

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_

підпис, дата

## Кваліфікаційна робота магістра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"  
освітня програма "Обладнання хімічних виробництв  
і підприємств будівельних матеріалів"

Тема роботи: Виробництво сульфату амонію. Розробити та модернізувати сушарку киплячого шару

Виконав:  
студент групи ХМ.м-21/2  
П'ятигор Ілля Миколайович

\_\_\_\_\_

підпис

Залікова книжка  
№ 22510255

Кваліфікаційна робота магістра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Юхименко Микола Петрович

\_\_\_\_\_

підпис, дата

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	<b>3</b>
<b>1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	<b>6</b>
1.1 Загальна інформація про процес сушіння	6
1.2 Устрій та принцип роботи сушарок з киплячим шаром	10
1.3 Способи автоматизації сушильних установок	14
1.4 Модернізація автоматизованої системи керування у сушарці киплячого шару	16
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>22</b>
2.1 Опис технологічної схеми виробництва сульфату амонію	22
2.2 Теоретичні основи процесу сушіння	24
2.3 Пристрій і принцип роботи сушарки з киплячим шаром	
2.4 Технологічні розрахунки апарата	31
2.5 Конструктивні розрахунки апарата	35
2.6 Визначення гідравлічного опору апарата	40
2.7 Вибір допоміжного обладнання	42
<b>3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>	<b>45</b>
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	45
3.2 Розрахунки апарата на міцність, стійкість та герметичність	48
<b>4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА</b>	<b>51</b>
4.1 Монтаж основного обладнання	51
4.2 Проведення ремонтних робіт основного технологічного обладнання	54
<b>5 ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ</b>	<b>57</b>
5.1 Вибір та обґрунтування параметрів контролю, регулювання та вимірювання	57
5.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації	60
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b>	<b>63</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</b>	<b>69</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	

## ВСТУП

Сульфат амонію або, як його ще називають, амоній сірчаноокислий містить два важливих мікроелементи – азот і сірку. Азот є одним із основних поживних елементів, необхідних для зростання рослин. Він є ключовим компонентом білків, нуклеїнових кислот та інших важливих органічних сполук. Сірка також є важливим хімічним елементом для рослин. Вона бере участь у синтезі амінокислот, біотрансформації та інших метаболічних процесах. Додавання сірки може покращити якість ґрунту та плодючість рослин [1].

Сульфат амонію представляє собою безбарвний порошок з кристалічною структурою, який може мати рожевий чи жовтий відтінок. Як вже було зазначено, його склад базується на двох важливих макроелементах, а саме азоті та сірці, що виключає його віднесення до категорії комплексних хімічних сполук. Таким чином, фермери вдосконалюють його ефективність шляхом використання взаємного підживлення спільно з іншими добривами, щоб забезпечити рослинам повний спектр необхідних поживних речовин [2].

Однією з ключових переваг сульфату амонію є його безагресивна природа, завдяки якій він не завдає шкоди ані плодам, ані корінню будь-якої рослини. Це робить його надзвичайно безпечним для використання в аграрному секторі, де збереження родючості ґрунту та здоров'я рослин є найбільш пріоритетним завданням. Крім того, важливо відзначити, що сульфат амонію доступний у різних формах та може бути введений у ґрунт як у рідкому стані, так і у вигляді сухої речовини. Рідка форма ідеально підходить для забезпечення кореневої системи, стебел та листя необхідними поживними речовинами, тоді як суха форма найефективніша при внесенні в ґрунт під час копання [3].

Враховуючи ці характеристики, сульфат амонію визначається не лише своєю хімічною ефективністю, але й гнучкістю в застосуванні, що робить його незамінним елементом у стратегіях раціонального сільськогосподарського виробництва.

Гранульовані (або крупнодисперсні) добрива стали важливою складовою світових тенденцій у сфері сільського господарства, враховуючи їхні численні переваги. Такий підхід має популярність завдяки кільком важливим факторам [3].

По-перше, гранульовані добрива забезпечують легкість зберігання та транспортування, що робить їх більш практичними для фермерів та виробників. Гранули можна зберігати у стійких контейнерах або мішках, зменшуючи ризик втрати якості та легкість використання під час розподілу.

Однією з ключових переваг використання гранульованих добрив є їх повільне розкладання у ґрунті. Це дозволяє пролонгувати дію поживних речовин, забезпечуючи рослинам стаке живлення протягом тривалого періоду. Цей ефект може бути особливо корисним для підтримки росту та розвитку рослин на тривалій термін. Також гранульовані добрива надають можливість точного та ефективного внесення поживних речовин у ґрунт. Це дозволяє фермерам оптимізувати витрати та максимізувати виробництво без втрат на різних етапах вирощування рослин.

Гранульовані добрива можуть також мати екологічні переваги, оскільки їх повільне розкладання зменшує ризик виносу надмірних поживних речовин в ґрунтові води.

Отже, світова спрямованість аграрного сектору в бік гранульованих добрив підкреслюється їхньою зручністю в обробці, довготривалим впливом на рослини та виробничою ефективністю, що робить їх важливим інструментом для сучасного сільського господарства [3, 4].

Стадія теплового сушіння виявляється важливою не лише для зневоднення сульфату амонію, але й для формування якісних та ефективних гранул, що відповідають вимогам аграрного сектору.

Видалення зайвої вологи з матеріалів не тільки допомагає зменшити вагу продукту, забезпечуючи ефективніше транспортування, але і призводить до формування гранул з визначеними фізичними характеристиками. Гранульовані матеріали стають менш схильними до утворення крихких частинок та

залишаються стійкими до розсипання, що важливо для забезпечення надійності виробничих процесів та збереження продукту [3].

Важливо відзначити, що сушіння може здійснюватися різними методами. Механічні способи, такі як віджимання, відстоювання, фільтрування та центрифугування, є ефективними для видалення вологи, але для досягнення повного зневоднення часто використовується теплове сушіння. Теплове сушіння, зокрема в барабанних сушарках або сушарках киплячого шару, є ефективним методом, який дозволяє випаровувати вологу та відводити утворену пару. Цей процес не лише сприяє зневодненню, але і може бути інтегрованим з іншими етапами виробництва, наприклад, гранулюванням, що забезпечує комплексний та ефективний підхід до виробництва гранульованих добрив.

Отже, метою даної магістерської роботи є дослідження виробництва сульфату амонію та розроблення автоматизованої системи керування тепловим процесом, що забезпечить точність і ефективність у сушінні полідисперсних матеріалів [5].

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Загальна інформація про процес сушіння [5, 6]

Сушіння – це технологічний процес, спрямований на видалення вологи з матеріалів шляхом випаровування рідини, яка міститься в них, за допомогою теплового впливу. Цей процес визначається рядом фізичних та хімічних змін, які відбуваються в матеріалі під впливом тепла.

Основною метою сушіння є видалення рідкого компонента, яким у більшості випадків є вода, з продукту. Проте, іноді також потрібно видаляти органічні розчинники. Процес сушіння супроводжується змінами властивостей матеріалу, такими як зміна теплопровідності, зниження об'ємної ваги та підвищення міцності.

Важливо відзначити, що якість сушіння визначається не лише ефективністю видалення вологи, але й збереженням властивостей та якості матеріалу. Висока якість сушіння дозволяє максимально використовувати матеріал у подальших процесах виробництва.

Ефективний режим сушіння визначається параметрами, такими як температура, тиск і відносна вологість теплоносія. Врахування властивостей конкретного матеріалу є ключовим аспектом для досягнення оптимальних результатів сушіння. Такий підхід забезпечує не лише високу якість, але і збереження ефективності матеріалу після завершення процесу сушіння.

Сушіння є важливим технологічним етапом у різних галузях промисловості, таких як хімічна, хіміко-фармацевтична, харчова та інші. У своїй фізичній сутності, сушіння представляє собою складний дифузійний процес, чия швидкість визначається темпом дифузії вологи з глибини матеріалу, який піддається сушінню, до навколишнього середовища.

Цей процес зводиться до видалення вологи шляхом переміщення тепла та речовини (вологи) всередині матеріалу та їхнього перенесення з поверхні матеріалу в навколишнє середовище. У зв'язку з цим, сушіння можна визначити

як поєднання взаємопов'язаних процесів теплового та масообміну, що включають в себе обмін теплом та вологою між матеріалом та навколишнім середовищем.

Важливо враховувати, що швидкість дифузії визначається не лише фізичними властивостями матеріалу, але й параметрами процесу сушіння, такими як температура, тиск та відносна вологість теплоносія. Оптимальне налаштування цих параметрів визначається з метою досягнення ефективності сушіння та забезпечення якісного кінцевого продукту.

Сушіння, таким чином, виступає як ключовий етап в технологічних ланцюгах виробництва, де відмінна якість та збереження властивостей матеріалу є критичними факторами для подальших процесів та застосувань.

Сушіння, як важливий етап в обробці матеріалів, реалізується через різноманітні способи підведення теплоти, кожен з яких має свої характеристики та використовується в залежності від конкретних умов і типу матеріалу:

- 1. Конвективна сушка.** Цей метод включає безпосередній контакт матеріалу з сушильним агентом, яким може бути повітря або суміш повітря з продуктами згоряння палива. Теплопередача відбувається газовою фазою, і сушіння призводить до охолодження газу при збільшенні вологовмісту.
- 2. Контактна (кондуктивна) сушка.** У цьому методі теплопередача відбувається через стінку між теплоносієм та матеріалом. Теплова енергія передається від теплоносія до матеріалу за допомогою кондукції. Цей спосіб використовується для матеріалів різної текстури та густини.
- 3. Радіаційне сушіння.** Тут теплопередача відбувається через випромінювання. Матеріал нагрівається внаслідок електричних або газових інфрачервоних випромінювачів. Цей метод відрізняється високою інтенсивністю сушіння та невеликою інерційністю сушарок.
- 4. Сублімаційне сушіння.** Використовується у вакуумі для видалення вологи з матеріалу у замороженому стані. Застосовується для збереження об'єму, кольору, запаху та смакових якостей матеріалу, зокрема в харчовій промисловості.

**5. Діелектричне сушіння.** Цей метод використовує поле струмів високої частоти для висушування матеріалів, таких як деревина, пінопласт, штучне волокно тощо. Хоча він ефективний, він може бути дорогим у реалізації.

Кожен із зазначених методів має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного залежить від властивостей матеріалу, ефективності процесу, енергоефективності та економічних обставин.

На рис. 1.1 відображено основні принципи функціонування сушильної установки.

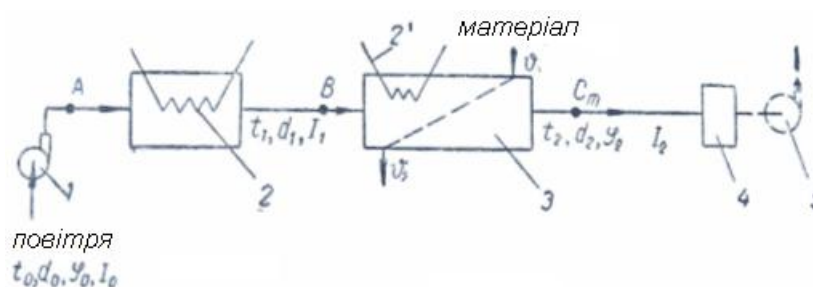


Рисунок 1.1 – Принципова схема сушильної установки:

- 1 – вентилятор; 2 – тепловий генератор; 3 – сушильний апарат;  
4 – пиловловлювач; 5 – пристрій для відсмоктування

Сушіння матеріалу розпочинається, коли він потрапляє до сушильної установки 3. У цьому процесі вологість матеріалу, яка спочатку має значення  $\omega_1$ , послідовно знижується до кінцевого показника  $\omega_2$ . У сушильній установці матеріал може перебувати у стані покою, розміщений на вагонетках, або ж пересуватися, використовуючи транспортерні стрічки, сітки чи гребінці, а також пересипання під час обертання сушарки.

Принциповою складовою цього процесу є використання тепла, що генерується в теплогенераторі 2. Теплоносій, який може бути поданий вентилятором 1, приводить до вироблення тепла в теплогенераторі. Такий теплогенератор може використовувати парові або газові калорифери, топки на твердому, рідкому або газоподібному паливі, інфрачервоні випромінювачі або електричні генератори. Вибір конкретного типу теплогенератора зазвичай визначається схемою та



методом сушіння, фізичними характеристиками матеріалу і потрібним режимом сушіння. Часом у сушильній камері може бути встановлений додатковий підігрівач 2'.

Передача тепла до матеріалу під час сушіння може здійснюватися двома основними способами. По-перше, це може відбуватися при безпосередньому контакті матеріалу з теплоносієм. У цьому випадку теплова енергія передається безпосередньо від носія тепла до поверхні матеріалу. По-друге, тепло може передаватися через обігріту поверхню, на якій розташований матеріал. Ця поверхня може бути обігріта парою, димовими газами або гарячою водою.

Тепло може бути передано матеріалу безпосередньо від повітря та димових газів, які оточують сушарку і взаємодіють з матеріалом, або від інертних газів і перегрітої пари. Однак зауважимо, що використання останнього типу теплоносія не є популярним у хімічній промисловості через труднощі в розробці сушильних установок безперервної дії, які використовують цей принцип.

Крім того, тепло може передаватися матеріалу від радіаційних джерел нагріву, особливо цікаво при сушінні тонких матеріалів. Також можливе використання струму високої або промислової частоти для передачі тепла матеріалам порівняно великої товщини під час сушіння.

Пари розчинника, що виходять з матеріалу під час процесу сушіння, ефективно видаляються з сушильної установки завдяки використанню відсмоктуючого пристрою 5. Цей пристрій може бути реалізований у вигляді вентилятора, якщо сушіння відбувається повітрям чи газом, або конденсатора із вакуум-насосом, коли потрібно створити вакуум у сушильному пристрої.

Під час сушіння повітрям і газами, які мають відпрацьований теплоносій, існує можливість виведення деякої кількості дрібних частинок висушеного продукту. З метою очищення газу, що виходить з сушильної установки, введено пиловловлюючий пристрій 4. Цей пристрій може представляти собою циклон, скруббер або рукавний фільтр, і його завданням є утримання та видалення дрібних частинок з газового потоку перед виходом з системи сушіння.

## 1.2 Устрій та принцип роботи сушарок з киплячим шаром [7–12]

Сушарки із киплячим шаром матеріалу мають широке застосування в хімічній та відповідних галузях промисловості, оскільки вони дозволяють ефективно висушувати матеріали різної консистенції – від зернистих до пастоподібних та рідких. Процес сушіння в цих апаратах протікає із вражаючою швидкістю, і кількість видаляється вологи з  $1 \text{ м}^2$  газорозподільної решітки значно варіюється в залежності від розміру частинок матеріалу та температурного режиму сушіння, сягаючи значень від 500 до 3000 кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{год.}$ ). Можливість сушіння липких, пастоподібних і рідких матеріалів пояснюється тим, що утворюється киплячий (зважений, псевдо-зріджений) шар, що виступає в ролі "ретура" для попередньо підсушеного продукту.

У сушильних установках зі зваженим шаром можна одночасно проводити різноманітні процеси, що включають сушіння та випал, сушіння та гранулювання, або сушіння та подрібнення. Ці установки вирізняються не лише різноманіттям конструкцій, але й великим спектром гідродинамічних і теплових режимів.

Розглядаючи їхню конструкцію, можна провести класифікацію за кількістю камер, режимом процесу (періодичний, напівбезперервний або безперервний), конфігурацією сушильної камери (круглі або прямокутні, сталі або зростаючі по висоті перерізу) та гідродинамічним режимом (з киплячим, фонтануючим або вихровим шаром).

У таких установках відбувається синергія різних процесів, що дозволяє оптимізувати виробництво і підвищити його продуктивність. Такий підхід розширює можливості використання установок і дозволяє ефективно використовувати їх в різних галузях промисловості.

Час, протягом якого матеріал перебуває в таких апаратах, може бути легко налаштований і контрольований. Цей параметр визначається відповідно до взаємозв'язку між різними факторами і умовами процесу:

$$\tau_{\text{сер}} = G_{\text{III}} / G_2, \quad (1.1)$$

де  $\tau_{\text{сер}}$  – середній витратний час перебування матеріалу в шарі;

$G_{\text{ш}}$  – маса шару;

$G_2$  – продуктивність сушарки за висушеним матеріалом; змінюючи висоту шару і, таким чином, його масу, можна регулювати  $\tau_{\text{сер}}$ .

Сушильні установки з періодичною дією призначені для ефективного сушіння матеріалів у виробництвах хімічної та хіміко-фармацевтичної галузей, де обсяги виробництва є невеликими. Ці апарати спеціально розроблені для обробки сипких та пастоподібних матеріалів, забезпечуючи оптимальні умови сушіння.

У хімічній промисловості найбільш поширені безперервно діючі сушильні установки, зокрема киплячого шару та інших варіацій зваженого шару, таких як фонтануючий і вихровий. На рис. 1.2 зображено установку для сушіння хлористого калію, здатну обробляти близько 100 тонн на годину.

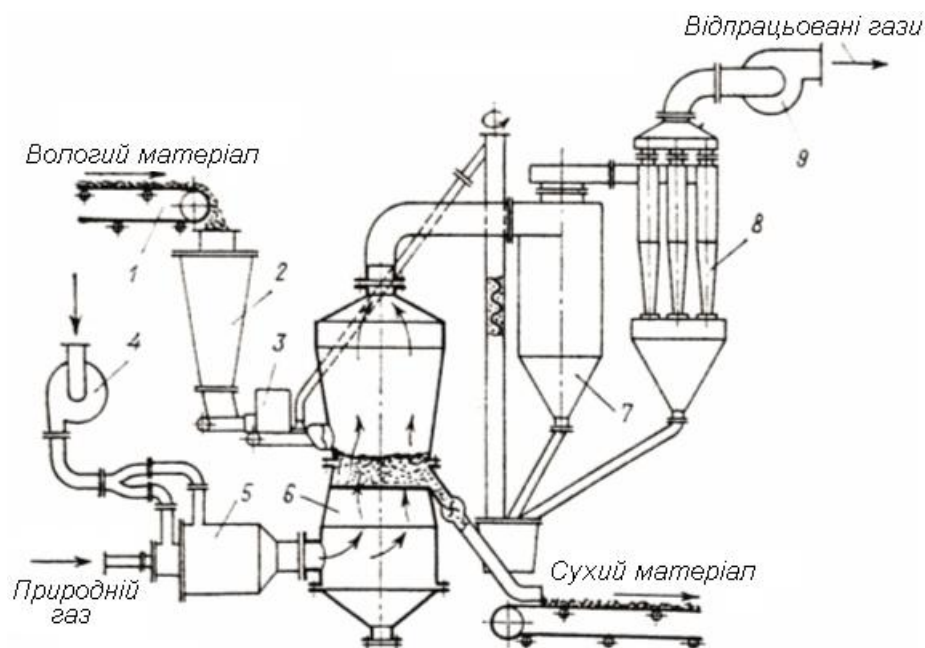


Рисунок 1.2 – Сушильна установка з апаратом киплячого шару

Процес розпочинається із подачі вологого матеріалу транспортером до приймального бункера 2. Подальше розподілення матеріалу по поверхні шару здійснюється за допомогою живильника-закидувача 3. Вентилятор 4 направляє повітря для подачі в пальник, де відбувається згорання природного газу або мазуту. Та-

кож, повітря використовується для розведення продуктів згоряння в камеру змішування, яка інтегрована з топкою 5. У цій камері відбувається процес псевдозридження шару висушеного продукту. Ця сучасна та продуктивна установка спроектована для оптимальної ефективності сушіння, забезпечуючи високий рівень продуктивності та якісний результат.

Процес вивантаження висушеного продукту в даній установці відбувається неперервно через спеціальний отвір, розташований на рівні решітки (інші системи можуть використовувати пересипний пристрій, який також розташований на рівні поверхні шару). Цей метод розвантаження, властивий саме рівню решітки, сприяє уникненню утворення великих грудок в сушарці. Сухий матеріал подається на стрічковий транспортер для подальшого використання.

Дрібна фракція, яка виокремлюється в системі циклонів (включаючи звичайний 7 та 8 батарейний циклони), направляється вертикальним шнеком зі збірника до місця завантаження, де вона змішується з вологим матеріалом. Остаточне очищення теплоносія, що виходить із сушильної установки, проводиться в мокрому скрубєрі, перед яким розташований димосос 9. Такий комплексний процес гарантує ефективність та якість вивантаженого продукту.

Під час сушіння матеріалів, особливо тих, які можуть утворювати комки, і термочутливих продуктів, визначальним фактором є забезпечення активного гідродинамічного режиму у прирешіточній зоні та уникнення застійних областей. Важливо враховувати, що такий оптимальний режим можна досягти за допомогою сучасних апаратів із розширюючимся шаром розтину.

Одним із ефективних рішень для цього є використання сушильних апаратів, таких як фонтануючі (зазначено на рис. 1.3 а) та вихрові (показані на рис. 1.3 б) системи. Ці апарати розроблені з урахуванням потреб сучасних технологій сушіння, спрямованих на забезпечення оптимальних умов для матеріалів, які мають складну консистенцію або високу чутливість до температурних змін.

Використання фонтануючих і вихрових сушильних апаратів не лише забезпечує ефективне розподілення матеріалу в прирешіточній зоні, але й усуває можливість утворення застійних областей, що є ключовим фактором для забезпечення якісного та ефективного процесу сушіння.

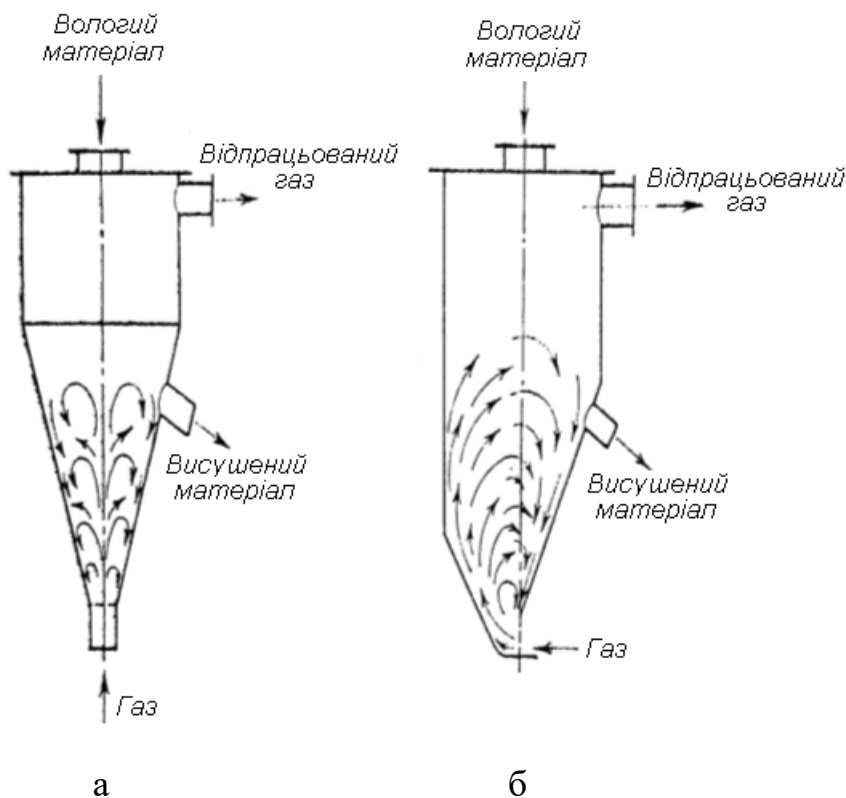


Рисунок 1.3 – Схеми сушильних апаратів з фонтануючим (а) та вихровим (б) шаром матеріалу

Сушильні апарати з киплячим шаром вражають своєю здатністю до легкого масштабування, завдяки можливості паралельного з'єднання відповідної кількості жолобів. Їх відмінність полягає у способі постачання теплоносія: у вихровому апараті теплоносії вводиться тангенціально, а решітка не має жодних провалів, тим часом, як у фонтануючому апараті теплоносії подається знизу, і процес сушіння відбувається через фонтануючий шар матеріалу, розташований вище. Ця особливість дозволяє ефективно адаптувати апарати до потреб конкретного виробництва, регулюючи їхню продуктивність шляхом збільшення або зменшення кількості жолобів, що використовуються в паралельному з'єднанні.

Сушарки зі зваженим шаром досить успішно використовуються для сушіння суспензій і розчинів, причому висушений продукт може бути представлений у вигляді гранул або порошку. У випадку отримання гранульованого матеріалу процес зазвичай проводять, застосовуючи шар матеріалу для висушування і розвантажуючи продукт з цього шару. При необхідності отримання тонкодисперсного мате-

ріалу, особливо при сушінні термочутливих і в'язких речовин (наприклад, желатину, барвників, пігментів), рекомендується використовувати інертні частинки, такі як фторопластові або фарфорові. Важливо відзначити, що в цьому випадку процес стає більш стійким, оскільки маса шару, що складається практично тільки з інертних частинок, залишається стабільною протягом всього процесу сушіння.

### **1.3 Способи автоматизації сушильних установок [13–15]**

Технології, які використовують високі температури та радіаційні потоки у процесах сушіння, надають можливість швидко та ефективно видаляти вологу з різних матеріалів. Однак, щоб забезпечити оптимальні умови та точність в управлінні такими процесами, важливо використовувати автоматизовані системи регулювання. Ручне керування в таких випадках не може забезпечити необхідної стабільності високих температур сушильного агента чи радіаційної енергії в межах встановлених параметрів.

Застосування автоматизації та систем автоблокування у сушильних установках також відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки виробничих процесів. Особливо це актуально при використанні високочастотних струмів чи обробці матеріалів, які можуть бути вибухонебезпечними чи токсичними. Автоматизовані системи не лише забезпечують ефективність процесу сушіння, але й гарантують високий рівень безпеки для пристроїв та персоналу, що працює з ними.

Впровадження систем автоматизованого управління призводить до значного підвищення рівня культури експлуатації сушильної установки та сприяє ряду позитивних змін у її функціонуванні. Однією з ключових переваг автоматизації є підвищення продуктивності сушильного процесу, що веде до збільшення обсягу виробництва. Також, цей підхід сприяє покращенню якості сушіння, забезпечуючи більш точний та стабільний контроль параметрів процесу.

Автоматизована система управління забезпечує високий рівень надійності роботи сушильної установки, виключаючи можливі помилки, які можуть бути спричинені людським фактором. Це важливо для забезпечення стабільності та ефективності виробничого процесу. Крім того, автоматизація полегшує умови праці пер-

соналу, оскільки вона виключає необхідність ручного контролю багатьох етапів сушіння. Зменшення кількості персоналу, що обслуговує сушарку, є ще однією вагомою перевагою автоматизованого управління, що впливає на оптимізацію витрат та підвищення ефективності виробництва.

Сучасні досягнення в галузі комплексної автоматизації та механізації вражають своєю високою ступенем досконалості, забезпечуючи ефективні та надійні рішення. На сьогоднішній день, ці передові технології активно використовуються в різноманітних сферах індустрії, забезпечуючи оптимальні умови для автоматизованого виробництва та обслуговування.

- 1. Автоматичне регулювання сушарок безперервної дії.** Авансована техніка автоматизованого управління надає можливість стабільного регулювання параметрів сушіння у безперервних сушарках. Це включає постійний моніторинг та належне управління температурою і вологістю сушильного агента в різних секціях робочої камери сушарки, забезпечуючи точне дотримання заданих значень.
- 2. Програмне автоматичне регулювання сушарок періодичної дії.** Застосування програмованого автоматичного регулювання у сушарках періодичної дії дозволяє гнучке налаштування параметрів сушіння протягом процесу. Це включає регулярні зміни температури та вологості сушильного агента на основі передбачених планів, що сприяє максимальній ефективності сушіння.
- 3. Автоматичний захист та сигналізація.** Введення автоматичних систем захисту та сигналізації є ключовим елементом, що гарантує безпеку та надійність роботи сушарки. Аварійні ситуації відслідковуються та сигналізуються за допомогою автоматичних сигналізаторів, що забезпечує невідкладне втручання для запобігання подальших проблем.
- 4. Автоматичне блокування.** Механізм автоматичного блокування дозволяє послідовне та автоматичне включення та вимикання різних механізмів та систем, що є важливим для точного виконання технологічних процесів. Наприклад, це може включати автоматичне вимикання подачі газу, перемикання газів та зупинку конвеєра в разі аварії або інших технічних несправностей.

На промислових сушильних установках киплячого шару, які використовуються для сушіння різноманітних матеріалів, теплова рівновага між газоподібним теплоносієм та матеріалом утвореного шару встановлюється на відносно короткій відстані від газорозподільних ґрат. Це призводить до того, що температури газів, які покидають шар, і самого матеріалу стають майже ідентичними, незалежно від вихідної температури теплоносія та інтенсивності передачі тепла в матеріал. Основна концепція полягає в тому, що регулювання температури шару в апаратах кільцевого сушіння вважається постійним та безперервним забезпеченням рівноваги між постачанням тепла від теплоносія та його витратою на нагрівання матеріалу та випаровування води за заданих умов сушіння. Порушення теплового балансу внаслідок зовнішніх впливів призводить до змін у вихідних параметрах системи, що відображає вплив збуджуючих факторів на процес сушіння та його результати.

#### **1.4 Модернізація автоматизованої системи керування у сушарці киплячого шару**

У якості основного критерію оптимальності сушіння зазвичай вибирається кількість вологи (позначена як  $W$ ), яка видаляється з матеріалу протягом одиниці часу. Цей параметр є ключовим, оскільки визначає ефективність процесу сушіння та його продуктивність. Вимірювання та контроль кількості вологи, яка видаляється, дозволяють оптимізувати режим сушіння для досягнення оптимальних результатів з врахуванням властивостей конкретного матеріалу та технічних обмежень сушильного обладнання:

$$W = G_M (\omega_n - \omega_k), \quad (1.2)$$

де  $G_M$  – витрата сухого матеріалу;

$\omega_n, \omega_k$  – вологість вологого та сухого матеріалу відповідно.



Поточні значення витрати сушильного агента (позначені як  $G_m$ ) та вологості матеріалу (позначені як  $\omega_n$  і  $\omega_k$ ) передаються на обчислювальний пристрій, який розраховує критерій оптимальності. Вихідний сигнал з цього пристрою подається на екстремальний регулятор. Екстремальний регулятор змінює витрати сушильного агента та вологого матеріалу послідовно, шукаючи оптимальне значення критерію оптимальності процесу. Важливо відзначити, що при роботі екстремального регулятора встановлені обмеження на мінімальну вологість сухого матеріалу.

У цій схемі стабілізації початкова температура сушильного агента досягається зміною витрати теплоносія, який постачається в теплообмінник. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективний контроль і оптимізацію процесу сушіння, реагуючи на зміни в вихідних параметрах та умовах в процесі.

У сушарках з великою інерційністю, де масштабні процеси мають тенденцію відбуватися повільно, виявляється, що пошук оптимальних значень стає тривким процесом. Завдяки великій інерційності системи, взаємодія між регулюванням та реакцією процесу вимагає більше часу для досягнення екстремальних точок.

У таких умовах важко досягти покращення якості регулювання, особливо в порівнянні зі звичайними схемами регулювання. Це може впливати з того, що велика інерційність ускладнює точне визначення оптимальних параметрів та вимагає більше часу для виявлення оптимальних значень параметрів системи сушіння. Таким чином, несумісність великої інерційності із швидкістю досягнення екстремальних точок може призвести до затримок у виявленні та підтриманні оптимальних режимів сушіння.

При досягненні в процесі сушіння рівноважної вологості, коли вміст вологи у матеріалі стає стійким, температура матеріалу наближається до температури сушильного агента. Це надає можливість впроваджувати ефективний контроль за завершенням процесу сушіння. Для цього можна використовувати чутливі елементи, такі як термопари, які розташовані як у матеріалі, так і в навколишньому середовищі.

За допомогою цих термопар, які з'єднані за диференціальною схемою, можна точно вимірювати температурний градієнт між матеріалом і сушильним агентом. Підключивши їх до потенціометра з сигналізуючим пристроєм, можна забезпечити автоматичне сповіщення про завершення сушіння, коли досягається необхідний рівень рівноважної вологості. Це спрощує процес контролю і дозволяє уникнути пересушування або недосушування матеріалу.

Якщо відбудеться збільшення завантаження вологого матеріалу або підвищення його вмісту води (або обидві зміни одночасно), відбувається великий приплив води в систему, що порушує тепловий баланс. Це викликає збільшення витрат тепла при постійному постачанні тепла, що, в свою чергу, приводить до негайного зниження температури в шарі матеріалу.

У разі збільшення кількості теплоносія або підвищення його температури при незмінному завантаженні, відбувається надмірний приплив тепла, що призводить до збільшення температури в шарі. Це спричинює підвищення температури матеріалу, оскільки приплив тепла перевищує витрати.

Отже, температура в шарі матеріалу служить чутливим індикатором для будь-яких змін у факторах, які визначають процес сушіння, і вона реагує миттєво на будь-які відхилення в цих параметрах, забезпечуючи тим самим контроль і регулювання процесу сушіння.

Ефективність регулювання температури великою мірою залежить від характеристик надходження сировини на сушильну установку. У деяких випадках, коли коливання як кількості, так і вологовмісту матеріалу є невеликими та випадковими, їх легко компенсувати встановленням проміжного бункера. Однак, в умовах, коли сушіння тісно пов'язане з роботою попередньої виробничої станції та обробляє всю поступаючу воду сировини без врахування можливих коливань навантаження, вищеписаний метод стабілізації температури може бути недостатнім.

За таких обставин необхідно вживати спеціальних заходів для узгодження продуктивності сушильної установки із змінюючимся навантаженням. Додатковий параметр введений у схему регулювання, що відображає відповідність продуктивності

вності сушарки вимогам попередньої станції. Цим параметром може служити, наприклад, рівень вологого матеріалу у проміжному бункері.

Коли рівень вологого матеріалу в бункері знижується, це свідчить про те, що продуктивність сушарки перевищує продуктивність попередньої станції. У цьому випадку температуру теплоносія слід знизити. Навпаки, якщо відбувається накопичення сирого матеріалу в бункері, це вимагає підвищення продуктивності сушарки за допомогою підвищення температури теплоносія. Цей відокремлений параметр дозволяє ефективно узгоджувати роботу сушарки з попередньою станцією, забезпечуючи оптимальні умови для сушіння при будь-яких умовах навантаження.

У системі автоматизації процесу сушіння, окрім функцій стабілізації температури шару та узгодження навантажень, важливо також забезпечити стабілізацію опору шару. Ця функція є критичною, оскільки значні коливання в кількості матеріалу в шарі призводять до змін в опорі, що може викликати аварійні ситуації та порушення гідродинамічного режиму процесу сушіння. У деяких випадках це також може вплинути на гранулометричний склад продукту.

Система стабілізації опору шару забезпечується за допомогою регулятора (див. рис. 1.4), який контролює кількість сухого матеріалу, вивантажуваного з шару. Цей регулятор впливає на продуктивність вивантажувального пристрою, такого як секторний затвор або шнек, який обладнаний регульованим приводом. Зміна кількості вивантажуваного матеріалу дозволяє підтримувати стійкий опір шару або сумарний перепад в опорі між шаром та газорозподільною решіткою.

Цей метод регулювання дозволяє забезпечити сталість опору шару в процесі сушіння, що є важливим аспектом для забезпечення ефективності процесу та уникнення негативних впливів на гідродинамічні характеристики та гранулометричний склад продукту.

Механізм регулювання розрідження забезпечує ефективну роботу системи та контролює рівень тиску в апараті. Це є важливим елементом з погляду технічної безпеки, оскільки допомагає утримувати гази та частки пилу всередині апарата і запобігає їхньому проникненню у навколишнє середовище.

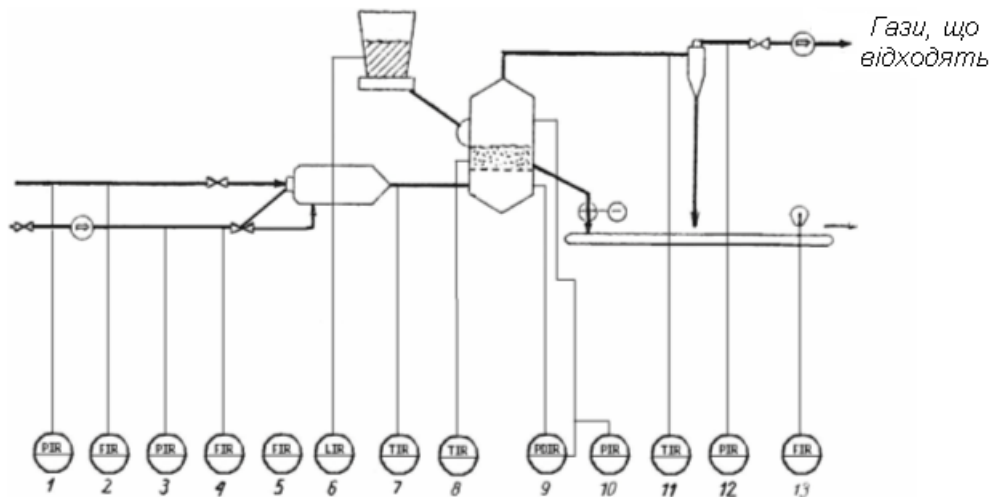


Рисунок 1.4 – Контроль процесу сушіння в апараті киплячого шару

Забезпечення стабільної та нормальної експлуатації процесу сушіння визначається основною умовою підтримання постійної витрати повітря та відповідної швидкості газу в шарі. Різкі порушення гідродинаміки шару можуть призвести до важливих проблем, особливо до зниження витрати повітря нижче визначеної межі, що є характерною для конкретного матеріалу. Важливо відзначити, що підвищена витрата повітря може спричинити винесення матеріалу з шару, що призводить до збільшення навантаження на системи пилоловлювання та значних втрат продукту.

Дотримання сталої витрати повітря визначається як ключовий фактор для забезпечення ефективності та надійності процесу сушіння. Регуляція швидкості газу в шарі допомагає уникнути порушень гідродинаміки та забезпечити оптимальні умови для проходження повітря через матеріал. Порушення цього балансу можуть призвести до надмірного зносу обладнання, збільшення витрат на обслуговування та зниження ефективності процесу сушіння.

У схемі автоматизації процесу сушіння важливо передбачити контроль за різноманітними параметрами (див. рис. 1.9), зокрема:

- 1. Температура в шарі і початкова температура теплоносія.** Забезпечення оптимального режиму сушіння вимагає стабільної температури в шарі мате-

ріалу та контролю за температурою теплоносія для забезпечення ефективного теплообміну.

- 2. Температура газів, що виходять.** Моніторинг температури виходячих газів дозволяє контролювати ефективність сушіння і забезпечує відповідність вимогам технологічного процесу.
- 3. Витрати палива.** Система автоматизації повинна слідкувати за витратами палива для оптимізації енергоефективності процесу сушіння.
- 4. Загальна витрата повітря і повітря для горіння.** Контроль за витратою повітря важливий для забезпечення необхідної гідродинаміки в апараті та підтримання ефективності сушіння.
- 5. Опір шару та рівень матеріалу в бункері.** Контроль опору шару є важливим для уникнення аварійних ситуацій, а рівень матеріалу в бункері впливає на подачу вологого матеріалу для сушіння.

Зазначені параметри контролю мають визначальне значення для забезпечення стабільності, продуктивності та якості процесу сушіння.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис технологічної схеми виробництва сульфату амонію [16]

Технологічна схема установки виробництва сульфату амонію приведена на рис. 2.1. У апараті 8, який призначений для розчинення сульфату амонію, використовується лінія з артезіанською водою об'ємом 2500 літрів. Одночасно з цим, з мішків завантажується приблизно 1400–1500 кг (35–39 мішків) кристалічного сульфату амонію в апарат.

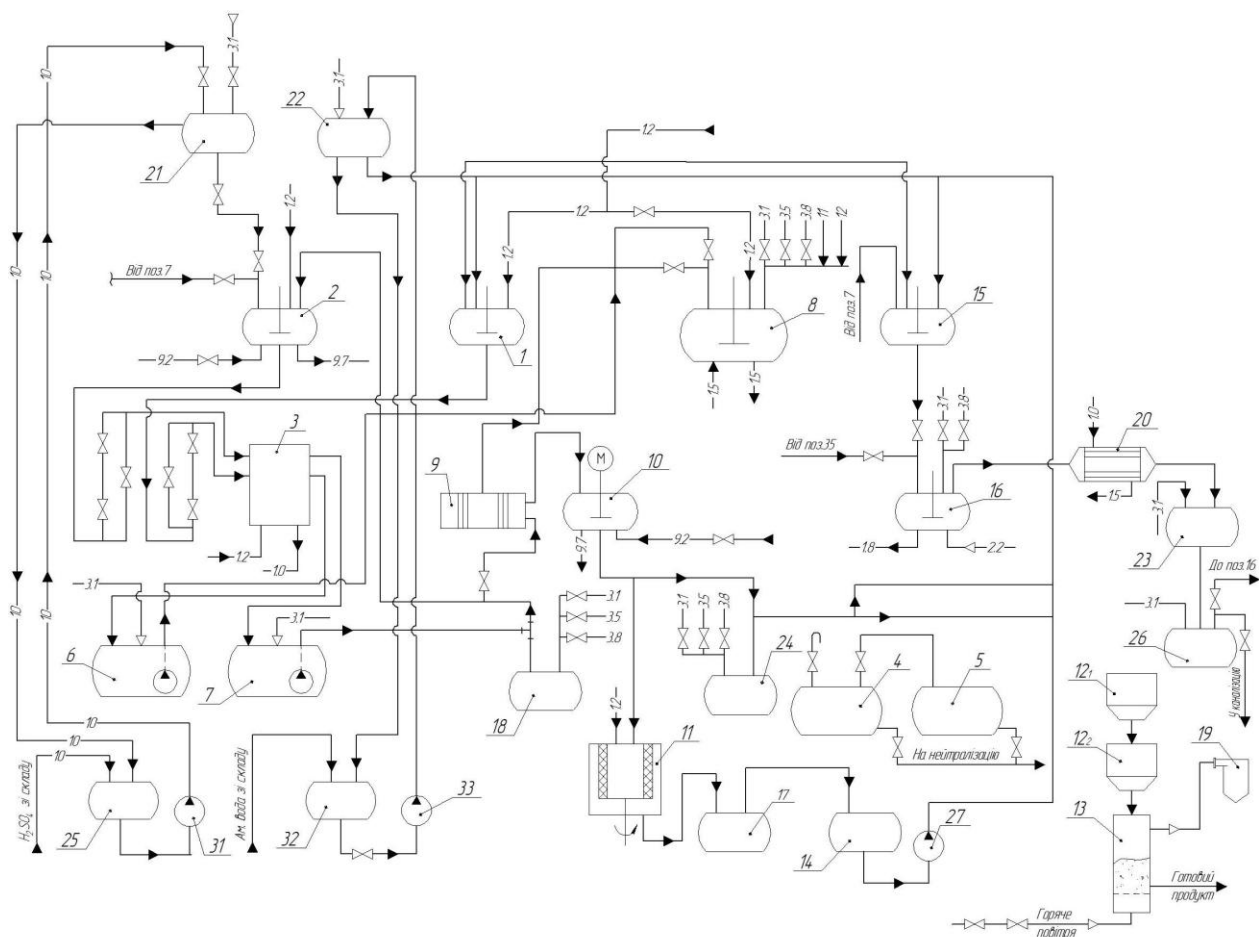


Рисунок 2.1 – Технологічна схема установки виробництва сульфату амонію

Перед подачею сульфату амонію апарат 8 нагрівається до температури 30–35°C. При цьому включається мішалка для забезпечення рівномірного розчинення сульфату амонію в воді. Процес передбачає досягнення вмісту сульфату амонію в

розчині на рівні 430–460 г/л. Після досягнення цієї концентрації розчин з апарату 8 надходить на фільтрацію. Для цього використовується стиснуте повітря, яке направляє розчин через рамний фільтр 9. Цей процес дозволяє видалити механічні домішки з розчину.

Очищений розчин подається в один із кристалізаторів 10 для подальшого використання чи обробки. Такий підхід забезпечує ефективне розчинення сульфату амонію та виведення його у вигляді чистого розчину з видаленням небажаних домішок.

Після кристалізаторів розчин сульфату амонію зливають у збірник 14. Потім, за допомогою відцентрового насоса 27, цей розчин подається у мірники аналізу 1 або, в іншому випадку, в проміжну ємність 24. Подальше використання цього розчину може мати різні напрямки, в залежності від його характеристик.

Розчин також може бути направлений в мірники католіту 2, використовуючи стиснуте повітря. Процес наповнення системи та запуску електролізерів включає в себе роботу з католітним розчином. З мірника 21 завантажується сірчана кислота в кількості 60–65 л на 1 м<sup>3</sup> розчину. Розчин потім перемішується мішалкою протягом 30 хвилин, після чого в ньому перевіряють вміст кислоти, який повинен бути в межах 110–120 г/л.

Таким чином, підготовлений католітний розчин у кількості 8,5–9 м<sup>3</sup> готується для заповнення системи та пуску електролізерів. Робота електролізерів здійснюється в безперервному режимі, де циклові розчини аноліту і католіту циркулюють у загальній технологічній схемі окремо, забезпечуючи ефективний процес виробництва.

Для охолодження анодів і катодів необхідно подати охолоджуючу воду з колектора у кількості 30–35 м<sup>3</sup>/год. Ця вода використовується для забезпечення оптимальної температури робочих елементів електролізерів. Для ефективної роботи аноліту і католіту через ротаметри подається проточна вода. Для аноліту рекомендована проточність в межах 800–1000 л/год., а для католіту – 800–900 л/год. Кі-

лькість поданої проточної води може бути регульована в процесі роботи в залежності від результатів аналізів, зокрема кислотності і вмісту продуктів розпаду.

Проточність води в аноліт і католіт може бути регульована за допомогою ротаметрів. Це дозволяє забезпечити оптимальні умови для процесів, які відбуваються на аноді та катоді. Регулювання проточності може бути важливим для забезпечення стабільності та ефективності роботи електролізерів.

Важливо також здійснювати регулярний контроль якості води, зокрема кислотності і вмісту продуктів розпаду, щоб вчасно виявляти можливі аномалії та підтримувати оптимальні умови роботи системи.

Для видалення забруднень з сульфату амонію сульфатом заліза і досягнення вмісту заліза менше 60 мг/л можна використовувати спеціальні методи очищення, такі як розчинення і відновлення. Застосування іонообмінних смол для видалення заліза з розчину сульфату амонію. Цей метод базується на здатності іонообмінних смол замінювати іони забруднюючих металів на іони більш безшкідливих. Потім іонообмінник можна регенерувати для повторного використання.

Використання реагентів для утворення осаду оксиду заліза, який може бути легко відфільтрований або осаджений. Цей метод може включати застосування коагулянтів та флокулянтів для полегшення формування осаду. Використання хелатуючих агентів, які можуть утворювати комплекси з іонами заліза, роблячи їх менш доступними у водному розчині. Такі комплекси можуть бути легше вилучені за допомогою фільтрації або інших методів.

Використання мембранних технологій, таких як обернена осмоз чи ультрафільтрація, для видалення забруднень з розчину. Мембрани можуть бути налаштовані так, щоб вони видаляли іони заліза, залишаючи сульфат амонію в розчині.

## **2.2 Теоретичні основи процесу сушіння**

Теоретичний огляд, що наведено у даному розділі, виконано на підставі літературних джерел [6, 7, 17, 18].



Сушіння – це процес видалення вологи з матеріалів, шляхом її випаровування і відведення утворених парів. Апарати, в яких безпосередньо відбувається процес сушіння, називають сушарками.

За способом передачі тепла розрізняють конвективні, контактні, терморадіаційні, сублімаційні і високочастотні сушарки. Дисперсні матеріали, до яких відносяться зернисті, порошкоподібні, гранульовані, подрібнені тверді, а також дисперговані рідкі і пастоподібні продукти, в хімічній технології висушують головним чином конвективним способом – шляхом безпосереднього зіткнення висушуваного матеріалу з сушильним агентом, в якості якого зазвичай використовується нагріте повітря або топкові гази.

Вибір способу сушіння, а відповідно і типу сушарки, залежить від хімічних властивостей матеріалу. Для сушіння кристалів сульфату амонію можуть бути застосовані барабанна сушарка або сушарка киплячого шару.

Апарати з псевдозрідженим шаром зернистого матеріалу відрізняються великою різноманітністю, як по конструкції, так і по гідродинамічним і тепловим режимам роботи. Ефективність сушки в киплячому шарі, в значній мірі, залежить від правильного визначення конструктивних і технологічних параметрів сушарки, правильного вибору апаратного оформлення. Як правило, параметри сушарок киплячого шару визначаються для сушки конкретного матеріалу і враховують початкову і кінцеву вологість матеріалу, його фізико-механічні властивості, вимоги до температурного режиму, мінімізації або максимізації виносу дрібних фракцій і інші вимоги, що пред'являються до матеріалу і процесу сушіння.

Ці сушарки є одним із найбільш ефективних типів сушарок, які останнім часом набувають усе більшого поширення. Процес в киплячому шарі дозволяє значно збільшити поверхню контакту між частинками матеріалу і сушильним агентом, інтенсифікувати випаровування вологи з матеріалу і скоротити (до декількох хвилин) тривалість процесу сушіння.

Сушіння різних матеріалів у киплячому шарі набуло широкого поширення завдяки специфіці процесу:

– по-перше, цим методом можна висушувати зернисті, сипкі, пастоподібні і навіть рідкі матеріали;

– по-друге, процес протікає дуже інтенсивно. Об'ємний коефіцієнт теплообміну, віднесений до шару матеріалу, дорівнює від 5 до 10 тис. ккал/м<sup>3</sup>·г·град, тоді як для барабанних сушарок він складає на увесь об'єм не більше 500 ккал/м<sup>3</sup>·г·град. Знімання вологи з 1 м<sup>2</sup> решітки залежно від дисперсності матеріалу і температурного режиму сушіння складає від 60 до 3000 кг/м<sup>2</sup>·г. Навіть при сушінні матеріалів, які комкуються та мають погану сипкість, не виникало порушень роботи установки, оскільки шар є своєрідним ретуром заздалегідь підсушеного продукту.

Саме тому сушарки з киплячим шаром нині успішно застосовуються в хімічній технології не лише для сушіння сипких зернистих матеріалів (наприклад, мінеральних і органічних солей), а також для матеріалів, схильних до комкоутворення (наприклад, сульфату амонію), пастоподібних матеріалів (пігментів, анілінових барвників, розплавів і суспензій).

В установках з киплячим шаром можна одночасно проводити декілька процесів: сушіння і випалення, сушіння і класифікацію частинок за розмірами, сушіння і гранулювання.

Проте, сушки киплячого шару мають і недоліки: підвищена витрата електроенергії, невисока інтенсивність процесу при сушінні тонкодисперсних продуктів.

Кількість вологи  $W$ , яка видаляється з матеріалу в процесі сушіння при зміні вмісту вологи матеріалу (вважаючи на суху речовину) від  $\omega_H$  до  $\omega_K$ ,

$$W = G \cdot (\omega_H - \omega_K), \quad (2.1)$$

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

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

$$G_C = \frac{W}{x_K - x_H}, \quad (2.2)$$

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)  $\nu_{ВД}$  (м<sup>3</sup>/кг) розраховується за формулою:

$$\nu_{ВД} = \frac{R_B \cdot T}{P - \phi_B \cdot P_{НАС}}, \quad (2.3)$$

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

$T$  – температура повітря, К;

$P$  – загальний тиск пароповітряної суміші, Па;

$\phi_B$  – відносна вологість повітря, частки;

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

Різниця питомих витрат теплоти в дійсній і в теоретичній сушарках:

$$\Delta q = q - q_T = \frac{(I_H - I_K)}{(x_K - x_H)}, \quad (2.4)$$

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.

При відсутності додаткового підігріву повітря в сушильній камері маємо:

$$\Delta q = q_{МАТ} + q_{ТР} + q_{ПОТ} - c_w \cdot \theta_H, \quad (2.5)$$

де  $q_{МАТ}$  – питома теплота, що витрачається на нагрівання матеріалу від температури  $\theta_H$  до температури  $\theta_K$ , Дж/кг

$$q_{MAT} = \frac{G \cdot c_M \cdot (\theta_K - \theta_H)}{W}, \quad (2.6)$$

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

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

$$q_{TP} = \frac{G_{TP} \cdot c_{TP} \cdot (t_{TP.K} - t_{TP.H})}{W}; \quad (2.7)$$

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

$$q_{ПОТ} = (0,05 \div 0,10) \cdot q_T. \quad (2.8)$$

Для киплячого шару характерний несталий гідродинамічний режим з нерівномірністю полів тиску і температур, циклічним виникненням і руйнуванням газових пазирів, неоднаковою локальною порозністю і таке інше. Тому в шарі псевдокиплячого матеріалу спостерігається рух часток у всіх напрямках. Для киплячого шару характерно також перемішування газу і матеріалу, причому обидві фази перемішуються в осьовому (по напрямку потоку газу) і подовжньому (чи поперечному) напрямках. Частки при зворотньо-поступальному русі захоплюють газ і переносять його в глибину шару, тобто відбувається осьове перемішування газу.

По гідродинаміці газової фази апарати з киплячим шаром займають проміжне положення між апаратами ідеального витіснення і ідеального змішення. Частки твердої фази також перемішуються в осьовому і подовжньому напрямках, причому інтенсивність і область перемішування обумовлені гідродинамічним режимом кипіння, конструкцією розподільних решіток і камери, розмірами апарату. Тому по твердій фазі апарати з киплячим шаром відносяться до апаратів проміжного типу.

На практиці сушарки з киплячим шаром забезпечують досить рівномірну сушку продукту.

У киплячому шарі кожна частка інтенсивно омивається потоком газу. Швидкість обмивання має змінний пульсуючий характер, що інтенсифікує тепло- і масообмінні процеси. У процесі теплообміну відбувається зіткнення часток і внаслідок цього турбулізація пограничного шару. У одиниці об'єму апарату одночасно знаходиться велика кількість часток, поверхня яких бере участь в теплообміні. Сукупність високих теплообмінних коефіцієнтів і великих поверхонь розділу фаз в установках з киплячим шаром обумовлює інтенсивність процесів тепло- і масообміну, віднесена до  $1 \text{ м}^3$  апарата.

Газ, що виходить в шар киплячого матеріалу з-під решітки, досить швидко переміщається в осьовому напрямі. Тому на висоті 10–25 мм від решітки відбувається різке зниження температури газів (майже до температури газів, що відходять).

### **2.3 Пристрій і принцип роботи сушарки з киплячим шаром**

Проектована сушарка киплячого шару (рис. 2.2) представляє собою складний технічний апарат, який забезпечує ефективний процес сушіння матеріалів. Основні компоненти сушарки включають конічний корпус, газорозподільний пристрій, газорозподільну решітку і кришку. Газорозподільна решітка виготовлена зі штампованого сита з круглими отворами, що забезпечує живий перетин близько 15 %.

Конструкція сушарки обладнана рядом важливих елементів, серед яких технологічний люк, оглядові вікна та штуцери для приладів контролю, вимірювання та автоматизації (КВПіА). Ці елементи роблять експлуатацію та обслуговування сушарки зручними та доступними для персоналу.

Важливими характеристиками сушарки є також опори-лапи, на які вона встановлюється. Чотири опори-лапи забезпечують стабільність та надійність роботи сушарки, допомагаючи уникнути коливань та перекосів в процесі експлуатації.

Узагальнюючи, конструкція сушарки киплячого шару розроблена таким чином, щоб забезпечити ефективне та безперебійне сушіння кристалів сульфату амонію, забезпечуючи при цьому зручність обслуговування та надійність в роботі.

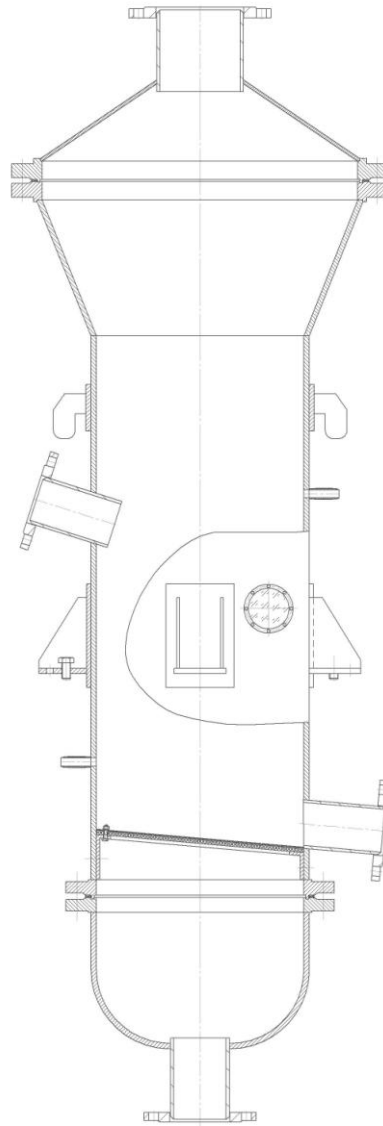


Рисунок 2.2 – Схема сушарки киплячого шару

У киплячому шарі, який характеризується інтенсивним перемішуванням частинок по всьому його об'єму, процес віднесення дрібних часток вздовж з іншими, більшими частинками, що характеризуються більшою швидкістю витання, не відбувається миттєво. Здебільшого, віднесення часток з шару відбувається у той момент, коли швидкість газу стає рівною швидкості витання дрібних часток. Це є необхідною умовою, але не єдиною, яка визначає цей процес. Зокрема, розміри апарату також впливають на ефективність віднесення частинок в системі киплячого шару.

Розміри апарату, такі як діаметр і висота, мають суттєвий вплив на гідравлічні умови та інтенсивність перемішування внутрішнього шару. Оптимальний розмір апарату сприяє забезпеченню рівномірного розподілу та контролю газового потоку в усьому об'ємі шару, що, у свою чергу, визначає ефективність віднесення частинок.

На початку процесу шар матеріалу частково розділяється на фракції, і в цьому контексті дрібні частки піднімаються на поверхню шару, а потім підхоплюються газом. Віднесення частинок збільшується зі зростанням швидкості кипіння, зменшенням діаметру апарату і розміру частинок. З іншого боку, віднесення зменшується зі збільшенням висоти шару, нерівномірності частинок за формою і при збільшенні до певного значення висоти зони сепарації.

Важливо враховувати, що оптимальний гідродинамічний режим залежить від конкретних параметрів системи, таких як розміри апарату, фізичні характеристики матеріалів та умови процесу. Адекватне налаштування цих параметрів може забезпечити ефективну роботу гідродинамічного механізму та відповідати специфічним вимогам процесу сушіння в конкретному випадку.

## 2.4 Технологічні розрахунки апарата

Розрахунок проводимо на підставі значень та за методикою попереднього кваліфікаційного проекту (бакалаврської роботи) [16].

Для початку визначимо середньорічні параметри повітря. Приймаємо умови, що в цілому клімат є помірно континентальним із середньорічною температурою  $t_{B0} = 7^\circ\text{C}$ , а відносна вологість повітря в середньому за рік становить  $\varphi_{B0} = 78\%$ .

За діаграмою Рамзина (рис. 2.3) параметри повітря перед калорифером складають: точка А на діаграмі ( $X_0 = 0,006$  кг/кг;  $I_0 = 20$  кДж/кг). Тоді параметри повітря в калорифері: точка В ( $t_{вн} = 110^\circ\text{C}$ ,  $X_B = 0,006$  кг/кг,  $I_B = 132$  кДж/кг).

Параметрами точки С<sub>1</sub> є: постійна ентальпія  $I_B = 132$  кДж/кг і кінцева температура повітря, яку приймаємо по практичним даним  $t_{BK} = 70^\circ\text{C}$ .

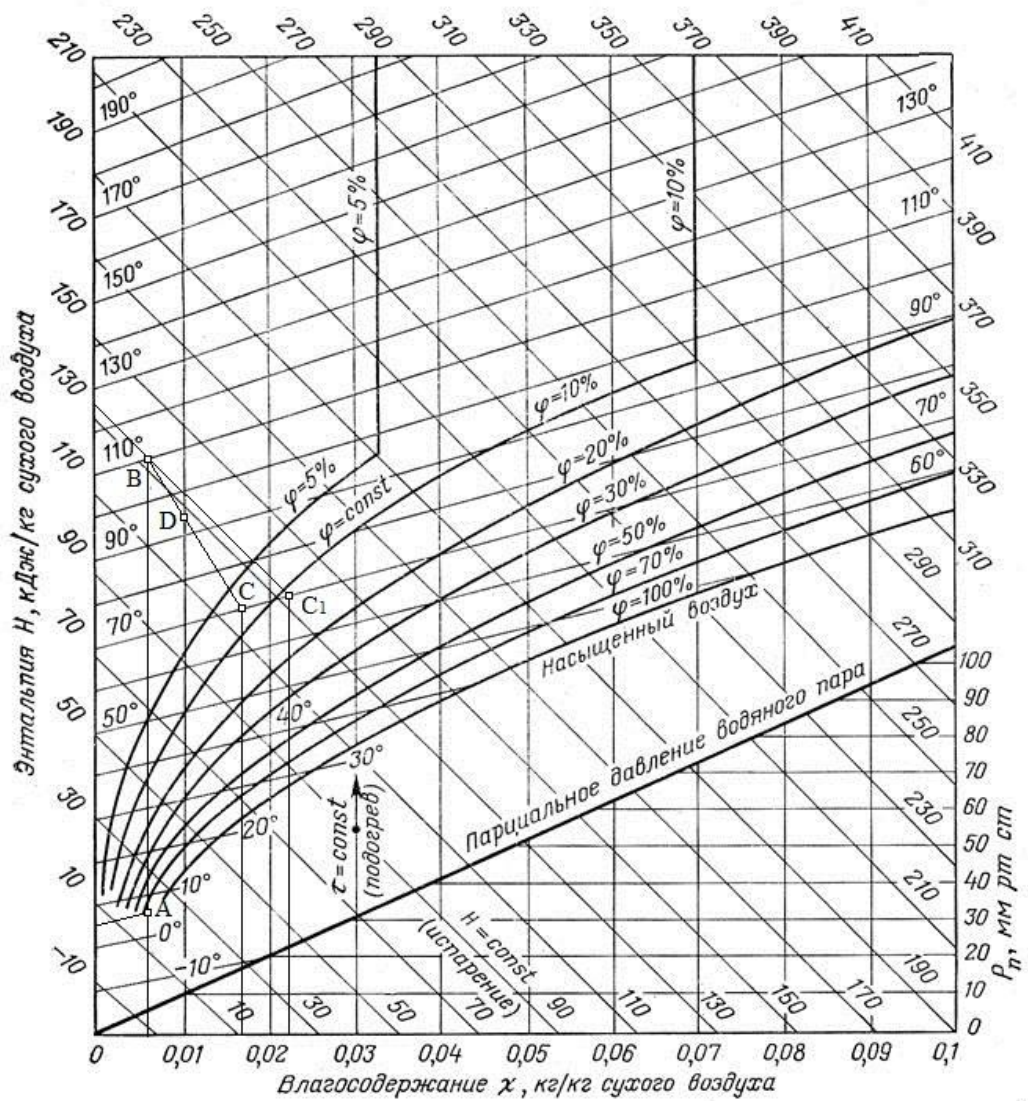


Рисунок 2.3 – Діаграма Рамзина (схема реального процесу сушіння)

При теоретичному процесі сушіння питома теплота визначається з наступного рівняння:

$$q_T = \frac{I_B - I_0}{X_{\text{ВЫХ}} - X_0}, \quad (2.9)$$

де  $X_{\text{ВЫХ}}$  – вміст вологи в повітрі на виході з сушарки при теоретичному процесі, кг/кг. За діаграмою Рамзина  $X_{\text{ВЫХ}} = 0,022$  кг/кг (точка  $C_1$  на рис. 2.3).



$$q_T = \frac{132 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3}{0,022 - 0,006} = 7,0 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)}.$$

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

З рівняння лінії реального процесу сушіння

$$I = I_B - \Delta q (X - X_0), \quad (2.10)$$

приймавши будь-яке значення  $X$ , менше  $X_{\text{ВЫХ}}$ , визначаємо  $I$ , попередньо розрахувавши вологу, що випаровується  $W$ , і поправку  $\Delta q$  для реального процесу.

Витрати вологи, що випаровується:

$$W = G_1 \cdot (\omega_H - \omega_K), \quad (2.11)$$

$$W = 1500 \cdot (0,03 - 0,002) = 42 \text{ (кг/год.)}.$$

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

$$q_{MAT} = \frac{G_1 \cdot c_M \cdot (\theta_K - \theta_H)}{W}, \quad (2.12)$$

де  $c_M$  – питома теплоємність сульфату амонію,  $c_M = 712$  Дж/(кг·К).

$$q_{MAT} = \frac{1500 \cdot 712 \cdot (60 - 20)}{42} = 1,02 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)}.$$

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

$$q_{ПОТ} = 0,10 \cdot q_T = 0,10 \cdot 7,0 \cdot 10^6 = 7,0 \cdot 10^5 \text{ (Дж/кг)}.$$

Різниця температур в теоретичній і реальній сушарках:

$$\Delta q = q_{MAT} + q_{ПОТ} - c_{\omega} \cdot t_{B0}, \quad (2.13)$$

$$\Delta q = 1,02 \cdot 10^6 + 7,0 \cdot 10^5 - 1007 \cdot 7 = 1,7 \cdot 10^6 \text{ (Дж/кг)}.$$

Прийнявши значення  $X=0,01$  кг/кг, за рівнянням (2.2) розраховуємо:

$$I = 132 \cdot 10^3 - 1,7 \cdot 10^6 \cdot (0,01 - 0,006) = 1,25 \cdot 10^5 \text{ (Дж/кг)}.$$

Виходячи з діаграми Рамзина (рис. 2.3), визначаємо вміст вологи в повітрі на виході з сушарки. Для цього проведемо лінію через дві точки: точка В має координати ( $X_B = 0,006$  кг/кг;  $I_B = 132$  кДж/кг); точка D має координати ( $X = 0,01$  кг/кг;  $I = 125$  кДж/кг), до перетину з ізотермою  $t_{BK} = 70^\circ\text{C}$ . Відповідно знаходимо вміст вологи в повітрі, який залишає сушарку:  $X_K = 0,017$  кг/кг (точка С на рис. 2.3).

Витрати сухого теплоносія в сушарці:

$$G_C = \frac{W}{X_K - X_0}, \quad (2.14)$$

$$G_C = \frac{42}{0,017 - 0,006} = 3818 \text{ (кг/год.)}.$$

Витрати вологого теплоносія на виході з сушарки:

$$V_B = v_{уд} \cdot G_C, \quad (2.15)$$

$$\text{де } v_{уд} = \frac{R_B \cdot T}{P - \phi_e p_{нас}} = \frac{287 \cdot (273 + 70)}{10^5 - 0,78 \cdot 6,18 \cdot 10^4} = 1,90 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

$$V_B = 1,90 \cdot 3818 = 7254 \text{ (м}^3\text{/год.)}.$$

## 2.5 Конструктивні розрахунки апарата

Для визначення площі поперечного перерізу сушарки необхідно визначити швидкість повітряного потоку в сушарці.

Швидкість початку псевдозрідження (перша критична швидкість):

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \mu_{\text{CP}}}{d_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{CP}}}, \quad (2.16)$$

де  $\mu_{\text{CP}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – в'язкість повітря при середній температурі [18];

$\rho_{\text{CP}}$  – густина повітря при середній температурі [18];

$d_{\text{э}}$  – еквівалентний діаметр частинки,  $d_{\text{э}} = 0,5 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м}$ .

Критерій Рейнольдса [19]:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (2.17)$$

де  $Ar$  – критерій Архімеда.

$$Ar = \frac{d_{\text{э}}^3 \cdot \rho_{\text{CP}} \cdot g \cdot \rho_{\text{ч}}}{\mu_{\text{CP}}^2}, \quad (2.18)$$

де  $\rho_{\text{ч}} = 1770 \text{ кг/м}^3$  – щільність матеріалу (сульфат амонію).

$$Ar = \frac{(0,0005)^3 \cdot 1,0 \cdot 9,81 \cdot 1770}{(2,2 \cdot 10^{-5})^2} = 4484.$$

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{4484}{18 + 5,22 \cdot \sqrt{4484}} = 12,2.$$

Підставивши в рівняння (2.16), отримаємо:

$$\omega_{кр} = \frac{12,2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5}}{0,0005 \cdot 1,0} = 0,54 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.19)$$

Швидкість віднесення частки (друга критична швидкість)  $\omega_{ун}$  з сушарки «киплячого шару» визначається за допомогою критеріального рівняння [13]:

$$\omega_{ун} = \frac{\mu_{ср}}{d_3 \rho_{ср}} \left( \frac{Ar}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{Ar}} \right), \quad (2.20)$$

$$\omega_{ун} = \frac{2,2 \cdot 10^{-5}}{0,0005 \cdot 1,0} \cdot \left( \frac{4484}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{4484}} \right) = 3,39 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Робочу швидкість сушильного агента вибирають в інтервалі від  $\omega_{кр}$  до  $\omega_{ун}$ . Ця швидкість залежить від граничного числа псевдозрідження. У свою чергу, число псевдозрідження залежить від: форми частинок, форми апарата, конструкції газорозподільної решітки і т.д. [19]. Його визначення базується на підставі аналізу дослідних даних, і для наших умов ведення процесу рекомендується вибирати значення в інтервалі від 3 до 4.

Таким чином, робоча швидкість сушильного агента:

$$\omega_p = K_\omega \cdot \omega_{кр}, \quad (2.21)$$

$$\omega_p = 3,5 \cdot 0,54 = 1,89 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Діаметр решітки сушарки «киплячого шару» визначається з виразу:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega_p}}, \quad (2.22)$$

$$D = \sqrt{\frac{2,02}{0,785 \cdot 1,89}} = 1,17 \text{ м.}$$

Приймаємо  $D = 1,2$  м, тоді площа решітки складе:

$$S = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 1,2^2 = 1,13 \text{ м}^2. \quad (2.23)$$

Згідно з рекомендаціями [19] для забезпечення осадження частинок матеріала в сепараційній частині необхідно розширити сепараційний простір. Діаметр сепараційного простору повинен бути більше в 1,5 рази від діаметра решітки сушарки (нижньої частини).

$$D_c = D \cdot 1,2 = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ м.}$$

Тоді кут конусності сепараційної частини складе:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{D_c - D}{H_{\text{общ}}}\right) = \arctg\left(\frac{1,8 - 1,2}{2,8}\right) = 12^\circ,$$

де  $H_{\text{общ}}$  – загальна висота циліндричної частини апарата над решіткою (див. розрахунок нижче).

Діаметри штуцерів розраховуємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}, \quad (2.24)$$

де  $G$  – масова витрата теплоносія;

$\rho$  – густина теплоносія;

$\omega$  – швидкість руху теплоносія в штуцері.

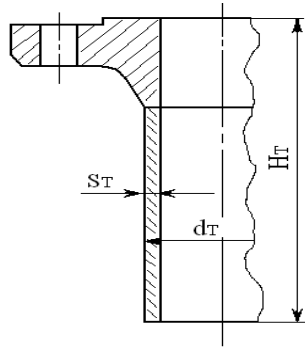


Рисунок 2.4 – Штуцер з приварним фланцем встик і виступом

Швидкості руху теплоносіїв [18]: для газового потоку 5–15 м/с.

Діаметр штуцера для входу повітря:

$$d_1 = \sqrt{\frac{2,02}{0,785 \cdot 15}} = 0,4 \text{ м.}$$

Приймаємо для входу повітря патрубков номінальним діаметром 400 мм.

Враховуючи більший переріз сепараційної частини, а відповідно і меншу швидкість відпрацьованого повітря, діаметр штуцера для виходу повітря:

$$d_1 = \sqrt{\frac{2,02}{0,785 \cdot 10}} = 0,5 \text{ м.}$$

Приймаємо для виходу повітря патрубков номінальним діаметром 500 мм.

Висота киплячого шару [19]:

$$H = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_{CP}} \cdot H_0 \quad (2.25)$$

де  $H_0$  – висота шару, який знаходиться у спокої, згідно з рекомендаціями [19] приймаємо  $H_0 = 0,2$  м;

$\varepsilon_0$  – порізність насипного шару, що знаходиться в спокої,  $\varepsilon_0 = 0,4$  [19];

$\varepsilon_{CP}$  – середня порізність киплячого шару, визначаємо за формулою [19]:

$$\varepsilon_{CP} = \left( \frac{18 \operatorname{Re}_p + 0,36 \operatorname{Re}_p^2}{Ar} \right)^{0,21}, \quad (2.26)$$

де  $\operatorname{Re}_p$  – число Рейнольдса при робочій швидкості:

$$\operatorname{Re}_p = \frac{\omega_p d_{\text{э}} \rho_{CP}}{\mu_{CP}}, \quad (2.27)$$

$$\operatorname{Re}_p = \frac{1,89 \cdot 0,0005 \cdot 1,0}{2,2 \cdot 10^{-5}} = 43.$$

Тоді  $\varepsilon_{CP}$  дорівнює:

$$\varepsilon_{CP} = \left( \frac{18 \cdot 43 + 0,36 \cdot 43^2}{4484} \right)^{0,21} = 0,79.$$

Можемо визначити висоту киплячого шару:

$$H = \frac{1-0,4}{1-0,79} \cdot 0,2 = 0,57 \text{ м.}$$

Діаметри отворів в газорозподільній решітці визначаються за формулою [19]:

$$d_0 = \frac{H}{80}, \quad (2.28)$$

$$d_0 = \frac{0,57}{80} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Число отворів  $n$  у розподільній решітці визначаємо за рівнянням:

$$n = \frac{D^2 \cdot F_c}{d_0^2}, \quad (2.29)$$

де  $F_c$  – живий перетин решітки, приймаємо  $F_c = 0,04$  [13].

$$n = \frac{1,2^2 \cdot 0,04}{0,007^2} \approx 1200.$$

За рекомендацією [19] застосовуємо розташування отворів в розподільній решітці по кутах рівносторонніх трикутників. При цьому поперечний крок  $t'$  і поздовжній крок  $t''$  обчислюються по наступних співвідношеннях:

$$t' = 0,95d_0F^{-0.5} = 0,95 \cdot 0,007 \cdot 0,04^{-0.5} = 0,033 \text{ м}; \quad (2.30)$$

$$t'' = 0,866t' = 0,866 \cdot 0,033 = 0,029 \text{ м}. \quad (2.31)$$

Висоту циліндричної частини сепараційного простору сушарки з псевдозрідженим шаром  $H_y$  приймають в 4–6 разів більше висоти псевдозрідженого шару [13]:

$$H_y = 5 \cdot H = 5 \cdot 0,57 = 2,8 \text{ м}. \quad (2.32)$$

## 2.6 Визначення гідравлічного опору апарата

Основну частку загального гідравлічного опору сушарки становить гідравлічний опір псевдозрідженого шару і решітки:

$$\Delta P = \Delta P_{ПС} + \Delta P_P \quad (2.33)$$

Величину  $\Delta P_{ПС}$  знаходимо з рівняння:



$$\Delta P_{\text{IC}} = \rho_{\text{ч}}(1 - \varepsilon)gH, \quad (2.34)$$

$$\Delta P_{\text{IC}} = 1770 \cdot (1 - 0,57) \cdot 9,81 \cdot 0,28 = 2090 \text{Па} .$$

Мінімально допустимий опір решітки:

$$\Delta P_{P_{\text{min}}} = \frac{\Delta P_{\text{IC}} \cdot K_{\omega}^2 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0)}{(K_{\omega}^2 - 1) \cdot (1 - \varepsilon_0)}, \quad (2.35)$$

$$\Delta P_{P_{\text{min}}} = \frac{2090 \cdot 2,6^2 \cdot (0,57 - 0,4)}{(2,6^2 - 1)(1 - 0,4)} = 695 \text{Па} .$$

Гідравлічний опір обраної решітки:

$$\Delta P_p = \xi \cdot \left( \frac{w}{F_c} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{\text{cp}}}{2} \quad (2.36)$$

Коефіцієнт опору решітки приймаємо  $\xi = 1,75$ .

$$\Delta P_p = 1,75 \cdot \left( \frac{1,4}{0,04} \right)^2 \cdot \frac{1,0}{2} = 1070 \text{Па} .$$

Загальний гідравлічний опір сушарки:

$$\Delta P = 2090 + 1070 = 3160 \text{Па} .$$

## 2.7 Вибір допоміжного обладнання

При сушінні порошкоподібних і зернистих матеріалів спостерігається значне унесення висушеного матеріалу. Для уловлювання таких часток на виході з сушарки встановлюють циклони.

Циклони вибираються в залежності від необхідного ступеня уловлювання частинок, розміру і властивостей частинок, вологості, температури. Ретельне очищення повітря дозволяє заощадити продукт, так як винесення матеріалу доходить до 15 % від загальної маси висушеного матеріалу. Найбільш поширеною конструкцією циклонів є циклон НІОГАЗ серії ЦН-15. Ступінь очищення газу залежить від діаметра циклону і розміру часток.

При розрахунку циклонів визначають діаметр циклонів по умовній швидкості газу, віднесеної до повного перетину апарата:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega_y}}, \quad (2.37)$$

де  $V$  – секундна витрата газу (повітря);

$\omega_y$  – умовна швидкість газу, яка знаходиться з формули:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\omega_y^2 \cdot Y_r}{2g}, \quad (2.38)$$

де відношення  $\frac{\Delta P}{Y_r}$ , залежить від продуктивності і знаходиться в межах 25–55.

Приймаємо  $\frac{\Delta P}{Y_r} = 40$ .

$$\omega_y = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2 \cdot g}{Y_r \cdot \xi}}, \quad (2.39)$$

де  $\xi = 100$  – коефіцієнт місцевого опору циклонів ЦН-15.

$$\omega_y = \sqrt{\frac{40 \cdot 2 \cdot 9,81}{100}} = 2,8 \text{ м/с.}$$

$$D = \sqrt{\frac{6,72}{0,785 \cdot 2,8}} = 1,75 \text{ м.}$$

Приймаємо 2 циклона НПОГАЗ серії ЦН-15 (див. рис. 2.5) діаметром 1000 мм.

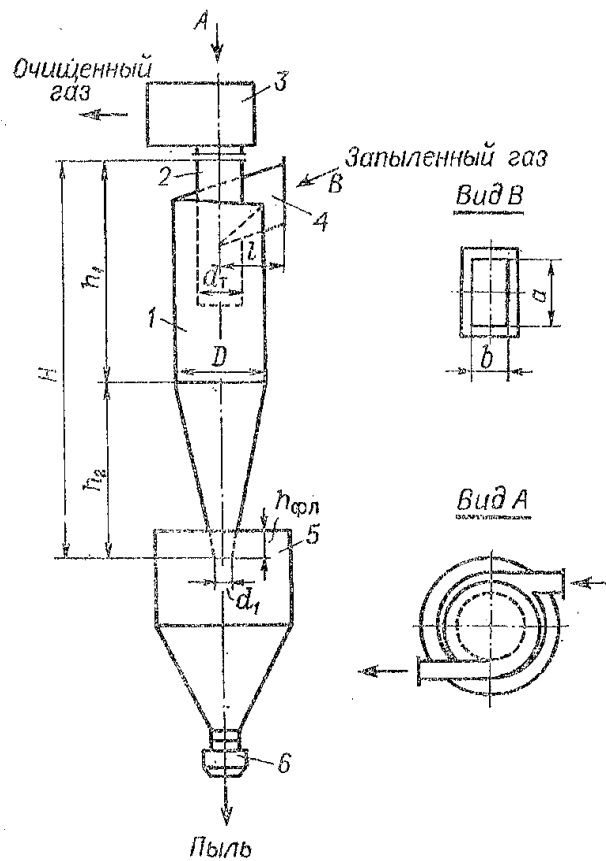


Рисунок 2.5 – Схема циклона НПОГАЗ серії ЦН-15

Об'єм бункера вологого матеріалу:

$$V_n = \frac{G_u \cdot \tau}{\rho_3 \cdot \varphi}, \quad (2.40)$$

де  $G_u$  – кількість вологого матеріалу;

$\tau$  – тривалість робочої зміни, приймаємо  $\tau = 3 \text{ год.} = 10800 \text{ с}$ ;

$\rho_3$  – щільність матеріалу;

$\varphi$  – коефіцієнт заповнення ємкості,  $\varphi = 0,85 \div 0,95 = 0,9$ .

$$V_n = \frac{1,39 \cdot 10800}{1770 \cdot 0,9} = 9,4 \text{ м}^3.$$

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір конструкційних матеріалів [20]

Вибір конструкційного матеріалу для виготовлення будь-якого апарата зазвичай базується на ряді факторів, таких як функціональні вимоги, умови експлуатації, технологічні можливості та вартість матеріалу. Якщо апарат повинен бути легким і має витримувати значні механічні навантаження, то вибір може впасти на високоміцні алюмінієві сплави або композитні матеріали. Для елементів, які повинні мати високу теплопровідність, може використовуватися мідь або алюміній.

Якщо апарат планується використовувати в агресивних середовищах (наприклад, хімічні виробництва), слід обрати матеріали, які стійкі до корозії, такі як нержавіюча сталь або спеціальні полімери. Важливо враховувати, наскільки легко обробляється обраний матеріал. Наприклад, титан є високоякісним матеріалом, але його обробка може бути складною та дорогою.

При необхідності мінімізації вартості апарата можна розглядати використання більш дешевих матеріалів, таких як різні види пластмас або сталі з низьким вмістом вуглецю.

Також важливо, щоб обраний матеріал був доступний на ринку в необхідних обсягах і не ставав об'єктом дефіциту. Має сенс розглядати матеріали, для яких існують розвинуті технології обробки та виготовлення.

Враховуючи ці фактори і відповідно аналізуючи їх, можна вибрати оптимальний матеріал для конкретного випадку. Низьколегована сталь може забезпечити необхідну термічну стійкість для процесу сушіння при температурі до 110°C. Сталь з вмістом легуючих елементів до 2,5 % може мати достатню міцність для утримання тиску в апараті до 0,1 МПа. Листовий прокат сталі легко обробляється та формується, що полегшує процес виготовлення апарата. Листовий прокат є дуже поширеним і важливим матеріалом при виготовленні апаратів киплячого шару. Використання листового прокату дозволяє виготовляти різноманітні елементи апаратів, такі як обичайки, днища, фланці, газорозподільні решітки та інші деталі.

Сталь 16ГС, яка є низьколегованою конструкційною сталлю для зварних конструкцій, є універсальним та ефективним матеріалом для різноманітних застосувань у виробництві апаратів та інших деталей. Виготовлена у формі сталевих листів, ця сталь демонструє вражаючі характеристики та властивості.

Сталь 16ГС використовується для виготовлення апаратів, фланців, днищ, обичайок, судів, що вказує на її універсальність та можливість використання в різноманітних конструкціях. Вона характеризується гарною зварюваністю, що дозволяє легко виготовляти складні зварні конструкції з високою якістю зварювання. Також сталь 16ГС відзначається високою міцністю, що надає довговічність та стійкість конструкціям під час експлуатації. Висока ударна в'язкість робить її стійкою до різних умов навантаження. Здатність працювати в інтервалі температур від  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+775^{\circ}\text{C}$  розширює область застосування цієї сталі, забезпечуючи високу стійкість при екстремальних температурах.

Сталь 16ГС добре деформується як в гарячому, так і в холодному стані, а також легко піддається різанню та іншим операціям обробки, що полегшує виробництво. Вона добре зварюється всіма видами зварювання, що робить її придатною для різноманітних виробничих умов.

Сталь Ст3 є типовою конструкційною вуглецевою сталлю звичайної якості, яка знаходить широке застосування у виготовленні різноманітних елементів конструкцій. Використовується для виготовлення збірників, насосів, несучих елементів зварних і незварних конструкцій. Це свідчить про її універсальність та придатність для різноманітних виробничих завдань.

Сталь Ст3 практично використовується при температурах від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+725^{\circ}\text{C}$ , що робить її придатною для роботи в різних умовах. Ця сталь добре зварюється всіма видами зварювання, що забезпечує легкість виготовлення зварних конструкцій та збірок. Не схильна до відпускнуї крихкості, що робить її стійкою до руйнівного впливу високих температур на властивості матеріалу. Постачається у вигляді листового та фасонного прокату, що робить її зручною для різних видів виробництва та конструкційних проектів.

Сталь Ст3 є економічно вигідним матеріалом, що сприяє зниженню вартості виробництва.

Сталь 35Х є конструкційною легованою сталлю, яка відзначається певними особливостями та характеристиками, що роблять її підходящою для конкретних застосувань. Нижче наведено деякі ключові аспекти сталі 35Х:

Сталь 35Х є матеріалом із спеціальним призначенням, який ефективно використовується для виробництва поліпшених деталей, важливих для працездатності та надійності машин та обладнання. Однак, при обмеженій зварюваності та схильності до відпускнуї крихкості, важливо враховувати особливості цього матеріалу при його використанні.

Пароніт – це листовий матеріал, який отримується шляхом пресування азбокаучукової маси. Основними компонентами цієї маси є азбест, каучук та порошкові інгредієнти.

Пароніт володіє високою механічною міцністю і стійкістю до тиску, а також здатністю працювати при різних температурах. Це робить його ідеальним для використання в умовах змінних температур і великих тисків, які зазвичай спостерігаються в трубопровідних системах. Маса, що складає пароніт, часто містить додаткові порошкові інгредієнти, які покращують хімічну стійкість матеріалу. Це дозволяє пароніту витримувати вплив агресивних рідин і газів, які можуть присутні в трубопровідній системі. Каучук в складі пароніту надає матеріалу гнучкість і еластичність, що дозволяє йому легко адаптуватися до нерівностей поверхонь та ущільнювати фланцеві з'єднання без проблем. Пароніт має високі водовідштовхувальні властивості, що дозволяє йому залишатися ефективним у вологих умовах та у місцях, де присутні рідини. Такий листовий матеріал легко обробляється та нарізається, що спрощує виготовлення прокладок різних форм та розмірів. Це дозволяє швидко та ефективно ущільнювати фланцеві з'єднання без необхідності великої трудомісткої обробки.

### 3.2 Розрахунки апарата на міцність, стійкість та герметичність

Проведемо розрахунок на міцність корпусу сушарки [21].

Вихідні дані для розрахунку: матеріал – сталь 16ГС; внутрішній діаметр основи  $D = 1200$  мм; надбавка для компенсації корозії та ерозії  $c_1 = 1$  мм; надбавка для компенсації мінусового допуску  $c_2 = 0$  мм; надбавка технологічна  $c_3 = 0$  мм; сумарна надбавка  $c = 1$  мм; коефіцієнти міцності зварних швів  $\phi = 1$ ; розрахунковий внутрішній тиск  $P = 0,1$  МПа.

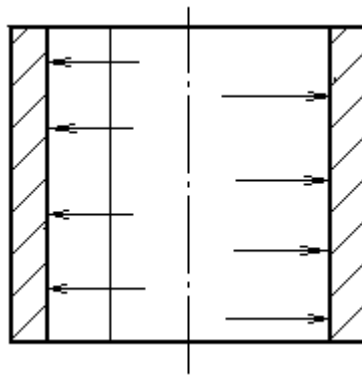


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема обичайки циліндричної

Розрахункова товщина стінки в робочому стані:

$$s_R = \frac{p_p D}{2[\sigma]\phi - p_p}, \quad (3.1)$$

$$s_R = \frac{0,1 \cdot 1,2}{2 \cdot 134 \cdot 1 - 0,1} = 4,48 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Виконавча товщина стінки корпусу:

$$S = s_R + c, \quad (3.2)$$



$$S = 0,000448 + 0,001 = 0,001448 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину обичайки  $S = 4 \text{ мм}$ .

Допустимий внутрішній надлишковий тиск визначимо за формулою:

$$[p_{II}] = \frac{2[\sigma]\varphi(S - C)}{D + (S - C)}, \quad (3.3)$$

$$[p_{II}] = \frac{2 \cdot 134 \cdot 1,0 \cdot (4 - 1) \cdot 10^{-3}}{1,2 + (4 - 1) \cdot 10^{-3}} = 0,668 \text{ МПа.}$$

Оскільки  $[p_{II}] > P$  ( $0,668 > 0,1$ ) – умова виконується, міцність забезпечується.

Перевіряємо умови застосовності формул:

$$\frac{S - C}{D} \leq 0,1, \quad \frac{4 - 1}{1200} = 0,0025 < 0,1.$$

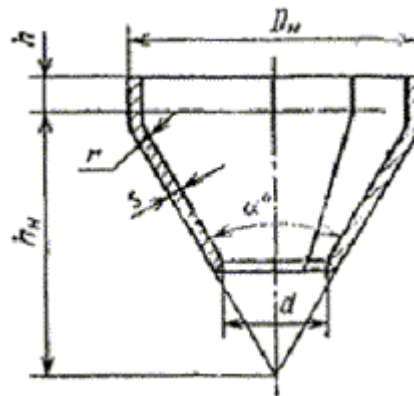


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема обичайки конічної

Визначаємо відношення визначальних параметрів:

$$\frac{\sigma}{p} \varphi = \frac{134}{0,1} \cdot 1 = 1340. \quad (3.4)$$

Товщину стінки знаходимо за формулою:

$$S_{к\ p} = \frac{pD}{2 \cos \alpha [\sigma] \varphi}, \quad (3.5)$$

де  $D = 1,8$  м – найбільший діаметр апарата;

$P=0,1$  МПа – тиск в апараті;

$[\sigma]=134$  МН/м<sup>2</sup> – допустиме напруження для сталі 16ГС.

$$S_{к\ p} = \frac{0,1 \cdot 1,8}{2 \cdot \cos 12^{\circ} \cdot 134 \cdot 1} = 0,0007 \text{ м.}$$

Виконавча товщина стінки корпусу:

$$S = S_{к\ p} + c, \quad (3.6)$$

$$S = 0,0007 + 0,001 = 0,0017 \text{ м.}$$

Приймаємо товщину обичайки  $S = 4$  мм.

Допустимий тиск для корпусу сушарки:

$$[p] = \frac{2 \cos \alpha \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + 2 \cos \alpha (s - c)}, \quad (3.7)$$

$$[p] = \frac{2 \cos 12^{\circ} \cdot 134 \cdot 1 \cdot (4 - 1) \cdot 10^3}{1,8 + 2 \cos 12^{\circ} \cdot (4 - 1) \cdot 10^3} = 0,134 \text{ МПа}$$

Умову міцності корпусу виконано.

## 4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

### 4.1 Монтаж основного обладнання [22, 23]

Проект проведення робіт (ППР) є важливим етапом у плануванні та організації монтажних робіт. Його складові елементи деталізуються та визначають важливі параметри для успішної реалізації проекту в цілому.

Для монтажу сушильних установок киплячого шару використовують самохідні стрілові крани, які дозволяють ефективно встановлювати обладнання на фундаменті. Після розташування обладнання на фундаменті проводиться перевірка відповідності його розміщення проектним вимогам та вимірюються відхилення від проектних осей в горизонтальному та вертикальному напрямках.

Вибір конкретного методу монтажу та використання необхідних механізмів залежить від конструкції, маси та розмірів обладнання.

**1. Метод ковзання без відриву від землі** використовується для установки вертикальних апаратів за допомогою самохідних кранів або щогл. Під час цього процесу апарат підводиться за допомогою монтажних пристроїв, які закріплені на корпусі апарату вище центру ваги (рис. 4.1, а).

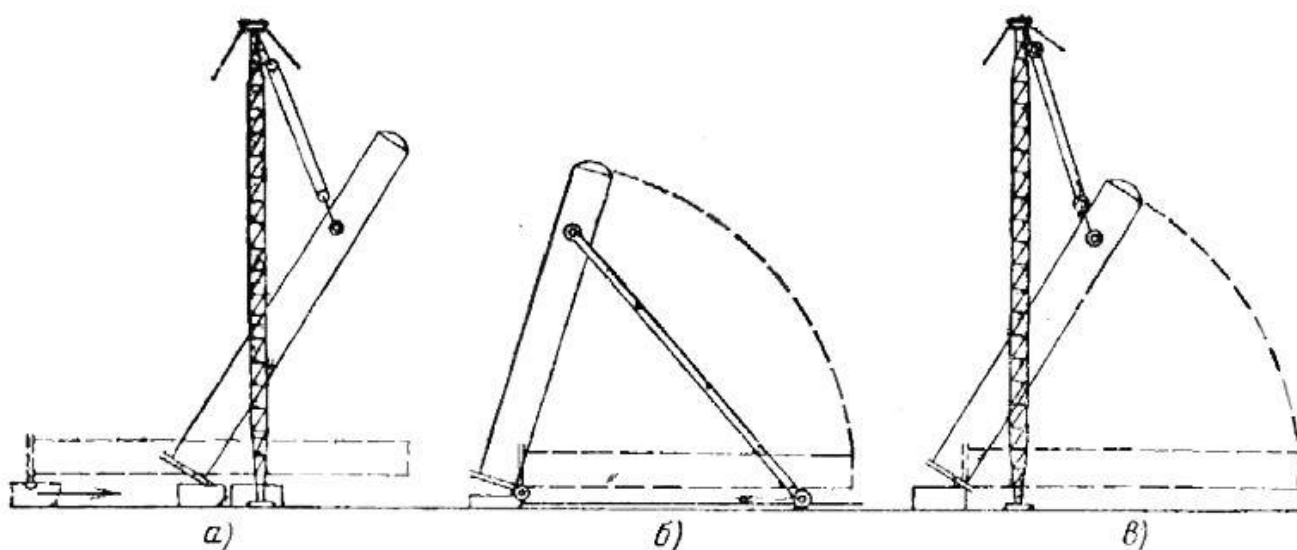


Рисунок 4.1 – Схеми монтажу апаратури: а – методом підйому і ковзання; б – методом витискання; в – методом повороту навколо шарніра

Нижню частину апарату, яка розташована на санях або візку, підтягують за допомогою трактора або лебідки, щоб підняти апарат і встановити його на фундамент. Важливо, щоб кран, який використовується для монтажу, мав достатню вантажопідйомність, яка не менше маси самого апарату, що піднімається.

**2. Метод повороту навколо шарніра** (див. рис. 4.1, в). Шарнір розташований біля фундаменту і прикріплений до нього. Нижня частина апарату з'єднана з шарнірним пристроєм. Під час підняття за верхню частину апарат обертається на шарнірі, і коли досягає вертикального положення, основа апарату встановлюється на фундамент. Цей спосіб дозволяє піднімати апарати значно більшої маси, в порівнянні з вантажопідйомністю монтажних кранів або механізмів.

**3. Метод витискання** (див. рис. 4.1, б) є варіацією методу обертання навколо шарніра. У цьому випадку штовхачі прикріплені до корпусу апарату за допомогою шарнірів і рухаються по коліях. Під час роботи лебідки кінці штовхачів пересуваються вздовж рейок і піднімають апарат до вертикального положення. Цей метод застосовується в обмежених умовах, коли не можна використовувати вантажопідйомні крани або щогли з розтяжками.

План подачі деталей і вузлів сушарки в монтажну зону розробляється з урахуванням часу, місця, транспортних та підйомних засобів та трудових витрат. У цьому плані вказуються час, коли деталі або вузли мають бути доставлені, місце, де вони мають бути розташовані, і використовувані транспортні та підйомні засоби. Запас деталей у монтажній зоні не повинен перевищувати 2-3 змінної потреби. Зберігання вузлів і деталей в монтажній зоні має здійснюватися так, щоб не заважати виконанню монтажних робіт. Подача деталей на місце монтажу найкраще проводити через зміни, коли вони не використовуються для монтажу.

Процес монтажу сушарок киплячого шару включає в себе кілька важливих кроків, які спрямовані на надійне та ефективне встановлення обладнання. Першим етапом є установка апарату на фундамент або спеціальну опорну металоконструкцію. Ця операція може виконуватися різними механізмами, такими як мостові крани, тельфери, електроталі, автокрани, щогли тощо. У випадку відсутності вка-

заних механізмів в монтажній зоні, можуть бути використані ручні талі, домкрати та інші прості такелажні пристрої.

Після установки апарата його піддають вивірці за допомогою нівеліра або гідростатичного рівня. Вивірка включає в себе перевірку відхилень апарата по осях, висотній відмітці та орієнтації штуцерів і патрубків щодо комунікацій.

Допустимі відхилення по осях і висоті зазвичай залежать від конкретних обставин, але, як правило, не перевищують  $\pm 2$  мм для апаратів, що розміщуються групами, і  $\pm 5$  мм для окремо розташованих апаратів.

Важливим аспектом вивірки є використання фланців горловини і штуцерів як основи для вимірювань. Це дозволяє забезпечити точність та надійність під час процедури вивірки.

Під час монтажу обладнання вельми важливо надавати особливу увагу якості та надійності фланцевих з'єднань. Установка прокладок повинна проводитися дуже обережно, і фланці повинні бути звільнені від будь-яких забруднень та корозії. Для забезпечення надійності фіксації прокладок (особливо на плоских фланцях), їх можна кріпити до фланців за допомогою ниток.

Мідні і сталеві прокладки мають бути ретельно прокалені і очищені від залишків іржі, забруднень та інших дефектів. Поверхні металевих прокладок повинні бути гладкими і без раковин, виїмок, глибоких подряпин та інших пошкоджень. Ширина металевих прокладок повинна бути на 0,1–0,2 мм менше ширини пазу.

Паронітові прокладки перед установкою слід піддавати процедурі проварювання в рослинній олії при температурі, що не перевищує  $300^{\circ}\text{C}$ , до їх розм'якшення.

Болти, які використовуються для фланцевих з'єднань, повинні бути в належному стані, без відламаних або пошкоджених ниток різьблення. Головки болтів не повинні мати подряпин або тріщин у місцях з'єднання з тілом болта. Затягування болтів слід виконувати рівномірно, спочатку хрестоподібно під кутом  $90^{\circ}$ , а потім послідовно за годинниковою стрілкою. Для затягування болтів рекомендується використовувати ключі з обмежувачами зусилля затяжки. Гайки болтів також рекомендується кріпити шайбами, а для апаратів, які піддаються вібраціям, можуть бути використані пружинні шайби.

Після завершення монтажу, апарат піддається гідравлічним випробуванням та готується до введення в експлуатацію.

### **Проведення ремонтних робіт основного технологічного обладнання [22, 23]**

Технологічний ремонт та капітальний ремонт є ключовими компонентами системи технічного обслуговування технологічного обладнання, спрямованої на забезпечення його ефективної та безперебійної роботи. Розглянемо детальніше обидва види ремонтів:

Технологічний ремонт – це спеціальний вид технічного обслуговування та ремонту, який виконується без зупинки виробничого процесу з метою забезпечення нормального функціонування обладнання. Цей вид ремонту включає ряд дій та процедур, спрямованих на відновлення ефективності та продовження терміну служби обладнання.

Капітальний ремонт є важливим етапом обслуговування технічного обладнання, і його проведення спрямоване на повне відновлення робочого стану та ресурсу обладнання. Це більш глибокий та всебічний вид ремонту, охоплюючи не лише виправлення поточних проблем, а й забезпечення оптимального функціонування обладнання на тривалий період.

Технічне обслуговування – це система комплексних заходів, спрямованих на забезпечення ефективності та безперебійної роботи основного та допоміжного технологічного обладнання. Технічне обслуговування включає в себе широкий спектр операцій, які націлені на запуск, експлуатацію, моніторинг, а також вчасне та компетентне виконання ремонтних робіт для забезпечення функціональності та продуктивності обладнання.

Ремонт сушарки киплячого шару – це важливий та відповідальний етап обслуговування обладнання, яке використовується для сушіння матеріалів. Особливості ремонту можуть залежати від конкретного типу сушарки, його конструкції та принципу роботи.

Перш ніж розпочати ремонт, необхідно перевірити елементи безпеки сушарки, такі як система газопостачання, система вентиляції та система відведення гарячого повітря. Це важливо для уникнення аварій та забезпечення безпечної експлуатації.

Перевірка та очищення системи нагріву, такої як нагрівальні елементи або горілка, може бути необхідною. Заміна пошкоджених частин або очищення від осідань та бруду допомагає забезпечити ефективну роботу сушарки. Теплообмінник в сушарці має велике значення для передачі тепла. Перевірка стану ізоляції та чистоти теплообмінника допомагає уникнути втрати тепла та підвищити ефективність сушіння.

Система вентиляції повинна бути в належному стані, щоб забезпечити ефективне видалення вологи та гарячого повітря з сушарки. Перевірка та чистка вентиляційних каналів є важливим етапом ремонту.

У процесі ремонту слід звертати увагу на стан всіх ключових компонентів. Заміна пошкоджених або зношених деталей допомагає продовжити термін служби сушарки.

Після виконання ремонтних робіт необхідно перевірити та налаштувати автоматику, термодатчики, датчики та інші контрольно-вимірювальні пристрої для правильної роботи сушарки. Також важливо провести технічне обслуговування сушарки, що включає змащення рухомих частин, очищення вентиляційних систем, перевірку з'єднань тощо.

Перевірка та тестування системи аварійного відключення є важливою частиною ремонту для забезпечення безпеки обладнання та персоналу. При ремонті сушарки киплячого шару важливо враховувати виробничі стандарти, використовувати лише сертифіковані запчастини та дотримуватися рекомендацій виробника для забезпечення надійності та безпеки роботи обладнання.

Капітальний ремонт сушарки киплячого шару є складним процесом. Спочатку роз'єднують фланцеві стики, знімають трубку обв'язку, оглядове скло, кришки люків, форсунки, кришку апарата, верхню та середню секцію апарата, а також перфоровану газорозподільчу решітку. Після демонтажу важливо встановити

спеціальні заглушки для запобігання небажаним речам у відкритих каналах апарату. Також проводять очищення та промивання всього обладнання та газорозподільчої решітки.

Під час огляду можуть виявити дефектні деталі, які потребують заміни. Дефектні або зношені деталі замінюються новими або відремонтованими. Комплектують апарат новими прокладками та іншими необхідними компонентами. Після заміни деталей та виконання необхідних робіт встановлюють перфоровану решітку, прокладки, середню частину апарату, форсунки, верхню кришку апаратів, оглядові вікна та люки. Відновлюють фланцеві стики та встановлюють трубну обв'язку для забезпечення герметичності системи.

Відремонтоване обладнання піддається випробуванню, під час якого переконуються в його правильному функціонуванні та відсутності витoku рідини чи інших неполадок. Після успішного випробування обладнання готують до повторного використання.

Також після завершення капітального ремонту ведуть відповідну документацію, яка включає в себе дані про проведені роботи, замінені деталі, результати випробувань та іншу інформацію, необхідну для подальшої експлуатації та обслуговування обладнання.



## **5 ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ**

### **5.1 Вибір та обґрунтування параметрів контролю, регулювання та вимірювання [24]**

Загальна мета автоматизації та механізації у хімічній промисловості полягає в тому, щоб підвищити ефективність, зменшити витрати, забезпечити високу якість продукції та зменшити ризики для людей, пов'язані з експлуатацією складних технологічних процесів.

Хімічні процеси часто характеризуються високою складністю і швидкістю. Точність управління та оперативність реакцій визначають успішність виробничого процесу. Автоматизація дозволяє оперативно реагувати на зміни у процесі та уникати ситуацій, що можуть призвести до відхилень від нормативів.

Можливість автоматичного регулювання параметрів дозволяє уникати небажаних відхилень та підтримувати стабільність процесів. Умови роботи у хімічній промисловості можуть бути шкідливими для здоров'я людини, а також пов'язаними з вибуховою та пожежною небезпечністю. Автоматизація дозволяє зменшити витрати на ручну працю, що допомагає знизити ризик впливу шкідливих чинників на працівників та підвищити загальну безпеку.

Розглянемо основні принципи управління процесом сушіння на прикладі сушарки киплячого шару. Важливо розглянути можливі впливи на об'єкт управління, які можуть бути керуючими або збурюючими. Наприклад, витрату та температуру теплоносія (повітря) можна легко стабілізувати або використовувати для внесення ефективних регулюючих впливів.

Для успішного контролю і управління процесом сушіння важливо враховувати кілька ключових параметрів. Основними контрольованими величинами в цьому процесі є витрати, температури та тиск, а саме: кінцева та початкова температури гранул, висота киплячого шару, температура теплового агента, розрідження в апараті, маса шару та рівень в збірнику готових гранул.

Знання поточних значень цих параметрів є важливим для ефективного керування процесом на різних етапах, від пуску і наладки до повноцінної експлуатації. Зазначимо, що одним із ключових параметрів контролю є висота киплячого шару матеріалу. Зміни в цій величині впливають на інтенсивність циркуляції матеріалу. Однак важливо враховувати, що висота шару також впливає на продуктивність установки. Температурний режим в шарі гранул також належить до ключових параметрів.

Для забезпечення стабільної температури в шарі гранул в ході процесу застосовують зміну витрат та (або) температури сушильного агента. Цей метод полягає у зміні температури повітря, яке подається під газорозподільчу решітку апарата. Для досягнення цієї зміни можна впливати на витрату палива в топці, що регулює температуру сушильного агента. Збільшення витрати палива призведе до збільшення температури повітря, що входить в апарат.

Підтримання постійної температури повітря на вході в апарат забезпечується за допомогою автоматичної системи регулювання, яка змінює подачу паливного газу в топку. Регулятор стану встановлює оптимальну кількість первинного повітря в топку для повного згорання газу. Зміна витрати вторинного повітря в змішувальну камеру також впливає на температуру в шарі гранул. Задане розрідження в апараті регулюється за допомогою клапана, встановленого на лінії відпрацьованого сушильного агента.

Рівень псевдорозрідженого матеріалу в апараті вимірюється гідростатичним диференціальним манометром за перепадом тиску в апараті. Забезпечення стабільного рівня шару гарантує певний час перебування матеріалу в апараті і контролює склад продукту. Це також мінімізує можливість винесення матеріалу з теплоносієм. До точності регулювання рівня киплячого шару пред'являють особливо високі вимоги. В якості регулюючих впливів використовують витрату зернистого матеріалу на вході та виході апарату (рис 5.1, а), або витрату газу на кипіння шару (рис 5.1, б).

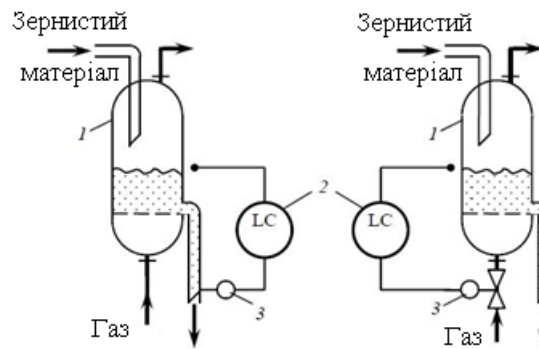


Рисунок 5.1 – Регулювання рівня киплячого шару:

- а) відведенням гранульованого матеріалу; б) зміною витрати газу;  
 1 – апарат з киплячим шаром; 2 – регулятор рівня; 3 – регулюючий орган

У сушильній установці використовуються різні засоби та прилади для контролю та регулювання різних параметрів процесу. Наприклад, для контролю витрати загального повітря та газів, що відходять, використовуються осьові напрямні апарати, які встановлюються на всмоктуванні вентилятора і димососа. Для регулювання витрати первинного повітря ефективно використовується розподільний клапан.

Для точного контролю температурних параметрів використовують низькоінерційні термопари. Термопари, які призначені для вимірювання температури в шарі матеріалу, встановлюються таким чином, щоб їхні кінці знаходилися на відстані від решітки приблизно в  $1/3$  діаметра решітки і мали невеликий нахил від 5 до 10 градусів до центру апарату. Зазвичай кінці термопар розташовуються на відстані від 100 до 150 мм від решітки. Оптимальним місцем для розміщення термопари вважається газохід, який з'єднує топку з підрешіточним простором апарату киплячого шару.

У сушильних установках контроль ряду параметрів є критичним для забезпечення ефективності процесу сушіння. Основні параметри, які підлягають контролю в сушильній установці:

**1. Температура.** Контроль температури є ключовим параметром для забезпечення ефективності сушіння. Відповідна температура залежить від типу сушильного обладнання та характеристик оброблюваного матеріалу.

**2. Вологість матеріалу.** Сушильний процес спрямований на видалення вологи з матеріалу. Контроль вологості дозволяє визначити ступінь сушіння та вчасно зупиняти процес, коли досягнута необхідна вологість продукту.

**3. Час сушіння.** Оцінка часу сушіння є важливою для планування виробничих процесів і забезпечення високої продуктивності сушильного обладнання.

**4. Потік повітря.** Кількість та швидкість повітря, яке проходить через сушильну установку, впливає на рівномірність сушіння та продуктивність. Контроль потоку повітря допомагає уникнути нерівномірного висихання матеріалу.

**5. Енергоспоживання.** Моніторинг та контроль витрат енергії дозволяють оптимізувати сушильний процес з точки зору ефективності та вартості експлуатації.

**6. Ступінь вологовіддачі.** Визначення ефективності сушіння шляхом вимірювання ступеня вологовіддачі матеріалу після сушіння.

Контроль температури в киплячому шарі може бути здійснений двома способами:

- зміною витрати матеріалу;
- зміною температури теплоносія.

У даному кваліфікаційному проекті віддана перевага другому способу регулювання температури шару – через зміну температури теплоносія. Цей спосіб визнається більш простим і надійним, оскільки для зміни температури потрібно лише передати відповідний сигнал на калорифер, який, в свою чергу, скоригує напругу на нагрівних витках і підвищить їхню температуру. Порівняно з першим способом, де потрібно регулювати декілька змінних, цей метод є більш простим і ефективним.

## **5.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації**

При виборі конкретних типів автоматичних пристроїв для системи управління необхідно керуватися рядом факторів, які враховують особливості об'єкта управління та обраної системи управління, чи то централізованої, чи локальної. Перш

за все, важливо враховувати рівень пожежної та вибухонебезпечності, агресивність і токсичність середовища, кількість параметрів, які підлягають контролю і регулюванню, а також вимоги до якості цього контролю та регулювання.

У випадку, коли технологічні апарати і панелі управління знаходяться на великій відстані один від одного, на практиці краще використовувати електричні засоби автоматизації. Вони відрізняються меншими запізненнями і вищою точністю вимірювання, порівняно з пневматичними пристроями. Крім того, використання електронних засобів спрощує впровадження обчислювальних машин.

Під час вибору конкретних типів автоматичних пристроїв, рекомендується керуватися такими засадами:

- для контролю та регулювання однакових параметрів технологічного процесу слід використовувати однакові автоматичні пристрої, що спрощує їхнє придбання, налаштування та обслуговування;
- завжди варто віддавати перевагу автоматичним пристроям серійного виробництва, оскільки вони зазвичай більш доступні та надійні;
- при наявності великої кількості однакових параметрів контролю, рекомендується використовувати централізовані засоби контролю та управління;
- у випадку автоматизації складних технологічних процесів рекомендується використовувати обчислювальні та керуючі машини;
- клас точності приладів повинен відповідати технічним вимогам та потребам процесу;
- для локального контролю рекомендується застосовувати прості та надійні прилади, такі як термометри розширення в захисних чохлах, загального призначення манометри, лічильники і ротаметри. Ці прилади ефективно працюють в умовах значних коливань температури, вологості, підвищеної вібрації та механічних впливів.
- для автоматизації технологічних апаратів, які мають справу з агресивними середовищами, завжди слід передбачати встановлення спеціалізованих приладів.

У схемах автоматизації завжди рекомендується застосовувати принцип уніфікації, що передбачає використання однотипних технічних засобів автоматизації. Це забезпечує взаємозамінність, зручність експлуатації, налаштування та комплектацію приладів. Важливо використовувати доступні та надійні прилади, які відповідають необхідному класу точності. Усі ключові параметри технологічного процесу мають бути під постійним контролем і вимірюванням відповідними приладами, які одночасно відображають ці параметри.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці у виробництві сульфату амонію є важливою складовою, оскільки цей процес може включати в себе ряд технологічних етапів та робочих операцій, які пов'язані з ризиками для здоров'я та безпеки працівників. Важливо приділяти увагу організації безпеки та вживати заходів для зменшення можливих ризиків [25].

Системи безпеки на виробництві стежать за численними аспектами, щоб гарантувати безпеку персоналу та виробничого процесу. Розглянемо деякі з найважливіших аспектів та факторів, які потрібно враховувати під час роботи обладнання:

*Механічні фактори:* вони включають в себе рухомі машини та механізми, такі як збірники з мішалками, приводи, вали, а також висоту та пересувні частини апаратів. Дотримання вимог безпеки під час роботи з цими компонентами є важливою складовою забезпечення безпеки на робочому місці.

*Електробезпека:* стосується можливості ураження струмом при доторканні до кабелю, електричних приводів та електрообладнання, що знаходиться під напруженням. Серед ризикових компонентів можна виокремити електронасоси, силові трансформатори та електродвигуни, які керують мішалками та газодувками, а також можливу небезпеку статичної електрики.

*Небезпечні фактори:* вони можуть включати в себе наявність отруйних або вибухонебезпечних речовин, запиленість приміщень при розгерметизації циклонів, пилозбірників та трубопроводів, а також термічну небезпеку від нагрітих поверхонь топки та гранулятора. Ці фактори вимагають особливої уваги та заходів з безпеки.

*Пожежна безпека:* вона стосується можливих джерел загоряння, таких як електромережі, природний газ, горючі речовини та високі температури в робочому середовищі. Ретельний контроль над цими чинниками допомагає попередити виникнення пожеж.

*Хімічні фактори:* включають речовини та сполуки азоту, які можуть бути присутніми у вихідній речовині. Особливий нагляд за цими речовинами важливий для уникнення небезпеки для здоров'я персоналу.

*Шкідливі фактори:* включає параметри мікроклімату, освітлення, шум, вібрацію та повітря в робочій зоні. Існує потенційна небезпека зараження вірусами від сировини.

Джерелами механічної небезпеки є різні компоненти обладнання, такі як електродвигуни, рухомі частини мішалок, вали газодувки та насосів. Важливо дотримуватися вимог безпеки при роботі з цим обладнанням.

На підприємствах не передбачено робочих місць технологічного обслуговуючого персоналу на висоті більше ніж 1,5 метрів над рівнем підлоги. Якщо виникає потреба в ремонтних роботах на висоті більшій за 1,5 метра, то обов'язково використовуються стаціонарні підмости, огороження та стаціонарні пояси безпеки. Робота на висоті має проводитися тільки в присутності дублера для забезпечення безпеки.

Всі переходи, робочі та обслуговуючі площадки, кришки ємностей повинні бути оснащені перилами висотою 1 метр і огорожені бортом висотою не менше 0,15 метра. Відчинені монтажні прорізи також повинні мати огороження зі знімними перилами.

Роботи по чистці та ремонту обладнання, що приводиться в рух електродвигунами, необхідно виконувати тільки після відключення електродвигуна та вивіски попереджувального плакату «Не вмикати – працюють люди».

Для запобігання механічним небезпекам застосовуються різні засоби захисту. Наприклад, рухомі частини обладнання можуть бути огорожені суцільними кожухами і металевими сітками. Горизонтальні ремінні передачі повинні бути захищені з усіх боків, а вертикальні – на висоту до 2 метрів.

У виробництві часто використовується обладнання, яке працює під тиском, і для забезпечення безпеки важливо дотримуватися вимог «Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском». Забороняється експлуа-



тація обладнання під тиском без необхідних клейм та вказівок щодо строків опосвідчення. Для безпеки експлуатації систем під підвищеним тиском застосовуються запірна арматура, прилади контролю і запобіжні пристрої.

Забезпечення механічної безпеки є надзвичайно важливою складовою безпечного виробничого середовища і вимагає постійного дотримання вимог і процедур безпеки на виробництві.

Захисне заземлення – це процес навмисного електричного з'єднання металевих неструмоведучих частин обладнання з землею, що запобігає небезпеці в разі надмірної напруги. Електродвигуни насосів, компресорів та газодувок живляться від електромережі з напругою 380 В та частотою струму 50 Гц. Вимоги до електрообладнання, пристосувань, монтажу та експлуатації повинні відповідати «Правилам техніки безпеки при експлуатації електрообладнання споживачів» і «Правилам захисту від статичного струму у виробництвах хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості». Періодична перевірка надійності заземлення має здійснюватися електролабораторією.

Для забезпечення ефективного контролю над умовами праці і запобігання впливу шкідливих чинників, таких як хімічні речовини і мікроклімат, необхідно дотримуватися ряду нормативних документів і вимог.

Контроль за концентрацією шкідливих хімічних речовин в повітрі робочої зони виробничого приміщення є однією з головних запорукою здоров'я працівників. Концентрація аміаку не повинна перевищувати 20 мг/м<sup>3</sup>. Періодичність контролю цих параметрів також регламентована. Також цей стандарт визначає методи і способи вимірювання концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Щодо мікроклімату, вимоги до нього залежать від характеру робочого процесу і умов праці. Оптимальні параметри мікроклімату включають температуру повітря, відносну вологість повітря і швидкість руху повітря. Вони визначені в нормативах МОЗ України і забезпечують комфортні умови для працівників. Наприклад, у виробничих приміщеннях оптимальна температура повітря зазвичай знаходиться в діапазоні 22–24°C, відносна вологість 60–40 %, а швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с.

Важливо відзначити, що оптимальні і допустимі параметри мікроклімату можуть різнитися для різних видів робіт і робочих зон. Наприклад, для робіт, пов'язаних із нервово-емоційним напруженням, які виконуються в кабінах, на пультах керування, встановлення оптимальної температури, вологості і швидкості руху повітря є особливо важливим.

Поширення оптимальних норм мікроклімату для різних робочих зон і робочих місць регулюється галузевими документами, які узгоджені з органами санітарного нагляду. Визначення категорії робіт за важкістю та оптимальних метеорологічних умов для робочої зони приміщення подано в додатку до відповідних нормативних документів, які регулюють сферу охорони праці.

Контроль за температурними коливаннями в робочій зоні є важливим аспектом забезпечення комфорту та безпеки працівників. Згідно з вимогами, температурні коливання повітря в залежності від важкості робіт повинні відповідати наступним нормам: до 4°C для легких робіт, до 5°C для середньої тяжкості робіт і до 6°C для важких робіт.

Інтенсивність теплового опромінення працюючих від нагрітих поверхонь технологічного устаткування також регулюється для забезпечення безпеки. Вимоги до інтенсивності опромінення залежать від відсотка опромінюваної поверхні тіла працівника. Для більшості випадків, інтенсивність теплового опромінення не повинна перевищувати 35 Вт/м<sup>2</sup> для 50 % поверхні тіла і більше, 70 Вт/м<sup>2</sup> для величини опромінюваної поверхні від 25 % до 50 %, і 100 Вт/м<sup>2</sup> для опромінювання не більше 25 % поверхні тіла.

Процеси виробництва та зберігання сульфату амонію вимагають належного обладнання і управління умовами приміщень. Виробничі приміщення повинні бути оснащені системами обігріву, вентиляції та кондиціонування, відповідно до СНіП. Забезпечення санітарно-гігієнічного контролю систем вентиляції та промислових приміщень покладається на вентиляційні служби або санітарні лабораторії. Контроль повинен проводитися із заданою періодичністю, залежно від типу системи вентиляції.

Викиди забрудненого повітря в атмосферу повинні відповідати вимогам ДСП 201-97. Температура зовнішньої поверхні технологічного обладнання чи огорожувальних засобів також регулюється. Наприклад, температура поверхні апаратів при виробництві добрив не повинна перевищувати 45°C в місцях, де є можливість контакту з персоналом.

Застосування заходів для нормалізації мікроклімату, таких як вентиляція приміщення, кондиціонування повітря, утеплення устаткування і раціональне розміщення обладнання, є необхідним для забезпечення оптимальних умов праці. Для запобігання перевищенню концентрації пилу в повітрі робочих приміщень, важливо забезпечити безперервну і ефективну роботу систем проточно-витяжної вентиляції, як це вимагається СНіП 2.04.05-92.

Усі ці заходи і вимоги спрямовані на забезпечення безпеки і комфорту працівників під час їхньої професійної діяльності, а також на дотримання всіх нормативів і стандартів, що регулюють умови праці та виробничий процес.

Забезпечення належного освітлення та контроль за рівнем шуму та вібрації вирішуються через ряд обов'язкових нормативних вимог та заходів. Для аварійного освітлення зазвичай використовуються лампи розжарювання, які живляться від акумуляторів. Метод визначення освітленості робочих місць включає в себе конкретні вимоги до розміщення та інтенсивності освітлення.

Джерелами шуму і вібрації в виробничому приміщенні є насоси, мішалки, сушарка киплячого шару, компресори, газодувки та пневмокласифікатори. Для зменшення рівня шуму та вібрації можуть бути впроваджені наступні заходи:

- поліпшення умов експлуатації робочого обладнання;
- виконання робіт з зменшення биття обертових вузлів і механізмів;
- застосування демпфуючих матеріалів, таких як гума і пінополістирол;
- використання звукоізоляції та віброізоляції обладнання;
- застосування звукопоглинаючого облицювання виробничих приміщень;

Кожен працівник повинен бути обізнаним про методи та дії, необхідні для надання невідкладної допомоги потерпілому відповідно до характеру надзвичайної

ситуації, яка може виникнути в робочому середовищі. Ось деякі поради щодо надання допомоги в різних ситуаціях:

А) При контакті з кислотою або кислими розчинами, якщо ця речовина потрапила на тіло або в очі, негайно слід промити пошкоджену область чистою водою та відразу звернутися до медичного працівника для надання необхідної медичної допомоги.

Б) При опіках незалежно від їх ступеня важкості, на вражену ділянку слід накласти стерильну пов'язку, не торкаючись опіків, і відразу звернутися до лікаря для надання лікарської допомоги.

В) У разі закритого перелому кісток кінцівок необхідно накласти шину або інший доступний матеріал (наприклад, дошку або планку) до пошкодженої кінцівки та якнайшвидше викликати швидку допомогу для подальшого лікування.

Г) Якщо працівник отримав удар електричним струмом, перш за все, потрібно забезпечити безпеку та вимкнути джерело струму. Потім слід надавати допомогу відповідно до «Інструкції по наданню першої допомоги при враженні електричним струмом».

Д) У випадку отруєння або задушення природним газом, потерпілого слід негайно вивести на свіже повітря, розстебнути одяг, дати понюхати нашатирний спирт та якнайшвидше викликати медичну допомогу. Якщо ситуація вимагає, необхідно також звернутися до лікаря.

Знання та уміння надавати першу допомогу може врятувати життя та запобігти серйозним ушкодженням в небезпечних ситуаціях на робочому місці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Господаренко Г.М. Основи інтегрованого застосування добрив / Г.М. Господаренко. – Київ : Нічлава, 2002. – 344 с.
2. Забелешинський Ю.А. Ефективність виробництва та застосування мінеральних добрив / Ю.А. Забелешинський, Н.С. Корогодов, Е.І. Ципіна. – Київ : Нічлава, 2004. – 272 с.
3. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Е.А. Казакова. – М. : Химия, 1980. – 288 с.
4. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений / В.Н. Кочетков. – М. : Химия, 1975. – 224 с.
5. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : для студ. денної, заочної та дистанційної форм навчання / В.І. Склабінський, Я.Е. Михайловський, Р.О. Острога, М.С. Скиданенко. – Суми : СумДУ, 2019. – 53 с.
6. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М. : Химия, 1970. – 429 с.
7. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская. – Изд. 2-е, пер. – Л. : Химия, 1968. – 204 с.
8. Классен П.В. Основы техники гранулирования / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
9. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.
10. Буевич Ю.А. Струйное псевдоожижение / Ю.А. Буевич, Г.А. Минаев. – М. : Энергия, 1984. – 133 с.
11. Классен П.В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М. : Химия, 1990. – 304 с.

12. Соколовский А.А. Обезвоживание и грануляция растворов и суспензий в аппаратах кипящего слоя / А.А. Соколовский, Н.М. Плотникова, А.С. Безруков. – Под ред. Б.С. Сажина // ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. Серия: Техника сушки во взвешенном слое. Вып. 1. – М., 1965. – 64 с.
13. Овчинников Л.Н. Интенсификация тепловых и массообменных процессов в гетерофазных средах : монография / Под ред. А.Г. Липина; Иван. гос. хим. технол. ун.-т. Иваново, 2009. – 164 с.
14. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М. : Высш. шк., 1991. – 400 с.
15. Одинцов А.В. Расчет гранулометрического состава продукта при нанесении гетерофазной оболочки / А.В. Одинцов, А.Г. Липин, А.С. Кувшинова // Сб. трудов XXII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22». – Псков, 2009. – Т. 9, секция 10. – С. 147–148.
16. П'ятигор І.М. Сушильна установка для сушіння сульфату амонію. Розробити сушарку кипячого шару / Drying plant for ammonium sulfate. Develop a fluidized bed dryer : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 133 – галузеве машинобудування / наук. кер. М. П. Юхименко. Суми : Сумський державний університет, 2022. 59 с.
17. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М. : Химия, 1971. – 784 с.
18. Врагов А.П. Массообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв : Навчальний посібник. – Суми : Вид-во СумДУ, 2007. – 256 с.
19. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П. Д. Лебедев. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.
20. Лацинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. – 382 с.

21. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов вузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.
22. 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.
23. Обладнання заготівельних та котельно-зварювальних дільниць ремонтно-механічних цехів хімічних виробництв : навч. посіб. / С.М. Яхненко, М.С. Скиданенко, Є.М. Піддубний. – Суми : СумДУ, 2022. – 170 с.
24. Голубятников В. А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности / В. А. Голубятников, В. В. Шувалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1985. – 352 с.
25. Охрана труда в машиностроении : Учебн. для машиностр. вузов / Под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 432 с.