

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра "Процеси та обладнання хімічних
і нафтопереробних виробництв"

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

підпис, дата

Кваліфікаційна робота бакалавра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг
обладнання хімічних виробництв"

Тема роботи: Виробництво хлориду натрію. Розробити
барабанну сушарку

Виконала:
студентка групи ХМ.дн-64гд
Головань Олена Василівна

підпис

Залікова книжка

№ _____

Кваліфікаційна робота бакалавра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20 ____ р.

Підпис голови
(заступника голови) комісії

Керівник:

кандидат технічних наук

Острога Руслан Олексійович

підпис, дата

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"
Освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних виробництв"

Курс 2 Група ХМ.дн-64гд Семестр 4

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Студентка Головань Олена Василівна

1 Тема проекту: Виробництво хлориду натрію. Розробити барабанну сушарку

2 Вихідні дані: Розробити барабанну сушарку для сушіння NaCl продуктивністю 6800 кг/год. за вологим матеріалом. Вологість матеріалу (% на загальну масу): початкова – 5,2; кінцева – 0,2. Температура матеріалу (°C): початкова – 26; кінцева – 60. Теплоносій – повітря з початковою температурою 150 °C. Розмір частинок матеріалу (мм): максимальний – 1,4; мінімальний – 0,3. Теплові втрати 10 %.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

- | | |
|--|------------|
| 1. <u>Технологічна схема установки</u> | – 1,0 арк. |
| 2. <u>Складальне креслення апарата</u> | – 1,0 арк. |
| 3. <u>Складальні креслення вузлів</u> | – 1,0 арк. |

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р.О. Острога, М.С. Скиданенко, Я.Е. Михайловський, А.В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Чернобыльский И.И. Машины и аппараты химических производств / И.И. Чернобыльский, А.Г. Бондарь, Б.А. Гаевский [и др.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 456 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	x				
2 Технологічна частина		xx			
3 Проектно-конструкторська частина			xx		
4 Розробка креслень				xx	
5 Оформлення записки					x
6 Захист роботи					x

6 Дата видачі завдання

жовтень 2019 р.

Керівник

підпис

ст. викл. Острога Р.О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 45 с., 11 рис., 4 табл., 2 додатки, 18 джерел.

Графічні матеріали: технологічна схема установки отримання хлориду натрію, складальне креслення барабанної сушарки, складальні креслення вузлів та деталей – усього 3 аркуша формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Виробництво хлориду натрію. Розробити барабанну сушарку».

У роботі наведено теоретичні основи і особливості процесу сушіння, виконані технологічні розрахунки процесу, визначені габаритні розміри апарата, обґрунтований вибір конструкції апарата та матеріалів для виготовлення основних його елементів. Виконано розрахунок та проведено підбір допоміжного обладнання. Викладена організація монтажних і ремонтних робіт барабанної сушарки. Розрахунками на міцність та герметичність показана надійність роботи запроектованого апарата. У розділі «Охорона праці» представлена характеристика та дія на організм людини шкідливих речовин у повітрі робочої зони та розглянуто нормування вмісту шкідливих речовин у повітрі.

Ключові слова: АПАРАТ, УСТАНОВКА, СУШАРКА, БАРАБАН, ХЛОРИД НАТРІЮ, ЦИКЛОН, РОЗРАХУНОК, ШКІДЛИВІ РЕЧОВИНИ.

Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	6
1.1 Опис технологічної схеми установки	6
1.2 Теоретичні основи процесу	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів	12
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	17
2.1 Технологічні розрахунки	17
2.2 Конструктивні розрахунки	20
2.3 Гідравлічний опір апарата	21
2.4 Вибір допоміжного обладнання	23
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	26
4 Монтаж та ремонт апарата	34
4.1 Монтаж апарата	34
4.2 Ремонт апарата	36
5 Охорона праці	39
Список літератури	44
Додаток А – Схема реального процесу сушіння на діаграмі Рамзина	
Додаток Б – Специфікації	

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Виробництво НаСЛ Барабанна сушарка Пояснювальна записка</i>	Лім.	Лист	Листів
Розробник.	Головань						4	45
Перевір.	Острога							
Рецензії.								
Н. Контр.								
Затвердив.	Склабінський					<i>СумДУ, ХМ.дн-64гд</i>		

Вступ

У хімічній промисловості здійснюються різноманітні процеси, в яких вихідні матеріали у результаті хімічної взаємодії зазнають глибоких перетворень, які супроводжуються зміною агрегатного стану, внутрішньої структури і складу речовин. У різних галузях народного господарства широко поширені процеси видалення рідини (вологи) з поверхні або із внутрішніх шарів різних матеріалів. У якості таких рідин можуть бути: вода, метанол, бензин, різного роду суміші тощо.

Видалення вологи з твердих і пастоподібних матеріалів здешевлює їх транспортування і надає їм певні фізико-хімічні властивості, а також зменшує корозію апаратури. Вологу можна видаляти механічними способами: віджимання, центрифугування, відстоювання – цими способами волога видаляється частково. Більш ретельне видалення вологи здійснюється шляхом теплового сушіння: випаровування вологи та видалення парів.

Процес теплового сушіння може бути природним і штучним. Природне сушіння застосовується дуже рідко. За фізичною сутністю сушіння є складним дифузійним процесом, швидкість якого визначається швидкістю дифузії вологи з глибинних частин матеріалу до поверхні, а потім – у навколишнє середовище.

Таким чином, під сушінням розуміють сукупність термічних і масообмінних процесів у поверхні (зовнішня задача) і всередині (внутрішня задача) вологого матеріалу, що сприяють його зневодненню. Зневоднення матеріалів, у тому числі і сушіння, призначається для поліпшення їх якості і довговічності. Тому в ряді випадків сушіння супроводжується структурно-механічними, хімічними, біохімічними, реологічними змінами. Швидкість протікання цих процесів і ступінь їх завершеності залежить не тільки від способу підведення теплоти до матеріалу, а й від режиму сушіння [1].

У результаті комплексної роботи над проектом закріплюються практичні навички в розрахунках і проектуванні апаратів хімічної технології. Кваліфікаційну роботу бакалавра виконано у відповідності до методичних вказівок із дотриманням нормативних вимог і представленням усіх регламентованих розділів [2].

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

1 Технологічна частина

1.1 Опис технологічної схеми установки

Кухонну сіль (NaCl) в Україні отримують із насичених розчинів хлориду натрію (розсолів) шляхом випаровування води. Отримання насичених розчинів здійснюється штучним підземним вилуговуванням (розчиненням) соляних покладів. Це спеціальний гірничотехнічний спосіб розробки родовищ солі, розташованих, як правило, на глибинах понад 600 м.

Вилуговування солі здійснюють через свердловини діаметром 0,25–0,5 м. Окрім іонів хлориду натрію в розчин потрапляють іони і інших, небажаних, домішок. До таких належать, у першу чергу, накипформуючі домішки, а також інші, які по мірі упарювання розсолу переходять в малорозчинний стан, осідаючи на гріючих поверхнях випарних апаратів, або забруднюючи кухонну сіль. Тому, перш ніж отримувати сіль, такі розсоли необхідно очищати. Очищення полягає у видаленні домішок кальцію, магнію і нерозчинного у воді осаду.

Технологічна схема виробництва хлориду натрію представлена на рис. 1. Принцип її роботи полягає у наступному. Очищений розчин надходить на випарні установки, які містять дві чотирикорпусні системи. По мірі випаровування води в апаратах відбувається кристалізація солі. Кристали кухонної солі разом із маточним розсолом (солепульпою) з випарних апаратів надходять у відстійники, де відбувається як згущення, так і освітлення розсолу. Освітлений розсіл повертається на випарювання, а сіль потрапляє на зневоднення, яке відбувається у центрифугах. Далі сіль із вологістю 5,2 % мас. направляється на сушіння.

Сушіння солі – це заключна технологічна операція по отриманню готового продукту – харчової кухонної солі «Екстра». Видалення вологи шляхом випаровування відбувається в барабанних сушарках, через які пропускають потік гарячого повітря з початковою температурою 150°C (відповідно до завдання на проект). Сушіння закінчується, коли вологість продукту становить не більше 0,2 % мас.

Таким чином, отримувана за даною технологією сіль може використовуватися для харчових цілей.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

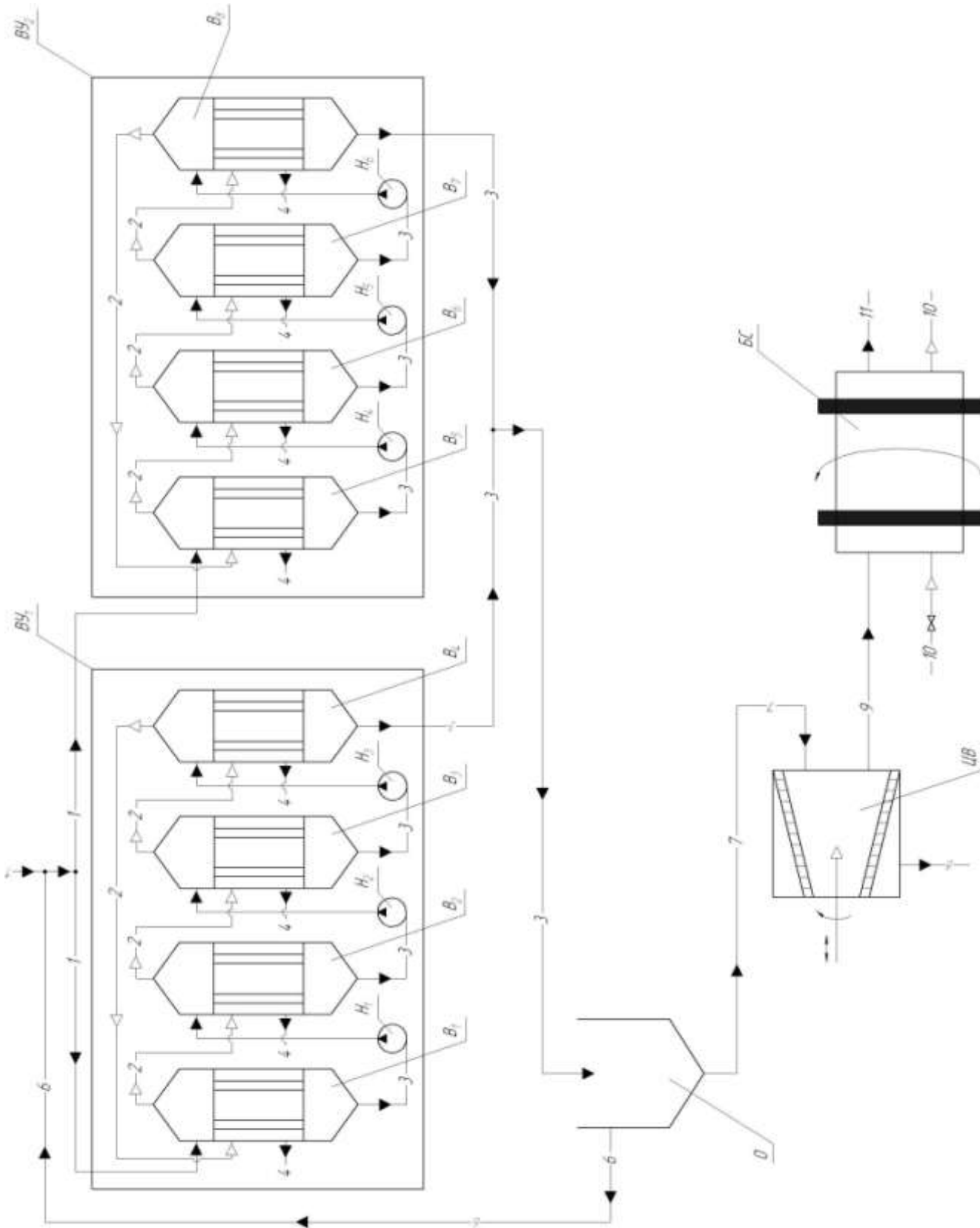


Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва хлориду натрію: ВУ₁₋₂ – випарна установка; В₁₋₈ – випарний апарат; О – відстійник; ЦВ – центрифуга вібраційна з горизонтальним конічним ротором; БС – барабанна сушарка; Н₁₋₆ – насос

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ

Лист

7

1.2 Теоретичні основи процесу

Теоретичні основи досліджуваного процесу, які подано у цьому підрозділі, виконано на підставі аналізу літературних джерел [1, 3–5].

Кількість вологи W , яка видаляється з матеріалу в процесі сушіння при зміні вмісту вологи матеріалу (вважаючи на суху речовину) від ω_H до ω_K ,

$$W = G \cdot (\omega_H - \omega_K),$$

де G – продуктивність сушарки за сухим продуктом, кг/с.

Якщо в якості сушильного агента використовується повітря, то його витрата розраховується по залежності:

$$G_C = \frac{W}{x_K - x_H},$$

де x_K і x_H – кінцевий і початковий вологовміст повітря в дійсній сушарці, кг/кг.

Питомий об'єм вологого повітря (віднесений до 1 кг сухого повітря) $\nu_{уд}$ (м³/кг) розраховується за формулою:

$$\nu_{уд} = \frac{R_B \cdot T}{P - \varphi_B \cdot P_{НАС}},$$

де R_B – газова постійна; для повітря $R_B = 287$ Дж/(кг·К);

T – температура повітря, К;

P – загальний тиск пароповітряної суміші, Па;

φ_B – відносна вологість повітря, частки;

$P_{НАС}$ – тиск насиченої водяної пари, Па.

Різниця питомих витрат теплоти в дійсній і в теоретичній сушарках:

$$\Delta q = q - q_T = \frac{(I_H - I_K)}{(x_K - x_H)},$$

де q і q_T – питома теплота в дійсній і теоретичній сушарках відповідно, Дж/кг;

I_H і I_K – ентальпія повітря на вході і виході з сушарки відповідно, Дж/кг.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

При відсутності додаткового підігріву повітря в сушильній камері маємо:

$$\Delta q = q_{MAT} + q_{TP} + q_{ПОТ} - c_{\omega} \cdot \theta_H,$$

де q_{MAT} – питома теплота, що витрачається на нагрівання матеріалу від температури θ_H до температури θ_K , Дж/кг;

$$q_{MAT} = \frac{G \cdot c_M \cdot (\theta_K - \theta_H)}{W},$$

де c_M – питома теплоємність сухого матеріалу, Дж/(кг·К);

q_{TP} – питома теплота на нагрівання транспортних пристроїв, Дж/кг;

$$q_{TP} = \frac{G_{TP} \cdot c_{TP} \cdot (t_{TP,K} - t_{TP,H})}{W};$$

$q_{ПОТ}$ – питомі втрати теплоти, Дж/кг. Для попередніх розрахунків зазвичай приймають

$$q_{ПОТ} = (0,05 \div 0,10) \cdot q_T.$$

Вибір способу сушіння, а відповідно і типу сушарки, залежить від хімічних властивостей матеріалу. Для сушіння як органічних, так і неорганічних речовин найбільш часто застосовуються барабанні сушарки.

Барабанні сушарки являють собою зварний циліндр – барабан, на зовнішній поверхні якого закріплені бандажні опори, кільця жорсткості і приводний зубчастий вінець; вісь барабана може бути нахилена до горизонту до 4 градусів.

Барабанні атмосферні сушарки (рис. 2) – апарати безперервної дії, які призначені для сушіння сипучих матеріалів топковими газами або нагрітим повітрям. Різновидом барабанних атмосферних сушарок є апарати з контактним підведенням тепла через спеціальну трубчасту насадку. На кінцях циліндричного корпусу барабанної сушарки є розподільні камери. Вони служать для подачі в барабан і відведення з нього теплоносія.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

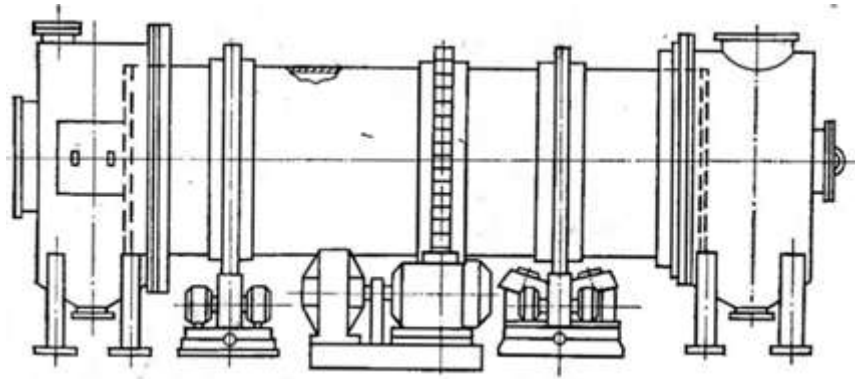


Рисунок 2 – Барабанна атмосфера сушарка

Основний матеріал для виготовлення барабанів сушарок, завантажувальних і розвантажувальних камер – вуглецеві сталі. У технічно обґрунтованих випадках допускається виготовлення барабанів, а також завантажувальних і розвантажувальних камер, частково або повністю, із жаростійких сталей спеціальних марок. Барабанні сушарки випускаються серійно [6–7].

На рис. 3 наведена схема установки з барабанною сушаркою.

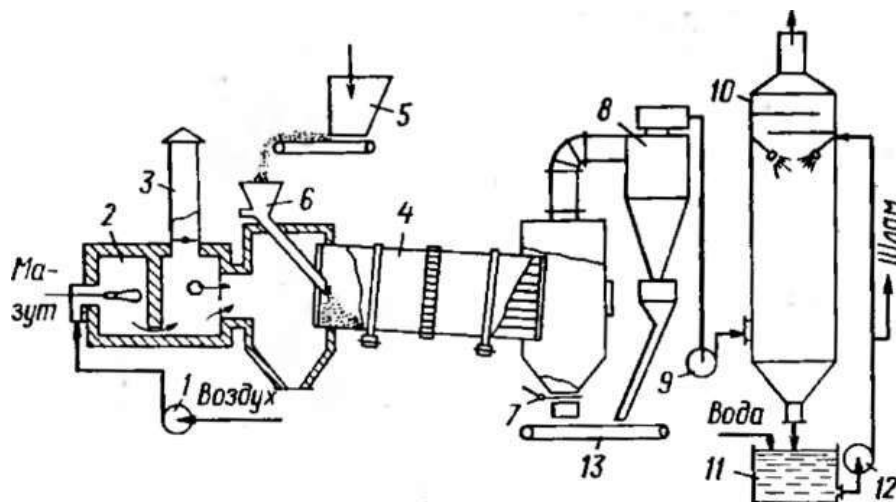


Рисунок 3 – Установка з барабанною сушаркою:

- 1 – вентилятор; 2 – топка; 3 – розтопна труба; 4 – барабанна сушарка;
- 5 – стрічковий живильник; 6 – тічка; 7 – затвор; 8 – циклон; 9 – димосос;
- 10 – скруббер; 11 – шламівідстійник; 12 – насос; 13 – стрічковий транспортер

Матеріал надходить у сушарку через живильник-дозатор 5. Гази, одержувані спалюванням в топці 2 рідкого палива, надходять через розподільну камеру в барабан 4. Сушарка працює в умовах прямогоку матеріалу і теплоносія. Висушений матеріал вивантажується через затвор – «мигалку» 7 і відводиться стрічко-

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

вим транспортером 13, гази надходять в циклон-пиловідокремлювач 8, з якого відводяться димососом 9 в мокрий скрубєр 10 і далі в атмосферу. Сушарка працює під невеликим розрідженням.

Барабанні вакуумні сушарки працюють, як правило, періодично. Їх застосовують для звільнення термочутливих матеріалів від води та органічних розчинників, а також для сушіння токсичних матеріалів [5].

Залежно від властивостей матеріалу і вимог до готової продукції застосовують сушарки середнього (залишковий тиск 3–13 кПа) або глибокого (залишковий тиск до 133,3 Па) вакууму. Вакуумні барабанні сушарки застосовують в основному у виробництві отрутохімкатів, гербіцидів, деяких полімерних матеріалів, а також в медичній, харчовій та фармацевтичній промисловостях.

Барабанна вакуумна гребкова сушарка (рис. 4) з реверсивним обертанням ротора (типу СВГР) являє собою горизонтальний циліндричний барабан із сорочкою, всередині якого встановлено лопатевий перемішувачий пристрій.

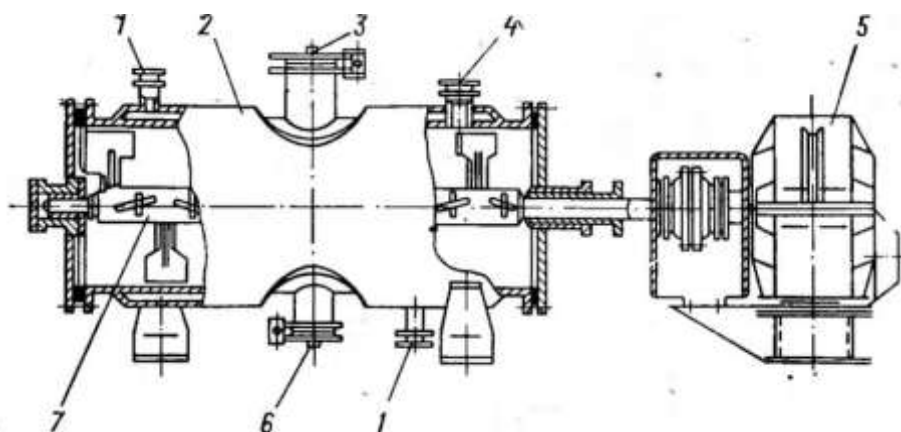


Рисунок 4 – Барабанна вакуумна гребкова сушарка типу СВГР з реверсивним обертанням ротора: 1 – штуцер для введення грійочої пари і виведення конденсату; 2 – корпус; 3 – завантажувальний штуцер; 4 – штуцер для відведення парів; 5 – електродвигун; 6 – розвантажувальний штуцер; 7 – лопатевий вал

Реверсне обертання валу – автоматичне. У цих сушарках можуть бути встановлені перемішують пристрої різних конструкцій: гребкова мішалка без обігріву, лопатева мішалка з валом, що обігрівається, або мішалка з додатковими трубчастими поверхнями теплообміну. Сушіння продукту відбувається, при контакті з нагрітими поверхнями в умовах вакууму. Залишковий тиск в апараті до 5,3 кПа.

Барабанні вакуумні сушарки (типу ВБС) з обертовим корпусом (рис. 5) відрізняються гарною герметичністю, що дозволяє використовувати їх для сушіння токсичних сипучих матеріалів. Ця сушарка містить ряд вбудованих один в інший циліндрів, які обігріваються паром низького тиску або водою. Для захисту висушених матеріалів від взаємодії з повітрям – вивантажують і охолоджують матеріал під вакуумом. За допомогою однієї цапфи підводять пару до парових сорочок циліндрів і відводять конденсат, а за допомогою іншої – завантажують вихідний матеріал і вивантажують готовий продукт (з використанням шнекового пристрою). Для створення вакууму в установці використовуються механічні або пароструминні вакуум-насоси.

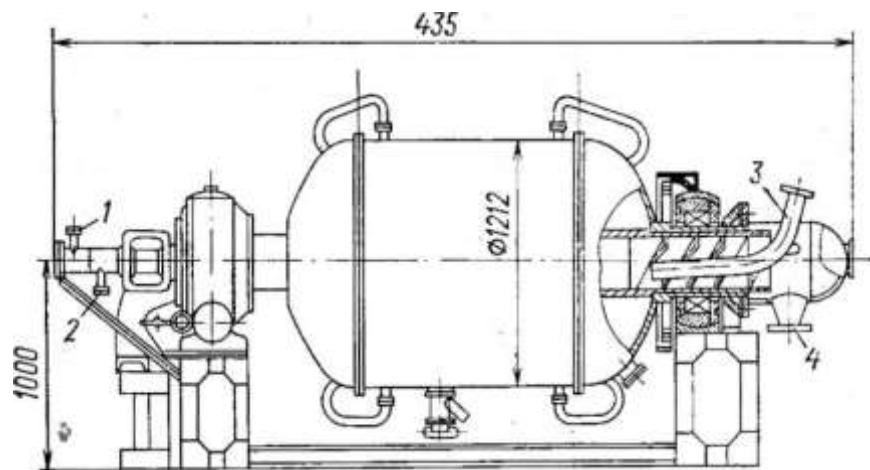


Рисунок 5 – Барабанна вакуумна сушарка типу ВБС з обертовим корпусом:
 1 – штуцер для підведення пари; 2 – штуцер для відведення конденсату; 3 – патрубок для з'єднання сушарки з вакуум-насосом; 4 – розвантажувальний патрубок

1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів

Проектована барабанна атмосферна сушарка (рис. 6) являє собою суцільно-зварний циліндр – барабан, встановлений з нахилом до горизонту на 4–6 градусів. Барабан приводиться в обертання за допомогою електромотору, через зубчасту передачу і редуктор. Число обертів барабана, зазвичай, не перевищує 5–8 обертів на хвилину. Його положення в осьовому напрямку фіксується стійкими роликами.

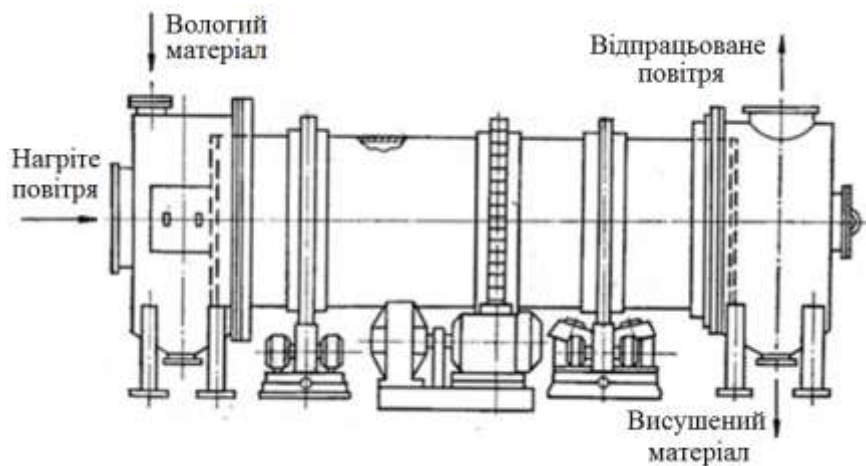


Рисунок 6 – Барабанна атмосферна сушарка

У середині барабана встановлена спеціальна насадка, конструкція якої залежить від властивостей матеріалу, що висушується. З боку завантажувальної камери розташована багатозапірна гвинтова насадка з кількістю спіральних лопатей від 6 до 16 (у залежності від діаметра барабана). Також на початковій ділянці поверхні барабана закріплені ланцюги, за допомогою яких руйнуються грудки і очищаються стінки барабана. Для цієї ж мети можуть використовуватися й ударні пристосування, розташовані із зовнішнього боку барабана.

На рис. 7 представлені різні типи внутрішніх насадок барабанів.

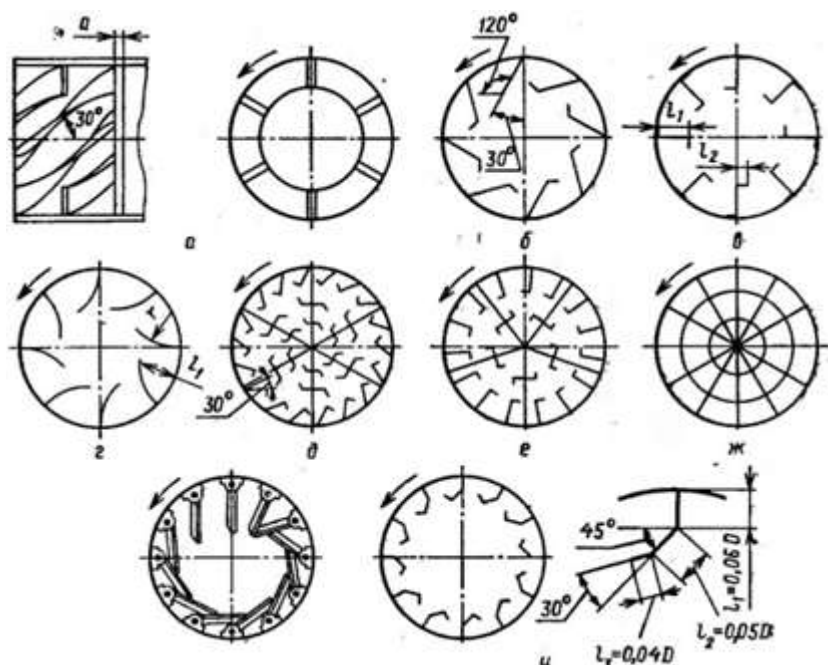


Рисунок 7 – Типи внутрішніх насадок барабана:

а – гвинтова розподільна; б, в, г, и – периферійні підйомно-лопатеві з лопатками різних видів; д, е – секторні, ж – для добре сипучих матеріалів

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Правильний вибір матеріалів і технології виготовлення апаратів сприяє збільшенню тривалості їх ефективної експлуатації, зниженню трудомісткості їх виготовлення та собівартості. Вибір матеріалів та заготовок обумовлюється характером виробництва, конструктивними, експлуатаційними та технологічними особливостями, а також економічною доцільністю. Для матеріалів які працюють в агресивному середовищі необхідно враховувати характер останніх, концентрацію та температуру [6].

Матеріалами для виготовлення сталених зварних апаратів є напівфабрикати, які поставляються металургічною промисловістю у вигляді листового, сортового та фасонного прокатів, труб, спеціальних поковок та відливків тощо. Матеріали повинні бути хімічно- та корозійно-стійкими в робочому середовищі, при відповідних робочих параметрах; володіти гарною зварюваністю; відповідними показниками міцності та пластичності; допускати холодну та гарячу механічну обробку, а також мати якомога нижчу вартість та не бути дефіцитними. Якість, хімічний склад та механічні властивості матеріалів повинні відповідати вимогам діючих стандартів [7].

Вибір конструкційних матеріалів проводиться на підставі аналізу умов експлуатації обладнання, параметрів процесу (таких як температура, тиск, концентрація робочих середовищ та їх агресивність). Також, обираючи матеріали заготовок, враховують: механічні властивості матеріалів, хімічну стійкість, теплопровідність, технологічність у виготовленні та вартість матеріалу. Одним із найважливіших показників при виборі матеріалу є здатність матеріалу добре зварюватися, адже більшість нероз'ємних з'єднань при виготовленні хімічних апаратів виконують зварюванням. Хімічна промисловість відрізняється застосуванням агресивних речовин, а тому корозійна стійкість матеріалів є ключовим фактором при виборі матеріалу обладнання та визначає довголіття хімічного обладнання [6–7].

Основний матеріал для виготовлення барабана, завантажувальних і розвантажувальних камер – вуглецеві сталі. У технічно обгрунтованих випадках допускається виготовлення барабанів, а також завантажувальних і розвантажувальних камер частково або повністю з жаростійких сталей спеціальних марок [5].

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

Із огляду на вищезазначене, для виготовлення основних частин апарата застосовуємо матеріал – сталь 20. На користь цієї сталі говорить її порівняно низька вартість, вона добре обробляється і має достатньо високі фізико-механічні властивості.

Механічні властивості і хімічний склад сталі 20 наведено відповідно в табл. 1 і 2 [8].

Таблиця 1 – Механічні властивості сталі 20 при температурі 20°C

Стан поставки	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	Ψ (%)	НВ (не більше)
Сталь калібрована:				
– гарячекатана, кована, другої категорії після нормалізації	410	25	55	
– п'ятої категорії після нагартування	490	7	40	
– п'ятої категорії після відпалення	390	21	50	
Сталь калібрована і калібрована зі спеціальною обробкою:				
– після відпалення	390–490	7	50	163
– після сфероїдизуючого відпалення	340–440		50	163
– загартування без термообробки	490		40	207
Смуги нормалізовані або гарячекатані	410	25	55	
Лист тепло обробний першої та другої категорій	340–490	28		127

Таблиця 2 – Хімічний склад сталі 20

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,25	до 0,04	до 0,04	до 0,25	до 0,25	до 0,08	~98

Бандажі виготовляються зі сталі 40 або 45Л, як правило, прямокутної форми в поперечному перерізі. Опорні ролики будуть відлиті з чавуну СЧ 18-36 або СЧ 21-40. Різна міцність роликів і бандажу призводить до більш прискореного зносу

перших, які простіше і дешевше виготовити, аніж бандажі. Вінець або венцеву шестерню виготовляють зі сталі 35Л.

У якості прокладкового матеріалу (для ущільнення з'єднань) використовуємо пароніт ПОН-1 – це листовий матеріал, виготовлений пресуванням азбокаучукової маси, яка складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

2.1 Технологічні розрахунки

Технологічний розрахунок проводимо відповідно до методики, викладеної в [9]. Для сушарки барабанного типу вибираємо прямотокову схему руху матеріалу і теплоносія (рис. 8).

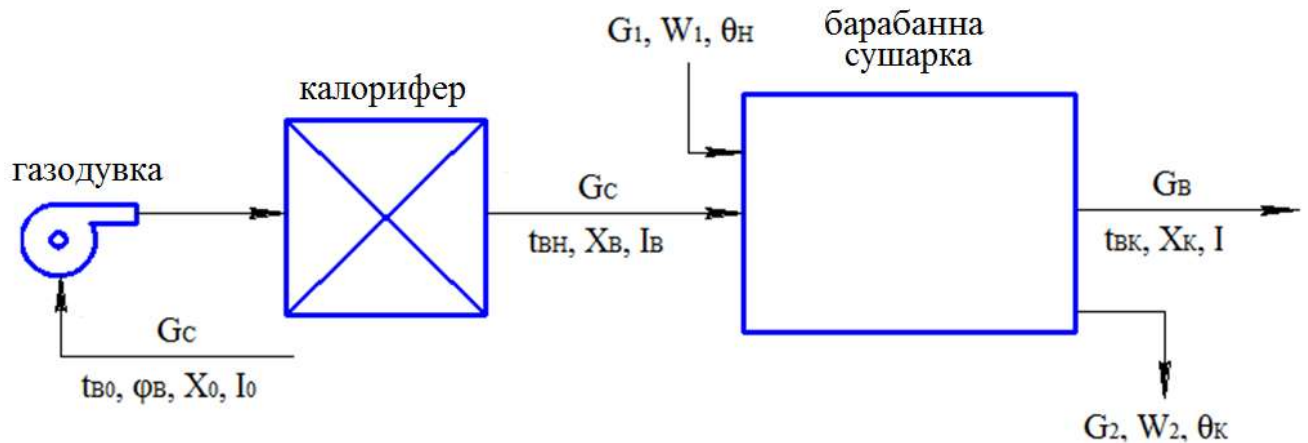


Рисунок 8 – Розрахункова схема сушильної установки

Для початку визначаємо середньорічні параметри повітря в місті Суми: у цілому клімат міста є помірно континентальним з прохолодною зимою і теплим літом. Середньорічна температура повітря становить $t_{B0} = 6,6^\circ\text{C}$, а відносна вологість повітря в середньому за рік становить $\phi_{B0} = 78\%$.

За рекомендаціями [9] приймаємо коефіцієнт заповнення барабана $\psi = 0,15$. За діаграмою Рамзина (див. Додаток А) параметри повітря перед калорифером складають: точка А на діаграмі ($X_0 = 0,005$ кг/кг; $I_0 = 20$ кДж/кг).

Тоді параметри повітря у калорифері: точка В ($t_{BH} = 150^\circ\text{C}$, $X_B = 0,005$ кг/кг, $I_B = 170$ кДж/кг).

Параметрами точки C_1 є: постійна ентальпія $I_B = 170$ кДж/кг і кінцева температура повітря, яку приймаємо за практичними даними $t_{BK} = 90^\circ\text{C}$ [9].

При теоретичному процесі сушіння питома теплота визначається з наступного рівняння:

$$q_T = \frac{I_B - I_0}{X_{ВИХ} - X_0}, \quad (1)$$

де $X_{\text{ВИХ}}$ – вміст вологи у повітрі на виході з сушарки при теоретичному процесі, кг/кг. За діаграмою Рамзина $X_{\text{ВИХ}} = 0,028$ кг/кг (точка C_1 , Додаток А).

$$q_T = \frac{170 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3}{0,028 - 0,005} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)}.$$

У реальній сушарці кінцевий вміст вологи X_K буде меншим за $X_{\text{ВИХ}}$. Його значення визначаємо наступним чином.

Із рівняння лінії реального процесу сушіння

$$I = I_B - \Delta q \cdot (X - X_0), \quad (2)$$

приймавши будь-яке значення X , менше $X_{\text{ВИХ}}$, визначаємо I , попередньо розрахувавши витрату вологи W , що випаровується, і поправку Δq для реального процесу сушіння.

Витрата вологи, що випаровується:

$$W = G_1 \cdot (\omega_H - \omega_K), \quad (3)$$

$$W = 6800 \cdot (0,052 - 0,002) = 340 \text{ (кг/год.)}$$

Питома теплота на нагрівання матеріалу при температурі матеріалу на виході з сушарки:

$$q_{\text{МАТ}} = \frac{G_1 \cdot c_M \cdot (\theta_K - \theta_H)}{W}, \quad (4)$$

де c_M – питома теплоємність хлориду натрію, $c_M = 840$ Дж/(кг·К) [10].

$$q_{\text{МАТ}} = \frac{6800 \cdot 840 \cdot (60 - 26)}{340} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ (Дж / кг)}.$$

Із огляду на те, що втрати тепла складають 10 %, отримаємо:

$$q_{\text{ПОТ}} = 0,10 \cdot q_T = 0,10 \cdot 6,5 \cdot 10^6 = 6,5 \cdot 10^5 \text{ (Дж/кг)}.$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

Різниця температур в теоретичній і реальній сушарках:

$$\Delta q = q_{MAT} + q_{ПОТ} - c_{\omega} \cdot t_{BO}, \quad (5)$$

$$\Delta q = 5,7 \cdot 10^5 + 6,5 \cdot 10^5 - 4190 \cdot 6,6 = 1,2 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)}.$$

Прийнявши значення $X = 0,02$ кг/кг, за рівнянням (2) розраховуємо:

$$I = 170 \cdot 103 - 1,2 \cdot 106 \cdot (0,02 - 0,005) = 152 \cdot 10^3 \text{ (Дж/кг)}.$$

Виходячи з діаграми Рамзина (Додаток А), визначаємо вміст вологи в повітрі на виході з сушарки. Для цього проведемо лінію через дві точки:

– точка В має координати ($X_B = 0,005$ кг/кг; $I_B = 170$ кДж/кг);

– точка D має координати ($X = 0,02$ кг/кг; $I = 152$ кДж/кг),

до перетину з ізотермою $t_{BK} = 90^\circ\text{C}$. Відповідно, знаходимо вміст вологи у повітрі, який залишає барабанну сушарку: $X_K = 0,021$ кг/кг (точка С, Додаток А).

Витрата сухого теплоносія в сушарці:

$$G_C = \frac{W}{X_K - X_0}, \quad (6)$$

$$G_C = \frac{340}{0,021 - 0,005} = 21250 \text{ (кг/ГОД.)}$$

Витрата вологого теплоносія на виході з сушарки:

$$V_B = V_{num} \cdot G_C, \quad (7)$$

$$\text{де } v_{num} = \frac{R_B \cdot T}{P - \phi_v p_{нас}} = \frac{287 \cdot (273 + 90)}{10^5 - 0,78 \cdot 3,22 \cdot 10^4} = 1,4 \text{ (м}^3\text{/кг)};$$

$$V_B = 1,4 \cdot 21250 = 29750 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

2.2 Конструктивні розрахунки

Прийmemo швидкість повітря на виході з сушарки за [9]: $\omega_r = 4$ м/с при розмірі частинок $\delta_{\text{ч}} = 0,3-1,4$ мм і насипній щільності матеріалу $\rho_{\text{н}} = 950$ кг/м³.

Внутрішній діаметр сушильного барабана:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_B}{\pi \cdot (1 - \psi) \cdot \omega_r}}; \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 29750}{\pi \cdot (1 - 0,15) \cdot 4 \cdot 3600}} = 1,76 \text{ (м)}.$$

Прийнявши товщину футерування $\delta_{\text{ф}} = 0,15$ м [9], розрахуємо зовнішній діаметр сушарки:

$$D_{\text{н}} = D + 2 \cdot \delta_{\text{ф}}, \quad (9)$$

$$D_{\text{н}} = 1,76 + 2 \cdot 0,15 = 2,06 \text{ (м)}.$$

Згідно [9] вибираємо сушильний барабанний апарат із зовнішнім діаметром 2200 мм:

- СБ 2,2-10 – довжина барабана $L = 10000$ мм;
- СБ 2,2-12 – довжина барабана $L = 12000$ мм;
- СБ 2,2-14 – довжина барабана $L = 14000$ мм;
- СБ 2,2-16 – довжина барабана $L = 16000$ мм.

Згідно [10], приймаємо напруженість барабана за вологою $A = 6,5$ кг/(м³·год), тоді необхідний внутрішній об'єм барабана буде дорівнювати:

$$V_B = \frac{W}{A}, \quad (10)$$

$$V_B = \frac{340}{6,5} = 52,3 \text{ (м}^3\text{)}.$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

При цьому довжина барабана складе:

$$L = \frac{4 \cdot V_B}{\pi \cdot D_B^2}, \quad (11)$$

$$L = \frac{4 \cdot 52,3}{\pi \cdot 2,2^2} = 13,8(\text{м}).$$

За [9] остаточно вибираємо сушарку СБ 2,2-14.

Попередня товщина стінки барабана δ , мм, знаходиться в межах:

$$\begin{aligned} 0,005 \cdot D_B &\leq \delta \leq 0,01 \cdot D_B; \\ 0,005 \cdot 2200 &\leq \delta \leq 0,01 \cdot 2200; \\ 11 &\leq \delta \leq 22. \end{aligned}$$

Таблиця 3 – Конструктивні показники промислових барабанних сушарок [1]

Конструктивні показники	Номер за заводською специфікацією					
	7450	7119	6843	6720	7207	7208
Внутрішній діаметр барабана, м	1,5	1,8	2,2	2,2	2,8	2,8
Довжина барабана, м	8	12	12	14	12	14
Товщина стінок зовнішнього циліндра, мм	10	12	14	14	14	14
Об'єм сушильного простору, м ³	14,1	30,5	45,6	53,2	74,0	86,2
Загальна маса, т	13,6	24,7	42,0	45,7	65,0	70,0

Із можливого діапазону товщин, відповідно до табл. 3, приймаємо $\delta = 14$ мм.

2.3 Гідравлічний опір апарата

У цьому підрозділі визначаємо гідравлічний опір сушильного барабана за методикою [11].

Густина і динамічна в'язкість повітря при усередненій температурі $t_{\text{вср}} = 120^\circ\text{C}$ відповідно дорівнюють: $\rho_{\text{вср}} = 0,9 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{вср}} = 22 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

За прийнятим коефіцієнтом заповнення барабана $\psi = 0,15$ відносний вільний перетин барабана складе $\varphi = 0,85$.

Еквівалентний діаметр барабана для секторної насадки:

$$D_E = \frac{\pi \cdot D \cdot \varphi}{\pi + Z}, \quad (12)$$

де Z – відношення довжини барабана до його внутрішнього діаметра;

$$Z = 14 / (2,2 - 2 \cdot 0,15) = 7,4.$$

$$D_E = \frac{\pi \cdot (2,2 - 2 \cdot 0,15) \cdot 0,85}{\pi + 7,4} = 0,48 \text{ (м)}.$$

Критерій Рейнольдса для частинок розміром $\delta_{CP} = 0,85$ мм.

$$Re = \frac{\omega_{\Gamma} \cdot \delta_{CP} \cdot \rho_{Bcp}}{\mu_{Bcp}}, \quad (13)$$

$$Re = \frac{4 \cdot 0,85 \cdot 0,9}{22 \cdot 10^{-6}} = 139090.$$

За рисунком [11] визначаємо як для гладкої труби: $\lambda_B = 2$.

Таким чином, опір барабана (без урахування транспортуючого матеріалу):

$$\Delta P_B = \lambda_B \cdot \frac{L}{D_E} \cdot \omega_{\Gamma}^2 \cdot \rho_{Bcp}; \quad (14)$$

$$\Delta P_B = 2 \cdot \frac{14}{0,48} \cdot 4^2 \cdot 0,9 = 840 \text{ (Па)}.$$

Відносна масова концентрація матеріалу:

$$y = \frac{G_1 + (G_1 - W)}{2} \cdot G_C \cdot X_K, \quad (15)$$

$$y = \frac{6800 + (6800 - 340)}{2 \cdot 3600} \cdot \frac{21250}{3600} \cdot 0,021 = 0,228 \text{ (кг/кг)}.$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

Опір сушильного барабана при $k = 1,4$ [11]:

$$\Delta P = \Delta P_B \cdot (1 + k \cdot y); \quad (16)$$

$$\Delta P = 840 \cdot (1 + 1,4 \cdot 0,228) = 1108 \text{ (Па)}$$

За літературними даними [11] опір барабанної сушарки знаходиться у діапазоні 1000–1500 Па при швидкості сушильного агента 3–5 м/с і заповненні барабану до 20 %. Отже, наше отримане значення ($\Delta P = 1108$ Па) відповідає вказаному чисельному діапазону.

2.4 Вибір допоміжного обладнання

Розрахунок і вибір повітродувки [9].

Відповідно до схеми (рис. 8), подача сушильного агента (повітря) в барабану сушарку забезпечується за допомогою повітродувки.

Повітродувку підбирають у залежності від номінальної подачі і створюваного тиску, необхідного для подолання опорів повітряного тракту з метою нормальної роботи сушарки. Загальний тиск, що розвивається повітродувкою (P , Па) визначається за формулою:

$$P = 1,05 \cdot (\Delta P_1 + \Delta P_2), \quad (17)$$

де $\Delta P_1 = 1108$ Па – опір барабанної сушарки;

$\Delta P_2 = 500$ Па – опір калорифера (приймається);

1,05 – коефіцієнт, який враховує втрати тиску в газопроводах (5 %).

$$P = 1,05 \cdot (1108 + 500) = 1688 \text{ (Па)}.$$

Потужність, споживана повітродувкою:

$$N = \frac{V \cdot P}{1000 \cdot \eta}, \quad (18)$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		23

де V – об’ємна витрата повітря, необхідного для висушування матеріалу;

η – загальний ККД повітродувки; приймаємо $\eta = 0,6$.

Визначаємо об’ємну подачу повітря вентилятором:

$$V = \frac{G_c \cdot (t_{B0} + 273)}{3600 \cdot \rho_B \cdot 273} = \frac{21250 \cdot (6,6 + 273)}{3600 \cdot 1,25 \cdot 273} = 4,84 \text{ (м}^3\text{/с)}. \quad (19)$$

$$N = \frac{4,84 \cdot 1688}{1000 \cdot 0,6} = 13,6 \text{ (кВт)}.$$

Повітродувки ВР – це надійні (ресурс до 100000 годин) машини, призначені для подачі повітря в басейни аерації, печі, сушарки та інших застосувань. Повітродувки ВР забезпечують створення надлишкового тиску до 100 кПа або вакууму до 50 кПа (окремі моделі до 90 кПа) в широкому діапазоні продуктивностей. Їх виготовляють на базі компресорних вузлів компаній Robushi (Італія).

Із запасом 30 % вибираємо повітродувку марки ВР-225 з наступними характеристиками:

- продуктивність – 377 м³/хв.;
- максимальний перепад тиску – 70 кПа;
- електродвигун типу АО1-160-2 потужністю 160 кВт.

Розрахунок і вибір циклону [9].

Циклонні апарати внаслідок дешевизни і простоти пристрою і експлуатації, відносно невеликого опору і високої продуктивності є найбільш поширеним типом механічних пиловловлювачів. Циклонні пиловловлювачі мають наступні переваги перед іншими апаратами: відсутність рухомих частин; надійна робота при температурі до 500°С без конструктивних змін; можливість роботи циклонів при високому тиску; стабільна величина гідравлічного опору; простота виготовлення і можливість ремонту; підвищення концентрації пилу не призводить до зниження фракційної ефективності апарата. До недоліків можна віднести тільки низьку ефективність при уловлюванні частинок розміром < 5 мкм.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24

Розраховуємо площу перетину циклону:

$$F = \frac{V}{v_0}, \quad (20)$$

де v_0 – оптимальна швидкість газового потоку в циклоні, приймаємо $v_0 = 4,5$ м/с.

$$F = \frac{4,84}{4,5} = 1,08 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Визначаємо діаметр циклону:

$$D = 1,13 \cdot \sqrt{F} = 1,13 \cdot \sqrt{1,08} = 1,17 \text{ (м)}. \quad (21)$$

Із ряду типорозмірів вибираємо циклон ЦН-24 діаметром 1,2 м.

Розраховуємо дійсну швидкість повітря в циклоні:

$$v_0' = \frac{1,27 \cdot V}{D^2} = \frac{1,27 \cdot 4,84}{1,2^2} = 4,27 \text{ (м/с)}. \quad (22)$$

Розраховуємо відхилення дійсної швидкості газу в циклоні від оптимальної:

$$\frac{v_0 - v_0'}{v_0} \cdot 100 \% = \frac{4,5 - 4,27}{4,5} \cdot 100 \% = 5,1 \% . \quad (23)$$

3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

Маса матеріалу, який знаходиться в сушарці:

$$m_M = \frac{\psi \cdot \rho \cdot L \cdot \pi \cdot D_\phi^2}{4}, \quad (24)$$

де ρ – щільність хлориду натрію; $\rho = 2165 \text{ кг/м}^3$.

$$m_M = \frac{0,15 \cdot 2165 \cdot 14 \cdot \pi \cdot 1,872^2}{4} = 12500 (\text{кг}).$$

Маса барабана з футеровкою:

$$m_B = \frac{\pi \cdot (D_H^2 - D^2)}{4} \cdot L \cdot \rho_M + \frac{\pi \cdot (D^2 - D_\phi^2)}{4} \cdot L \cdot \rho_\phi, \quad (25)$$

де $D = D_H - 2 \cdot \delta = 2200 - 2 \cdot 14 = 2172 \text{ мм}$;

$D_\phi = D - 2 \cdot \delta_\phi = 2172 - 2 \cdot 150 = 1872 \text{ мм}$;

$\rho_\phi = 2200 \text{ кг/м}^3$ – щільність матеріалу футеровки;

$\rho_M = 7850 \text{ кг/м}^3$ – щільність сталі.

$$m_B = \frac{\pi \cdot (2,2^2 - 2,172^2)}{4} \cdot 14 \cdot 7850 + \frac{\pi \cdot (2,172^2 - 1,872^2)}{4} \cdot 14 \cdot 2200 = 39900 (\text{Кг}).$$

Сумарна маса барабана і матеріалу:

$$m = m_B + m_M, \quad (26)$$

$$m = 39900 + 12500 = 52400 (\text{кг}).$$

Лінійна напруга (див. рис. 9):

$$q = \frac{m \cdot g}{L} = \frac{52400 \cdot 9,81}{14} = 36700 (\text{Н/м}). \quad (27)$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

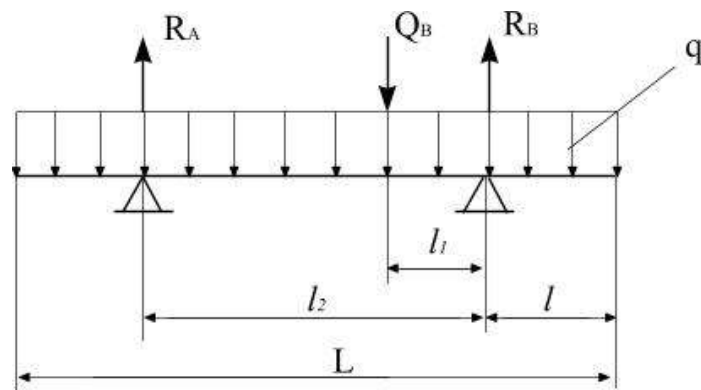


Рисунок 9 – Розрахункова схема для визначення товщини стінки бандаж

Реакція на опорах:

$$R_A = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{Q_B \cdot \ell_1}{\ell_2}, \quad (28)$$

$$\text{де } \ell_2 = 0,585 \cdot L = 0,585 \cdot 14 = 8,19 \text{ м};$$

$$\ell = 0,205 \cdot L = 0,205 \cdot 14 = 2,87 \text{ м};$$

$$\ell_1 = 0,09 \cdot L = 0,09 \cdot 14 = 1,26 \text{ м};$$

$Q_B = 20900 \text{ Н}$ – навантаження від венцової шестерні [9].

$$R_A = \frac{36700 \cdot 14}{2} + \frac{20900 \cdot 1,26}{8,19} = 260000 \text{ Н};$$

$$R_B = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{Q_B \cdot (\ell_2 - \ell_1)}{\ell_2} = \frac{36700 \cdot 14}{2} + \frac{20900 \cdot (8,19 - 1,26)}{8,19} = 274600 \text{ Н}. \quad (29)$$

Максимальний згинальний момент, що діє на барабан:

$$M_{\max} = q \cdot L \cdot \frac{(2 \cdot \ell_2 - L)}{8} + Q_B \cdot \frac{(\ell_2 - \ell_1) \cdot \ell_1}{\ell_2}; \quad (30)$$

$$M_{\max} = 36700 \cdot 14 \cdot \frac{(2 \cdot 8,19 - 14)}{8} + 20900 \cdot \frac{(8,19 - 1,26) \cdot 1,26}{8,19} = 175100 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Момент опору перетину корпусу барабана:

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$W = \frac{\delta \cdot \pi \cdot D_{CP}^2}{4} = \frac{14 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot 2,036^2}{4} = 0,046 \text{ м}^3, \quad (31)$$

$$\text{де } D_{CP} = \frac{(D_H + D_\Phi)}{2} = \frac{(2200 + 1872)}{2} = 2036 \text{ мм}.$$

Напруга в корпусі барабана:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{175100}{0,046} = 3,8 \text{ МПа}. \quad (32)$$

Допустима напруга для апаратів з футеровкою $[\sigma] = 20 \text{ МПа}$.

Умова міцності виконується: $\sigma \leq [\sigma]$ ($3,8 \text{ МПа} < 20 \text{ МПа}$).

Виконуємо розрахунок барабана на жорсткість (визначаємо прогин).

Лінійне навантаження від маси оброблюваного матеріалу:

$$q_1 = \frac{g \cdot m_M}{L} = \frac{9,81 \cdot 12500}{14} = 8760 \text{ (Н/м)}. \quad (33)$$

Лінійне навантаження від маси барабана:

$$q_2 = \frac{g \cdot m_B}{L} = \frac{9,81 \cdot 39900}{14} = 28000 \text{ (Н/м)}. \quad (34)$$

Момент інерції одиночного кільця барабана:

$$I_x = \frac{\delta^3}{12} = \frac{(14 \cdot 10^{-3})^3}{12} = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^3\text{)}. \quad (35)$$

Сумарний прогин від чинного напруги:

$$y_{\max} = \frac{D_{CP}^3}{8 \cdot E \cdot I_x} \cdot (0,04 \cdot q_1 + 0,002 \cdot q_2), \quad (36)$$

де E – модуль пружності, $E = 1,87 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$y_{\max} = \frac{2,036^3}{8 \cdot 1,87 \cdot 10^{11} \cdot 2,3 \cdot 10^{-7}} \cdot (0,04 \cdot 8760 + 0,002 \cdot 28000) = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Відносний прогин:

$$\varepsilon = \frac{y_{\max}}{D_{CP}} = \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{2,036} = 2,4 \cdot 10^{-3} = 1/416. \quad (37)$$

Умова жорсткості виконано, тобто:

$$\varepsilon \leq [\varepsilon] \quad (1/416 < 1/300).$$

Визначаємо геометричні розміри бандажа, вільно насунутих на корпус сушарки.

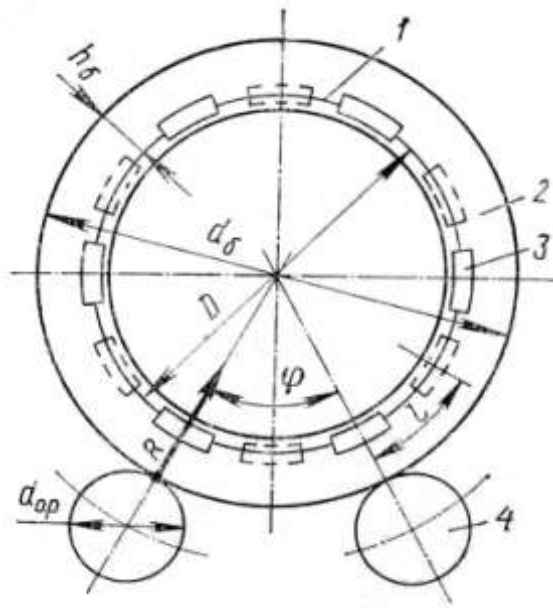


Рисунок 10 – Схема для розрахунку бандажа і опорних роликів

Визначаємо ширину бандажа:

$$b_{\delta} = \frac{R}{q_H}, \quad (38)$$

де $q_H = (1,0 \div 2,4) \text{ МН / м}$ – допустиме навантаження, яке приходить на одиницю довжини майданчика торкання ролика і бандажа (із досвіду експлуатації);

R – реакція опори ролика, МН.

$$R = \frac{m \cdot g \cdot \cos \alpha}{2 \cdot z \cdot \cos(\phi / 2)}, \quad (39)$$

де $\alpha = 3^\circ$ – кут нахилу барабана [9];

$\phi = 41^\circ$ – кут між опорними роликами [9];

z – кількість бандажів (візьмемо $z = 1$ шт.).

$$R = \frac{52400 \cdot 9,81 \cdot \cos 3^\circ}{2 \cdot 1 \cdot \cos(41^\circ / 2)} = 274000 \text{ Н} = 0,274 \text{ МН}.$$

$$b_{\bar{o}} = \frac{0,274}{2,0} = 0,135 \text{ м}.$$

Ширина опорного ролика $b_{o.p.}$ повинна бути більша за ширину бандажа на 30 мм.

$$b_{o.p.} = b_{\bar{o}} + 0,03 = 0,135 + 0,03 = 0,165 \text{ м}.$$

Діаметр опорних роликів $d_{o.p.}$ беруть в 3–4 рази меншим, ніж зовнішній діаметр барабана:

$$d_{o.p.} = \frac{D_H}{4} = \frac{2,2}{4} = 0,55 \text{ м}.$$

Умова контактної міцності на зминання в місці торкання ролика і бандажа:

$$\sigma_{CM} = 0,0418 \cdot \sqrt{\frac{R}{b_{\bar{o}}} \cdot E \cdot \frac{r_{\bar{o}} + r_{o.p.}}{r_{\bar{o}} \cdot r_{o.p.}}} \leq [\sigma]_{CM}, \quad (40)$$

де $r_{\bar{o}}$ – зовнішній радіус бандажа;

$$r_{\bar{o}} = \frac{D_H + 2 \cdot h_{\bar{o}}}{2} = \frac{2,2 + 2 \cdot 0,1}{2} = 1,2 \text{ м};$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

$r_{o.p.}$ – зовнішній радіус опорного ролика.

$$\sigma_{CM} = 0,0418 \cdot \sqrt{\frac{0,274}{0,135} \cdot 1,87 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,2+0,275}{1,2 \cdot 0,275}} = 54,4 \text{ МН} / \text{м}^2.$$

$[\sigma]_{CM} = 300 \div 500 \text{ МПа}$ (для сталевого лиття) – допустиме напруження матеріалу ролика і бандажа на зминання.

Остаточно маємо:

$$\sigma_{CM} < [\sigma]_{CM} \quad (54,4 \text{ МПа} < 300 \text{ МПа}),$$

тобто умова виконується.

Далі виконаємо перевірку контактної міцності на зминання в місці зіткнення упорного ролика і бандажа.

Осьова сила, яку сприймають упорні ролики:

$$T = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{10^6}; \quad (41)$$

$$T = \frac{52400 \cdot 9,81 \cdot \sin 3^\circ}{10^6} = 0,027 \text{ (МН)}.$$

Умова контактної міцності на зминання в місці зіткнення упорного конічного ролика і бандажа:

$$\sigma_C = 0,0418 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot E}{b_{y.p.} \cdot r_{\delta} \cdot \sin(\frac{\gamma}{2})}} \leq [\sigma]_C, \quad (42)$$

де $b_{y.p.}$ – ширина упорного ролика, м; $b_{y.p.} = b_{o.p.} = 0,165$ м;

$\gamma = 17^\circ$ – кут конусності упорного ролика.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$\sigma_c = 0,0418 \cdot \sqrt{\frac{0,027 \cdot 1,87 \cdot 10^5}{0,165 \cdot 1,25 \cdot \sin\left(\frac{17^\circ}{2}\right)}} = 17,0 \text{ МПа} < 300 \text{ МПа}.$$

Умови виконуються.

Перевірка міцності бандажа на вигин.

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{\delta}}{W_{\delta}} \leq [\sigma]_{изг}, \quad (43)$$

де $M_{\delta} = \frac{R \cdot \ell}{4}$ – максимальний згинальний момент в місці контакту опорного ролика і бандажа, МН·м;

ℓ – відстань між сусідніми башмаками

$$\ell = \frac{\pi \cdot D_B}{m}, \quad (44)$$

де $m = 16$ – загальна кількість башмаків [9].

$$\ell = \frac{\pi \cdot D_B}{m} = \frac{3,14 \cdot 2,2}{16} = 0,43 \text{ м}.$$

$$M_{\delta} = \frac{0,274 \cdot 10^6 \cdot 0,43}{4} = 29 \text{ кН}.$$

W_{δ} – момент опору перерізу бандажа, м³.

$$W_{\delta} = \frac{b_{\delta} \cdot h_{\delta}^2}{6}, \quad (45)$$

де $h_{\delta} = 0,1$ м – висота бандажа.

$$W_{\delta} = \frac{0,135 \cdot 0,1^2}{6} = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		32

Тоді:

$$\sigma_{узг} = \frac{29 \cdot 10^3}{2,25 \cdot 10^{-4}} = 128,9 \text{ МПа} .$$

$$\sigma_{узг} \leq [\sigma]_{узг} \quad (128,9 \text{ МПа} < 130 \text{ МПа}).$$

Отже, умова виконується.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

4 Монтаж та ремонт апарата

4.1 Монтаж апарата [14, 15]

Вантажопідйомні машини є істотною складовою частиною більшості виробництв, оскільки вони відіграють дуже важливу роль в механізації технологічних процесів.

Сучасне кранобудування характеризується:

- вдосконаленням конструкцій;
- застосуванням нових матеріалів, методів і засобів виготовлення та контролю;
- впровадженням більш досконалих методів розрахунку;
- підвищенням надійності.

Пневматичні катки, дорожні крани, бульдозери та ін. із кожним роком усе більше застосовуються на будівництві. Їх головна перевага полягає у великій швидкості переміщення (до 60 км/год.). Особливо зручні пневмоколісні крани для роботи в міських умовах і на невеликих об'єктах, що віддалені один від одного.

Під час монтажу крупногабаритних об'єктів, а також для підйому великої кількості обладнання та металоконструкцій на значну висоту застосовують баштові крани марок КБ-100, С-981Б, МСК-5-20А, КБ-160.2, КБК-250, БК-180, КБ-573, МСК-250, КБ-674, БК-1000 та інші.

Більшість кранів може працювати як на виносних опорах, так і без них. Деякі можуть пересуватися з піднятим вантажем, що значно розширює сферу їх застосування.

На підставі проведених конструктивних розрахунків (розділ 2.2), ми монтуємо барабану сушарку діаметром 2,2 м, довжиною барабана 14 м і загальною масою приблизно 40 тонн. Тобто нам необхідно похило встановити обертовий барабан, на який надіти два бандажа і зубчастий вінець. Бандажами барабан спирається на чотири ролика, які змонтовано на рамах. Два опорних ролика обмежують осьове зміщення корпусу барабана. На обох кінцях барабана є камери: в одній передбачено введення газів і завантаження вологого матеріалу, а в іншій – розванта-

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

ження підсушеного продукту і відведення газів. Між камерами і барабаном роблять спеціальні ущільнення для запобігання підсосу повітря ззовні.

Перед монтажем апарат необхідно ретельно очистити від антикорозійного покриття. Для горизонтального обладнання, як в нашому випадку, що буде розміщено на нульовій позначці, фундаменти виконують у вигляді двох залізобетонних стовпів з анкерними болтами під опори. Сушарка встановлюється на бетонний фундамент. Глибина залягання фундаменту не повинна бути менше 436 мм. Монтаж слід проводити по рамному рівню. Необхідна точність установки барабанної сушарки в обох напрямках 0,5 / 1000.

Після вивірки апарата фундаментні болти заливаються бетоном. Після затвердіння бетону слід затягнути гайки фундаментних болтів, перевіряючи стан апарата рівнем. Затягування гайок повинно проводитися рівномірно і плавно. Потім під раму барабана підливається цементний розчин і ведеться остаточна обробка фундаменту.

При обробці фундаменту необхідно передбачити закладання труб для підведення електроживлення до автоматичного вимикача і від автоматичного вимикача до барабану. Місце установки автоматичного вимикача вибирається таким чином, щоб він не заважав проведенню ремонтних робіт. Заземляють апарат до загальної системи заземлення.

Барабанна сушарка доставляється на монтажний майданчик у розібраному вигляді за допомогою тягача. Для приймання призначається відповідальна особа з числа ІТП, якій здійснює приймання деталей, що надійшли на об'єкт, і записує в журнал «Прийому і огляду обладнання». Готовність апарата під монтаж оформляють актом, підписаним представниками замовника монтажною організацією.

Після перевірки стану конструкції підписується акт «приймання – здачі обладнання». Після підписання акту, відповідальність за обладнання несе монтажна організація.

Одним із найбільш поширених способів монтажу для масивного горизонтального обладнання є підйом пневмоколісними стріловидними самохідними кранами. Цей спосіб активно використовують, оскільки він не вимагає тривалих підготовчих робіт, а також є безпечним і зручним (рис. 11).

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		35

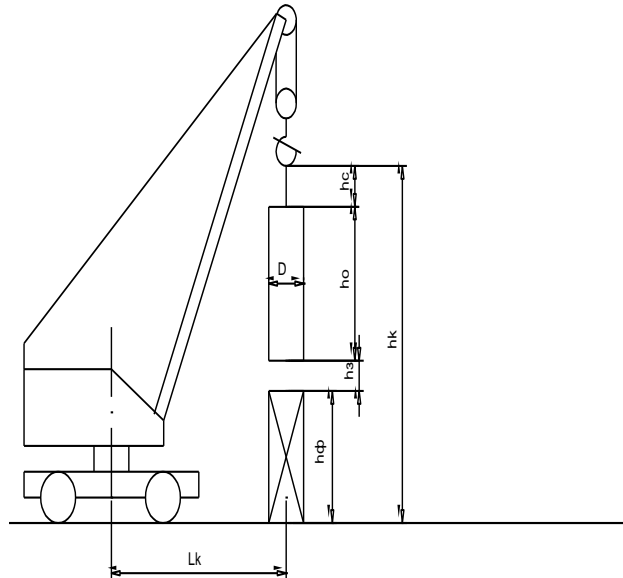


Рисунок 11 – Розрахункова схема підйому горизонтального апарата стріловидними кранами методом ковзання з відривом від землі

Монтаж починають із підйому апарата з вихідного горизонтального положення без відриву його від землі. Коли установка одного з кранів із зовнішньої сторони фундаментів неможлива, монтаж апарата виконують тільки маневруванням стріли крана. У тих випадках, коли при підйомі апаратів неможливо розташувати крани із зовнішньої сторони фундаментів і проїхати між фундаментами, збільшують виліт стріли кранів або переміщують крани з піднятим апаратом в межах їх вантажної характеристики.

Після установки і вивірки апарата перевіряють надійність зачеплення зубчастої передачі. А після підключення барабанної сушарки до електромережі перевіряють коректність обертання барабана і можливість завантаження матеріалу в середину барабана.

4.2 Ремонт апарата [15]

Барабанна сушарка є дуже металомістким апаратом, а тому при його ремонті виконується великий обсяг монтажних робіт із застосуванням підйомно-транспортного обладнання, риштувань та помостів. Частина вузлів сушарки не може бути замінена за допомогою існуючих самохідних монтажних кранів через

недостатню їх вантажопідйомність і закоротку довжину стріли. Це призводить до необхідності застосування при виконанні ремонтних робіт різноманітних такелажних пристроїв, щогл, порталів тощо. У той же час, застосування кранів замість щогл і порталів дозволяє підвищити продуктивність праці у 3–4 рази при одночасному значному скороченні термінів ремонту.

Зовнішній огляд корпусу дозволяє визначити місця прогарів, корозії, великих деформацій обичайок (вм'ятини, випучини), тріщини, порушення зварних і клепаних швів і т. ін. Викривлення корпусу апарата визначається за допомогою профілографа і геодезичним безконтактним методом. Останній спосіб найбільш прийнятний для визначення максимальних викривлень корпусу барабанної сушарки. На працюючій сушарці проводиться вимір биття гарячого і холодного кінців і визначається експлуатаційний стан ущільнень.

Нормальна робота приводу характеризується відсутністю вібрацій, шуму і поштовхів у зачепленні і універсальному шпинделі, безперебійним надходженням масла в усі точки змащування.

Результати комплексного обстеження апарата зводяться в єдину схему за якою складається відомість дефектів агрегату. Аналогічним чином визначаються дефекти і допоміжного обладнання.

Для скорочення тривалості простою барабанної сушарки на ремонті, підвищення якості та зниження вартості ремонту – основні роботи виконують за проектом організації ремонтних робіт (ПОР).

ПОР включає в себе:

- ескіз сушарки;
- перелік ремонтних операцій і їх зміст;
- технічні умови на виконання ремонтних операцій;
- визначення перевіркової бази і методи перевірки;
- перелік матеріальних ресурсів, допоміжних інструментів і пристосувань;
- допуски відхилень розмірів від зазначених у кресленнях.

При виконанні ремонту обертових вузлів обов'язковим є застосування вузлового методу, який передбачає заміну всіх зношених вузлів новими (заздалегідь підготовленими) або ж відремонтованими.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		37

При підготовці апарата до ремонту проводяться наступні роботи:

1. Готуються шляхи під'їзду і засоби доставки вузлів.
2. Встановлюються вантажопідйомні і підтримуючі пристрої.
3. Виконується укрупнена збірка вузлів.

Підготовчі роботи дозволяють зменшити тривалість капітального ремонту і провести його протягом 18–28 діб.

Перед здачею в ремонт з барабанної сушарки необхідно видалити клінкер і футеровку, ретельно очистити всі підлягаючі ремонту і розбиранню вузли. Найбільш часто ремонтowanими вузлами барабанної сушарки є корпус, роликові опори, бандажі, венцові пари, приводи, вентилятори і димососи, теплообмінні пристрої, холодильники, масляні системи, системи водяного охолодження, аспіраційні пристрої.

Майже кожна зупинка барабанної сушарки на капітальний ремонт супроводжується заміною дефектних ділянок корпусу. Така заміна проводиться шляхом установки нових обичайок довжиною від 1 до 20–30 м, причому найбільш часто замінюються ділянки по 3–4 м. При цьому потрібна установка підпор під консолі корпусу для запобігання можливого викривлення осі апарата в місці установки нових обичайок. Стиковка їх зі старим корпусом – доволі трудомістка операція, а застосування існуючих методів перевірки стикувань нерідко призводить до значних неточностей.

Привід є найбільш відповідальним вузлом. Від надійності його роботи залежить нормальна експлуатація усього агрегату. Відповідно до кінематичної схеми приводу сушарки, яка містить: електродвигун, редуктор, універсальний шпindel і венцову пару – найменш надійним в експлуатації і найбільш часто ремонтovanим вузлом вважається венцова пара.

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		38

5 Охорона праці

Характеристика та дія на організм людини шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Нормування вмісту шкідливих речовин у повітрі.

Для створення нормальних умов виробничої діяльності необхідно забезпечити не лише комфортні метеорологічні умови, а й необхідну чистоту повітря. Внаслідок виробничої діяльності у повітряне середовище приміщень можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах [16].

У відповідності до ГОСТ 12.1.007-76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» *шкідливою речовиною* називається речовина, яка при контакті з організмом людини при порушенні вимог безпеки може викликати виробничі травми, професійні захворювання або відхилення стану здоров'я в процесі роботи та у наступний період життя, а також справити негативний вплив на здоров'я нащадків.

Усі шкідливі речовини *за характером дії* на організм людини поділяються на шість груп:

I – загальнотоксичні або загальносоматичні речовини – речовини, які діють на центральну нервову систему, кров і кровотворні органи (сірководень (H_2S), ароматичні вуглеводні, чадний газ (CO), ціаністий водень (HCN), хлор (Cl_2), бром (Br_2)). За концентрацією цих речовин у повітрі повинен бути забезпечений безперервний контроль із сигналізацією про перевищення гранично допустимих концентрацій;

II – подразнюючі речовини – речовини, які діють на слизові оболонки очей, носу, гортані, шкіри (пари кислот, лугів, оксид Нітрогену (NO_2), оксиди сульфуру (SO_2 і SO_3) тощо);

III – сенсibiliзуючі або алергени – речовини, які призводять до виникнення алергії (альдегіди, ароматичні нітро-, нітросо-, аміносполуки, зокрема, акрилонітрил, берилій, нікель, хлорофос);

					ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

IV – канцерогенні або бластомогенні речовини – речовини, що призводять до виникнення ракових пухлин. Це продукти перегонки нафти і кам'яного вугілля (похідні антрацену, бензпірен, мазути, гудрони, бітуми, асфальти, мастила, дьоготь, бензол, хлористий вініл), пил азбесту, арсен (As), меркурій (Hg), плюмбум (Pb), цинк (Zn), молібден (Mo), нікель (Ni), радіоактивні речовини;

V – мутагенні речовини – речовини, які призводять до зміни спадкової інформації (Pb, Mn, радіоактивні речовини);

VI – такі, що пригнічують репродуктивну функцію (меркурій, плюмбум, манган (Mn), радіоактивні сполуки, хлоропрен, нікотин).

Існують і інші класифікації шкідливих речовин, наприклад [17]:

- *за фізіологічною дією*: подразнюючі, задушливі, соматичні, наркотичні;
- *за переважаною дією на певні органи чи системи людини*: серцеві, кишково-шлункові, печінкові, ниркові та ін.;
- *за тривалістю дії*: летальні, тимчасові, короточасні та ін.

Досить поширеним небезпечним та шкідливим виробничим чинником є виробничий пил. Від пилу потерпають робітники гірничодобувної промисловості, машинобудування, металургії, текстильної промисловості, сільського господарства і т. ін. Залежно від походження пил може бути органічним (тваринний, рослинний, штучний), неорганічним (металевий, мінеральний) та змішаним [16].

Ступінь шкідливої дії пилу залежить від концентрації його у повітрі, а також від розміру, форми пилинок, від їх механічних, магнітних властивостей.

Шкідливі речовини можуть проникати в організм людини через:

- органи дихання;
- органи травлення;
- шкіру та слизові оболонки.

Через дихальні шляхи потрапляють пари, газо- та пилоподібні речовини, через шкіру переважно рідкі речовини. Через шлунково-кишкові шляхи потрапляють речовини під час ковтання або при внесенні їх в рот забрудненими руками. Основним шляхом надходження промислових шкідливих речовин в організм людини є дихальні шляхи. Завдяки величезній (понад 90 м²) всмоктувальній поверхні легенів утворюються сприятливі умови для потрапляння шкідливих речовин у

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40

кров. Шкідливі речовини, що потрапили тим чи іншим шляхом в організм, можуть викликати отруєння (гострі чи хронічні). Ступінь отруєння залежить від токсичності речовини, її кількості, часу дії, шляху проникнення, метеорологічних умов, індивідуальних особливостей організму. Гострі отруєння виникають в результаті одноразової дії великих доз шкідливих речовин (чадний газ, метан, сірководень). Хронічні отруєння розвиваються внаслідок тривалої дії на людину невеликих концентрацій шкідливих речовин (свинець, ртуть, марганець). Шкідливі речовини, потрапивши в організм, розподіляються в ньому нерівномірно. Найбільша кількість свинцю накопичується в кістках, фтору – в зубах, марганцю – в печінці. Такі речовини мають властивість утворювати в організмі так зване «депо» і затримуватись в ньому тривалий час. При хронічному отруєнні шкідливі речовини можуть не лише накопичуватись в організмі (матеріальна кумуляція), але й викликати "накопичення" функціональних ефектів (функціональна кумуляція).

Виробничий пил досить розповсюджений, небезпечний та шкідливий виробничий фактор. Пил може здійснювати на людину фіброгенну дію, при якій в легенях відбувається розростання сполучних тканин, що порушує нормальну будову та функцію органу. Вражаюча дія пилу в основному визначається дисперсністю, розміром частинок пилу, їх формою та твердістю, волокнистістю, питомою поверхнею. Шкідливість виробничого пилу обумовлена його здатністю викликати професійні захворювання легень, в першу чергу пневмоконіози. Необхідно враховувати, що у виробничих умовах працівники, як правило, зазнають одночасного впливу кількох шкідливих речовин, в тому числі й пилу. При цьому їхня спільна дія може бути взаємопідсиленою, взаємопослабленою чи «незалежною». На дію шкідливих речовин впливають також інші шкідливі і небезпечні фактори. Наприклад, підвищена температура і вологість і значне м'язове напруження в більшості випадків підсилюють дію шкідливих речовин. Суттєве значення мають індивідуальні особливості людини. З огляду на це для робітників, які працюють у шкідливих умовах, проводяться обов'язкові попередні (при вступі на роботу) та періодичні (1 раз на 3, 6, 12 та 24 місяці, залежно від токсичності речовин) медичні огляди [18].

					<i>ПОХНВ.С.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		41

Отруєння шкідливими речовинами можливе тільки за їх концентрації в повітрі робочої зони, що перевищує певну межу – *гранично допустиму концентрацію* (ГДК).

Гранично допустима концентрація шкідливої речовини у повітрі робочої зони (ГДК р.з.) – це така концентрація, вплив якої на людину в разі її щоденної регламентованої тривалості (щоденна дія при 8-годинній роботі, але не більш ніж 40 годин протягом тижня) не призводить до зниження працездатності чи захворювання в період трудової діяльності та у наступний період життя, а також не справляє негативного впливу на здоров'я нащадків.

Вимірюється ГДК у мг/м^3 . Перелік ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони наводиться у «Санитарных нормах проектирования промышленных предприятий» СН 245-71; ГОСТ 12.1005-88, ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-технические требования, а також ДСП 201-97.

У відповідності до ГОСТу 12.1.007-76 за ступенем дії на організм людини шкідливі речовини поділяються на чотири класи небезпеки (таблиця 4).

Таблиця 4 – Класифікація шкідливих речовин за ступенем дії на організм людини

Клас	Назва	ГДК, мг/м^3	Летальна концентрація у повітрі, мг/м^3	Приклади
1	Надзвичайно небезпечні	< 0,1	< 500	Бензпірен, ртуть, плумбум, берилій, марганець, фосген
2	Високонебезпечні	0,1...1	500...5000	Нітроген діоксид (NO_2), бензен, сірководень, гідроксид натрію (NaOH)
3	Помірно небезпечні	1,1...10	5001...50000	Ксилол, сірчистий газ (SO_2), метанол
4	Малонебезпечні	> 10	> 50000	Аміак (NH_3), чадний газ, бензин, етанол, ацетон

У державних стандартах наведено більше 700 речовин, для яких встановлені значення ГДК:

- ГДК бензпірена = 0,00015 мг/м³;
- ГДК_{Be} = 0,001 мг/м³;
- ГДК_{Pb} = 0,01 мг/м³.

За одночасного знаходження в повітрі робочої зони декількох шкідливих речовин односпрямованої дії, близьких за хімічним складом і характером біологічної дії на організм людини, для визначення можливості працювати в цій зоні користуються такою залежністю:

$$\frac{C_1}{ГДК_1} + \frac{C_2}{ГДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ГДК_n} \leq 1 \quad (46)$$

де C_n – концентрації шкідливих речовин у повітрі, мг/м³;

$ГДК_n$ – гранично допустимі концентрації відповідних шкідливих речовин, мг/м³.

До шкідливих речовин односпрямованої дії відносяться шкідливі речовини, які схожі за хімічною будовою та характером впливу на організм людини. Наприклад: фенол і ацетон, сірчистий газ і нітрогендіоксид, органічні кислоти, чадний газ і нітрогендіоксид.

Вміст шкідливих речовин в повітрі, яке надходить у виробниче приміщення не повинно перевищувати 0,3 ГДК.

Для речовин, які не мають ГДК, встановлені орієнтовно безпечні рівні впливу (ОБРВ) [17].

Список літератури

1. Чернобыльский И.И. Машины и аппараты химических производств / И.И. Чернобыльский, А.Г. Бондарь, Б.А. Гаевский [и др.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 456 с.
2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
3. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии / И.Л. Иоффе. – Л. : Химия, 1991. – 352 с.
4. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1972. – 494 с.
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
6. Лашинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
7. Лашинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лашинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
8. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
10. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П. Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – За ред. А. П. Врагова. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 170 с.

11. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

12. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

13. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов втузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.

14. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.

15. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шейн. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.

16. Основи охорони праці. Тема 8. Повітря робочої зони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ztec.com.ua/ztec/e-lib/Охорона%20праці/Тема%208%20Повітря%20робочої%20зони.pdf>.

17. Шкідливі речовини в повітрі робочої зони, їх класифікація та нормування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/590.html>.

18. Дистанційний курс. Лекція 6. Повітря робочої зони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://moodle.kntu.kr.ua/pluginfile.php/1674/course/section/3704/%D0%9B%D0%95%D0%9A%D0%A6%D0%86%D0%AF_6.pdf.