без урахування ентальпії водяних парів продуктів згоряння палива кДж/кг.

Витрата тепла на сушіння з урахуванням ККД токи, кДж/год

$$Q_T = \frac{Q_c}{\eta}. \quad (2.39)$$

Витрата палива, кг/год

$$B = \frac{Q_T}{Q_v}. \quad (2.40)$$

Витрата атмосферного повітря, м<sup>3</sup>/год

$$V_{\text{пов}} = B \cdot L''_{\alpha}. \quad (2.41)$$

Результати теплотехнічного розрахунку за методикою (2.1) – (2.41) наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахунок сушильної установки

| Найменування               | Умовні позначення | Величина | Одиниці виміру |
|----------------------------|-------------------|----------|----------------|
| 1                          | 2                 | 3        | 4              |
| Кількість випареної вологи | W                 | 1895     | кг/год         |

Продовження таблиці 2.7

| 1  | 2                   | 3     | 4                        |
|--|---------------------|-------|--------------------------|
| Кількість вологого матеріалу, що надходить на сушіння                | $u_l$               | 13895 | кг/ год                  |
| Кількість вологи, що міститься в матеріалі до сушки                  | $W_{\text{вл.п}}$   | 3335  | кг/ год                  |
| Кількість вологи, що міститься в висушеному матеріалі                | $W_{\text{вл.к}}$   | 1440  | кг/ год                  |
| Об'ємне напруга барабана по волозі                                   | $A_v$               | 36    | кг/(м <sup>3</sup> ·год) |
| Коефіцієнт заповнення барабана                                       | $\beta$             | 0,19  | –                        |
| Кількість матеріалу, що одночасно знаходяться в барабані             | $G_m$               | 14657 | кг                       |
| Середня питома теплоємність каоліну                                  | $C_{\text{м. с.}}$  | 0,92  | кДж/(кг·К)               |
| Температура повітря, що надходить для змішування                     | $t_{\text{пов}}$    | 20    | °С                       |
| Вологість повітря  | $j_{\text{пов}}$    | 70    | %                        |
| Вологовміст повітря  | $x_{\text{пов}}$    | 0,011 | кг/кг                    |
| Щільність повітря  | $\rho_{\text{пов}}$ | 1,12  | кг/м <sup>3</sup>        |
| Температура вологого термометра                                      | $t_v$               | 16,32 | °С                       |
| Ентальпія повітря, що надходить для змішування                       | $I_{\text{пов}}$    | 48    | кДж/кг                   |
| Температура палива   | $T_t$               | 20    | °С                       |
| Кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 м <sup>3</sup> газу | $Q_v$               | 34272 | кДж/(м <sup>3</sup> ·Т)  |
| Щільність газоподібного палива                                       | $\rho$              | 0,667 | кг/м <sup>3</sup>        |

Продовження таблиці 2.7

| 1  | 2                     | 3        | 4                                     |
|--|-----------------------|----------|---------------------------------------|
| Теоретична кількість сухого повітря, що витрачається на спалювання 1 кг палива | $L_0$                 | 15,76374 | $\text{м}^3/\text{кг}$                |
| Кількість атмосферного повітря, при його $d = 10 \text{ г/кг}$                 | $L'_0$                | 16,01596 | $\text{м}^3/\text{кг}$                |
| Кількість тепла що виділяється при спалюванні 1 кг палива                      | $Q$                   | 51418    | $\text{кДж/кг}$                       |
| Теплоємність газоподібного палива при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$          | $c_T$                 | 1,34     | $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ |
| Кількість вологи, що виділяється при згорянні 1 кг палива                      | $N_{\text{вол}}$      | 2,10     | $\text{кг/кг}$                        |
| Теплота випаровування води при $0 \text{ }^\circ\text{C}$                      | $r_0$                 | 2500,00  | $\text{кДж/кг}$                       |
| Середня теплоємність водяної пари  | $c_{\text{п}}$        | 2,054    | $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ |
| Температура парів  | $t_{\text{п}}$        | 750,00   | $^\circ\text{C}$                      |
| Ентальпія водяної пари   | $i_{\text{п}}$        | 4040,50  | $\text{кДж/кг}$                       |
| Ентальпія сухих газів  | $i_{\text{сг}}$       | 787,50   | $\text{кДж/кг}$                       |
| Коефіцієнт надлишку повітря на пальник   | $\alpha_{\text{п}}$   | 1,05     | —                                     |
| Коефіцієнт надлишку повітря  | $\alpha_{\text{заг}}$ | 2,81     | —                                     |
| Загальна дійсна кількість сухого повітря                                       | $L_{\alpha}$          | 49,34    | $\text{кг/кг}$                        |



Продовження таблиці 2.7

| 1   | 2                      | 3     | 4                       |
|---|------------------------|-------|-------------------------|
| Загальна кількість атмосферного повітря, що необхідне для горіння 1 кг палива та розведення димових газів до заданої температури            | $L''_{1\alpha}$        | 44,93 | $\text{м}^3/\text{кг}$  |
| Загальна кількість атмосферного повітря, що необхідне для горіння 1 $\text{м}^3$ палива та розведення димових газів до заданої температури  | $L''_{\alpha}$         | 29,95 | $\text{м}^3/\text{м}^3$ |
| Кількість сухого повітря при $\alpha_{\text{п}}$  | $L\alpha_{\text{п}}$   | 18,46 | $\text{кг}/\text{кг}$   |
| Кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 кг палива при $\alpha_{\text{п}}$   | $L'_{1\alpha\text{п}}$ | 16,82 | $\text{м}^3/\text{кг}$  |
| Кількість атмосферного повітря, необхідне для горіння 1 $\text{м}^3$ палива при $\alpha_{\text{п}}$   | $L_{1\alpha\text{п}}$  | 11,21 | $\text{м}^3/\text{м}^3$ |
| Загальна питома маса сухих газів, що отримується при спалюванні 1 кг палива та розведення топкових газів до $t = 750\text{ }^\circ\text{C}$ | $G_{\text{сг}}$        | 72,37 | $\text{м}^3/\text{кг}$  |
| Питома маса водяної пари в газовій суміші при спалюючи 1 кг палива  | $G_{\text{п}}$         | 2,65  | $\text{кг}/\text{кг}$   |

Продовження таблиці 2.7

| 1   | 2               | 3       | 4          |
|---|-----------------|---------|------------|
| Влагосодержание газів на вході в сушарку на 1 кг сухого повітря | $X_1$           | 0,055   | кг/кг      |
| Ентальпія газів на вході в сушарку                              | $I_1$           | 1009    | кДж/кг     |
| Ентальпія газів при $t_{нм}$ і $X_1$                            | $I_0$           | 140,00  | кДж/кг     |
| Вологовміст (крапка А)  | $X_0$           | 0,05    | кг/кг      |
| Влагосодержание відпрацьованого сушильного агента               | $X_2$           | 0,33    | кг/кг      |
| Ентальпія відпрацьованого сушильного агента                     | $I'_{дм.г}$     | 1009,07 | кДж/кг     |
| Витрата сухих газів (по масі) при теоретичному процесі          | $Y_{газ}^{тео}$ | 6886    | кг/ч       |
| Питома теоретична витрата теплоти                               | $q'_т$          | 3158    | кДж/кг     |
| Теплоємність висушеного матеріалу при кінц. вологості           | $C_m$           | 1,31    | кДж/(кг·К) |
| Витрата тепла на нагрів матеріалу                               | $Q_m$           | 866976  | кДж/год    |
| Питома витрата тепла на нагрів матеріалу                        | $q_m$           | 458     | кДж/кг     |
| Середня температура матеріалу в барабані                        | $t_{ср.м}$      | 51,67   | °С         |
| Середня температура газів робочого простору барабана            | $t_{ср.газ}$    | 272,32  | °С         |

Продовження таблиці 2.7

| 1  | 2                | 3       | 4                   |
|--|------------------|---------|---------------------|
| Питома втрата тепла в навколишнє середовище (5% від теоретичного)                                | $q_{\text{п}}$   | 158     | кДж/кг              |
| Втрати тепла в навколишнє середовище   | $Q_{\text{п}}$   | 299217  | кДж/год             |
| Поправка $\Delta$ для реального процесу  | $\Delta$         | 553     | кДж/кг              |
| Загальні втрати тепла в процесі сушіння  | $Q$              | 1166193 | кДж/год             |
| Задаємося $x$ (точка D)  | $X$              | 0,2     | кг/кг               |
| Ентальпія для точки D  | $I_d$            | 929     | кДж/кг              |
| Влагосодержание для точки C  | $X_c$            | 0,280   | кг/кг               |
| Ентальпія для точки C  | $I_c$            | 860     | кДж/кг              |
| Дійсна витрата сухого газу на сушку  | $Y_{\text{газ}}$ | 8415    | кг/год              |
| Ентальпія суміші газів з повітрям без урахування ентальпії водяної пари продуктів горіння палива | $I'_n$           | 830     | кДж/кг              |
| Витрата тепла на сушку   | $Q_c$            | 6461438 | кДж/год             |
| Витрата тепла в топці з урахуванням ККД топки  | $Q_t$            | 7179375 | кДж/год             |
| Витрати палива   | $V$              | 140     | кг/год              |
| Витрата атмосферного повітря   | $V_{\text{пов}}$ | 209,48  | м <sup>3</sup> /год |

На основі отриманих результатів побудований процес сушіння на I–x діаграмі, що представлена на рисунку 2.33.

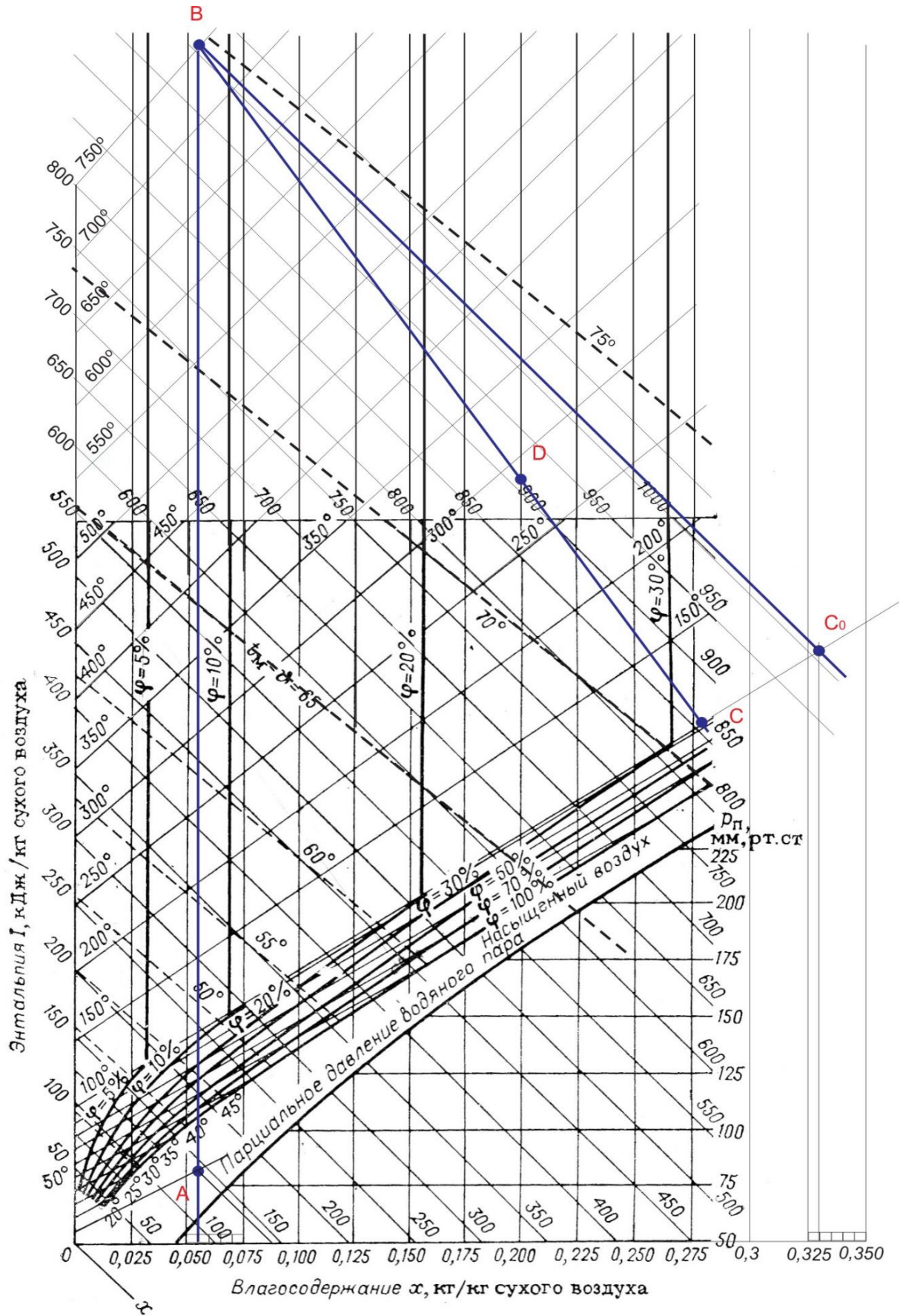


Рисунок 2.33 – Процесс сушіння на I-x діаграмі

### 2.2.3 Матеріальний баланс сушарки

Кількість водяних парів в димових газах, що надходять на сушіння,  
кг/год

$$Y_{в.п} = G_n \cdot B. \quad (2.42)$$

Витрата вологих газів, що відходять при виході з сушильного барабану,  
кг/год

$$Y_{см} = (1 + X_1) Y_{газ} + W. \quad (2.43)$$

Нев'язка балансу

$$\Delta = (y_1 + Y_{газ} + Y_{в.п}) - Y_{в.п} + Y_{см}. \quad (2.44)$$

Результати розрахунку матеріального балансу представлені у таблиці  
2.8.

### 2.2.4 Тепловий баланс сушарки

Тепло від згоряння палива, кДж/год

$$Q_{гор} = B \cdot Q, \quad (2.45)$$

де  $Q$  – кількість тепла, що виділяється при згорянні 1 кг палива, кДж/кг.

Тепло, що надходить з атмосферним повітрям, кДж/год

$$Q_в = L''_{1а} \cdot I_{нов} \cdot B. \quad (2.46)$$

Таблиця 2.8 – Матеріальний баланс сушарки

| Прихід   |                   | Витрата  |                |       |  |                   |          |                |       |
|--|-------------------|----------|----------------|-------|--|-------------------|----------|----------------|-------|
| Найменування   | Умовні позначення | Величина | Одиниці виміру | %     | Найменування   | Умовні позначення | Величина | Одиниці виміру | %     |
| Вологий матеріал   | $U_1$             | 13895    | кг/год         | 61,27 | Висушений матеріал   | $U_2$             | 12000    | кг/год         | 52,91 |
| Сухі димові гази   | $Y_{газ}$         | 8415     | кг/год         | 37,10 | Витрата вологих газів, що відходять при виході з сушильного барабану | $Y_{см}$          | 10771,19 | кг/год         | 47,49 |
| Кількість водяних парів в димових газах, що надходять на сушіння | $Y_{вл}$          | 369,32   | кг/год         | 1,63  | Нев'язка балансу   |                   | -92,14   | кг/год         | -0,41 |
| Всього   |                   | 22679,05 | кг/год         | 100   | Всього   |                   | 22679,05 | кг/год         | 100   |

Таблиця 2.9 – Тепловий баланс сушильного барабану

| Прихід                 |                   | Витрата    |                |       |  |                   |            |                |       |
|------------------------|-------------------|------------|----------------|-------|--|-------------------|------------|----------------|-------|
| Найменування           | Умовні позначення | Величина   | Одиниці виміру | %     | Найменування                               | Умовні позначення | Величина   | Одиниці виміру | %     |
| Від згоряння палива    | $Q_{гор}$         | 7179375    | кДж/год        | 95,53 | На нагрівання матеріалу                    | $Q_{м}$           | 866976     | кДж/год        | 11,54 |
| З атмосферним повітрям | $Q_{п}$           | 335946     | кДж/год        | 4,47  | В навколишнє середовище                    | $Q_{п}$           | 299217,02  | кДж/год        | 3,98  |
|                        |                   |            |                |       | На випаровування і нагрів вологи матеріалу | $Q_{вип}$         | 4977473,68 | кДж/год        | 66,23 |
|                        |                   |            |                |       | З димовими газами, що відходять            | $Q_{від}$         | 826638,13  | кДж/год        | 11,00 |
|                        |                   |            |                |       | Витрати в топці                            | $Q_{топ}$         | 717937,54  | кДж/год        | 9,55  |
|                        |                   |            |                |       | Нев'язка балансу                           |                   | -172921,24 | кДж/год        | -2,30 |
| Всього                 |                   | 7515321,13 | кДж/год        | 100   | Всього                                     |                   | 7515321,13 | кДж/год        | 100   |

Витрата тепла на випаровування і нагрів вологи матеріалу, кДж/год

$$Q_{\text{вип}} = (2493 + 1,97 \cdot t_{\text{від}} - 4,2 \cdot t_{\text{м}}) \cdot W. \quad (2.47)$$

Витрата тепла з димовими газами, що відходять, кДж/год

$$Q_{\text{від}} = L\alpha \cdot B \cdot 120. \quad (2.48)$$

Витрати тепла в топці, кДж/год

$$Q_{\text{топ}} = Q_{\text{гор}} \cdot (1 - \eta). \quad (2.49)$$

Нев'язка балансу

$$\Delta = (Q_{\text{гор}} + Q_{\text{в}}) - (Q_{\text{м}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{вип}} + Q_{\text{від}} + Q_{\text{топ}}). \quad (2.50)$$

Результати розрахунку теплового балансу представлені у таблиці 2.9.

### 2.2.5 Розрахунок часу сушки матеріалу і частота обертання барабана

Середня вологість матеріалу, %

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\omega_1^0 + \omega_2^0}{2}. \quad (2.51)$$

Щільність матеріалу при  $\omega_{\text{ср}}$ , кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\text{м.ср.}} = \rho_{\text{м}} \cdot \frac{100}{100 - \omega_{\text{ср}}}. \quad (2.52)$$

Час, що матеріал знаходиться в барабані, хв

$$\tau = 120 \cdot \frac{\beta \cdot \rho_{\text{м.сер.}}}{A_v} \cdot \frac{\omega_1^0 - \omega_2^0}{200 - (\omega_1^0 - \omega_2^0)}. \quad (2.53)$$

Приблизне число оборотів барабана, об/хв

$$n_{\text{бар}} = A \cdot \frac{L_{\text{бар}}}{\tau \cdot D_{\text{бар}} \cdot \tan \alpha_{\text{бар}}}, \quad (2.54)$$

де –  $A = 0,65$  – коефіцієнт, що залежить від типу насадки і характеру руху матеріалу;

–  $\alpha_{\text{бар}} = 0,0524$  рад – кут нахилу барабану.

Розрахунок часу сушки матеріалу і частота обертання барабана наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Розрахунок часу сушки матеріалу і частота обертання барабана

| Найменування                                 | Умовні позначення      | Величина | Одиниці виміру    |
|--|------------------------|----------|-------------------|
| Середня вологість матеріалу                  | $\omega_{\text{ср}}$   | 18       | %                 |
| Щільність матеріалу при $\omega_{\text{ср}}$ | $\rho_{\text{м.сер.}}$ | 1768,3   | кг/м <sup>3</sup> |
| Час, що матеріал знаходиться в барабані      | $\tau$                 | 72,3     | хв                |
| Приблизне число оборотів барабана            | $n_{\text{бар}}$       | 1,1      | об/хв             |



### 3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних заходів, а так само санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних засобів, направлених на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. (згідно закону України "про охорону праці" ст. 1).

Згідно ст. 2 закону «про охорону праці» дія Закону "про охорону праці" розповсюджується на всі підприємства, установи і організації не залежно від форми власності і видів їх діяльності, на всіх громадян, які працюють, а також повернуті до праці на цих підприємствах.

Згідно ст. 4 Закону України «про охороні праці» державна політика в області охорони праці визначається відповідно Конституції України Верховною Радою України і направлена на створення належних, безпечних і здорових умов праці, запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням.

За порушення законів і інших нормативно-правових актів про охорону праці, створення перешкод в діяльності посадовців органів державного нагляду за охороною праці, а також представників профспілок, їх організацій і об'єднань винні особи притягуються до дисциплінарної, адміністративної, матеріальної, кримінальної відповідальності згідно закону (ст. 44 Закону "про охорону праці") [28].

Метою охорони праці на підприємстві є оцінка обстановки і характеристик трудового процесу в частині його впливу на здоров'я і життя працівника. Для досягнення цього завдання державою встановлено ряд критеріїв оцінки, які допомагають визначити ступінь небезпеки умов праці на підприємствах, які використовують працю найманих працівників [27].

В таблиці 3.1 представлені основні елементи виробничого процесу, що формують небезпечні та шкідливі фактори по ГОСТ 12.0.003-74 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація» [17].

Таблиця 3.1 – Небезпечні та шкідливі фактори

| Найменування видів робіт і параметрів виробничого процесу  | Фактори   |  | Нормативні документи  |
|--|---|--|---|
|  | Шкідливі  | Небезпечні   |   |
| Управління технологічним процесом змішування сипучої добавки: – розміщення систем управління живильником на пульті і щитах управління; – візуальне спостереження роботи обслуговуючого приводу живильника з електродвигуном, шнекового механізму | 1. Підвищений рівень шуму на робочому місці;<br>2. Підвищений рівень вібрації;<br>3. Недостатнє освітлення робочої зони;<br>4. Аспірація і тепловологосний режим в приміщенні: – підвищена температура повітря робочої зони, підвищена або знижена вологість повітря. | Небезпечний фактор ураження електричним струмом. Підвищене значення в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини. Небезпечний фактор механічного впливу. Рухомі машини, рухомі частини виробничого обладнання. Небезпека вибуху і пожежі. Газове господарство і газові пальники печі. Займання електропроводки | ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [13].<br>ДСанПіН 3.3.6-096-2002.<br>Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [14].<br>СанПіН 2.1.6.1032-01 [15].<br>ГОСТ 12.1.005 – 88 [16]. |

3.1 Опис шкідливих речовин, джерела виникнення, вплив на людину і пропоновані засоби захисту

### 3.1.1 Недостатня освітленість в робочій зоні

Освітленням називають використання світлової енергії сонця і штучних джерел світла для забезпечення зорового сприйняття довкілля. Освітлення дає

сприятливий психофізіологічний ефект, впливає на працездатність людини і на безпеку праці. Освітлення є важливим стимулятором організму людини, і тому недостатній рівень його підвищує втому зорового аналізатора у процесі виконання роботи, чим сприяє травматизму.

Джерело виникнення - недостатня освітленість штучного світла в нічний час.

Вплив на організм людини - погане освітлення в нічний час призводить до стомлюваності очей і всього організму, погіршує або призводить до втрати орієнтації.

Засоби захисту. Зорову роботу в цеху можна віднести до IV–V розряду. Згідно ДБН В.2.5-28-2006 [18] природне освітлення в виробничих цехах передбачається (100...200) лк, а при загальному 150 лк. Виробниче приміщення повинно бути рівномірно освітлене, мати раціональний напрямок світлового потоку, виключати сліпучу дію світла і утворення різких тіней. Штучне освітлення доповнює природне – світлом неба, що потрапляє через світлові прорізи в стінах цеху. Фактична освітленість 150 лк.

Рекомендоване значення яскравості в полі зору працівника повинно лежати в межах 2,5 %.

Визначаємо відношення відстані між світильниками  $L$  і висоті їх підвісу  $h_c$ . Залежно від типу світильників відношення  $L/h_c$  при розташуванні світильників прямокутником може бути рівним 0,1...1,2.

При  $h_c = 3$  м;  $L = 0,6$  м, отримуємо

$$\frac{L}{h_c} = \frac{0,6}{3} = 0,2.$$

Висота світильників над робочою поверхнею, м

$$H_c = h - \frac{L}{h_c} - h_p = 3 - 0,2 - 0,9 = 1,9,$$

де  $h$  – загальна висота приміщення, м;

–  $h$  – загальна висота приміщення, м;

–  $h_p$  – висота від пола до поверхні, що освітлюється, м.

Знаходимо відстань між рядами світильників, м

$$L = 1.4 \cdot H_c = 1.4 \cdot 1.9 = 2.66.$$

Визначаємо площу приміщення, м<sup>2</sup>

$$S = A \cdot B = 4.2 \cdot 4 = 16.8.$$

Коефіцієнт запасу, який передбачає зменшення світлової віддачі ламп при старінні і забрудненні, приймаємо рівним 1,5. Як джерело світла використовуються УСП – 35 з двома лампами ЛБ – 40. Залежно від рівня освітленості, площі приміщення, і висоти підвісу приймаємо питому потужність лампи  $W = 12$  Вт/м<sup>2</sup>.

Загальна встановлювана потужність, Вт

$$P = S \cdot W = 16.8 \cdot 12 = 202.$$

Знаходимо кількість ламп, шт.

$$n = \frac{P}{N} = \frac{202}{40} = 5,$$

де  $N$  – потужність однієї лампи, дорівнює 40 Вт.

Світильники встановлюються у три ряди.

При розрахунку загального рівномірного освітлення приймаємо метод коефіцієнта використання.

Величина світлового потоку лампи визначається за формулою, лм

$$F = E_H \cdot K_3 \cdot \frac{z}{n} \cdot \eta,$$

де –  $E_H$  – нормована мінімальна освітленість, лм, [18];

- $K_3$  – коефіцієнт запасу;
- $n$  – кількість світильників;
- $\eta$  – коефіцієнт використання;
- $z$  – коефіцієнт рівномірності.

Для визначення значення коефіцієнта використання необхідно знати індекс приміщення, який розраховується по формулі

$$i = \frac{S}{H_c \cdot (A + B)} = \frac{16,8}{1,9 \cdot (4,2 + 4)} = 1,07,$$

де –  $S = 16,8 \text{ м}^2$  – площа приміщення;

- $A$  та  $B$  – сторони приміщення, м.

Коефіцієнт використання  $\eta = 45$ , коефіцієнт рівномірності освітлення  $z = 0,9$ .

$$F_{\text{роз}} = 400 \cdot 1,5 \cdot \frac{0,9}{15} \cdot 45 = 1620.$$

### 3.1.2 Рівень шуму в робочих приміщеннях

Враховуючи значні технічні труднощі щодо зниження рівня шуму при виконанні виробничих процесів, доводиться орієнтуватися не на рівні шуму, що спричиняють подразнення чи втомлення, а на такі допустимі рівні шуму, за яких виключається імовірність набуття працівником професійних захворювань.

При нормуванні шуму до уваги беруться різні його види. Відповідно до ДСТУ 2867 – 94 та ДСНУ 3.3.6.037 – 99 шуми класифікуються за характером спектра та часовими характеристиками. За першою ознакою шуми поділяються на широкосмужні, з неперервним спектром шириною понад одну октаву, та вузькосмужні, або тональні, у спектрі яких є виражені дискретні тони. За часовими характеристиками шуми можуть бути постійними, якщо їх рівень протягом робочої зміни (8 год) змінюється не більше, ніж на 5 дБА, та непостійними. Останні поділяються на:

- мінливі, рівень шуму яких неперервно змінюється (коливається) в часі більше, ніж на 5 дБА;
- переривчасті, рівень шуму яких змінюється ступінчасто на 5 дБА і більше;
- імпульсні, які складаються з одного або декількох звукових сигналів, кожен з яких довжиною менше 1 с; при цьому рівні шуму відрізняються не менше, ніж на 7 дБА [29].

Джерела виникнення: Виробничі процеси на підприємстві з виробництва каоліну супроводжуються шумом, особливо велика кількість шуму доводиться на цех дроблення. Джерелами шуму є обертові частини помельного обладнання, а також електродвигуни, транспортери і живильники матеріалу.

Вплив на організм людини: Шум надає шкідливий вплив на організм людини, викликаючи функціональні розлади нервової та серцево-судинної систем, швидку стомлюваність, зниження уваги і працездатності, ураження слуху.

Засоби захисту:

- зменшення і ліквідація шуму в джерелі його виникнення, з цією метою встановлюють звукопоглинальні облицювання і глушники шуму;
- зменшення шуму на шляху його поширення, для цього встановлюють звукопоглинальні екрани і конструкції між помольним

обладнанням і робочою зоною, а також звукопоглинальні кабінки спостереження;

– зниження шумового впливу з використанням засобів індивідуального захисту, для цього використовують протишумові каски, спеціальні навушники, вкладиші у вушну раковину, захисну дію цих засобів засновано на ізоляції й поглинання звуку.

– для зниження рівня вібрації обладнання для подрібнення і помелу матеріалів встановлюється в окремих приміщеннях на віброізоляційних фундаментах із застосуванням амортизаторів зі сталевих пружин і гумових прокладок. На вібраційну поверхню кожухів, огорож та інших деталей наносять вібропоглинаючі покриття, виконане з гуми, пластика або вібропоглинаючих мастик. Ці покриття розсіюють енергію коливань. Для індивідуального захисту від впливу вібрацій застосовується взуття на товстій підшві (гумова) або підшві з повсті, а також рукавички, що гасять вібрацію.

### 3.1.3 Підвищення або зниження температури повітря навколишнього середовища

Значне перегрівання організму супроводжується порушенням водно-електролітного обміну, циркуляторними розладами, периваскулярним та перицелюлярним набряками, дрібнокрапковими крововиливами у мозок, що призводить до втрати свідомості з можливими негативними наслідками [30].

Джерела виникнення: природні явища, погодні умови.

Вплив на організм людини: допустимий стан мікрокліматичних умов – це взаємозв'язок параметрів мікроклімату, які при тривалості і систематичному впливі на людину можуть викликати зміни функціонального і теплового стану організму і напруження реакцій терморегуляції, що не виходять за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому не виникає ушкоджень або порушує стану здоров'я, але можуть спостерігатися

стан теплового дискомфорту, погіршення самопочуття і зниження працездатності.

У випадку погіршення самопочуття (загальна слабкість, розбитість, головний біль, головокружіння, шум у вухах, сонливість, спрага, нудота, гіперемія шкірного покриву, прискорення пульсу та дихання, підвищена температура тіла, загальмований психічний стан або психомоторне збудження) слід негайно звернутися по медичну допомогу [30].

Метеорологічні умови, або мікроклімат, залежать від теплофізичних особливостей технологічного процесу, клімату, сезону року.

Засоби захисту: Видача засобів індивідуального захисту, в літню пору легкого спец. одягу, в зимовий час утеплений спец. одяг.

### 3.2 Характеристика небезпечних факторів на виробництві

#### 3.2.1 Небезпечність ураження електричним струмом

Електричний струм – це спрямоване переміщення електричних зарядів усередині провідної речовини (усередині металів, рідких провідників і т. д.). Визначальним фактором наслідків електротравм є сила струму, тривалість і шлях протікання струму через тіло людини. Електричний струм, проходячи через тіло людини, обумовлює перетворення електричної енергії в інші види і спричиняє термічну, електролітичну та біологічну дії.

Термічна дія полягає в тому, що струм проходячи через тіло людини, нагріває його, як і будь який провідник, через який він проходить. Для використання цієї властивості електричного струму працюють електронагрівальні прилади. Таким чином, органи людського тіла, електричний струм може викликати їхні опіки, обуглювання тканини і всього тіла [31].

Джерела виникнення: За умовами електробезпеки, цех відповідно до вимогою ПВЕ (правила встановлення електрообладнання) відноситься до категорії з підвищеною небезпекою (2 клас).



Для захисту людей від ураження електричним струмом виробниче обладнання повинно відповідати таким вимоги:

- струмопровідні частини виробничого обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути надійно ізольовані або розташовані в недоступних для людей місцях;
- металеві частини виробничого обладнання, які внаслідок пошкодження ізоляції струмоведучих частин можуть опинитися під напругою небезпечної величини, повинні бути заземлені (занулені).

У схемі електроланок обладнання передбачається пристрій централізованого відключення мережі. Майданчик для обслуговування сушильних агрегатів знаходиться вище підлоги, обладнується міцною огорожею і суцільний обшивкою по нижньому контуру.

Правилами будови електричних установок вважаються безпечними, у відношенні до безпеки людини і пожежному відношенні, такі установки, в яких витік між двома нижніми запобіжниками не більше 1 мА. Це забезпечується опором ізоляції 120 кОм.

Вплив на організм: дія електричного струму на людину носить різний характер. Електричний струм, проходячи через організм людини, викликаючи різні пошкодження шляхом електричного, термічного і біологічного впливу.

Електричні травми являють собою чітко виражені місцеві ушкодження тканин організму, викликані впливом електричного струму (або електричної дуги).

Засоби захисту:

- дозволяється користуватися лише справними приладами. З'єднувальні шнури повинні мати неушкоджену ізоляцію. Всі з'єднання повинні бути надійними і виключати можливість випадкового замикання або від'єднання проводів під час роботи;
- всі великі електроприлади в металевих корпусах необхідно постачати захисним заземленням;

- всі монтажні роботи, а також приєднання і від'єднання проводів можна робити тільки на установці, повністю відключеною від електромережі;
- слід уникати дотику до провідників, що знаходяться під напругою;
- для захисту працівників, обслуговуючого електротехнічні установки, від ураження електричним струмом застосовуються захисні засоби, до яких відносяться діелектричні рукавички, інструменти електромонтерів з ізолюючими ручками;
- недоступністю струмоведучих частин;
- належна, а в окремих випадках підвищена (подвійна) ізоляція;
- заземлення або занулення корпусів електрообладнання та елементів електроустановок, які можуть опинитися під напругою;
- надійним і швидкодіючим автоматичним захисним вимикачем.

Заземлення та занулення електроприймачів виконано відповідно до глави 1.7 і 7.1.5 ПУЕ – 85.

Крім заземлення, електроустановка підлягає занулення – обов'язковому з'єднанню металевих частин електроустановки з нульовою жилою живильного кабелю.

З метою вирівнювання потенціалу і зняття статичної електрики всі металеві трубопроводи і металеві корпуси технологічного обладнання приєднати до проектного заземлювачю внутрішнього контуру заземлення операторської.

Захист від прямих ударів блискавки приміщення операторської і зовнішньої установки забезпечує блискавкоприймач, виконаний з стрижня діаметром 20 мм, змонтований на димарі  $H = 16,2$  м. Захистом від прямого попадання блискавки в обладнання ділянки служить металева покрівля навісу.

Металеві трубопроводи та відгалуження від них, металеві конструкції технологічного обладнання підлягають захисту від проявів статичної електрики і вторинних проявів блискавки шляхом приєднання до проектного зовнішнього контуру заземлення. Для захисту від статичної

електрики на технологічних трубопроводах у місцях фланцевих приєднань встановлено перемичку з сталевого троса діаметром 6 мм.

### 3.2.2 Небезпека від рухомих машин та механізмів

Джерела виникнення: приводи машин і механізмів, транспортери, штовхачі.

Властивості: рухомі і обертові частини машин і механізмів, клино-ремінні та зубчасті передачі.

Вплив на організм: механічні впливи – удари, садна, переломи.

Засоби захисту: обов'язкове огороження рухомих частин, огороження небезпечних зон, системи оперативного вимикання двигунів механізмів.

### 3.2.3 Небезпека вибуху і пожежі

Джерела виникнення: обвалення елементів будівельних конструкцій, замикання електричних мереж.

Властивості речовини: відкрите полум'я, іскра, електрична дуга, нагріті поверхні і ін.

Вплив на організм: Втрата видимості внаслідок задимлення, знижена концентрація кисню.

Засоби захисту: Електропроводку з метою уникнення виникнення короткого замикання, здатного привести до пожежі, ізолюють. Ізолюють від вологи розетки, розташовані в санвузлах та на зовнішніх стінах. Встановлюють автоматичні запобіжники. Теплоізолюють газові та електричні плити від дерев'яних меблів. Для гасіння недопалків використовують попільнички. Не допускаються витіки газового палива з трубопроводів і утворення газо-повітряної суміші в замкнених об'ємах.

### 3.3 Екологічна безпека

У виробництві каоліну утворюється забруднення з надходженням в навколишнє середовище великої кількості пилу.

Таблиця 3.2 – Екологічна безпека

| Природні ресурси і компоненти навколишнього середовища | Шкідливий вплив  | Природоохоронні заходи   |
|--|--|--|
| Земля і земельні ресурси.                              | Знищення і пошкодження ґрунтового шару.<br>Засмічення ґрунту виробничими відходами та сміттям.   | Раціональне планування місць і термінів проведення робіт, дотримання відводів земель і рекультивація земель. Повторне використання виробничих відходів, вивіз і поховання. Заходи по відновленню земель, озеленення території. |
| Вода і водні ресурси.                                  | Засмічення побутовими стоками.   | Очисні споруди для побутових стоків, каналізаційні пристрої і т. д.  |
| Повітряний басейн.                                     | Викиди пилу і шкідливих речовин в атмосферу спостерігаються на ділянці навантаження і розвантаження глини, на складах, під час перевезення сировини стрічковими транспортерами, при приготуванні сировинної суміші змішувачах. | Заходи по оснащенню потужним обладнанням, що уловлює пил.  |

Для очищення газів від пилу застосовуються циклони і пилоуловлювальні апарати. Для створення сприятливих умов, територія заводу і прилеглі до нього райони озеленюються, при цьому, доцільно застосовувати дерева і рослини, які поглинають характерні для заводу викиди. При виробництві каоліну на підприємстві утворюються забруднені стічні води, які в повному обсязі перекачуються. Побутові стічні води скидаються в існуючу побутову каналізацію заводу, звідки вони перекачуються колектором

і насосною станцією на міські очисні споруди. В таблиці 3.2 наведені шкідливі впливи на певні ресурси і компоненти навколишнього середовища та природоохоронні заходи.

Найважливішим напрямком зниження промислових викидів в повітряний басейн є вдосконалення технології виробництва процесів і основного технологічного обладнання [19].

Для запобігання виносу дрібних частинок глини за сушильним барабаном встановлений батарейний циклон ЦН – 15 з чотирьох циклонів діаметром 700 мм.

Для запобігання можливості захворювань, що викликаються пилом на заводі, проводять нижче перераховані заходи:

- в якості вентиляції в приміщенні цеху встановлені витяжні осьові вентилятори і відсмоктувачі;
- проводиться відсмоктування і очищення запиленого повітря над стрічковим транспортером сировини в підготовчому відділенні;
- двостадійне очищення газів, що відходять з сушильного барабана.

#### 3.4 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Виробництво по виготовленню каоліну, як і багато інших виробництв, є стратегічним об'єктом. Тут є ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного або воєнного характеру.

Виділимо найбільш ймовірні НС для даного підприємства:

##### 1. Техногенного характеру:

- пожежі, вибухи на комунікаціях та технологічному обладнанні промислових об'єктів;
- раптове обвалення будівель. Обвалення виробничих будівель і споруд;

– аварії на електроенергетичних мережах. Аварії на автономних електростанціях з довготривалою перервою електропостачання всіх споживачів.

## 2. Природного характеру:

– геологічно небезпечні явища (екзогенні геологічні явища);  
– метеорологічні і агрометеорологічні небезпечні явища. Бурі ((9...11) балів). Урагани ((12...15) балів). Сильний снігопад.

## 3. Екологічного характеру:

– надзвичайні ситуації, пов'язані зі зміною складу і властивостей атмосфери (повітряного середовища). Перевищення гранично допустимої концентрації шкідливих домішок в атмосфері за змістом мінерального пилу і змістом СО.

### 3.4 Пожежна і вибухова безпека

Ділянка помелу глини за пожежною небезпекою відповідно до ДБН В 1.1 – 7 – 2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» відноситься до категорії «Д» [20].

Ділянка облаштована засобами пожежогасіння за «Правилами пожежної безпеки України» ДНАОП 0.01 – 1.01 – 95, місце розташування пожежного інвентарю та його комплектність встановлені міською пожежною інспекцією [21].

При розміщенні операторської виконані вимоги ДБН Б.2.2 – 12:2019 «Планування та забудова територій» щодо протипожежних розривів [22].

Існуючі автодороги з твердим покриттям забезпечують під'їзд пожежних автомобілів до будівлі операторської.

Категорія будівель визначена на підставі методики ОНТП – 24 – 86 [23].

Ступеня вогнестійкості прийняті по ДБН В.1.1–7–2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва»:

– Зовнішні несучі конструкції Е 15 МО;

– Перекриття RE 15 MO [24].

Категорії виробництв і класи приміщень по ПУЕ наведені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Категорії виробництв і класи приміщень по ПУЕ

|                                 |   |                       |
|---------------------------------|---|-----------------------|
| Найменування, будівель і споруд | Категорії приміщень за НАПБ Б.07.005 – 86 | Клас приміщень за ПУЕ |
| операторська                    | Г   | —                     |

Для забезпечення безпеки евакуації персоналу з приміщення в разі пожежі відповідно до ДБН В.1.1 – 7 – 2002 і ПУЕ передбачається необхідна кількість, евакуаційних виходів. Число евакуаційних виходів – один.

Ширина шляхів евакуації – не менше 1,0 м, дверей не менше 0,8 м. Висота проходів і дверей не менше двох метрів. Двері, що ведуть з приміщень назовні, самозакриваються з ущільненням в притворах.

Як природні заземлювачі використовується металева арматура залізобетонних фундаментів будівель. Опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом в будь-який час року [25].

В якості протипожежних заходів передбачається:

- виконання захисту від прямих ударів блискавки будівель блискавковідводом висотою 1 м, встановленим на димарі (H = 15 м);
- застосування кабелів з ізоляцією і оболонкою, які не підтримують горіння;
- комплектація приміщення первинними засобами пожежогасіння на вимогу ДБН В.2.5 – 20 – 2001 «Газопостачання» п. 6.84 вогнегасниками порошковими ВП – 9Б із розрахунку один вогнегасник на один газопальниковий пристрій [26].
- укомплектування місця чергового персоналу телефонним зв'язком.

У кожного об'єкта, що підлягає оснащенню засобами пожежогасіння, необхідно передбачити ящик з піском – 0,5 м<sup>3</sup>, покривало пожежне – 2 x 1,5 м, совкові лопати, багри, лом.

## ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті було виконано:

1. Експериментальні дослідження кінетики сушіння наступних матеріалів: річного піску, жовтої та каолінової глини.

В результаті отриманих даних було підтверджено, що швидкість сушіння залежить від структури матеріалу, що висушується. Пісок висушується швидко, приблизно у два рази, в порівнянні із глинами. Різниця у швидкості сушіння каолінової та жовтої глини майже немає;

2. Розрахунок горіння палива.

Отримано такі числові характеристики: 51418 кДж/кг – кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 кг палива; 29,95 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> – загальна кількість атмосферного повітря, що необхідне для горіння 1 м<sup>3</sup> палива та розведення димових газів до  $t = 750$  °С; 72,37 м<sup>3</sup>/кг – загальна питома маса сухих газів, що отримується при спалюванні 1 кг палива та розведення топкових газів до  $t = 750$  °С;

3. Розрахунок часу сушіння каолінової глини заданого гранулометричного складу. Час, що матеріал знаходиться в барабані = 72,3 хв.;

4. Розрахунок теплового та матеріального балансу.

Матеріальний баланс. Кількість вологого матеріалу, що надходить в барабан дорівнює 13895 кг/год, кількість сухого матеріалу, що виходить з барабану дорівнює 12000 кг/год. Кількість водяних парів в димових газах, що надходять дорівнює 369,32 кг/год, що виходять 10771,19 кг/год.

Тепловий баланс. Кількість тепла, що утворюється від згоряння палива дорівнює 7179,375 МДж/год, кількість тепла, що витрачається на нагрів матеріалу дорівнює 866,976 МДж/год.

Нев'язка матеріального балансу дорівнює -0,41 %, нев'язка теплового балансу дорівнює -2,3 %, що є допустимим;

Для дослідження механізмів та закономірностей видалення вологи в процесі сушіння були проведені експерименти на лабораторній установці.



Практична значимість даної роботи обумовлена актуальністю даної проблеми для підприємства. Реалізація запропонованих рішень дозволить отримати продукт потрібної якості що в свою чергу відкриє експортні можливості для підприємства.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Allbest: Проект сушильного барабана. URL: [https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00167387\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00167387_0.html) (дата звернення: 15.10.2019).
2. Новые огнеупоры: Шлегель. URL: <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/24/26> (дата звернення: 15.10.2019).
3. Все лекции: Основы сушки материалов. URL: <http://vse-lekcii.ru/zheleznodorozhnyj-transport/hladotransport/osnovy-sushki-materialov> (дата звернення: 15.10.2019).
4. Учебные материалы: Сушильный аппарат непрерывного действия. URL: [https://works.doklad.ru/view/T3U\\_aWZZad0.html](https://works.doklad.ru/view/T3U_aWZZad0.html) (дата звернення: 23.10.2019).
5. Учебные материалы: Проектирование сушильного барабана. URL: <https://works.doklad.ru/view/-liJ8D-k4tY.html> (дата звернення: 23.10.2019).
6. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков-М.: «Энергия», 1968. – 472с.
7. Сажин Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин-М.: «Химия», 1984. – 320с.
8. Лурье Л. М. Опыт эксплуатации барабанных сушилок в металлургии тяжелых и цветных металлов / Л. М. Лурье-М.: «Цветметинформация», 1967. – 86с.
9. Studfile: 17.7. Основы кинетики процесса конвективной сушки. URL: <https://studfile.net/preview/2036682/page:5/> (дата звернення: 3.1.2020).
10. Основы научных исследований: Учебное пособие. URL: [http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/454/77454/58544?p\\_page=6#:~:text=Основной%20целью%20эксперимента%20являются%20выявление,глубокое%20изучение%20темы%20научного%20исследования.&text=Естественный%20эксперимент%20предполагает%20проведение%20опытов%20в%20естественных%20условиях%20существования%20объекта%20исследования](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/454/77454/58544?p_page=6#:~:text=Основной%20целью%20эксперимента%20являются%20выявление,глубокое%20изучение%20темы%20научного%20исследования.&text=Естественный%20эксперимент%20предполагает%20проведение%20опытов%20в%20естественных%20условиях%20существования%20объекта%20исследования) (дата звернення: 21.1.2020).

11. Промышленные теплообменные процессы и установки: Учебник для вузов / Бакластов А. М., Горбенко В. А., Данилов О. Л. -М.: «Энергоатомиздат», 1986. – 328с.
12. Studfile: Лабораторная работа № 1 URL: <https://studfile.net/preview/4693550/> (дата звернення: 11.4.2020).
13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.-Чинний від 01.12.99.-К.:Держстандарт України, 1999.-3с.
14. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.-Чинний від 18.12.02.-К.:Держстандарт України, 2002.-4с.
15. ДСП-201-97. Охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами).-Чинний від 09.07.97.-К.:Держстандарт України, 1997.-46с.
16. ГОСТ 12.1.005 – 88. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони дійсний.-Чинний від 01.01.89.-М.: Стандартиформ, 1989.-48с.
17. ГОСТ 12.0.003-74. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація.-Чинний від 01.01.76.- М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.-7с.
18. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.-Чинний від 01.10.06.- К.: Мінбуд України, 2006.-96с.
19. Studbooks: Мероприяття по забезпеченню нормативних вибросов и их снижению. URL: [https://studbooks.net/941979/ekologiya/meropriyatiya\\_obespecheniyu\\_normativnyh\\_vybrosov\\_snizheniyu](https://studbooks.net/941979/ekologiya/meropriyatiya_obespecheniyu_normativnyh_vybrosov_snizheniyu) (дата звернення: 26.3.2020).
20. ДБН В 1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.-Чинний від 01.05.03.- К.: Держбуд України, 2003.-42с.
21. ДНАОП 0.01 – 1.01 – 95. Правила пожежної безпеки України.- Чинний від 05.3.15.- К.: Держбуд України, 2014.-86с.

22. ДБН Б.2.2 – 12:2019. Планування та забудова територій.-Чинний від 05.3.15.- К.: Мінрегіон України, 2019.-185с.
23. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.-Чинний від 03.12.07.- К.: Мінрегіон України, 2007.-5с.
24. ДБН В.1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.-Чинний від 1.6.17.- К.: Мінрегіон України, 2017.-44с.
25. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання) .-Чинний від 21.08.17.- К.: Мінрегіон України, 2017.-617с.
26. ДБН В.2.5 – 20 – 2018. Газопостачання.-Чинний від 1.07.19.- К.: Мінрегіон України, 2017.-113с.
27. Перечень вредных факторов по профессиям: Опасные и вредные производственные факторы. URL: <https://www.sop.com.ua/article/ru/422-qqq-14-m2-05-02-2014-opasnye-i-vrednye-proizvodstvennyye-factory> (дата звернення: 12.3.2020).
28. Охрана труда: Розділ з охорони праці дипломної роботи зразок. URL: <https://ohranatrud-ua.ru/razdely-kursovykh-i-diplomnykh-po-ot/2559-rozdil-z-okhoroni-pratsi-diplomnoji-roboti.html> (дата звернення: 12.3.2020).
29. Навчальні матеріали онлайн: Нормування та вимірювання шуму. URL: [https://pidru4niki.com/1707032638294/bzhd/normuvannya\\_vimiryuvannya\\_shumu](https://pidru4niki.com/1707032638294/bzhd/normuvannya_vimiryuvannya_shumu) (дата звернення: 16.3.2020).
30. Енергодарська міська рада: Про вплив високої температури навколишнього середовища на організм людини. URL: <https://www.en.gov.ua/dsns-m-energodara/pro-vpliv-visoko-temperaturi-navkolishnyogo-seredovischa-na-organzm-lyudini> (дата звернення: 24.2.2020).
31. Шаргородська районна державна адміністрація: Небезпека електричного струму та міри захисту від враження електрострумом. URL: <http://rda.sharrayrada.gov.ua/fakti/nebezpeka-elektrichnogo-strumu-ta-miri>

[zahistu-vid-vrazhennya-elektrichnim-strumom-251018/](http://zahistu-vid-vrazhennya-elektrichnim-strumom-251018/) (дата звернення: 24.2.2020).

32. Studfile: 24. Сушка, классификация сушильных процессов. URL: <https://studfile.net/preview/1970929/page:14/> (дата звернення: 3.4.2020).

33. Инфопедия: Классификация способов сушки. URL: <https://infopedia.su/16x6fd5.html> (дата звернення: 5.4.2020).

34. Findpatent.ru: Барабанная вакуумная сушилка термолabileльных продуктов с двустадийным индуктивным нагревом. URL: <https://findpatent.ru/patent/237/2374580.html> (дата звернення: 10.6.2020).

35. Chemport: Сушка. URL: [http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article\\_6364.html](http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_6364.html) (дата звернення: 12.9.2020).

36. Studopedia: Материальный баланс сушки. URL: [https://studopedia.su/5\\_21236\\_materialniy-balans-sushki.html](https://studopedia.su/5_21236_materialniy-balans-sushki.html) (дата звернення: 12.9.2020).

37. Сушильные установки: Сушильные установки. Виды, устройство сушильных установок. URL: [https://eti.su/articles/over/over\\_1555.html](https://eti.su/articles/over/over_1555.html) (дата звернення: 18.3.2020).

38. Справочник химика 21. URL: <https://chem21.info/page/142120127107046038081003221052224112044151165172/> (дата звернення: 18.3.2020).

39. Sushilki.info: Конвективные сушильные установки. URL: <https://sushilki.info/articles/archive4/konvektivnie-sushilnie-ustanovki.html> (дата звернення: 7.10.2020).

40. Ten24: Принцип действия туннельной сушилки. URL: <https://Ten24.Com.Ua/Blog/Printsip-Deystviya-Tunnelnoy-Sushilki/> (дата звернення: 7.10.2020).

41. Pres88: Проектирование, производство и монтаж сушилок для опилок. URL: <https://www.pres88.com.ua/oborudovanie/sushilki-dlya-opilok/> (дата звернення: 14.10.2020).