

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 хлориду калію. Розробити та модернізувати сушарку киплячого шару

Виконав:  
студент групи ХМ.м-21/2

Лічман Богдан Сергійович

\_\_\_\_\_   
підпис

Залікова книжка  
№ 22510318

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

	С.
<b>ВСТУП</b>	<b>4</b>
<b>1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>6</b>
1.1 Механізм гранулоутворення та основи процесу сушіння	6
1.2 Сушарки з активною гідродинамікою потоків	11
1.3 Характеристика сировини та кінцевої продукції	15
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>17</b>
2.1 Опис технологічної схеми виробництва	17
2.2 Теоретичні основи процесу	21
2.3 Опис конструкції проектного апарата	27
2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	30
2.5 Гідравлічні розрахунки	45
2.5 Вибір допоміжного обладнання	48
<b>3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>	<b>52</b>
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	52
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	54
<b>4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА</b>	<b>63</b>
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	63
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	65
<b>5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ</b>	<b>70</b>
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	70
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	72
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ</b>	<b>75</b>
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	75

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

**ДОДАТКИ**

## ВСТУП

Виробництво хлориду калію (KCl) – це процес, під час якого виробляється речовина, що містить калій та хлор. Хлорид калію є важливим мінеральним добривом, а також використовується у різноманітних промислових застосуваннях.

Основні етапи виробництва хлориду калію можуть включати:

1. Видобуток сировини. Головні джерела калію – це калійні солі, які можуть видобуватися з природних осадів або видобуватися з шахт.
2. Очищення і обробка. Сировину очищають від домішок та інших нечистот. Цей етап може включати фізичні та хімічні процеси.
3. Розчинення. Очищені сировинні матеріали розчиняють у воді для виділення калію.
4. Кристалізація. Із отриманого розчину калію відділяються кристали хлориду калію.
5. Сушіння. Кристали піддаються сушінню для видалення зайвої вологи та отримання готового продукту.
6. Пакування. Готовий хлорид калію фасується та готується до транспортування та використання.

Загалом під сушінням розуміється технологічний процес екстрагування вологи з різноманітних вологих, пастоподібних або рідких матеріалів, таких як суспензії. Цей процес включає в себе випаровування води та відведення утвореної пари. Сушіння є складним тепломасообмінним процесом, і в багатьох випадках його ефективність залежить від швидкості дифузійного перенесення вологи в середині твердого матеріалу.

Цей технологічний процес є важливим в різних галузях, де необхідно видалити вологу для поліпшення консистенції, збереження або підготовки матеріалів. Застосовується він також для виготовлення сухих продуктів, які можуть зберігатися тривалий час без втрати якості.

Визначення методу сушіння та типу сушарки є важливим завданням і вимагає комплексного аналізу властивостей матеріалів, які піддаються сушінню. Цей аналіз допомагає оптимізувати процес сушіння та забезпечити оптимальні

умови для збереження якості матеріалів. Основні фактори, які слід враховувати при виборі методу сушіння і сушарки, включають: фізичні та термічні властивості матеріалів, вологовміст матеріалу, масштаби (тоннажність) виробництва, енергоефективність, вимоги до якості продукту, екологічність та безпечність.

У даній кваліфікаційній роботі [2] досліджено виробництво хлориду калію із застосуванням апарата з киплячим шаром для сушіння кристалів KCl.

## 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Механізм гранулоутворення та основи процесу сушіння [3, 4]

Механізм утворення гранул безпосередньо визначає продуктивність процесу гранулювання, і його характер значно залежить від використовуваного апаратного обладнання виробничої лінії для виготовлення органічних гранульованих добрив. Також важливий вплив мають методи гранулювання та властивості вихідної сировини у вигляді суспензії.

У процесі гранулювання може відбуватися одночасне формування нових частинок разом із збільшенням розмірів вже існуючих. Також можуть мати місце процеси, в яких розмір частинок змінюється в часі без утворення нових зародків гранулювання. Ці особливості підкреслюють складність та множинний характер процесу гранулювання.

Важливо враховувати, що вплив механізму утворення гранул визначає якість готового продукту, його фізико-хімічні властивості та ефективність використання у сільському господарстві. Підбір оптимального обладнання та методів гранулювання стає стратегічним завданням для досягнення бажаних параметрів продукції.

Гранулювання в апаратах з рідким киплячим шаром (РКСГ) включає імпульсне нанесення рідини, яка перебуває у стані «зрідження», на поверхню твердих частинок. Процес передбачає нагрівання ззовні, що призводить до кристалізації рідини, випаровування розчинника і утворення твердого органічного шару навколо ядра. Гранулювання в апаратах РКСГ включає як формування нових частинок (зародків), так і одночасний ріст наявних частинок.

Основною метою процесу є досягнення максимального виходу товарної фракції, зазвичай гранул діаметром 2,5–4 мм. У зв'язку з цим важливою стає можливість передбачення та розрахунку фракційного складу, а також шляхів підвищення виходу цільової фракції за допомогою правильної настройки параметрів процесу. Це визначальний аспект для оптимізації виробництва

гранульованих добрив та підвищення ефективності цього складного технологічного процесу.

Для визначення всіх параметрів процесу грануляції, передусім, важливо провести дослідження кінетики, гідродинаміки та процесів теплообміну, що відбуваються під час грануляції органічних суспензій. Згідно з літературними джерелами, вже наявні результати численних досліджень, спрямованих на вивчення закономірностей зміни гранульованого продукту залежно від параметрів процесу. Ці дослідження об'єднують багато спільних аспектів, але можна виділити три основні методи:

- 1. Дослідження кінетики грануляції.** Цей підхід визначає швидкість утворення гранул та їх росту в залежності від часу. Включає в себе вивчення реакцій, що відбуваються на поверхні частинок та впливають на їхню форму та розмір.
- 2. Гідродинамічні дослідження.** Аспекти гідродинаміки дозволяють визначити оптимальні умови перемішування сировини та рідини, а також визначити вплив гідравлічних параметрів на якість гранул.
- 3. Дослідження теплообміну.** Оцінка теплообміну важлива для розуміння процесів, що відбуваються під час грануляції, таких як кристалізація рідини, яка впливає на структуру та стабільність гранул.

Один із методів визначення гранульованого складу продукту включає спільне розв'язання рівнянь, які визначають швидкість росту окремих частинок та розподіл гранул за часом їх перебування в апараті. У випадку ідеального перемішування гранул у псевдозрідженому шарі та полідисперсного рециркуляційного гранулометричного складу може бути розрахований за допомогою рівняння експоненціального закону росту гранул.

Цей підхід передбачає вивчення динаміки процесу грануляції, зокрема швидкості утворення та росту окремих гранул. Рівняння експоненціального закону росту гранул використовується для опису цього процесу і дозволяє врахувати розмірні зміни гранул з плином часу. Припускається, що гранули ростуть експоненційно пропорційно своєму поточному розміру.

$$F(d_i) = \sum_{k=1}^{k=n} F(d_i, d_{oi}) p_k \quad (1.1)$$

$$F(d_i, d_o) = 1 - \exp(-3(G_M + G_P)/(k \cdot G_M) \ln(d_i/d_o)) \quad (1.2)$$

де  $d_o$ ,  $d_i$ ,  $d_{oi}$  – початковий, поточний діаметр частинки  $k$ -ї фракції;  
 $G_P$  – витрата рециклу;  
 $G_M$  – витрата сухого матеріалу що вводиться в шар з рідиною;  
 $p_k$  – вміст  $k$  – ї фракції в рециклі;  
 $k$  – коефіцієнт гранулоутворення.

Коефіцієнт гранулоутворення, який залежить від режиму, вказує на те, яка частина сухої речовини, що вводиться разом із рідиною, розподіляється по поверхні твердих частинок. Значення цього коефіцієнта визначає характеристики процесу грануляції. Якщо  $k$  менше 1, це свідчить про те, що утворюються нові гранули. З іншого боку, якщо  $k$  більше 1, спостерігається агломерація, тобто об'єднання раніше утворених частинок.

Цей коефіцієнт є важливим показником для контролю та оптимізації процесу грануляції. Він вказує на ефективність розподілу рідини та сухої речовини, що впливає на фізичні характеристики утворених гранул. Значення менше 1 вказує на сприятливі умови для утворення нових гранул, тоді як значення більше 1 може свідчити про потенційну агломерацію частинок. Поєднання цього коефіцієнта з іншими параметрами дозволяє встановити оптимальні умови для досягнення бажаних характеристик гранул.

Існують різні точки зору на закон росту частинок. За думкою деяких авторів, швидкість зростання частинок є пропорційною поверхні шару і не залежить від розміру частинок у цьому шарі. Відповідно, закон зростання частинок у шарі може бути описаний наступними рівняннями.

Цей підхід визнає, що розмір частинок може впливати на їхню поверхню і, таким чином, визначати швидкість зростання. Зростання частинок розглядається як процес, що протікає на поверхні шару, і не обов'язково залежить від їхнього розміру у цьому шарі.



Врахування цього фактору важливо для правильного опису процесів гранулювання та прогнозування характеристик утворених гранул. Дослідження законів зростання частинок допомагає розуміти та контролювати процес грануляції для досягнення бажаних властивостей продукту.

$$d = d_0 + k\tau \quad (1.3)$$

$$\lambda = dd/d_\tau = G_M/(F\rho_m) = \text{const} \quad (1.4)$$

$$d/d = \exp(G_M/3G_{ст})\tau \quad (1.5)$$

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.

Сушіння є важливим етапом в технологічних процесах, де необхідно досягти певного рівня вологи у продукті для забезпечення його зберігання, транспортування або подальшого використання. Окрім видалення зайвої вологи, сушіння може впливати на фізичні та хімічні властивості матеріалу, що піддається обробці.

Процес сушіння може викликати зміни у теплопровідності матеріалу, оскільки видалення води може призводити до збільшення ступеня твердості і, відповідно, зменшення його теплопровідності. Зниження об'ємної ваги та підвищення міцності також можуть спостерігатися під час сушіння.

Усі ці зміни властивостей матеріалу важливі для подальшого використання або обробки продукту, і їх слід враховувати при проектуванні та контролі процесів сушіння.

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. Розглянемо більш детально види сушіння.

Конвективне сушіння. 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.

Контактне (кондуктивне) сушіння. 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.

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.

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.

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.

## **1.2 Сушарки з активною гідродинамікою потоків [5, 6]**

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 видалення 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  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ . Можливість сушіння липких, пастоподібних і рідких матеріалів пояснюється тим, що утворюється киплячий (зважений, псевдозріджений) 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:

$$\tau_{\text{сер}} = G_{\text{ш}} / G_2, \quad (1.6)$$

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. 1.1 зображено установку для сушіння хлористого калію, здатну обробляти близько 100 тонн на годину.

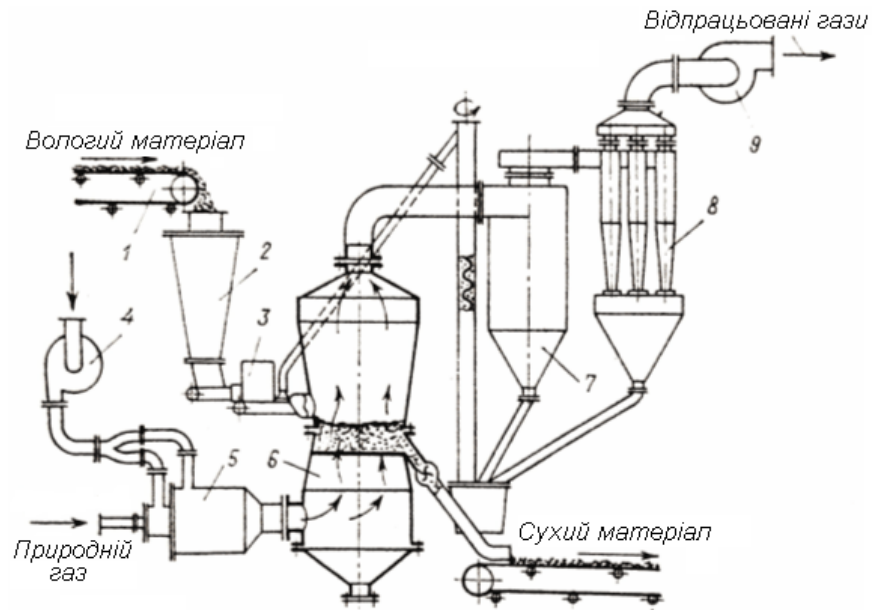


Рисунок 1.1 – Сушильна установка з апаратом киплячого шару

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. Також, повітря використовується для розведення продуктів згорання в камеру змішування, яка інтегрована з топкою 5. У цій камері відбувається процес псевдозрідження 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. 1.2 а) та вихрові (показані на рис. 1.2 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.

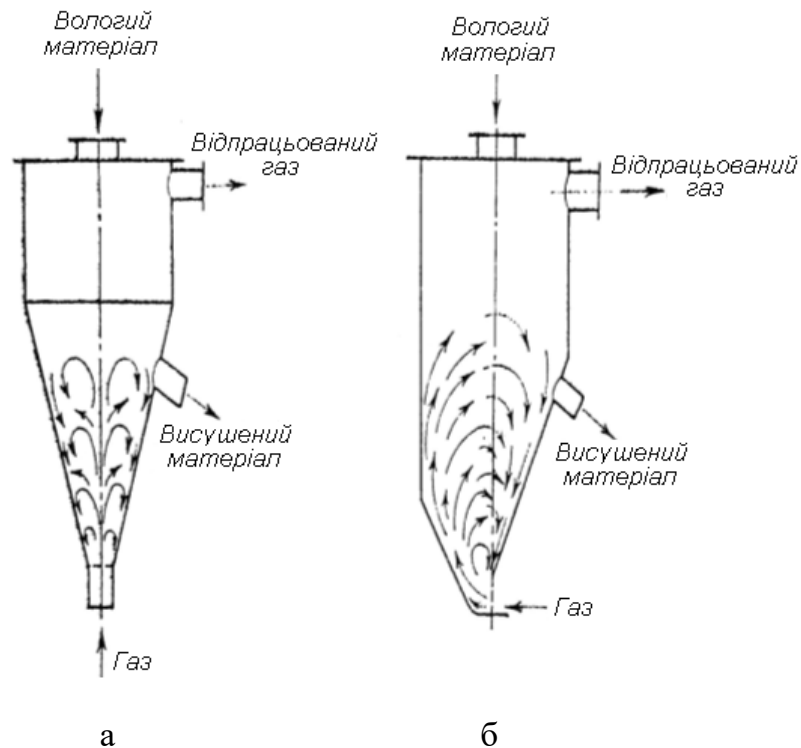


Рисунок 1.2 – Схеми сушильних апаратів з фонтануючим (а) та вихровим (б) шаром матеріалу

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 теплоносій вводиться тангенціально, а решітка не має жодних провалів, тим часом, як у фонтануючому апараті теплоносій 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 матеріалу, 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 Характеристика сировини та кінцевої продукції**

Хлорид калію отримують переважно з сільвініту ( $m\text{KCl}\cdot n\text{NaCl}$ ) і карналіту ( $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Сільвініт – механічна суміш (агломерат) сільвіна ( $\text{KCl}$ ) і галіта ( $\text{NaCl}$ ), що містить 22–25 %  $\text{K}_2\text{O}$ .

Головним продуктом калійної промисловості є хлористий калій, який має широке застосування в різних галузях промисловості. Близько 95 % виробленого хлористого калію використовується в сільському господарстві як ефективне добриво. Залишкові 5 % хлориду калію піддають переробку для виробництва інших важливих хімічних сполук калію, що знаходять своє використання у різних промислових секторах.

Хлористий калій використовується в різних галузях і може класифікуватися за різними ознаками:

1. За призначенням:

- добриво – хлористий калій є важливим добривом, оскільки містить калій, необхідний для забезпечення рослин потрібними поживними речовинами;
- хімічна промисловість – використовується для виробництва інших хімічних продуктів, таких як оксид калію, гідроксид калію та інші.

2. За видом сировини – зазвичай виробляється з мінералів, таких як сильвініт і карналіт, але може бути отриманий із сієніту концентрату, каїніту та інших мінералів.

3. За способами виробництва:

- флотаційний метод – отримання хлориду калію шляхом флотації мінералів;
- галургічний метод – використовує хімічні процеси для виділення хлористого калію;
- комбінований метод – комбінація різних технологій виробництва;
- підземне вилуговування солей – вилуговування калієвих солей підземним шляхом;
- отримання відходів на титано-магнієвих комбінатах – хлористий калій може бути вироблений як побічний продукт на титано-магнієвих комбінатах.

4. За гранулометричним складом:

- крупнозернистий – має розмір часток від 1 до 4 мм;
- дрібний – має розмір часток менше 1 мм.

Фізичні та фізико-хімічні властивості добрив, зокрема хлористого калію, мають велике значення для ефективного їх використання в сільському господарстві. Основні вимоги до хлористого калію зазвичай визначаються стандартами, такими як ГОСТ 4568-95 "Калій хлористий. Технічні умови". Добриво повинно мати стабільну консистенцію та уникати утворення грудок чи злежування під час зберігання, забезпечувати рівномірний розподіл гранул при внесенні на поле.



## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис технологічної схеми виробництва

Сильвінітові руди, які мають вміст корисного компонента в діапазоні 22–25 %, зазвичай не вважаються достатньо концентрованими для ефективного використання як добриво. Для підвищення вмісту корисного компонента в сировині використовують різні методи збагачення.

**Механічний метод (флотація).** Флотація є ефективним механічним методом збагачення руд. У цьому процесі застосовують спеціальні реагенти та пухирчасте повітря, щоб відокремити корисний компонент від некорисних мінералів. Зазвичай, сильвінітові руди флотують, тобто вони прилипають до поверхні пухирів, що витікає утворення пінки. Після цього пінка з корисним компонентом може бути зібрана, утворюючи концентроване добриво.

**Хімічний метод (галургія).** Галургічні методи використовують хімічні процеси для вилучення корисного компонента з руди. Це може включати в себе розчинення корисних мінералів за допомогою хімічних реагентів.

Флотація стала прогресивним методом збагачення сильвінітових руд і широко використовується в гірничо-металургійній промисловості для отримання концентрованих продуктів. Вона дозволяє виробникам ефективно виділяти корисні компоненти із сировини, забезпечуючи покращену якість та використання у виробництві добрив.

Сутність флотаційного способу полягає у наступному. Сировину (сильвінітову руду) попередньо подрібнюють на дрібні частинки, щоб полегшити подальший обробний процес. Подрібнену руду змочують у воді або водному розчині. Це створює пульпу, яка є водно-рудним розчином. Пульпу пропускають через флотаційну машину, де через неї пропускається повітря або інший газ. Повітря розподіляється у вигляді дрібних бульбашок. Гідрофобні (не люблять воду) мінерали прилипають до бульбашок повітря, утворюючи піну на поверхні пульпи. Піна, яка містить гідрофобні мінерали, підіймається на поверхню пульпи і

утворює піну. Ця піна видаляється, або збирається, а потім проходить через процес фільтрації для видалення твердих частинок.

Одночасно із флотацією проводять видалення глинистого шламу, який може впливати на якість добрива. Гідрофільні (люблять воду) мінерали залишаються на дні флотаційної машини і виводяться через зливний отвір.

Цей процес дозволяє виробляти концентроване добриво, вилучаючи багато зайвих компонентів та забруднень. Флотаційний метод широко використовується в гірничо-металургійній промисловості для обробки різних видів руд, включаючи сильвінітові руди.

Технологічні процеси отримання хлористого калію за допомогою флотаційного методу визначаються не лише характеристиками початкових сировинних матеріалів, але й їх властивостями, такими як вміст нерозчинних залишків та ступінь подрібнення. Розробка оптимальної технологічної схеми враховує ці параметри для досягнення максимальної ефективності процесу. Наприклад, в сучасних технологічних схемах флотаційного збагачення сильвінітових руд велика увага приділяється аналізу вмісту нерозчинних залишків у вихідних матеріалах. Це стосується не лише самого сильвініту, але й супутніх компонентів, таких як глинисті шлами.

Окрім того, ступінь подрібнення руди впливає на ефективність флотаційного процесу. Чим дрібніше матеріал, тим легше досягти високої ефективності виділення корисних компонентів та позбутися надмірних домішок.

Процес флотації часто включає кілька етапів. Однією з розглянутих схем є технологічна схема флотаційного збагачення сильвініту з попередньою флотацією глинистих шламів (рис. 2.1). Це може включати подрібнення руди, змочування у воді або розчині, подачу повітря для створення бульбашок, привертання гідрофобних мінералів до бульбашок, утворення піни, видалення піни та фільтрацію для видалення твердих частинок.

Такі технологічні схеми прагнуть до оптимізації процесу виробництва хлористого калію, підвищуючи чистоту та концентрацію продукту, а також ефективність використання сировини.

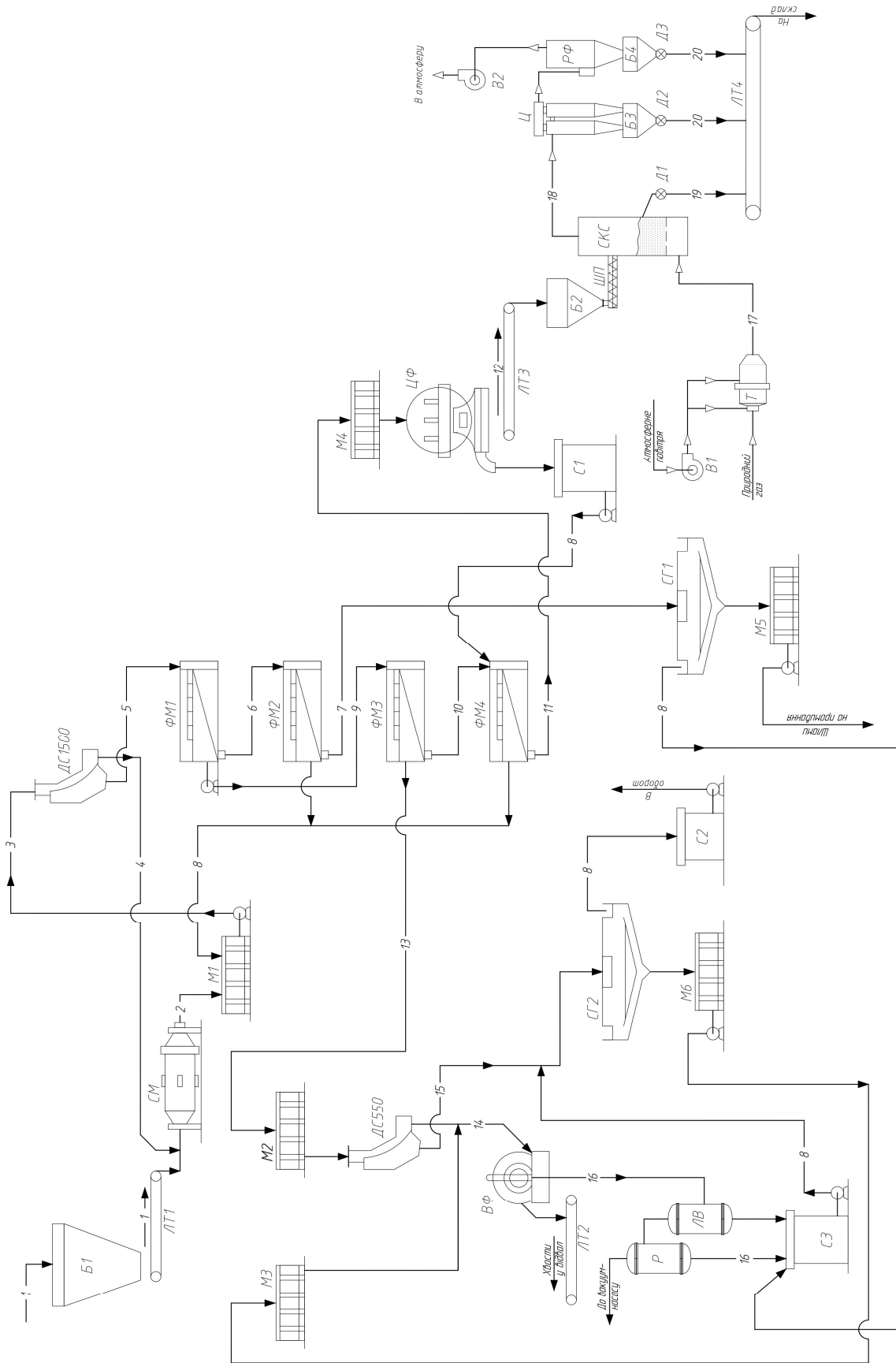


Рисунок 2.1 – Схема флотажного збагачення сільвініту з попередньою флотацією глинистих шламів

Принцип роботи даної установки полягає у наступному. Спочатку руду піддають подрібненню у стрижневому млині мокрого помелу, який працює в замкнутому циклі з дуговими ситами. Після цього процесу подрібнення і класифікації на ситах, частки руди мають розмір не більше 0,75 мм. Глинистий шлам проходить флотаційний процес на спеціальній машині.

Введення реагенту ФР-2 (що є окисленою формою уайт-спіриту) та газу для поліпшення властивостей піни, а також 0,25 %-вого розчину поліакриламідру для зниження витрати реагентів, глинистий шлам флотується. Цей процес триває 10 хвилин.

Пінний продукт шламової флотації піддають перечищенню у флотаційній машині без додаткової подачі реагентів. З метою згущення пінний продукт перечищення піддають освітленню в згущувачі. Згущений шлам, після протитечійного промивання, видаляють у відвал, а освітлений насичений розчин повертають у цикл. Шламова флотація з сильвініту в цій системі дозволяє вилучити до 85 % нерозчинного залишку, досягаючи високої ефективності обробки сировини.

Після процесу обезшламлювання пульпа сильвініту подається на основну флотацію в спеціальну машину. У цей момент в якості збирача використовується підігрітий до 40°C 1 %-вий водний розчин хлоргідрату амінів. Основна флотація триває 5 хвилин.

Пінний продукт, який утворюється після перечищення у флотаційній машині, представляє собою концентрат хлориду калію. Щоб зменшити вміст води у цьому продукті, його піддають зневодненню на центрифугі, після чого вологість продукту становить 5 %. Далі, відцентрований продукт направляється на процес осушення, а потім постачається споживачеві. Хлорид калію, який отримано флотаційним методом, містить достатню кількість амінів, що заважає його злежуванню.

Галітові хвости флотації з руди розділяють на дві фракції за допомогою сита. Великі частки (понад 0,2 мм) фільтруються на барабанному вакуум-фільтрі, тоді як дрібні частки (менше 0,2 мм) попередньо згущуються в згущувачі і потім фільтруються на вакуум-фільтрі. Фільтрат і злив згущувача повертають у виробництво. Для зменшення втрат хлориду калію кристали галіту промивають на

фільтрі водою при температурі 30–40°C. Галітові хвости, після промивання, мають вміст близько 14 % вологи. Очищені від глинистих домішок хвости можуть бути використані у виробництві кальцинованої соди або технічного хлориду натрію. Готовий продукт містить 93–95 % KCl, при ступені вилучення KCl з руди 90–92 %.

Сильвінітові руди, які містять не більше 2,5 % нерозчинного залишку, піддаються комплексній обробці з використанням схеми, яка передбачає попередню флотацію глинистого шламу. Процес розпочинається подрібненням руди в стрижневому млині мокрого помелу, який діє в замкнутому циклі з дуговими ситами. Глинистий шлам, що утворюється, флотується за допомогою реагента ФР-2 (продукту окислення уайт-спіриту), який доповнюється газом для поліпшення властивостей піни, а також розчином поліакриламідом для економії реагентів.

Після етапу шламової флотації сильвінітова пульпа направляється на основну флотацію. Пінний продукт, отриманий після перетищення, становить концентрат хлориду калію, який зневоднюється за допомогою центрифуги і подається на сушку. Галітові хвости флотації піддаються подальшій обробці: великі частки (понад 0,2 мм) фільтруються на барабанному вакуум-фільтрі, а дрібні (менше 0,2 мм) спочатку згущуються, а потім також фільтруються на вакуум-фільтрі. Фільтрат і злив згущувача повертаються у виробництво.

Кристали галіту, які відокремлюються на фільтрі, промиваються теплою водою від хлориду калію. Оскільки хлорид натрію в цій схемі не містить глинистих домішок, отриманий продукт може бути успішно використаний у виробництві кальцинованої соди і технічної солі. Таким чином, з використанням цієї технологічної схеми досягається ефективна обробка сировини та отримання продуктів високої якості.

## **2.2 Теоретичні основи процесу [5–10]**

Кожен твердий вологий матеріал взаємодіє з навколишнім середовищем, здатними абсорбувати вологу з оточуючого повітря або, навпаки, віддавати її в

навколишнє середовище. Отримання або віддача вологи залежить від властивостей матеріалу та параметрів навколишнього середовища. Останнє може складатися з водяної пари, що міститься в повітрі, або з суміші водяної пари та інших газів.

Для узагальнення цих взаємодій використовуються терміни "парціальний тиск водяної пари" (позначений як  $P_p$ ) та "тиск водяної пари у вологому матеріалі" (позначений як  $P_m$ ).

Парціальний тиск водяної пари ( $P_p$ ) визначається кількістю водяної пари у суміші з повітрям. Волога, яка міститься у вологому матеріалі, відповідає певному тиску водяної пари ( $P_m$ ). Цей тиск визначає, наскільки насиченим вологим є матеріал.

Отже, в контексті фізичних взаємодій між вологим матеріалом і його оточуючим середовищем, парціальний тиск водяної пари та тиск водяної пари у вологому матеріалі є ключовими параметрами, які визначають вологість та поведінку матеріалу у вологому стані.

У контексті взаємодії матеріалу з вологим повітрям можна виділити три можливі стани системи:

**1. Сушіння.** Стан, в якому тиск водяної пари у вологому матеріалі ( $P_m$ ) перевищує його парціальний тиск в навколишньому повітрі або газі ( $P_p$ ), тобто  $P_m > P_p$ . У цьому випадку відбувається процес десорбції, тобто вивільнення вологи з матеріалу в навколишнє середовище. Тиск водяної пари в матеріалі  $P_m$  залежить від вологості матеріалу, температури і характеру зв'язування вологи з матеріалом.

**2. Зволоження.** Стан, в якому парціальний тиск водяної пари в навколишньому середовищі ( $P_p$ ) перевищує тиск водяної пари у вологому матеріалі ( $P_m$ ), тобто  $P_p > P_m$ . У цьому випадку відбувається процес сорбції, тобто вбирання вологи матеріалом з оточуючого повітря.

**3. Динамічна рівновага (рівноважна вологість).** Стан, при якому тиск водяної пари у вологому матеріалі і навколишньому середовищі рівні, тобто  $P_m = P_p$ . У цьому випадку встановлюється динамічна рівновага, яка називається рівноважною вологістю  $W_p$ . Рівноважна вологість залежить від парціального

тиску водяної пари  $P_p$  або відносної вологості повітря  $\phi$  при фіксованій температурі ( $t$ ) і встановлюється експериментально шляхом визначення ізотерми сорбції.

Вказані три стани визначають вологість матеріалу в залежності від тиску водяної пари в матеріалі та навколишньому повітрі, що є важливими факторами для розуміння процесів сушіння та зволоження матеріалів.

Зв'язок вологи з матеріалом може бути різними видами:

- механічно пов'язана волога заповнює великі капіляри матеріалу в результаті змочування. Вона легко видаляється і найменш міцно пов'язана з матеріалом.
- фізико-хімічно пов'язана волога (адсорбційна волога) поглинається поверхнею дрібних капілярів або проникає внаслідок дифузії всередину клітин матеріалу. Важче видаляється з матеріалу.
- хімічно зв'язана волога (гідратна або кристалізаційна волога), наприклад, у вигляді гідратів чи кристалів. При сушінні зазвичай не видаляється і не враховується при розрахунках сушарок.

Незалежно від характеру зв'язку вологи, гігроскопічна волога є міцно пов'язаною з матеріалом і важко видаляється шляхом сушіння. Така волога називається вільною вологою і включає в себе той обсяг вологи, який може бути вилучений з матеріалу під час сушіння в умовах теплової сушки.

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)  $v_{уд}$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) розраховується за формулою:

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

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:

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

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;

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

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

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

У псевдокиплячому шарі відбувається несталий гідродинамічний режим, що характеризується нерівномірністю полів тиску і температур. Основні особливості цього режиму включають циклічне утворення і руйнування газових пазирів, а також нерівномірну локальну порозність. У результаті цього рух частинок матеріалу стає несталим і відбувається у всіх напрямках. Основні аспекти, які характеризують псевдокиплячий шар:

- несталі гідродинамічний режим – нерівномірність полів тиску і температур призводить до несталого гідродинамічного режиму;
- циклічне утворення і руйнування газових пазирів – газові пазирі періодично утворюються і руйнуються, створюючи динаміку руху матеріалу;
- локальна порозність – нерівномірність порозності у різних частинах шару сприяє різним характеристикам руху частинок;
- перемішування газу і матеріалу – обидві фази, газ і матеріал, перемішуються як у осьовому (по напрямку потоку газу), так і в подовжньому чи поперечному напрямку;

- осьове перемішування газу – при зворотньо-поступальному русі частки матеріалу захоплюють газ і переносять його в глибину шару, що призводить до осьового перемішування газу.

Ці характеристики визначають складний та циклічний процес взаємодії газу і матеріалу в псевдокиплячому шарі, що є важливим аспектом у розумінні та оптимізації технологічних процесів, де використовується такий тип матеріалу.

Апарати з киплячим шаром в гідродинаміці газової фази можна розглядати як проміжне положення між апаратами ідеального витіснення та ідеального змішення. У цих апаратах частки твердої фази піддаються перемішуванню як у осьовому, так і в подовжньому напрямках. Інтенсивність і область перемішування визначаються гідродинамічним режимом кипіння, конструкцією розподільних решіток і камери, а також розмірами апарату.

### **2.3 Опис конструкції проектного апарата**

Об'єктом розробки є сушарка киплячого шару (див. рис. 2.2), що представляє собою апарат з циліндричним корпусом, газорозподільним пристроєм, газорозподільною решіткою та кришкою:

- корпус – це основна частина сушарки, яка створює несталий гідродинамічний режим для ефективного сушіння в киплячому шарі;
- газорозподільний пристрій – елемент, який розподіляє газ по всій площі газорозподільної решітки для оптимального контакту з матеріалом;
- газорозподільна решітка – виготовлена з штампованого сита з круглими отворами, що забезпечує живий перетин близько 15 % і гарантує ефективне проникнення газу;
- кришка – закриває верхню частину апарату, забезпечуючи герметичність і контрольований вихід газів.

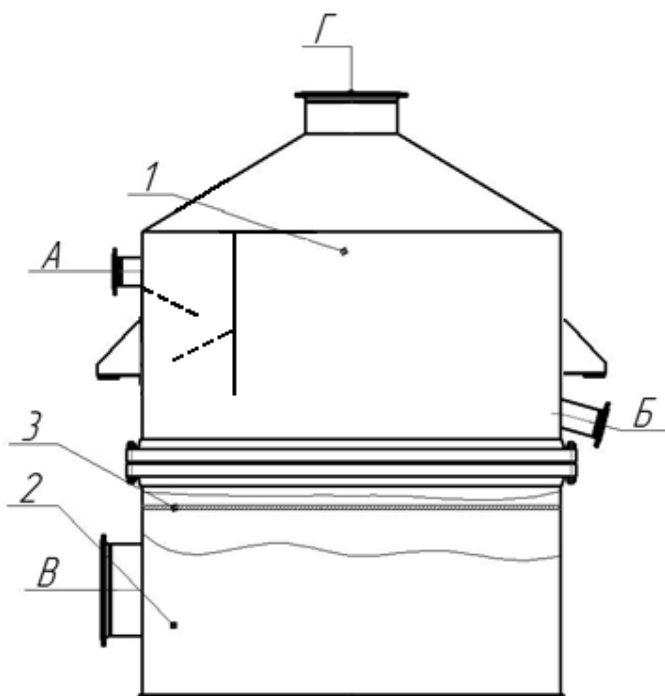


Рисунок 2.2 – Ескіз сушарки киплячого шару:

- 1 – сушильна камера; 2 – газорозподільна камера; 3 – газорозподільна решітка;  
 А – вхід вологого продукту; Б – вихід висушеного продукту;  
 В – вхід сушильного агента; Г – вихід відпрацьованого сушильного агента

Ця сушарка призначена для використання у процесах, де важливо забезпечити ефективне перемішування газу та матеріалу в осьовому та подовжньому напрямках, що робить її ідеальним рішенням для сушіння в киплячому шарі з використанням конусоподібної форми корпусу та оптимізованої газорозподільної решітки.

Сушарка киплячого шару оснащена технологічним люком (дозволяє зручний доступ до внутрішнього простору сушарки для завантаження та вивантаження матеріалу), оглядовими вікнами (для візуального контролю процесу сушіння без необхідності відкривання люка, що сприяє ефективному моніторингу) і спеціальними штуцерами для приладів контролю, вимірювання, регулювання та автоматизації (КВПіА). Для забезпечення стабільності та правильного функціонування, сушарку встановлюють на мінімум дві опори-лапи.

Принцип роботи даного апарату базується на двох основних робочих зонах: пневмокласифікації та сушки гранул. Процес розпочинається з дозування вихідних кристалів хлориду калію живильником, після чого матеріал потрапляє в секцію класифікації апарату. В цій зоні відбувається вилучення дрібної фракції частинок, що дозволяє отримати більш однорідний продукт.

Звільнений від дрібних частинок матеріал подається на газорозподільну решітку в зоні сушки. Тут, під впливом газового потоку, він потрапляє у зважений стан, що характеризується режимом псевдозрідження. Процес сушіння відбувається за участі газу, який вводиться через штуцер В. У цьому процесі продукт переміщується в напрямку вивантаження через решітку під дією газового потоку.

Висушений матеріал виводиться з сушарки через штуцер Б, розташований в протилежному напрямку від штуцера введення А. При цьому повітря, яке стає насиченим вологою під час сушіння, виводиться з апарату через штуцер Г у верхній частині кришки.

Такий принцип роботи дозволяє ефективно вилучати дрібні частинки, а потім проводити сушіння гранульованого матеріалу за допомогою газового потоку, забезпечуючи якісний та однорідний висушений продукт.

У випадку полиць із живим перетином 0 % (суцільна полиця) і 5 % процес пневмокласифікації матеріалу протікає більш інтенсивно порівняно з полицями із живим перетином більше 15 %. Це пояснюється тим, що при малих значеннях живого перетину полицного простору газовий потік переважно прямує через розвантажувальний простір. У такому випадку значна кількість газу прямує через розвантажувальний простір, що призводить до підвищення швидкості повітряного потоку в цьому просторі.

Навпаки, при великих значеннях живого перетину, більше 15 %, значна частина газового потоку направляється через отвори полки. Це сприяє зменшенню швидкості повітряного потоку в розвантажувальному просторі, що може впливати на інтенсивність процесу пневмокласифікації матеріалу.

## 2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата

У якості палива використовуємо природний сухий газ наступного складу, % об.: 92,0 CH<sub>4</sub>; 0,5 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 5,0 H<sub>2</sub>; 1 CO; 1,5 N<sub>2</sub> [1].

Теоретична кількість сухого повітря L<sub>0</sub>, що витрачається на спалювання 1 кг палива, за рівнянням [1]:

$$L_0 = 138 \cdot \left[ 0,0179 \cdot CO + 0,248 \cdot H_2 + \sum \frac{(m+n/4) \cdot C_m H_n}{(12m+n)} \right], \quad (2.9)$$

де склади горючих газів виражені в об'ємних частках.

Підставивши відповідні значення, отримаємо:

$$L_0 = 138 \cdot \left[ 0,0179 \cdot 0,01 + 0,248 \cdot 0,05 + \frac{(1+4/4)}{(12 \cdot 1+4)} \cdot 0,92 + \frac{(2+6/4)}{(12 \cdot 2+6)} \cdot 0,005 \right] = 17,686 \text{ кг} / \text{кг}.$$

Кількість тепла Q<sub>v</sub>, що виділяється при спалюванні 1 м<sup>3</sup> газу, так само:

$$Q_v = \sum \phi_i \cdot H_i = 0,92 \cdot 35741 + 0,005 \cdot 63797 + 0,05 \cdot 10810 + 0,01 \cdot 12680 = 33868 \text{ кДж} / \text{м}^3,$$

де φ<sub>i</sub> – об'ємна частка компонентів газу;

H<sub>i</sub> – тепловий ефект реакції (кДж/м<sup>3</sup>).

Густина газоподібного палива ρ<sub>T</sub> за рівнянням [1]:

$$\rho_T = \frac{\sum C_m H_n M_i}{v_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_T}, \quad (2.10)$$

де M<sub>i</sub> – молярна маса і-того компонента палива, кмоль / кг;

t<sub>T</sub> – температура палива, що дорівнює 20 °С;

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

$T_0 = 273$  К.

Підставивши значення, отримаємо:

$$\rho_T = \frac{(0,92 \cdot 16 + 0,005 \cdot 30 + 0,05 \cdot 2 + 0,01 \cdot 28 + 0,015 \cdot 28) \cdot 273}{22,4(273 + 20)} = 0,652 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 кг палива за рівнянням [1]:

$$Q = \frac{Q_v}{\rho_T}, \quad (2.11)$$

$$Q = \frac{33868}{0,652} = 51945 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Маса сухого газу, що подається в сушарку, в розрахунку на 1 кг палива, що спалюється визначається загальним коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha$ , необхідного для спалювання палива та розведення топкових газів до температури суміші  $t_{см} = 750$  °С.

Значення  $\alpha$  знаходимо з рівнянь матеріального і теплового балансів.

Рівняння матеріального балансу за формулою [1]:

$$1 + L_0 = L_{c.z.} + \sum \frac{9n}{12m + n} C_m H_n, \quad (2.12)$$

де  $L_{c.z.}$  – маса сухих газів, що утворюються при згорянні 1 кг палива;

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

Рівняння теплового балансу за формулою [1]:

$$Q \cdot \eta + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot L_0 \cdot I_0 = [L_{c.z.} + L_0 \cdot (\alpha - 1)] \cdot i_{c.z.} + \left[ \alpha \cdot L_0 \cdot x_0 + \sum \frac{9n}{12m + n} C_m H_n \right] \cdot i_n, \quad (2.9)$$

де  $\eta$  – загальний коефіцієнт корисної дії, що враховує ефективність роботи топки і втрати тепла топкою в навколишнє середовище, що дорівнює 0,95;

$c_T$  – теплоємність газоподібного палива при 20 °С, дорівнює 1,34 кДж/(кг·К);

$I_0$  – ентальпія свіжого повітря, що дорівнює 41,9 кДж/кг;

$x_0$  – вологовміст свіжого повітря, (0,0092 кг/кг сухого повітря), при температурі  $t_0 = 18^\circ\text{C}$  і відносній вологості 72 % (за діаграмою Рамзина);

$i_{c.g.}$  – ентальпія сухих газів, кДж/кг;

$$i_{c.g.} = c_{c.g.} \cdot t_{c.g.}, \quad (2.13)$$

$$i_{c.g.} = 1,15 \cdot 750 = 862,5 \text{ кДж/кг},$$

$c_{c.g.}$  і  $t_{c.g.}$  – відповідно теплоємність і температура сухих газів; теплоємність сухих газів приймаємо рівною теплоємності сухого повітря при 750 °С.

$c_{c.g.} = 1,15$  кДж/(кг·К);  $t_{c.g.} = 750$  °С;

$i_{п}$  – ентальпія водяної пари, кДж/кг;

$$i_{п} = r_0 + c_{п} t_{п}, \quad (2.14)$$

$$i_{п} = 2500 + 1,97 \cdot 750 = 3977,5 \text{ кДж/кг},$$

$r_0$  – теплота випаровування води при температурі 0 °С, дорівнює 2500 кДж/кг;

$c_{п}$  – середня теплоємність водяної пари, що дорівнює 1,97 кДж/(кг·К);

$t_{п}$  – температура водяної пари  $t_{п} = 750$  °С.

$$t_{п} = t_{c.g.} = t_{cm}.$$

Вирішуючи спільно рівняння щодо коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ , отримаємо:

$$\alpha = \frac{Q \cdot \eta + c_T \cdot t_T - i_{c.e.} \cdot \left(1 - \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n\right) - i_n \cdot \sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n}{L_0 (i_{c.e.} + i_n \cdot x_0 - I_0)}, \quad (2.15)$$

Перерахуємо компоненти палива, при згорянні яких утворюється вода, з об'ємних часток в масові:

$$\omega_i = \frac{\varphi_i \cdot M_i \cdot T_0}{22,4 \cdot \rho_T \cdot (T_0 + t_T)}, \quad (2.16)$$

де  $\varphi_i$  – об'ємна частка компонента в паливі;

де  $M_i$  – молярна маса  $i$ -того компонента палива, кмоль/кг;

$t_T$  – початкова температура палива, що дорівнює 20 °С;

$\rho_T$  – густина газоподібного палива, кг/м<sup>3</sup>;

22,4 м<sup>3</sup>/кмоль – молярний об'єм газу за нормальних умов;

$T_0 = 273$  К.

Підставивши відповідні значення, отримаємо:

$$\omega(\text{CH}_4) = 0,92 \cdot 16 \cdot 273 / [22,4 \cdot 0,652(273 + 20)] = 0,939,$$

$$\omega(\text{C}_2\text{H}_6) = 0,005 \cdot 30 \cdot 273 / [22,4 \cdot 0,652(273 + 20)] = 0,0096,$$

$$\omega(\text{H}_2) = 0,05 \cdot 2 \cdot 273 / [22,4 \cdot 0,652(273 + 20)] = 0,0064.$$

Кількість вологи, що виділяється при згорянні 1 кг палива [1]:

$$\sum \frac{9n}{12m+n} C_m H_n = \frac{9 \cdot 4}{12 \cdot 1 + 4} \cdot 0,939 + \frac{9 \cdot 6}{12 \cdot 2 + 6} \cdot 0,0096 + \frac{9 \cdot 2}{12 \cdot 0 + 2} \cdot 0,0064 = 2,19_{\text{кг}} / \text{кг} \cdot$$



Коефіцієнт надлишку повітря знаходимо за рівнянням:

$$\alpha = \frac{Q \cdot \eta + c_T \cdot t_T - i_{c.z.} \cdot (1 - 2,19) - i_n \cdot 2,19}{L_0 \cdot (i_{c.z.} + i_n \cdot x_0 - I_0)} =$$

$$= \frac{51945 \cdot 0,95 + 1,34 \cdot 20 - 862,5 \cdot (1 - 2,19) - 3977,5 \cdot 2,19}{17,686 \cdot (862,5 + 3977,5 \cdot 0,0092 - 41,9)} = 2,61$$

Загальна питома маса сухих газів, одержуваних при спалюванні 1 кг палива і розведенні топкових газів повітрям до температури суміші 750 °С, дорівнює за рівнянням [1]:

$$G_{c.z.} = 1 + \alpha \cdot L_0 - \sum \frac{9n}{12m + n} C_m H_n ; \quad (2.17)$$

$$G_{c.z.} = 1 + 2,61 \cdot 17,686 - 2,19 = 44,97 \text{ кг/кг.}$$

Питома маса водяної пари в газовій суміші при спалюванні 1 кг палива за рівнянням [1]:

$$G_n = \sum \frac{9n}{12m + n} C_m H_n + \alpha \cdot x_0 \cdot L_0 ; \quad (2.18)$$

$$G_n = 2,19 + 2,61 \cdot 0,0092 \cdot 17,686 = 2,62 \text{ кг/кг.}$$

Вологовміст газів на вході в сушарку ( $x_1 = x_{cm}$ ) на 1 кг сухого повітря [1]:

$$x_1 = \frac{G_n}{G_{c.z.}} ; \quad (2.19)$$

$$x_1 = 2,62 / 44,97 = 0,0583 \text{ кг/кг.}$$

Ентальпію газів на вході в сушарку знаходимо за рівнянням [4]:

$$I_1 = 1000 \cdot t + (2493 + 1,97 \cdot t) \cdot 10^3 \cdot x_1; \quad (2.20)$$

$$I_1 = 1000 \cdot 750 + (2493 + 1,97 \cdot 750) \cdot 10^3 \cdot 0,0583 = 982 \text{ кДж/кг.}$$

Оскільки коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha > 1$ , фізичні властивості газової суміші, яку використовують у якості сушильного агента, практично не відрізняються від фізичних властивостей повітря. Це дає можливість використовувати в розрахунках діаграму стану вологого повітря I-x [1].

Враховуючи високу ступінь знепилювання, приймаємо величину концентрації частинок на виході із зони пневмокласифікації  $Y_d = 500 \text{ г/м}^3$  [37], а концентрацію фракції, що уноситься:

$$Y_m = 500 \cdot 0,6 = 300 \text{ г/м}^3.$$

Тоді:

$$W_{ПК} = \frac{b}{a - \lg\left(\frac{Y_m}{X}\right)} = \frac{1,156}{4,0 - \lg\left(\frac{300}{0,445}\right)} = 0,988 \text{ м/с.}$$

Значення  $a$  і  $b$  для процесу пневмокласифікації зі зваженим шаром дорівнюють [6]:

$$a = \frac{4,9}{10^{\frac{0,0264}{U_B}}} = \frac{4,9}{10^{0,30}} = 4,0;$$

$$b = 5,4(U_B)^{1,28} = 5,4(0,30)^{1,28} = 1,156.$$

$X$  – відносний вміст дрібної фракції у зваженому шарі.

За рівнянням [1] визначимо витрату вологи, що видаляється з матеріалу:

$$W = G_{\kappa} \frac{\omega_n - \omega_{\kappa}}{100 - \omega_n}, \quad (2.21)$$

де  $G_{\kappa} = 30 \text{ т/ч} = 30 \cdot 1000 / 3600 = 8,33 \text{ кг/с}$  – продуктивність сушарки за висушеним матеріалом.

$$W = 8,33 \cdot \frac{6 - 0,5}{100 - 6} = 0,487 \text{ кг/с.}$$

Температуру розбавлених топкових газів, що надходять під решітку, приймаємо за вихідними даними рівній  $t_1 = 750^{\circ}\text{C}$ ; температуру вихідних газів  $t_2 = 100^{\circ}\text{C}$ , що дозволить виключити конденсацію парів в пилоуловлюваній апаратурі.

Розрахуємо внутрішній тепловий баланс сушарки за рівнянням [1]:

$$\Delta = ct_n + q_{\text{дон}} - (q_m + q_{\text{м}} + q_n), \quad (2.22)$$

де  $\Delta$  – різниця між питомим приходом і витратою тепла в сушильній камері;

$c = 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$  – теплоємність води у вологому матеріалі при температурі  $t_n = 15^{\circ}\text{C}$ ;

$q_{\text{дон}}$  – питома додаткове підведення тепла в сушильну камеру, кДж/кг води; при роботі сушарки по нормальному сушильному варіанту  $q_{\text{дон}} = 0$ ;

$q_m$  – питома підведення тепла в сушарку транспортними засобами, кДж/кг води; у даному випадку  $q_m = 0$ ;

$q_{\text{м}}$  – питома підведення тепла з висушуваним матеріалом, кДж/кг води [1]:

$$q_{\text{м}} = \frac{G_{\kappa} c_{\text{м}} (t_{\kappa} - t_n)}{W}, \quad (2.23)$$

де  $c_m = 0,712$  кДж/кг·К – теплоємність висушеного матеріалу;  
 $t_n = 15^\circ\text{C}$  – початкова температура матеріалу;  
 $t_k = 90^\circ\text{C}$  – кінцева температура матеріалу (вихідні дані).

Підставивши відповідні значення в рівняння 2.23, отримаємо:

$$q_m = [8,33 \cdot 0,712 \cdot (90 - 15)] / 0,487 = 914 \text{ кДж/кг вологи.}$$

$q_n$  – питомі втрати тепла в навколишнє середовище, кДж/кг вологи;  $q_n = 22,6$  кДж/кг вологи (що відповідає  $\approx 1$  % тепла, що витрачається на випаровування 1 кг води) [1].

Підставивши відповідні значення в рівняння 2.22, отримаємо:

$$\Delta = 4,19 \cdot 15 - 914 - 22,6 = -873,75 \text{ кДж/кг вологи.}$$

Запишемо рівняння робочої лінії сушіння за формулою [1]:

$$\Delta = \frac{I - I_1}{x - x_1} \text{ або } I = I_1 + \Delta(x - x_1). \quad (2.24)$$

Для побудови робочої лінії сушіння на діаграмі I-x необхідно задати координати (I і x) мінімум двох точок.

Координати однієї точки відомі:  $I_1 = 982$  кДж/кг,  $x_1 = 0,0583$  кг/кг. Для знаходження координат другої точки задамося довільним значенням x і визначимо відповідне значення I. Нехай  $x = 0,1$  кг вологи/кг сухого повітря. Тоді отримаємо:  $I = 982 - 873,75 \cdot (0,1 - 0,0583) = 946$  кДж/кг.

Далі проводимо лінію сушіння на діаграмі I-x через дві точки з координатами  $x_1 = 0,0583$ ;  $I_1 = 982$  і  $x = 0,1$ ;  $I = 946$  до перетину з заданим параметром відпрацьованого повітря  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . У точці перетину лінії сушіння і ізотерми  $100^\circ\text{C}$  знаходимо кінцевий вологовміст відпрацьованого повітря  $x_2 = 0,25$  кг/кг (рис.2.3).

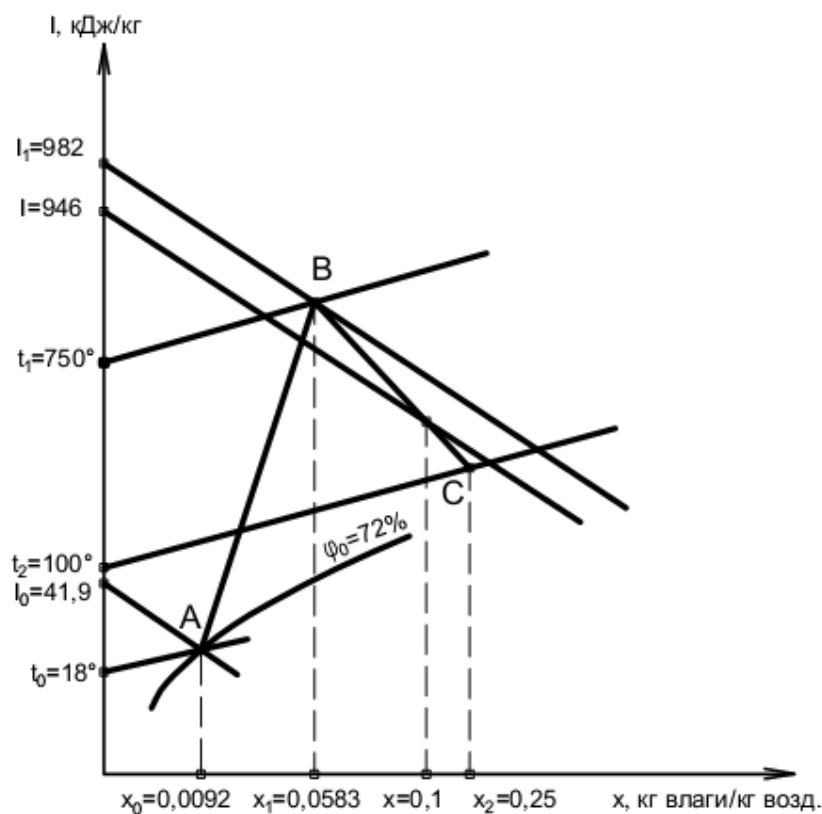


Рисунок 2.3 – Побудова процесу сушіння топковими газами на I-x діаграмі

Витрата сухого газу на сушіння розраховуємо за рівнянням [1]:

$$L_{\text{с.г.}} = \frac{W}{x_2 - x_1}, \quad (2.25)$$

$$L_{\text{с.г.}} = 0,487 / (0,25 - 0,0583) = 2,54 \text{ кг/с.}$$

Витрата сухого повітря на сушку розраховуємо за рівнянням [1]:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}, \quad (2.26)$$

$$L = 0,487 / (0,25 - 0,0092) = 2,02 \text{ кг / с.}$$

Середня температура повітря в сушарці [1]:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (2.27)$$

$$t_{cp} = (750 + 100)/2 = 425^\circ\text{C}.$$

Середній вологовміст повітря в сушарці:

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (2.28)$$

$$x_{cp} = \frac{0,0583 + 0,25}{2} = 0,154 \text{ кг вологи/кг сухого повітря}$$

Середня густина сухого повітря і водяної пари відповідно [1]:

$$\rho_{св.возд.} = \frac{M_{с.в.}}{\nu_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{cp}}, \quad \rho_{в.п.} = \frac{M_{в.п.}}{\nu_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{cp}} \quad (2.29)$$

де  $M_{с.в.} = 29$  – молярна маса сухого повітря, кмоль/кг;

$M_{в.п.} = 18$  – молярна маса водяної пари, кмоль/кг;

$\nu_0$  – молярний об'єм, рівний  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ;

$$\rho_{с.в.} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 425} = 0,506 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{в.п.} = \frac{18}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 425} = 0,314 \text{ кг/м}^3.$$

Середня об'ємна продуктивність за повітрям за рівнянням [1]:

$$V = \frac{L}{\rho_{с.в.}} + \frac{x_{cp} \cdot L}{\rho_{в.п.}}, \quad (2.30)$$

$$V = \frac{2,02}{0,506} + \frac{0,154 \cdot 2,02}{0,314} = 4,98 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Далі розраховуємо (на повний переріз апарату) швидкість початку псевдозрідження за рівнянням [1]:

$$w_{nc} = \frac{Re \cdot \mu_{cp}}{\rho_{cp} \cdot d_3}, \quad (2.31)$$

$$\text{де } Re = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} - \text{критерій Рейнольдса [1];}$$

$$Ar = \frac{d_3^3 \cdot \rho_{cp} \cdot g \cdot \rho}{\mu_{cp}^2} - \text{критерій Архімеда [1].}$$

де  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$  – щільність частинок матеріалу, що висушується (вихідні дані);

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;

$\mu_{cp}$  – в'язкість повітря при середній температурі за рівнянням:

$$\mu_{cp} = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2},$$

$$\mu_{cp} = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + 124}{273 + 425 + 124} \left( \frac{273 + 425}{273} \right)^{3/2} = 34,16 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

де  $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – в'язкість повітря при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$C = 124$  – постійна Сатерленда для повітря;

$$d_3 = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{d_i}} - \text{еквівалентний діаметр полідисперсних частинок матеріалу [1];}$$

$n$  – число фракцій;

$d_i$  – середній ситовий розмір  $i$ -тої фракції, м;

$m_i$  – вміст  $i$ -тої фракції, мас. частки.

Розрахуємо  $d_3$  на підставі вихідних даних про склад фракцій продукту:

$$d_3 = \frac{1}{\frac{0,09}{(0+0,5) \cdot 10^{-3}} + \frac{0,16}{(0,5+1,0) \cdot 10^{-3}} + \frac{0,36}{(1,0+2,5) \cdot 10^{-3}} + \frac{0,34}{(2,5+4,0) \cdot 10^{-3}} + \frac{0,05}{(4,0+0) \cdot 10^{-3}}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Критерій Архімеда:

$$Ar = \frac{(1,1 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0,506 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 10^3}{(34,16 \cdot 10^{-6})^2} = 1,33 \cdot 10^4.$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{1,33 \cdot 10^4}{1400 + 5,22 \sqrt{1,33 \cdot 10^4}} = 6,64.$$

Швидкість початку псевдозрідження за формулою (2.31):

$$w_{nc} = \frac{6,64 \cdot 34,16 \cdot 10^{-6}}{0,506 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}} = 0,41 \text{ м/с.}$$

Верхня межа допустимої швидкості повітря в псевдозрідженому шарі визначається швидкістю вільного витання (виносу) найбільш легких частинок. Цю швидкість визначають за рівнянням [1]:

$$w_{c.в.} = \frac{\mu_{cp}}{d_{\min} \cdot \rho_{cp}} \cdot \left( \frac{Ar_{\min}}{18 + 0,575 \sqrt{Ar_{\min}}} \right), \quad (2.32)$$

де  $d_{\min} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м – найменший діаметр частинок матеріалу.

Критерій Архімеда для частинок KCl  $d_{\min} = 0,5$  мм дорівнює:



$$Ar_{\min} = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0,506 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 10^3}{(34,16 \cdot 10^{-6})^2} = 0,11 \cdot 10^4.$$

Швидкість вільного витання (виносу) з рівняння (2.32):

$$w_{cv} = \frac{34,16 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,506} \cdot \left( \frac{0,11 \cdot 10^4}{18 + 0,575 \sqrt{0,11 \cdot 10^4}} \right) = 4,0 \text{ м/с}.$$

Робочу швидкість сушильного агента вибирають в межах від  $w_{nc}$  до  $w_{cv}$ . Ця швидкість залежить від граничного числа псевдозрідження  $K_{np} = w_{cv} / w_{nc}$ ; при  $K_{np} = w_{cv} / w_{nc}$  більше 40–50 робоче число псевдозрідження  $K_w = w / w_{nc}$  рекомендується вибирати в інтервалі від 3 до 7; при  $K_{np} = w_{cv} / w_{nc}$  менше 20–30 значення  $K_w = w / w_{nc}$  можна вибирати в інтервалі від 1,5 до 3 [1].

$$K_{np} = \frac{4,0}{0,41} = 9,8.$$

Прийmemo  $K_w = 2,8$ . Тоді робоча швидкість сушильного агента:

$$w = K_w \cdot w_{nc}, \quad (2.33)$$

$$w = 2,8 \cdot 0,41 = 1,15 \text{ / с}.$$

Оскільки швидкість витання часток більше робочої швидкості повітря, можна використовувати апарат циліндричної форми.

Діаметр сушарки визначаємо з рівняння [1]:

$$w = \frac{V}{0,785 \cdot d^2}. \quad (2.34)$$

Звідки:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.35)$$

$$d = \sqrt{\frac{4,98}{0,785 \cdot 1,15}} = 2,348 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр апарату  $d = 2400$  мм.

Максимальний діаметр частинок – 4,0 мм.

Швидкість повітря біля газорозподільної решітки:

$$w_{\text{реш}} = w \cdot (273 + t_1) / (273 + t_2) = 1,15 \cdot (273 + 750) / (273 + 100) = 3,154 \text{ м/с.}$$

Швидкість повітря в отворах решітки:

$$w_{\text{от}} = w_{\text{реш}} / F_c = 3,154 / 0,03 = 105,13 \text{ м/с,}$$

де  $F_c$  – частка живого перетину решітки, яка приймається в інтервалі від 0,02 до 0,1 [1]. Приймаємо  $F_c = 0,03$ .

Швидкість псевдозрідження частинок максимального розміру:

$$w_{\text{кр.от}} = w_{\text{от}} / K_w = 105,13 / 2,8 = 37,5 \text{ м/с,}$$

де  $K_w = 2,8$  – прийняте робоче число псевдозрідження.

Критерій Архімеда для частинок максимального розміру:

$$Ar_{\text{max}} = \frac{(4,0 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0,506 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 10^3}{(34,16 \cdot 10^{-6})^2} = 54,45 \cdot 10^4.$$

Критерій Рейнольдса для частинок максимального розміру:

$$Re_{\max} = \frac{54,45 \cdot 10^4}{1400 + 5,22 \sqrt{54,45 \cdot 10^4}} = 103,67 .$$

Швидкість газу, необхідна для зрідження частинок максимального розміру:

$$w_{кр(\max)} = \frac{103,67 \cdot 34,16 \cdot 10^{-6}}{0,506 \cdot 4,0 \cdot 10^{-3}} = 1,75 \text{ м/с} .$$

Оскільки  $v_{кр(от)} = 37,5 \text{ м/с} > v_{кр(\max)} = 1,75 \text{ м/с}$ , буде мати місце псевдозрідження частинок максимального розміру.

У разі видалення поверхневої вологи (перший період сушіння) було встановлено, що висота псевдозрідженого шару  $H$  повинна бути в 4 рази більше висоти зони гідродинамічної стабілізації шару  $H_{ст}$ , тобто  $H = 4H_{ст}$ . Висота  $H_{ст}$  пов'язана з діаметром отворів розподільчих решіток  $d_0$  співвідношенням  $H_{ст} \approx 20d_0$ ; отже,  $H \approx 80d_0$ .

Діаметр отворів розподільчих решіток вибирають з ряду нормальних розмірів, встановленого ГОСТ 6636-69 (в мм). Вибираємо  $d_0 = 2,5 \text{ мм}$ . Тоді:

$$H = 80 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ м} .$$

Число отворів в розподільчій решітці за формулою [1]:

$$n = \frac{4SF_s}{\pi d_0^2} = \frac{d^2 F_c}{d_0^2} , \quad (2.36)$$

де  $S$  – перетин розподільчої решітки, чисельно дорівнює перерізу сушарки,  $\text{м}^2$ ;  $F_c = 0,03$  – прийнята частка живого перетину.

Знайдемо  $n$ :

$$n = \frac{2,4^2 \cdot 0,03}{0,0025^2} = 27648.$$

Рекомендується застосовувати розташування отворів в решітці по кутах рівносторонніх трикутників. При цьому поперечний крок  $t'$  і поздовжній крок  $t''$  обчислимо по співвідношенням:

$$t' = 0,95 \cdot d_0 \cdot F_c^{-0,5}; \quad (2.37)$$

$$t' = 0,95 \cdot 0,0025 \cdot 0,03^{-0,5} = 0,014 \text{ м.}$$

$$t'' = 0,866 \cdot t'; \quad (2.38)$$

$$t'' = 0,866 \cdot 0,014 = 0,012 \text{ м.}$$

Висоту сепарації простору сушарки  $H_c$  приймаємо в 4–6 разів більше висоти псевдозрідженого шару:

$$H_c = 5H = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ м.}$$

Загальна висота апарату (над решіткою):

$$H + H_c = 0,2 + 1 = 1,2 \text{ м.}$$

## 2.5 Гідравлічні розрахунки

Основну частку загального гідравлічного опору сушарки  $\Delta P$  складають гідравлічний опір псевдозрідженого шару  $\Delta P_{пс}$  і решітки  $\Delta P_p$ .

За формулою [1]:

$$\Delta P = \Delta P_{nc} + \Delta P_p. \quad (2.39)$$

Величину  $\Delta P_{nc}$  знаходимо за рівнянням [1]:

$$\Delta P_{nc} = \rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot H, \quad (2.40)$$

де  $\varepsilon$  – порозність псевдозрідженого шару; знаходимо за формулою:

$$\varepsilon = \left[ (18\text{Re} + 0,36\text{Re}^2) / Ar \right]^{0,21}. \quad (2.41)$$

Критерій Рейнольдса для робочого режиму:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_s \cdot \rho_{cp}}{\mu_{cp}},$$

де  $w$  – робоча швидкість сушильного агента.

$$\text{Re} = \frac{1,15 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,506}{34,16 \cdot 10^{-6}} = 18,74.$$

Тоді:

$$\varepsilon = \left[ \frac{18 \cdot 18,74 + 0,36 \cdot 18,74^2}{1,33 \cdot 10^4} \right]^{0,21} = 0,5 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Гідравлічний опір псевдозрідженим шаром  $\Delta P_{nc}$  за формулою (2.40):

$$\Delta P_{nc} = 2 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,5) \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 1962 \text{ Па}.$$

Для задовільного розподілу газового потоку необхідно дотримуватися

певного співвідношення між гідравлічними опорами шару і решітки. Мінімально допустимий гідравлічний опір решітки  $\Delta P_{p_{\min}}$  за рівнянням [1]:

$$\Delta P_{p_{\min}} = \frac{\Delta P_{nc} \cdot K_w^2 (\varepsilon - \varepsilon_0)}{(K_w^2 - 1)(1 - \varepsilon_0)}. \quad (2.42)$$

Мінімально допустимий гідравлічний опір решітки при порозності нерухомого шару кулястих частинок  $\varepsilon_0 = 0,4$ :

$$\Delta P_{p_{\min}} = \frac{1962 \cdot 2,8^2 (0,5 - 0,4)}{(2,8^2 - 1)(1 - 0,4)} = 375 \text{ Па.}$$

Гідравлічний опір обраної решітки за рівнянням [1]:

$$\Delta P_p = \xi \cdot \left( \frac{w}{F_c} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{cp}}{2}. \quad (2.43)$$

Прийmemo коефіцієнт опору решітки  $\xi = 1,75$  [1]:

$$\Delta P_p = 1,75 \cdot \left( \frac{1,15}{0,03} \right)^2 \cdot \frac{0,506}{2} = 651 \text{ Па.}$$

Значення  $\Delta P_p = 651$  Па перевищує  $\Delta P_{p_{\min}} = 375$  Па. В іншому випадку необхідно було б вибрати іншу частку живого перетину решітки.

Загальний гідравлічний опір сушарки відповідно до рівняння (2.39) дорівнює:

$$\Delta P = 1962 + 651 = 2613 \text{ Па.}$$

## 2.6 Вибір допоміжного обладнання

Для першого етапу очищення вибрано циклонний пиловловлювач, зокрема, найбільш ефективний циклон ЦН-15 (ЦН – циклон НИИОГАЗ; 15 – кут нахилу вхідного патрубку щодо горизонталі, градусів). Цей вибір обумовлений високою ефективністю даного циклону у вилученні пиловмісних часток з газового потоку.

Циклон ЦН-15 розроблений Інститутом Науково-Дослідницького Об'єднання Газової Промисловості (НИИОГАЗ) і вирізняється своєю конструкцією, спеціально адаптованою для ефективного видалення пилу з газового потоку. Основні характеристики циклону ЦН-15 включають в себе кут нахилу вхідного патрубку щодо горизонталі в 15 градусів.

Цей циклон може виявитися важливим компонентом системи очищення повітря, забезпечуючи ефективне усунення пиловмісних часток та покращення якості газового потоку.

Визначаємо діаметр циклону за умовною швидкістю газу  $w_y$  за формулою:

$$D_u = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w_y}}, \text{ м} \quad (2.44)$$

де  $V = 4,98 \text{ м}^3/\text{с}$  – об'ємна витрата газів.

Величину  $w_y$  визначимо, виходячи зі значення співвідношення перепаду тиску  $\Delta P$  (в  $\text{Н}/\text{м}^2$ ) до густини газу  $\rho_t$  (в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ), яким попередньо задаємося. Для циклонів ЦН-15 це співвідношення знаходиться в межах 550–750. Прийmemo  $\Delta P / \rho_t = 740$ . Коефіцієнт опору циклону  $\xi = 160$ .

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{w_y^2 \cdot \rho}{2}, \quad (2.45)$$

$$w_y = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\xi \cdot \rho_t}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 740}{160}} = 3,04 \text{ м/с}. \quad (2.46)$$

де  $\rho_t$  – густина газу на виході з сушарки при  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  за формулою:

$$\rho_t = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{273+100} = 0,95 \text{ кг/м}^3.$$

Діаметр циклону за формулою (2.44):

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{4,98}{0,785 \cdot 3,04}} = 1,44 \text{ м}.$$

Циклон діаметром більше 1 м малоефективний. Тому замість одного обраного циклону приймаємо групу з двох. Коефіцієнт гідравлічного опору групового циклону визначаємо за формулою:

$$\xi_{\text{ц}}^{\text{гп}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \xi_{500}^{\text{г}} + K_3 = 1 \cdot 0,86 \cdot 150 + 28 = 157, \quad (2.47)$$

де значення коефіцієнтів в цій формулі становлять:

$K_1 = 1$  – поправочний коефіцієнт на діаметр циклону;

$K_2 = 0,86$  – коефіцієнт на запиленість газу;

$K_3 = 28$  – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов'язаних з груповим прямокутним компонуванням циклонів;

$\xi_{500}^{\text{г}} = 150$  – коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклону діаметром 500 мм.

$$\Delta P = \frac{\xi_{\text{ц}}^{\text{гп}} \cdot \rho_t \cdot w_y^2}{2}, \quad (2.48)$$

$$\Delta P = \frac{157 \cdot 0,95 \cdot 3,04^2}{2} = 689 \text{ Па}.$$



Приймаємо діаметр кожного циклону рівним 900 мм. Витрата газу через такий циклон  $Q_{ц}$  визначаємо за рівнянням:

$$q_{ц} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_y = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\xi_{ц}^{zp} \cdot \rho_t}}, \quad (2.49)$$

$$q_{ц} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_y = \frac{3,14 \cdot 0,9^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 689}{157 \cdot 0,95}} = 2,3.$$

Кількість циклонів у групі:

$$n = \frac{V}{q_{ц}} = \frac{4,98}{2,3} = 2,16. \quad (2.50)$$

Приймаємо по каталогу циклон групового виконання, що складається з двох елементів: ЦН-15-900×2УП з камерою очищеного газу у вигляді «равлика» і пірамідальним бункером.

Розрахунок рукавного фільтру зводиться до визначення мінімальної поверхні фільтрації  $F$  за рівнянням:

$$F = \frac{V}{V_{уд}^0}, \quad (2.51)$$

де  $V = 4,98 \text{ м}^3/\text{с}$  – об'ємна витрата газів;

$V_{уд}^0$  – витрата запиленого газу за нормальних умов через  $1 \text{ м}^2$  поверхні тканини (питома витрата),  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Приймаємо  $V_{уд}^0 = 50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

Об'ємна витрата газу  $V_{уд}$  при температурі  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  становить:

$$V_{уд} = \frac{V_{уд}^0 \cdot \rho_0}{\rho_{95}} = \frac{50 \cdot 1,293}{0,96} = 67,4 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), \quad (2.52)$$

де  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря за нормальних умов;  
 $\rho_{95}$  – густина повітря на вході в рукавний фільтр.

Приймаємо, що у груповому циклоні температура запиленого повітря знизиться на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  і складе  $100 - 5 = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тоді при вході в рукавний фільтр густина повітря  $\rho_{95}$  за формулою:

$$\rho_{95} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{273+95} = 0,96 \text{ кг/м}^3$$

Тоді загальна поверхня фільтрації дорівнює (з урахуванням частки підсмоктується повітря, що дорівнює 1,25):

$$\rho_{95} = \frac{29}{22,4} \cdot \frac{273}{273+95} = 0,96 \text{ кг/м}^3.$$

Застосовуємо для проектованої установки фільтр рукавний каркасний з імпульсною продувкою марки ФРКИ-360-П8-3-3 (рис. 2.8) з активною поверхнею фільтрації  $360 \text{ м}^2$  (число рукавів – 288, висота рукава – 3 м, число секцій – 8, маса – 10,5 т).

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір конструкційних матеріалів [11, 12]

Вірний вибір матеріалів та технології виготовлення апаратів впливає на подовження терміну їх надійної експлуатації, зменшення складнощів у виробництві і вартості. Визначення оптимальних матеріалів та заготовок залежить від особливостей виробництва, конструкційних вимог, умов експлуатації та технічних характеристик, а також економічної вигідності. Особливу увагу слід приділити вибору матеріалів для виробничих процесів, які відбуваються в агресивних середовищах, природа яких вимагає аналізу їхньої характеристики, концентрації та температурних параметрів.

Належне врахування вищезазначених факторів сприяє оптимізації вибору матеріалів та технологій для виготовлення апаратів, що в свою чергу гарантує їх ефективну роботу протягом тривалого періоду, а також дозволяє здійснити виробництво з економічно обґрунтованими витратами.

Визначення конструкційних матеріалів базується на ретельному аналізі умов експлуатації обладнання та ключових параметрів процесу, включаючи температуру, тиск, концентрацію робочих середовищ і їх агресивність. Враховуючи механічні властивості, хімічну стійкість, теплопровідність, технологічність виготовлення та вартість матеріалів, важливо також враховувати їх здатність до якісного зварювання.

Здатність матеріалу до ефективного зварювання є ключовим аспектом у виготовленні більшості хімічного обладнання, де нероз'ємні з'єднання забезпечуються зварюванням. Оскільки хімічна промисловість використовує агресивні речовини, корозійна стійкість матеріалів стає визначальним фактором при виборі матеріалу для обладнання. Цей аспект має безпосередній вплив на тривалість служби хімічного обладнання, забезпечуючи його надійність та стійкість в умовах використання агресивних середовищ.

З метою забезпечення високої якості та ефективної технології виготовлення апаратів, враховуючи температурні параметри процесу сушіння

(до 750°C), тиск у межах апарату (до 0,1 МПа) та помірну агресивність речовин, визначаємо низьколеговану сталь як основний матеріал для виготовлення апарату киплячого шару.

Сталь 16ГС є низьколеговою конструкційною сталлю, спеціально призначеною для виготовлення зварних конструкцій. Вона широко використовується у виробництві апаратів, фланців, днищ, обічайок та судів, а її постачання здійснюється у формі сталевих листів. Основні характеристики включають в себе відмінну зварюваність, високу міцність та ударну в'язкість. Ця сталь придатна для використання в інтервалі температур від -70°C до +775°C. Сталь 16ГС легко деформуються як в гарячому, так і в холодному стані, відзначаються високою оброблюваністю при різанні та здатністю до зварювання різними методами. Ці властивості роблять їх важливим матеріалом для виробництва обладнання, яке піддається різноманітним механічним та термічним впливам у процесі експлуатації.

Сталь Ст3 – це конструкційна вуглецева сталь стандартної якості. Вона широко використовується для виготовлення збірників, насосів, несучих елементів зварних і незварних конструкцій, які працюють в широкому діапазоні температур від -40°C до +725°C. Сталь Ст3 добре зварюються усіма видами зварювання, і вони не схильні до відпускнуї крихкості. Цей матеріал доступний у формі листового та фасонного прокату.

Сталь 35Х – це конструкційна легрована сталь, яка використовується для виготовлення осей, валів, шестерень та інших поліпшених деталей. Ця сталь має обмежену здатність до зварювання та схильна до відпускнуї крихкості. Вона застосовується в тих випадках, коли важливі висока міцність та інші механічні властивості.

Пароніт – це листовий матеріал для прокладок, який виготовляється методом пресування асбокаучукової суміші, що містить азбест, каучук і порошкові інгредієнти. Цей матеріал широко використовується для створення ефективних ущільнювачів у фланцевих з'єднаннях. Пароніт забезпечує надійність і герметичність в з'єднаннях, де важливо уникнути витoku рідин або газів.

### 3.2 Розрахунки на міцність та стійкість

У разі обігріву гарячими газами при  $t > 250^{\circ}\text{C}$  розрахункову температуру стінки і внутрішніх деталей приймають рівною температурі середовища, збільшеної на  $50^{\circ}\text{C}$ :

$$t_R = t_c + 50^{\circ}\text{C} = 425 + 50 = 475^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

де  $t_c = (t_1 + t_2)/2 = (750 + 100)/2 = 425^{\circ}\text{C}$  – середня температура середовища (суміші топкових газів з повітрям) в апараті.

Розрахунковий внутрішній тиск в апараті – це тиск, на який проводиться розрахунок міцності структурних елементів при максимальних температурних умовах експлуатації. Зазвичай розрахунковий тиск приймається на рівні робочого тиску або трошки вище. У даному випадку ми встановлюємо розрахунковий тиск в апараті на рівні  $0,1$  МПа для забезпечення надійності його елементів та стінок при оптимальних температурних умовах.

Нормативне напруження, що допускається для матеріалу корпусу сушарки 16ГС: при температурі  $20^{\circ}\text{C}$   $[\sigma]_{20}^* = 184$  МПа, при температурі  $475^{\circ}\text{C}$   $[\sigma]_{475}^* = 129$  МПа.

Напруження, що допускаються  $[\sigma] = \eta \cdot [\sigma]^*$ , де  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує вид заготовки. Для листового прокату  $\eta = 1$  [7]. Тоді напруження, що допускається: при  $20^{\circ}\text{C}$  –  $[\sigma]_{20} = 1 \cdot 184 = 184$  МПа; при  $475^{\circ}\text{C}$  –  $[\sigma] = 1 \cdot 129 = 129$  МПа.

Межа плинності для сталі 16ГС при температурі  $20^{\circ}\text{C}$   $\sigma_{T20} = 240$  МПа.

Напруга, що допускається при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_H = \sigma_{T20}/1,1 = 240/1,1 = 218 \text{ МПа.} \quad (3.2)$$

Пробний тиск при гідровипробуванні корпусу сушарки при робочому тиску всередині апарату менше  $0,5$  МПа:

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \\ 0,2 \end{array} \right\} \text{МПа}, \quad (3.3)$$

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 0,1 \cdot \frac{184}{129} \\ 0,2 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,22 \\ 0,2 \end{array} \right\} = 0,22 \text{ МПа}.$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу корпусу 16 ГС при 20 °С і розрахунковій температурі  $t = 475$  °С відповідно:

$$E_{20} = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа} ; E = 1,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Надбавку до розрахункових товщин визначаємо за формулою:

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3.4)$$

де  $C_1$  – надбавка для компенсації корозії та ерозії, мм;

$C_2 = 0,8$  мм – прибавка для компенсації мінусового допуску для листа товщиною понад 7,5 мм до 10 мм включно;

$C_3$  – технологічна надбавка, яка передбачає компенсацію утонення стінки апарату при технологічних операціях (витяжці, згинанні, штампуванні тощо) і залежить від технології виготовлення. Приймаємо  $C_3 = 0$ .

Надбавку для компенсації корозії (ерозію не враховуємо) визначаємо за формулою:

$$C_1 = P \cdot \tau = 0,1 \cdot 15 = 1,5 \text{ мм} \quad (3.5)$$

де  $P = 0,1$  мм/рік – проникність матеріалу (16ГС);

$\tau = 15$  років – термін служби апарату відповідно до завдання на проектування.

Тоді за формулою (3.4) отримуємо:

$$C = 1,5 + 0,8 + 0 = 2,3 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт міцності зварних швів  $\varphi = 1,0$  – для стикового або таврового зварювання з двостороннім проваром, виконаного напівавтоматичним способом. Довжина контрольованих швів 100 % від загальної довжини швів.

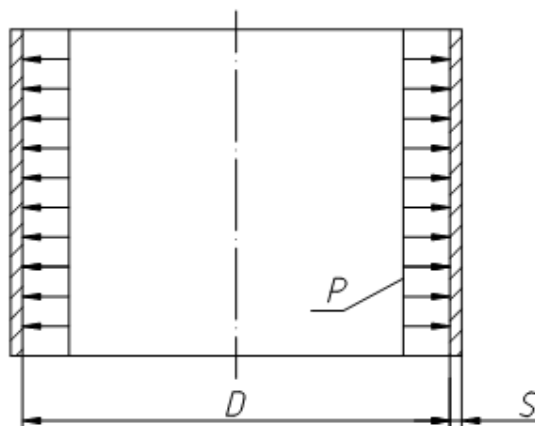


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки апарату

Розрахункова (номінальна) товщина стінки обичайки корпусу апарату, навантаженого внутрішнім надлишковим тиском, визначається за формулою:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P}; \\ \frac{P_{np} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_u - P_{np}} \end{array} \right\}, \quad (3.6)$$

де  $D = 2400 \text{ мм} = 2,4 \text{ м}$  – внутрішній діаметр обичайки корпусу апарату.

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,1 \cdot 2,4}{2 \cdot 1 \cdot 129 - 0,1} = 0,00093 \\ \frac{0,22 \cdot 2,4}{2 \cdot 1 \cdot 218 - 0,22} = 0,0012 \end{array} \right\} = 0,0012 \text{ м} = 1,2 \text{ мм}$$

Виходячи з конструктивних і технологічних міркувань мінімальну товщину стінки (без надбавки на корозію) вальцьованих циліндричних обичайок діаметром від 2000 мм до 4000 мм рекомендується приймати не менше 5 мм. Приймаємо  $S_p = 5$  мм.

Виконавчу товщину стінки обичайки корпусу апарату визначаємо за формулою:

$$S \geq S_p + C, \quad (3.7)$$

$$S \geq 5,0 + 2,3 = 7,3 \text{ мм} .$$

Приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки корпусу апарату  $S = 8$  мм.

Допустимий внутрішній тиск для обичайки корпусу апарату товщиною  $S = 8$  мм визначаємо:

- в робочих умовах за формулою:

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 129 \cdot (8 - 2,3)}{2400 + (8 - 2,3)} = 0,61 \text{ МПа} \quad (3.8)$$

- в умовах гідравлічних випробувань за формулою:

$$[P]_{np} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{np} \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 218 \cdot (8 - 2,3)}{2400 + (8 - 2,3)} = 1,03 \text{ МПа} \quad (3.9)$$

Таким чином  $P = 0,1 \text{ МПа} < [P] = 0,61 \text{ МПа}$ ;

$P_{np} = 0,22 \text{ МПа} < [P]_{np} = 1,03 \text{ МПа}$ , тобто міцність обичайки сушарки забезпечується як в робочому стані, так і при гідравлічних випробуваннях.

Перевіряємо умову застосовності розрахункових формул для обичайок  $D \geq 2000$  мм:



$$\frac{S-C}{D_p} \leq 0,1 \quad (3.10)$$

$$\frac{8-2,3}{2400} = 0,0024,$$

що менше 0,1 – умову застосовності формул виконано.

Сушарка зверху закрита конічним невідбортованим днищем (кришкою) з кутом при вершині  $2\alpha = 120^\circ$ , привареною до обичайки корпусу сушарки. Матеріал кришки – сталь 16ГС.

Розрахункова (номінальна) товщина стінки кришки апарату визначається за формулою:

$$S_{кр} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}; \\ \frac{P_{np} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{u} - P_{np}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \end{array} \right\}, \quad (3.11)$$

де  $\alpha = 60^\circ$  – половина кута при вершині конуса.

$$S_{кр} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,1 \cdot 2,4}{2 \cdot 1 \cdot 129 - 0,1} \cdot \frac{1}{\cos 60^\circ} = 0,0019 \\ \frac{0,22 \cdot 2,4}{2 \cdot 1 \cdot 218 - 0,22} \cdot \frac{1}{\cos 60^\circ} = 0,0024 \end{array} \right\} = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм}$$

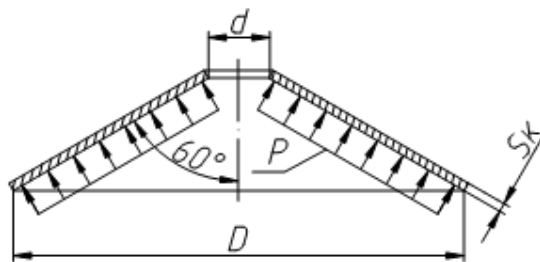


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема конічного днища апарату

З конструктивних і технологічних міркувань приймаємо виконавчу товщину стінки кришки апарату рівній товщині стінки обичайки апарату:

$$S_k = S = 8 \text{ мм.}$$

Допустимий внутрішній тиск для кришки товщиною  $S_k = 8$  мм визначаємо:

- в робочих умовах за формулою:

$$[P] = \frac{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] \cdot (S_k - C) \cdot \cos \alpha}{D + (S_k - C) \cdot \cos \alpha} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 129 \cdot (8 - 2,3) \cdot \cos 60^\circ}{2400 + (8 - 2,3) \cdot \cos 60^\circ} = 0,31 \text{ МПа} \quad (3.12)$$

- в умовах гідравлічних випробувань за формулою:

$$[P]_{np} = \frac{2 \cdot \phi \cdot [\sigma]_{II} \cdot (S_k - C) \cdot \cos \alpha}{D + (S_k - C) \cdot \cos \alpha} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 218 \cdot (8 - 2,3) \cdot \cos 60^\circ}{2400 + (8 - 2,3) \cdot \cos 60^\circ} = 0,52 \text{ МПа} \quad (3.13)$$

Таким чином  $P = 0,1 \text{ МПа} < [P] = 0,31 \text{ МПа}$ ;

$P_{np} = 0,22 \text{ МПа} < [P]_{np} = 0,52 \text{ МПа}$ , тобто міцність кришки сушарки забезпечується як в робочому стані, так і при гідравлічних випробуваннях.

Перевіряємо умову застосовності розрахункових формул:

$$\frac{S_k - C}{D_p} \leq \frac{0,1}{\cos \alpha} \quad (3.14)$$

$$\frac{8 - 2,3}{2400} = 0,024 \leq \frac{0,1}{\cos 60^\circ} = 0,2,$$

Умову застосовності формул виконано.

Остаточно приймаємо конічне невідбортоване днище (кришку) 120-2400-8 із внутрішнім діаметром 2400 мм, товщиною 8 мм і з кутом при вершині  $120^\circ$ .

Випускні лапи для вертикальних сталевих апаратів зазвичай обирають залежно від їхнього розташування та експлуатаційних умов. У випадках, коли апарат розміщують всередині приміщення, часто використовуються стійки. З іншого боку, якщо апарат встановлюється між перекриттями або на спеціальних конструкціях, то оптимальним вибором є підвісні лапи.

Зараз обрано тип опори – лапи, і варто зазначити, що усі опори для сталевих зварних апаратів підлягають стандартизації. Залежно від товщини стінки корпусу апарата, лапи можуть бути приварені безпосередньо до корпусу чи до накладного листа.

У випадках, коли використовується накладний лист, він зварюється до корпусу апарата суцільним швом. Важливо враховувати, що матеріал накладного листа повинен відповідати умовам експлуатації. Якщо опори виготовлені з вуглецевої сталі, а сам апарат – з корозійностійкої сталі, накладні листи мають бути виготовлені зі сталі тієї ж марки, що і корпус апарата.

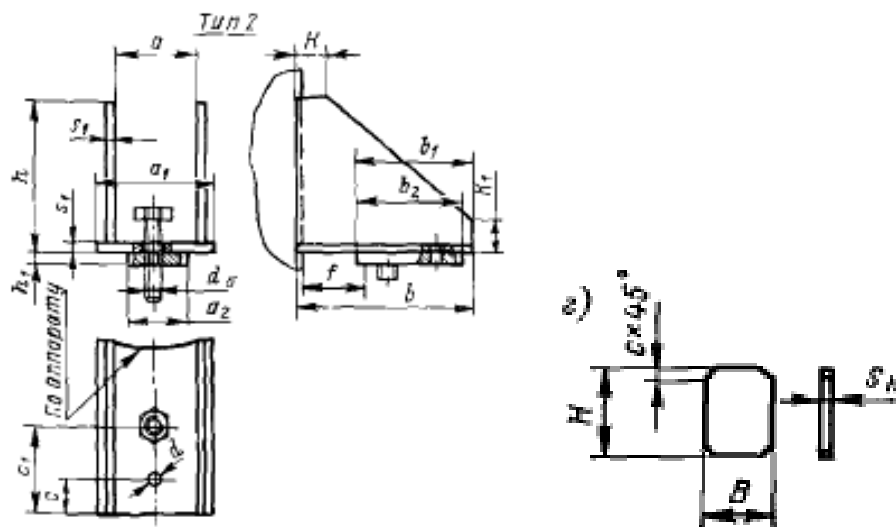


Рисунок 3.3 – Конструкція стандартної опори (лапи) і накладного листа

Число опор визначається розрахунком і конструктивними дослідженнями: лап має бути не менше двох, стійок – не менш трьох.

Маса сушарки:

$$M_c = (M_o + M_\delta + M_{кр} + M_\phi) \cdot 1,2, \quad (3.15)$$

де  $M_o$  – маса обичайки сушарки, кг;

$M_\delta$  – маса днища сушарки, кг;

$M_{кр}$  – маса кришки сушарки, кг;

$M_\phi$  – маса фланців, кг;

1,2 – коефіцієнт, що враховує масу неврахованих пристроїв (люків, штуцерів, газорозподільної решітки, кріпильних виробів і т. п.).

Маса обичайки сушарки:

$$M_o = \pi \cdot (D + S) \cdot S \cdot l_{об} \cdot \rho; \quad (3.16)$$

де  $l_{об} = 2,6$  м – загальна висота циліндричної обичайки;

$\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup> – щільність сталі.

Маса кришки (конічного днища) сушарки:  $M_{кр} = 328,6$  кг .

Маса плоского днища сушарки:  $M_\delta = 443,9$  кг .

Маса фланців сушарки:

$$M_\phi = M_{\phi 1} + M_{\phi 2} = 502,2 + 503,9 = 1006,1 \text{ кг} .$$

Маса сушарки по формулі (3.15):

$$M_c = (1235 + 328,6 + 443,9 + 1006,1) \cdot 1,2 = 3616 \text{ кг} .$$

Тоді сила тяжіння апарату, яка передається опорам, дорівнює:

$$P = M_c \cdot g = 3616 \cdot 9,81 = 35476 = 35,48 \text{кН} , \quad (3.17)$$

де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Навантаження на одну опору визначимо за формулою:

$$Q = \frac{\lambda_1 \cdot P}{Z} + \frac{\lambda_2 \cdot M}{D + 2 \cdot e} , \quad (3.18)$$

де  $Z = 4$  – число опор;

$\lambda_1 = 2$  – коефіцієнт, що залежить від числа опор.

Приймаємо перекидаючий момент  $M$  рівним нулю, тоді:

$$Q = \frac{2 \cdot 35,48}{4} = 17,74 \text{кН} .$$

Вибираємо стандартну опору (лапу) з допустимим навантаженням  $Q = 25,0 \text{ кН}$  типу 2 для апаратів з теплоізоляцією: опора 2-2500.

## 4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

### 4.1 Обґрунтування компоновання основного та допоміжного обладнання [14]

Правильне розміщення обладнання є дуже важливим. Саме компоновання має безпосередній вплив на ключові аспекти безпечної і ефективної експлуатації промислових об'єктів. Перш за все, слід ретельно розробити процес виробництва добрив і визначити оптимальний порядок операцій та послідовність роботи установки. Важливо розміщувати обладнання так, щоб забезпечити ефективність цих операцій.

Установку слід компоувати так, щоб забезпечити належну вентиляцію, доступ до систем пожежогасіння, дотримання вимог щодо уникнення викидів та можливостей для рятування в разі аварійних ситуацій. Забезпечення можливості технічного контролю та обслуговування обладнання – це важливий аспект. Обладнання повинно бути розташовано так, щоб фахівці могли легко здійснювати інспекції, обслуговування та ремонт в разі необхідності.

Оптимізація використання простору може зменшити витрати на будівництво та експлуатацію. Розташування обладнання повинно дозволити максимально використовувати наявний простір. Важливо враховувати економічні аспекти при компованні обладнання. Оптимізація розташування обладнання і систем підйому/транспортування може зменшити витрати на будівництво та експлуатацію. При компованні обладнання слід думати про спрощення процесів та мінімізацію зайвих операцій. Це може покращити продуктивність та знизити витрати.

Розміщення обладнання слід планувати з урахуванням можливостей постачання матеріалів та транспортування виробленої продукції.

За функціональним призначенням промислові будівлі поділяють на декілька категорій в залежності від їхнього призначення та функціональних завдань:

1. Виробничі будівлі. Ці будівлі призначені для виробництва готової продукції або напівфабрикатів. Вони можуть включати в себе цехи, лінії виробництва, обладнання та приміщення для виробничого процесу.

2. Підсобно-виробничі будівлі. Ця категорія включає в себе будівлі для експериментів, інструментальні майстерні, ремонтні майстерні та інші приміщення, які служать для підтримки виробничого процесу.

3. Енергетичні будівлі. Сюди входять будівлі та споруди, призначені для енергопостачання підприємства, такі як котельні, теплоелектроцентрали (ТЕЦ), компресорні станції та інші енергетичні об'єкти.

4. Складські та транспортні будівлі. Ці споруди використовуються для зберігання сировини, готової продукції, транспортування товарів та інших логістичних функцій.

5. Санітарно-технічні будівлі. Сюди входять насосні станції, очисні споруди та інші об'єкти, які служать для забезпечення санітарних та технічних потреб.

6. Допоміжні будівлі. Ця категорія включає в себе приміщення для керівництва підприємством, конструкторські бюро, медичні пункти та навчальні приміщення.

Закритий варіант компоновання цеху хлориду калію вказує на те, що система використовується для повторного використання та рециркуляції реагентів та вихідних матеріалів, а також для управління та зменшення викидів в атмосферу. Закритий процес дозволяє оптимізувати використання ресурсів і зменшує негативний вплив виробництва на навколишнє середовище.

Закритий процес дозволяє зберігати та повторно використовувати реагенти, що використовуються у виробництві. Це сприяє зменшенню витрат та впливу на навколишнє середовище. Система включає в себе заходи для зменшення викидів газів і рідких стічних вод у навколишнє середовище. Застосування технологій очищення та фільтрації допомагає забезпечити додержання стандартів екологічної безпеки.

Введення систем моніторингу для вимірювання та контролю основних параметрів процесу, таких як температура, тиск, концентрація реагентів і

продуктів, допомагає підтримувати ефективність і безпеку процесу. Методи обробки та використання відходів дозволяють зменшити відходи та оптимізувати їх вторинне використання або видалення.

Закритий варіант компоювання може включати заходи для оптимізації енергоспоживання та зменшення витрат енергії у виробництві. Ці заходи спрямовані на створення більш екологічно чистого та ефективного процесу виробництва хлориду калію.

#### **4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [15, 16]**

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.

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.** 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 апарата



встановлюється на фундамент. Цей спосіб дозволяє піднімати апарати значно більшої маси, в порівнянні з вантажопідйомністю монтажних кранів або механізмів.

**3. Метод витискання** є варіацією методу обертання навколо шарніра. У цьому випадку штовхачі прикріплені до корпусу апарата 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 апарата на фундамент або спеціальну опорну металоконструкцію. Ця операція може виконуватися різними механізмами, такими як мостові крани, тельфери, електроталі, автокрани, щогли тощо. У випадку відсутності вказаних 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°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°, 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.

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:

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 контрольні-вимірні 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 трубну обв'язку, оглядове скло, кришки люків, форсунки, кришку апарата, верхню та середню секцію апарата, а також перфоровану газорозподільчу решітку. Після демонтування 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 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

### 5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [17]

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.

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 зупинити 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 та зміною температури теплоносія.

## **5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [18]**

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).

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.

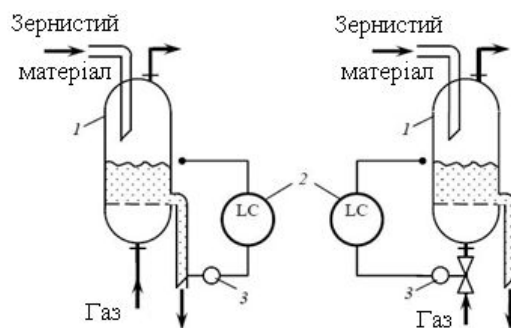


Рисунок 5.1 – Регулювання рівня киплячого шару:

а) відведенням гранульованого матеріалу; б) зміною витрати газу;

1 – апарат з киплячим шаром; 2 – регулятор рівня; 3 – регулюючий орган

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.

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 ДОВКІЛЛЯ

### 6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [19]

Вимоги безпеки при роботі з хлористим калієм зазначені в ГОСТ 4568-95 «Калій хлористий. Технічні вимоги». Хлористий калій за ступенем впливу на організм як помірно небезпечна речовина відноситься до 3-го класу небезпеки за ГОСТ 12.1.007-76. Переважно агрегатний стан в умовах виробництва – аерозоль. Відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 «Загальні санітарні вимоги до повітря робочої зони» гранично допустима концентрація хлористого калію в повітрі робочої зони – 5 мг/м<sup>3</sup>, в атмосферному повітрі населених місць – 0,1 мг/м<sup>3</sup>. Гранично допустима концентрація хлористого калію в ґрунті – 560 мг/кг. Пилоподібні частки, потрапляючи на шкірні рани, погіршують їх загоєння. На неушкоджену шкіру хлористий калій шкідливого впливу не робить. Хлористий калій не утворює токсичних сполук у повітряному середовищі, негорючий, пожежо- та вибухобезпечний. Роботи з хлористим калієм є радіаційно безпечними.

До робочої зони можуть потрапляти шкідливі речовини (природний газ з топки, пил при порушенні герметичності обладнання і трубопроводів), а на робочий персонал негативний вплив можуть надавати небезпечні виробничі фактори відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ:

- наявність рухомих машин і механізмів;
- відхилення параметрів мікроклімату в робочій зоні: температури, відносної вологості, швидкості руху повітря (при поломці систем вентиляції);
- наявність поверхонь з підвищеною температурою;
- підвищений рівень шуму на робочих місцях (від компресорів);
- підвищений рівень вібрації на робочих місцях (від роботи вентиляторів, компресорів тощо);
- відсутність або недостатній рівень штучного освітлення робочої зони;
- підвищений рівень статичної електрики;
- наявність обладнання, що працює під тиском;

- токсичність розчинників, що входять до складу фарб застосовуються під час ремонту;

- можливість ураження струмом при дотику до кабелю, електричним приводам, і електроустаткування, що знаходиться під напругою;

- вплив на організм пилу при роботі без респіратору в умовах підвищеного рівня запиленості робочих місць, внаслідок розгерметизації обладнання та несправності систем аспірації.

З метою забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці, виключення аварійних ситуацій і нещасних випадків слід дотримуватись таких вимог техніки безпеки:

- усі працівники повинні бути навчені безпечним методам роботи відповідно до «Типового положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони»;

- систематично перевіряти знання виробничого персоналу;

- дотримуватись вимог інструкцій, правил, норм;

- при виробництві, транспортуванні, зберіганні речовин необхідно дотримуватись вимог до виробничого обладнання та технологічного процесу відповідно до ГОСТ 12.2.003-91 і ГОСТ 12.3002-75.

При ремонтних роботах на висоті перевищує 1,5 м над рівнем підлоги відповідно до інструкції з техніки безпеки необхідно використовувати стаціонарні підмостки, огорожі та стаціонарні пояса безпеки. Працювати на висоті тільки в присутності дублера, при цьому працює, має закріпитися карабіном за надійний предмет.

Основним обладнанням у виробництві є: центрифуга, ресивери, сушарка киплячого шару, згущувачі.

У виробництві використовується обладнання, що працює під тиском. Виготовлення, монтаж, експлуатація, ремонт, гідравлічні випробування, реєстрація і технічний огляд устаткування і судин під тиском повинні виконуватись відповідно до «ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском». Забороняється експлуатація обладнання, що працює під тиском, з простроченим терміном експлуатації, без

клейма. Для безпеки експлуатації систем під підвищеним тиском застосовується запірна арматура, прилади контролю і запобіжні пристрої. Апарати, які знаходяться під тиском, виготовлені з металу, добре зварюється. На апараті повинні бути вказані такі дані:

- допустимий тиск в апараті;
- дата, місяць і рік останнього гідравлічного випробування апарату;
- дата наступного гідравлічного випробування.

При зберіганні аміаку може відбуватися ряд реакцій, в результаті яких в повітря виділяється аміак у вигляді пари. Концентрації шкідливих хімічних речовин в повітрі робочої зони виробничого приміщення повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1.005-88, а саме: аміак – ГДК 20 мг / м<sup>3</sup>, КО – IV, пар.

Періодичність контролю за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони згідно з ГОСТ 12.1005-88 п.4. Вимоги до методів і способів вимірювання концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони згідно з ГОСТ 12.1005-88 п.5.

Вимоги до методів вимірювання та контролю показників мікроклімату по ГОСТ 12.1005-88 п.2. Відповідно до санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених наказом МОЗ України. Показниками, що характеризують мікроклімат, є:

- 1) температура повітря;
- 2) відносна вологість повітря;
- 3) швидкість руху повітря;
- 4) інтенсивність теплового випромінювання.

Оптимальні показники мікроклімату поширюються на всю робочу зону, допустимі показники встановлюються диференційовано для постійних і непостійних робочих місць. Допустимі величини показників мікроклімату встановлюються у випадках, коли за технологічними вимогами, технічних і економічних причин не забезпечуються оптимальні норми. У кабінах, на пультах і постах керування технологічними процесами, в залах обчислювальної техніки та інших виробничих приміщеннях при виконанні робіт операторського типу, пов'язаних з нервово-емоційним напруженням, повинні дотримуватися

оптимальні величини температури повітря 22–24 °С, його відносної вологості 60–40 % і швидкості руху (не більше 0,1 м/с). Перелік інших виробничих приміщень, в яких повинні дотримуватися оптимальні норми мікроклімату,

При забезпеченні оптимальних показників мікроклімату температура внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій робочу зону (стін, підлоги, стелі та ін.), Або пристроїв (екранів і т.п.), а також температура зовнішніх поверхонь технологічного устаткування або огорожувальних його пристроїв не повинні виходити більш ніж на 2 °С за межі оптимальних величин температури повітря. При температурі поверхонь конструкцій нижче або вище оптимальних величин температури повітря робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

При виробництві та зберіганні різних речовин виробничі приміщення повинні бути оснащені обігрівом, вентиляцією і кондиціонуванням згідно СНІП 2.04.05-91 та згідно ГОСТ 12.4.021-75. Санітарно-гігієнічний контроль систем вентиляції та промислових приміщень проводиться силами вентслужб або санітарних лабораторій згідно МУ 4425-87 в такі строки:

- система місцевої витяжної і місцевої проточною вентиляції – 1 раз на рік;
- системи загальнообмінної механічної і природної вентиляції – 1 раз в 3 роки.

Виробничі та допоміжні приміщення, в яких проводять роботи, повинні бути забезпечені проточною холодною питною водою відповідно до ГОСТ 2874-82 і каналізацією.

Викиди забрудненого повітря в атмосферу повинні відповідати вимогам ДСП 201-97 і не повинні перевищувати щорічних сумарних викидів, які наведені в регламенті виробництва. Технологічні стоки виробництва (кількість і хімічний склад) повинні відповідати вимогам СанПіН 4630-88.

Вимоги до температури зовнішньої поверхні технологічного обладнання згідно з ГОСТ 12.1.005-88 п.1.11. Температура поверхні апаратів при виробництві добрив на місцях, де можливий контакт їх з персоналом, не повинна перевищувати 45 °С. Забороняється робота на технологічній лінії при

пошкодженні теплоізоляції на поверхні паропроводів, апаратів і газоходів шлях проходження гарячих газів.

Заходи, які використовуються на даному об'єкті, по нормалізації мікроклімату: вентиляція приміщення, кондиціонування повітря, застосування теплоізоляції устаткування (корпуси апаратів, трубопроводів, топки) і раціональне розміщення обладнання. Роботи середнього та легкого категорії тяжкості Іб і ПБ, згідно допустимим параметрам мікроклімату. У результаті вжитих заходів мікроклімат в приміщенні відповідає допустимим нормам згідно з ГОСТ 12.1.006 - 88 і ДБН 3.36 - 042 - 99.

Використовувані на підприємстві засоби попередження про пожежу – пожежний зв'язок і сигналізація.

Фізичні фактори визначаються (вимірюються) не рідше 1 разу на рік і після ремонту обладнання. Необхідно стежити за кріпленням трубопроводів, не допускати вібрації трубопроводів, що працюють під тиском. Негайно усувати виявлені витіки газу і технологічних розчинів.

Усі роботи на установці проводити відповідно до «Правил безпеки в газовому господарстві» і «Інструкції з техніки безпеки та пожежної безпеки при обслуговуванні установок, що працюють на газовій основі».

На фіксованих місцях установки обладнуються і укомплектовуються аптечки першої медичної допомоги з наявністю перев'язувальних, нейтралізують і протиопікових засобів. Обслуговуючий персонал повинен мати спецодяг і індивідуальні засоби захисту, відповідно до типових норм.

Кожен робітник повинен вміти надавати допомогу потерпілому залежно від характеру нещасного випадку:

а) при попаданні аміаку на тіло або в очі, пошкоджене місце необхідно швидко промити струменем чистої води і негайно звернутися в медпункт за медичною допомогою;

б) при термічних опіках, незалежно від ступеня опіку, на уражене місце необхідно накласти стерильну пов'язку, не допускаючи пошкодження обпаленої шкіри, і негайно звернутися до лікаря;

в) при закритих переломах кісток кінцівок необхідно накласти шини або інший допоміжний матеріал (дошку, планку) до пошкодженої кінцівки і викликати швидку допомогу;

г) якщо працівник уражений електричним струмом, йому необхідно надати допомогу відповідно до «Інструкції по надання першої допомоги при ураженні електричним струмом»;

д) при отруєнні, задуха токсичними парами потерпілого необхідно вивести із загазованого середовища на повітря, розстебнути одяг і обов'язково відправити в медичний пункт, а при необхідності викликати лікаря на місце.

## 6.2 Розрахунок потенційно небезпечного фактора

Для запобігання враженню струмом обслуговуючого персоналу всі апарати та механізми що використовуються в процесі виготовлення продукту (насоси, компресори, мішалки, млини, газодувки) повинні підлягати обов'язковому заземленню.

Таким чином, нашим локальним завданням є: розрахувати заземлення для стаціонарної установки. Заземлювачі заглиблені і розміщені в один ряд (глибина заглиблення  $h = 80$  см).

1. У відповідності до вимог ПУЕ визначається допустимий опір розтіканню струму в заземленні  $R_z$ . Для мереж з напругою до 1000 В можна взяти  $R_z = 4$  Ом.
2. Визначається питомий опір ґрунту, який рекомендовано для розрахунків,  $\rho_{\text{табл.}}$ , Ом·см). для торфу -  $\rho_{\text{табл.}} = 2000$  Ом·см.
3. Визначаються підвищувальні коефіцієнти для труб (вертикальних заземлювачів)  $K_{\text{п.т}}$  та для з'єднувальної смуги  $K_{\text{п.с}}$ , які враховують зміну опору ґрунту в різні пори року залежно від наявності опадів. Приймаємо:  $K_{\text{п.т}} = 1,8$ .  $K_{\text{п.с}} = 4,0$ .
4. Визначається питомий розрахунковий опір ґрунту для вертикальних електродів (труб)  $\rho_{\text{розр.т}}$  з урахуванням несприятливих умов за допомогою підвищувального коефіцієнта:

$$\rho_{\text{розр.т}} = \rho_{\text{табл}} \cdot K_{\text{П.Т}}, \text{ Ом}\cdot\text{см} \quad (6.1)$$

$$\rho_{\text{розр.т}} = 2000 \cdot 1,8 = 3600 \text{ Ом}\cdot\text{см}. \quad (6.2)$$

5. Визначається питомий розрахунковий опір ґрунту для горизонтального заземлювача (з'єднувальної смуги):

$$\rho_{\text{розр.н}} = \rho_{\text{табл}} \cdot K_{\text{П.С}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}. \quad (6.3)$$

$$\rho_{\text{розр.с}} = 2000 \cdot 4 = 8000 \text{ Ом}\cdot\text{см}. \quad (6.4)$$

6. Визначається відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача:

$$t = h_3 + \frac{l_m}{2}, \text{ см}, \quad (6.5)$$

де  $h_3$  – глибина заглиблення труб, см;

$l_T$  – довжина вертикального заземлювача.

$$t = 80 + 250/2 = 205 \text{ см} \quad (6.6)$$

7. Визначається опір розтіканню струму для одиночного вертикального заземлювача, який розташований нижче від поверхні землі:

$$R_T = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.т}}}{l_T} \left( \lg \frac{2l_T}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l_T}{4t - l_T} \right), \text{ Ом}. \quad (6.7)$$

$$R_T = 0,366 \times \frac{3600}{250} \left( \lg \frac{2 \times 250}{7} + \frac{1}{2} \lg \left( \frac{4 \times 205 + 250}{4 \times 205 - 250} \right) \right) = 10,5 \text{ Ом}. \quad (6.8)$$



8. Визначається необхідна кількість вертикальних заземлювачів без урахування коефіцієнта екранування:

$$n_T \cdot \eta_{e.T} = \frac{R_T}{R_3}. \quad (6.9)$$

$$n_T \cdot \eta_{e.T} = \frac{10,5}{4} = 2,63 \text{шт.}, \quad (6.10)$$

прийmemo 3 шт.

9. Визначається відстань між вертикальними заземлювачами  $L_T$  зі співвідношення

$$c = \frac{L_T}{l_T}. \quad (6.11)$$

Для стаціонарних заглиблених заземлювачів це співвідношення береться таким:

$$C = 1. \quad L_T = l_T = 250 \text{см.}$$

10. Визначаємо коефіцієнт екранування труб при числі труб  $n_T$  та відношенні:

$$c = \frac{L_T}{l_T} \cdot \eta_{e.T} = 0,78. \quad (6.12)$$

11. Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$n_{T.E} = \frac{R_T}{R_3 \cdot \eta_{E.T}}. \quad (6.13)$$

$$n_{T.E} = \frac{10,5}{4 \times 0,78} = 3,37 \text{ шт} \quad (6.14)$$

приймаємо 4 шт.

12. Визначаємо розрахунковий опір розтіканню струму при прийнятому числі вертикальних заземлювачів  $n_{T.E}$ :

$$R_{\text{розр.тр}} = \frac{R_T}{n_{T.E} \cdot \eta_{E.T}} \quad (6.15)$$

$$R_{\text{розр.тр}} = \frac{10,5}{4 \times 0,78} = 3,37 \text{ Ом} \quad (6.16)$$

13. Визначаємо довжину з'єднувальної смуги:

$$L_{3.C} = 1,05 L_T (n_{T.E} - 1), \text{ см.} \quad (6.17)$$

$$L_{3.C} = 1,05 \cdot 250 \cdot (4 - 1) = 787 \text{ см.} \quad (6.18)$$

14. Визначаємо опір розтікання струму в з'єднувальній смугі:

$$R_{3.C} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.с}}}{L_{3.C}} \lg \frac{2L_{3.C}^2}{h_3 \cdot b_C} \text{ Ом,} \quad (6.19)$$

$$R_{3.C} = 0,366 \times \frac{8000}{787} \lg \frac{2 \times 787^2}{80 \times 7} = 12,4 \text{ Ом.} \quad (6.20)$$

15. Визначаємо коефіцієнт екранування  $\eta_{E.3.C}$  для з'єднувальної смуги:

$$\eta_{E.3.C} = 0,77.$$

16. Визначаємо розрахунковий опір для розтікання електричного струму в з'єднувальній смугі з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$R_{розр.с} = \frac{R_{з.с}}{n_c \cdot \eta_{Е.З.П}} . \quad (6.21)$$

де  $n_c$  – кількість з'єднувальних смуг, у нас  $n_c=1$ .

$$R_{розр.с} = \frac{12,4}{1 \times 0,77} = 16,1 \text{ Ом} \quad (6.22)$$

17. Визначаємо загальний розрахунковий теоретичний опір розтіканню струму від вертикальних заземлювачів та з'єднувальної смуги:

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{R_{розр.Г}} + \frac{1}{R_{розр.С}}} . \quad (6.23)$$

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{4,49} + \frac{1}{16,1}} = 3,51 \text{ Ом} , \quad (6.24)$$

що менше  $R_3$ . Опір менше 4 Ом, отже заземлення розраховано правильно.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др., 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
2. 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.
3. Врагов А.П., Михайловський Я.Є, Якушко С.І. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв. – Суми: видавництво СумДУ, 2008. – 170 с.
4. Коваленко І.А., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. – Київ: Воля, 2006. – 253 с.
5. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах "газ (пара) – рідина" : підручник / Я.Е. Михайловський, А.Є. Артюхов, М.П. Юхименко, Н.О. Артюхова ; за заг. ред. Я.Е. Михайловського. – Суми : СумДУ, 2021. – 391 с.
6. Юхименко М. П. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок / М. П. Юхименко, С. В. Вакал, М. П. Кононенко, А. П. Філонов. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
7. Поперечний А.М., Черевко О.І., Гаркуша В.Б., Кирпиченко Н.В., Ласкіна Н.А. Процеси і апарати харчових виробництв. – К.: «Центр учбової літератури», 2007. – 304 с.
8. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 155 с.
9. Процеси та обладнання хімічних технологій. Базові принципи теорії тепломасообміну: практикум з кредитного модуля : навч. посіб. / уклад.:

- С.В. Гулієнко, Я.В. Гробовенко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.
10. Шалугін В.С., Шмандрій В.М. Процеси та апарати промислових технологій. – К.: «Центр учбових технологій», 2007. – 392 с.
  11. Будівельне матеріалознавство : Навчальний посібник // Т.М. Пащенко, З.І.Світла – К. : Аграрна освіта, 2009. – 434 с.
  12. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. для студ. / І.А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ, 2018. – 121 с.
  13. Андреев, І. Роз'ємні міцно-щільні з'єднання: навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 138 с.
  14. Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Проектування хімічних підприємств та основи САПР» / Укл.: О.О. Ляпощенко, В.М. Маренюк. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 81 с.
  15. 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.
  16. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 233 с.
  17. САПР технологічних ліній та комплексів хімічних і нафтогазопереробних виробництв / О. О. Ляпощенко, О. Є. Старинський // Дистанційний курс. – Суми : СумДУ, 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://elearning.sumdu.edu.ua/s/4b-z0x>
  18. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.
  19. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – Київ : Основа, 2006. – 448 с.