

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Колонні апарати

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології
проектування обладнання хімічної інженерії»
спеціальності 133 Галузеве машинобудування

Укладач І. А. Андреев

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК 621.01–66.05

Укладач *Андреев Игорь Анатолійович*, канд. техн. наук, доц.
Рецензент *Сокольський Олександр Леонідович*, д-р техн. наук, доц., кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування “КПІ ім. Ігоря Сікорського”
Відповідальний редактор *Корнієнко Ярослав Микитович*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 09.01.2025 р.)
за поданням вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 11 від 16.12.2024 р.)*

Колонні апарати [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 Галузеве машинобудування / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. І. А. Андреев. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 74 с.

Посібник містить основи конструювання і вимоги до застосування колонних апаратів, які призначені для процесів ректифікації, абсорбції, адсорбції, екстракції і т. ін. Матеріал подано відповідно до змісту навчальної дисципліни «Розрахунок і конструювання обладнання-2. Розрахунок і конструювання елементів».

Для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

УДК 621.01–66.05

Реєстр. № НП 24/25-186. Обсяг 3,1 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	8
1. ЗАСТОСУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ КОЛОННИХ АПАРАТІВ	9
2. НАСАДКОВІ КОЛОНИ	11
2.1. Конструкція насадкової колони	11
Питання для самоконтролю до підрозділу 2.1	14
2.2. Насадки колонних апаратів	14
2.2.1. Нерегулярна насадка	15
2.2.2. Регулярна насадка	18
Питання для самоконтролю до підрозділу 2.2	21
2.3. Розподільчі пристрої	22
Питання для самоконтролю до підрозділу 2.3	26
2.4. Перерозподільні пристрої	27
Питання для самоконтролю до підрозділу 2.4	29
2.5. Відбійні пристрої	29
Питання для самоконтролю до підрозділу 2.5	33
3. ТАРИЛЧАСТА КОЛОНА	34
3.1. Конструкція тарілчастої колони	34
Питання для самоконтролю до підрозділу 3.1	35
3.2. Царга тарілчастої колони	35
3.3. Вузол кріплення тарілки до корпусу	36
3.4. Вузли вводу сировини в колону	37
3.5. Вузол виведення рідини з колони	38
Питання для самоконтролю до підрозділів 3.2–3.5	39
3.6. Конструкції тарілок	39
Питання для самоконтролю до підрозділу 3.6	55

4. РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНІХ ПРИСТРОЇВ КОЛОННИХ АПАРАТІВ	56
4.1. Розрахунок товщини плоскої круглої тарілки (опорного перфорованого диска під насадку)	56
4.2. Розрахунок товщини плоскої тарілки (опорного перфорованого диска під насадку), яка складена з окремих прямокутних секцій	58
Питання для самоконтролю до підрозділів 4.1, 4.2	59
4.3. Розрахунок тарілок на жорсткість	60
Питання для самоконтролю до підрозділу 4.3	61
4.4. Розрахунок опорних балок під тарілки	61
Питання для самоконтролю до підрозділу 4.4	64
4.5. Конструктивний розрахунок капсульних ковпачків	65
Питання для самоконтролю до підрозділу 4.5	67
ДОДАТОК А. Основні стандартизовані терміни та визначення	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	74

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

- a – питома поверхня, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
- a – більша сторона прямокутника, м;
- b – ширина, менша сторона прямокутника, м;
- C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м;
- C_1 – додаток для компенсації корозії і (або) ерозії, м;
- C_2 – додаток для компенсації мінусового допуску, м;
- C_3 – технологічний додаток, м;
- C_e – додаток для компенсації ерозії, м;
- D – внутрішній діаметр колони у розрахунковому перерізі, м;
- D_T – діаметр тарілки, м;
- d – діаметр отвору, м;
- $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр, м;
- d_k – внутрішній діаметр ковпачка, м;
- d_n – внутрішній діаметр газового патрубку, м;
- E – модуль поздовжньої пружності матеріалу при розрахунковій температурі, Па;
- F – площа живого перерізу колони, м^2 ;
- f – прогин, м;
- $[f]$ – допустимий прогин, м;
- g – прискорення вільного падіння;
- H – висота колони, м;
- H_i – висота насадкового шару, м;
- $H_{\text{кр}}$ – критична висота насадкового шару, м;
- h – висота, м;
- h_0 – відстань від нижнього краю зубця ковпачка до тарілки, м;
- h_1 – висота рівня рідини над верхнім обрізом прорізів ковпачка, м;

h_2 – висота ковпачка над газовим патрубком, м;
 i – кількість прорізів;
 k – коефіцієнт;
 k_f – коефіцієнт;
 l – висота прорізів в ковпачку, м;
 M – згинальний момент, Н·м;
 m_n – маса насадки, кг;
 m_p – маса рідини, яка утримується насадкою, кг;
 n – кількість ковпачків;
 p – розрахунковий тиск, МПа;
 p_n – тиск на диск від сухої насадки, МПа;
 p_p – тиск на диск від рідини, яка утримується насадкою, МПа;
 q_{max} – максимальна щільність зрошення, м³/(м²·година);
 q_{min} – мінімальна щільність зрошення, м³/(м²·година);
 S – виконавча товщина, м;
 S_n – виконавча товщина стінки газового патрубка, м;
 t – крок між отворами, м;
 V_e – витрата газу, м³/с;
 $v_{кор}$ – швидкість корозії (проникність), м/рік;
 W – момент опору, Н·м;
 W_R – розрахунковий момент опору, Н·м;
 z – кількість балок;
 α – коефіцієнт, що показує яку частину живого перерізу колони займає
живий переріз всіх газових патрубків;
 Δp – перепад тиску, Па;
 ε – вільний об'єм, м³/м³;
 ξ – коефіцієнт гідравлічного опору ковпачкової тарілки;

ρ_{Γ} – густина газу, кг/м³;

ρ_p – густина рідини, кг/м³;

[σ] – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа;

τ – строк служби елемента у роках;

φ_0 – коефіцієнт ослаблення тарілки отворами;

ω_z – швидкість газу, м/с;

ВСТУП

При проектуванні колонних апаратів необхідно враховувати умови експлуатації обладнання, що зумовлює специфічні вимоги до конструювання, розрахунку, виготовлення, випробування і експлуатації обладнання.

У навчальному посібнику містяться основи конструювання і вимоги до застосування колонних апаратів, які призначені для процесів ректифікації, абсорбції, адсорбції, екстракції і т. ін., питання для самоконтролю.

Розглянутий у навчальному посібнику матеріал відповідає курсу "Розрахунок і конструювання обладнання-2. Розрахунок і конструювання елементів", який відіграє важливу роль при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 133 "Галузеве машинобудування".

Основні стандартизовані терміни і визначення, класифікація та застосування сталей і чавунів, вимоги до проектування, конструювання, виготовлення, розрахунки окремих елементів обладнання, а також розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість наведені у попередніх роботах [1–4].

1. ЗАСТОСУВАННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ КОЛОННИХ АПАРАТІВ

Колонні апарати (рис. 1.1) призначені для здійснення процесів ректифікації, абсорбції, адсорбції, екстракції і т. ін.



Рисунок 1.1 – Колонні апарати

За способом організації контакту фаз колонні апарати підрозділяються на насадкові, тарілчасті (біля 60% ректифікаційних і абсорбційних колон) і плівкові (обмежено використовуються в промисловості через складність виготовлення і велику вартість).

Корпуси апаратів, які мають діаметр більше 1200 мм і працюють при великих тисках, виконують суцільнозварними. Апарати діаметром 400...1000 мм виконують такими, що складаються з окремих царг.

При проектуванні колонних апаратів необхідно враховувати також умови експлуатації обладнання. Властивості конструкційного матеріалу під

впливом процесів, які здійснюються в колоні, можуть змінюватися, а якщо невірно вибраний матеріал обладнання, тоді можуть з'являтися нові шкідливі речовини. Перелічені особливості зумовлюють специфічні вимоги до конструювання, розрахунку, виготовлення, випробування і експлуатації обладнання.

Основні стандартизовані терміни та визначення, які стосуються колонних апаратів, наведені у Додатку А.

2. НАСАДКОВІ КОЛОНИ

Розділ містить особливості конструкцій насадкових колонних апаратів.

2.1. Конструкція насадкової колони

Діаметр колони (рис. 2.1) може досягати 12 м, але найчастіше він не перевищує 4 м, тому що при більшому діаметрі важко досягти достатньо рівномірного розподілу газової і рідинної фаз по перерізу апарата.

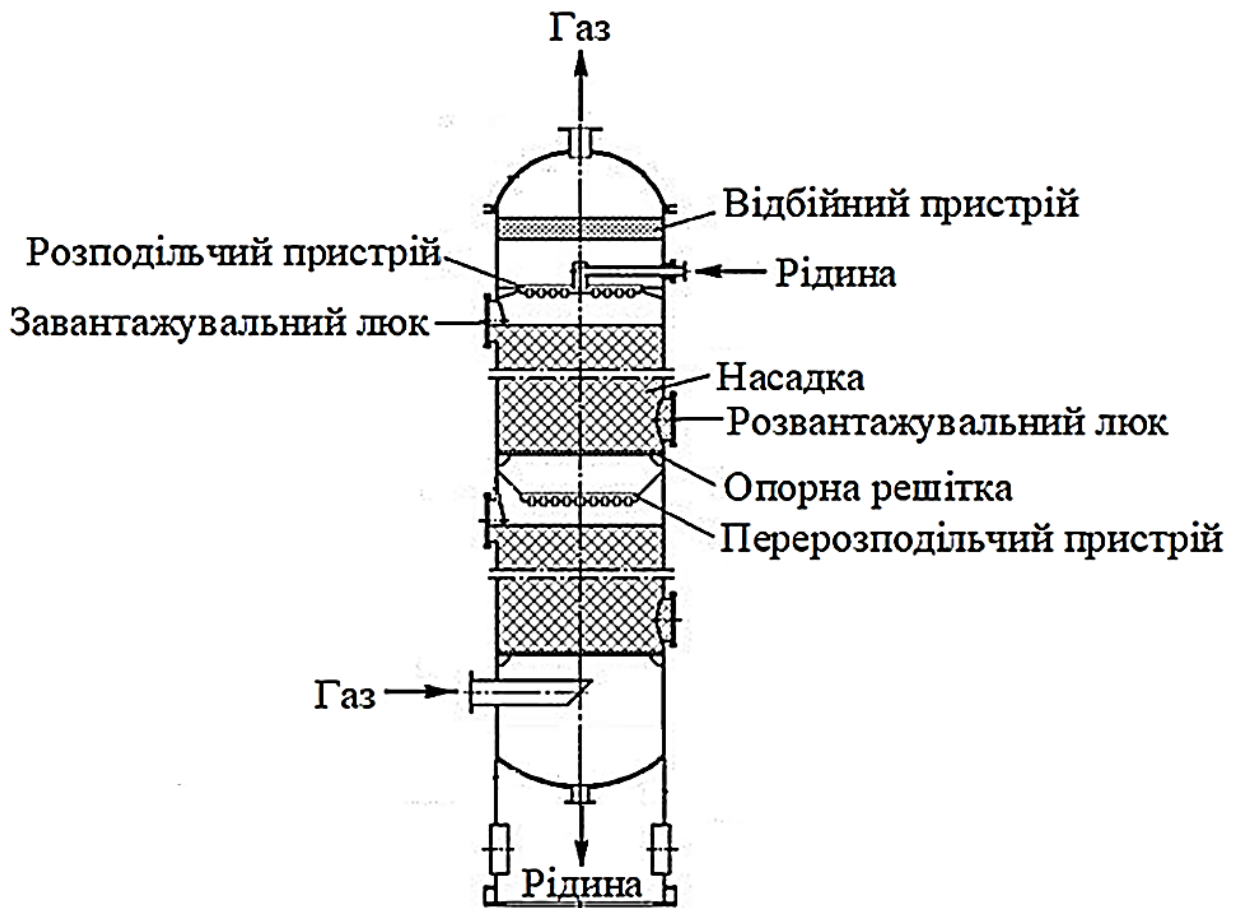


Рисунок 2.1 – Схема насадкового колонного апарата

В насадкових колонах необхідно здійснювати рівномірне зрошення, тому ріжина для зрошення насадок подається через розподільні і перерозподільні пристрої.

Насадку розташовують по висоті апарата в декілька шарів. Насадка укладається на опорні решітки, які мають отвори для проходження газу і стоку рідини.

Опора решітчастого типу (рис. 2.2) встановлюється на зварних підпорах. Характеризується великим пропускним перерізом (близько 97% вільної площі) для пропускання газу та рідини без суттєвого перепаду тиску.

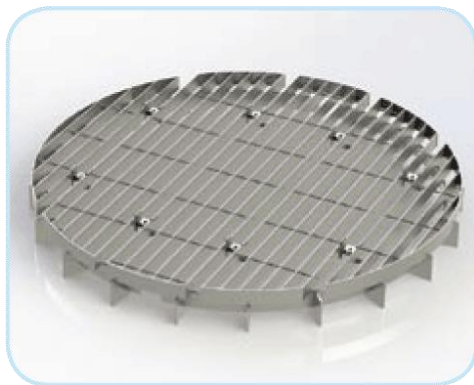


Рисунок 2.2 – Опора для насадки решітчастого типу

Опора насадки із гофрованої пластини (рис. 2.3) дозволяє газу та рідини проходити крізь гофровану плиту під нахилом. Характеризується великим пропускним перерізом для пропускання газу та рідини без суттєвого перепаду тиску.



Рисунок 2.3 – Опора насадки із гофрованої пластини

Для завантаження і розвантаження насадки у верхній і нижній частинах кожної секції встановлюють люки.

При великих навантаженнях по газу і перепаді тиску $\Delta p = 400 \dots 700$ Па на 1 м висоти насадки зверху на шар насадки укладають утримуючу решітку (рис. 2.4) для запобігання викиду насадки.



Рисунок 2.4 – Утримуюча притискна решітка

По висоті шару насадки виникає перерозподіл стікання рідини, рівномірність зрошення зменшується. Рідина тече в основному уздовж стінки апарата. Це пояснюється пристінковим ефектом – більшою щільністю укладки насадки в центральній частині колони. Тому насадковий простір поділяють на шари і встановлюють між шарами перерозподільчі пристрої.

Рідина стікає по насадці у вигляді плівки, газ рухається протитоком.

Корпус і внутрішні пристрої апаратів, які випускаються серійно для неагресивних середовищ, виготовляються з вуглецевих сталей (СтЗсп, 20К, 16ГС), для агресивних середовищ – з корозійностійких сталей (08Х22Н6Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т).

Апарати також виготовляються з чавуну, міді, кераміки, скла та ін.

Питання для самоконтролю до підрозділу 2.1

1. Обґрунтувати застосування розподільних і перерозподільних пристроїв в насадкових колонних апаратах.
2. Навести конструкції опорних решіток.
3. Обґрунтувати застосування утримуючої решітки.
4. Пояснити як здійснюється перерозподіл стікання рідини по висоті шару насадки в колоні.
5. Навести матеріали, які застосовуються для виготовлення корпусу і внутрішніх пристроїв колонних апаратів.

2.2. Насадки колонних апаратів

Насадка може бути *регулярною*, що правильно укладена і *нерегулярна*, яка засипається навалом.

Основні характеристики насадки:

- 1) питома поверхня a , $\text{м}^2/\text{м}^3$;
- 2) вільний об'єм ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$;
- 3) еквівалентний діаметр $d_{\text{екв}} = 4f/S$,

де f – площа вільного перерізу каналів між насадковими тілами, м^2 ; S – сумарний периметр каналів, м .

Величину вільного об'єму ε для непористої насадки звичайно визначають шляхом заповнення об'єму насадки водою, звідки ε розраховується як відношення об'єму води до об'єму, що займає насадка.

Вимоги до насадок

- 1) Велика питома поверхня a (менший еквівалентний діаметр $d_{\text{екв}}$).
- 2) Гарна змочуваність рідиною, що зрошує насадку.
- 3) Малий гідравлічний опір газовому потоку.

- 4) Рівномірне розподілення рідини, що зрошує насадку.
- 5) Стійкість до хімічного впливу рідини і газу в колоні.
- 6) Мала густина.
- 7) Висока механічна міцність.
- 8) Мала вартість.

2.2.1. Нерегулярна насадка

Нерегулярна насадка застосовується в процесах масообміну, які здійснюються під тиском або в умовах неглибокого вакууму.

Переваги нерегулярної насадки

- 1) Відсутність проблеми вибору матеріалу. Можна виготовляти з металу, полімеру, кераміки;
- 2) Переваги за технологією виготовлення.
- 3) Переваги за транспортуванням.
- 4) Переваги за монтажем.

Кокс або кварц кусковий.

Застосовується розміром 25...100 мм.

Недопiки: мала питома поверхня a , високий гiдравлiчний опiр.

В наш час ця насадка використовується рiдко.

Кiльця Рашига.

Кiльця Рашига (рис. 2.5) являють собою тонкостiнні кiльця з висотою, яка дорiвнює дiаметру. Застосовуються дiаметри 5...150 мм.

Частiше використовуються кiльця дiаметром 25, 35, 50 мм. Кiльця меншого розмiру мають значний гiдравлiчний опiр, а кiльця бiльшого розмiру менш ефективнi.



Рисунок 2.5 – Кільця Рашига

Кільця Рашига виготовляють з металу, фарфору, кераміки, пластмас.

Кільця малих розмірів засипають в колону навалом.

Більші кільця (з розмірами більшими за 50x50 мм) часто укладають правильними рядами, які зсунуті один щодо одного. Тоді це вже буде регулярна насадка.

Для підвищення ефективності масообміну кільцеву насадку виготовляють перфорованою і з внутрішніми перегородками.

Кільця Паля

На циліндричній поверхні такої насадки виконуються вікна з відігнутими всередину пелюстками з метою підвищення ефективності масообміну (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Керамічні, металеві і пластикові кільця Паля

Для механічної міцності насадки можуть бути виконані кільцеві гофри, які слугують також для перерозподілу рідини.

Кільця Лессинга і з хрестоподібною перегородкою

Для збільшення поверхні насадки застосовують кільця з перегородкою (кільця Лессінга) і кільця з хрестоподібною перегородкою (рис. 2.7).

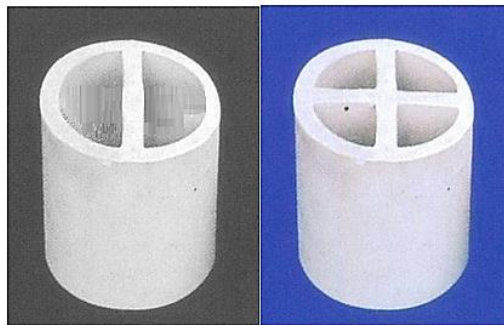


Рисунок 2.7 – Кільця Лессинга і з хрестоподібною перегородкою

Також кільця можуть мати всередині одну, дві або три спіралі.

Такі кільця більш складні у виготовленні, дорогі і мають малий вільний об'єм.

Сідлоподібні насадки

Сідлоподібні насадки виготовляють із кераміки і пластмаси.

Сідлоподібні насадки мають велику питому поверхню a , менший гідравлічний опір, ніж неупорядковані кільцеві насадки, а також високу здатність до перерозподілу рідини по перерізу колони.

Сідла Берля (рис. 2.8) за формою являють собою гіперболічний параболоїд і досить складні у виготовленні.

Сідла Інталокс (рис. 2.9) є частиною тора. Вони простіші у виготовленні, ніж сідла Берля.



Рисунок 2.8 – Сідло Берля



Рисунок 2.9 – Сідло Інталокс

Різновидом сідлоподібної насадки є насадка, яка відрізняється від сідла Інталокс наявністю отворів в центрі сідла, що підвищує ефективність і гофр на краях, що покращує перерозподіл рідини.

2.2.2. Регулярна насадка

Правильно укладена насадка відрізняється від нерегулярної меншим гідравлічним опором і тому особливо придатна для процесів вакуумної ректифікації.

Регулярна насадка допускає більші швидкості газу на відміну від нерегулярної насадки.

Недоліком такої насадки є висока чутливість до рівномірності зрошення. Для покращення змочування необхідно застосовувати більш складні по конструкції зрошувачі.

Плоскопаралельна (хордова) насадка

Плоскопаралельна насадка – це пакети з плоских вертикальних металевих пластин або дерев'яних планок, які розташовані паралельно з однаковим зазором 10...20 мм. Висота пакетів – 0,4...1,0 м (рис. 2.10).

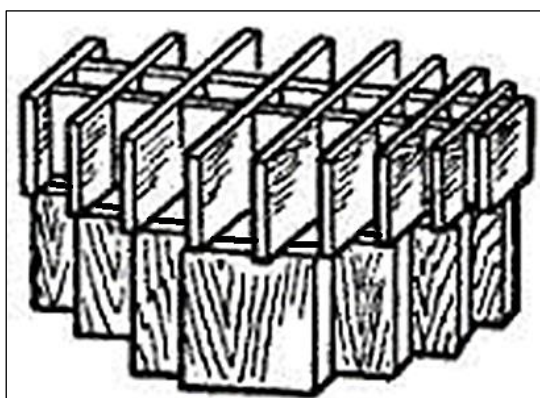


Рисунок 2.10 – Плоскопаралельна насадка

Для збільшення рівномірності розподілу рідини в колоні пакети встановлюються один над одним взаємно повернутими на кут $45 \dots 90^\circ$.

Перевага: простота виготовлення.

Недоліки: висока матеріалоемність, поганий перерозподіл рідини, невелика питома поверхня.

Для підвищення ефективності насадки листи виконують з рифленням або з різноманітними турбулізуючими елементами.

Гофрована насадка

Насадка складається з вертикальних паралельно розташованих листів з рифленням (рис. 2.11–2.13).



Рисунок 2.11 – Гофрована металева насадка



Рисунок 2.12 – Гофрована пластикова насадка



Рисунок 2.13 – Гофрована керамічна насадка

Перевага гофрованої насадки: менший бризкоунос порівняно з плоскопаралельною насадкою.

Дротова насадка

Дротова насадка (рис. 2.14) використовується для процесів ректифікації, які проводяться під вакуумом.

Дротова насадка виготовляється у вигляді пакетів з гофрованої дротяної сітки висотою 100...200 мм. Діаметр дроту – 0,1...0,2 мм.

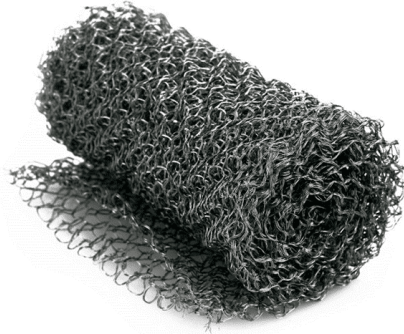


Рисунок 2.14 – Дротова насадка

Вибір насадок

Насадки з невеликим гідравлічним опором використовуються в процесах вакуумної ректифікації, а також при обмеженому часі перебування продуктів в колоні через схильність до розкладання, термічно нестійких і органічних сумішей, які легко полімеризуються.

Насадки з великим гідравлічним опором використовуються в процесах неглибокого вакууму і під тиском або коли потрібне велике число одиниць переносу (теоретичних ступенів змінювання концентрації).

Питання для самоконтролю до підрозділу 2.2

1. Навести основні характеристики насадок.
2. Пояснити відмінність регулярної насадки від нерегулярної.
3. Як можна визначити величину вільного об'єму ε для непористої насадки?
4. Навести вимоги до насадок.
5. Навести переваги нерегулярної насадки.
6. Надати різновиди нерегулярної насадки.
7. Пояснити відмінність сідла Берля від сідла Інталокс.
8. Навести різновиди кільцевих насадок.
9. Навести переваги і недоліки регулярної насадки.

10. Надати різновиди регулярної насадки.

11. Обґрунтувати вибір типу насадки.

2.3. Розподільчі пристрої

Розподільчі пристрої призначені для зрошення шару насадки.

Зрошення повинно бути рівномірним і достатнім.

Мінімальна щільність зрошення q_{min} повинно бути:

$$q_{min} = 10 \dots 12 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{година}}$$

Якщо неможливо забезпечити q_{min} , тоді необхідна частина рідини вертається в систему, тобто здійснюється рециркуляція рідини.

Але зрошення насадкового апарата не повинно бути надлишковим, що може викликати «затоплення» насадки і збільшення її гідравлічного опору при погіршені масообмінних характеристик.

Звичайно максимальна щільність зрошення q_{max} :

$$q_{max} = (4 \dots 6)q_{min}$$

Конструкція розподільчого пристрою залежить від типу насадки, яка зрошується.

Розподільна тарілка

Тарілка кріпиться на опорах до корпусу колони (рис. 2.15).

Тарілка являє собою відбортований диск діаметром, що дорівнює 0,6...0,7 діаметра колони з переливними патрубками.

Рідина поступає на тарілку через штуцер.

Тарілка являє собою відбортований диск діаметром, що дорівнює 0,6...0,7 діаметра колони з переливними патрубками.

Рідина поступає на тарілку через штуцер.

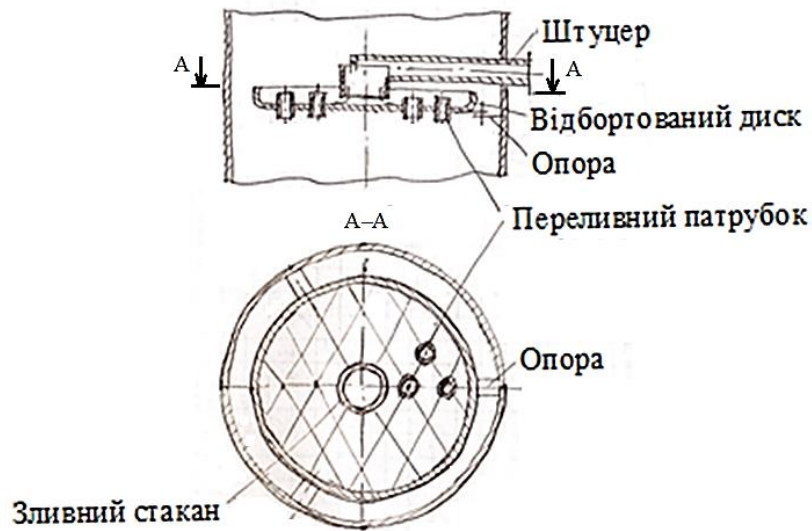


Рисунок 2.15 – Розподільна тарілка

Зливний стакан виконується для забезпечення рівномірного розподілу рідини на тарілці.

Установка тарілки в корпусі здійснюється за допомогою гвинтів.

Периферійні ділянки колони не зрошуються, вони заповнюються рідиною при розтіканні її у шарі насадки.

Розподільча тарілка використовується для зрошення насипної насадки.

Перфорований колектор

Розподільник розташовується на висоті біля 1 м над насадкою. Пристрої звичайно застосовуються для зрошення нерегулярної насадки і провальних тарілок (рис. 2.16).

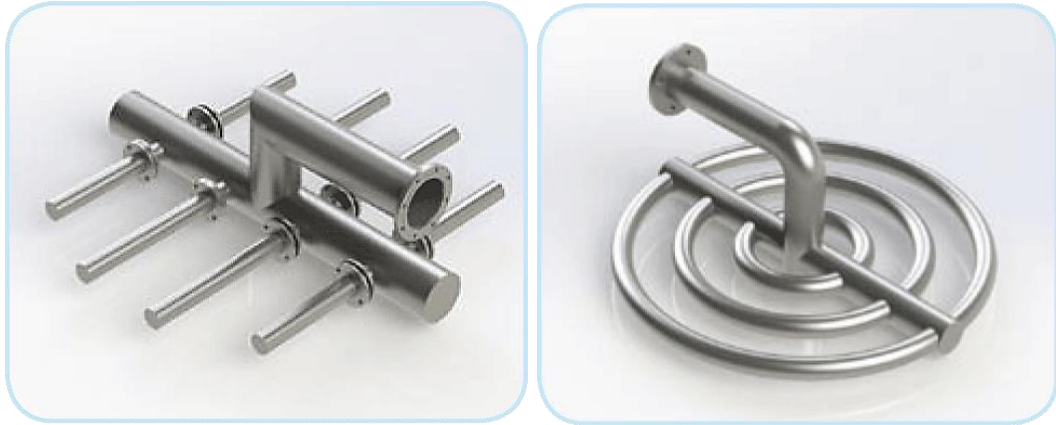


Рисунок 2.16 – Перфоровані колектори

Отвори розташовуються в нижній частині трубопроводів (рис. 2.17).

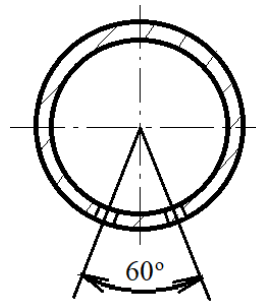


Рисунок 2.17 – Розташування отворів в поперечному перерізі трубопроводів

Перевагою колекторів є простота конструкції, ефективна робота під тиском.

Недолік: громіздкість.

Колекторно-пластинчастий зрошувач

Цей зрошувач застосовують для регулярної насадки. Від перфорованого колектора зрошувач відрізняється тим, що рідина не виливається через отвори, а поступає в зрошувальні трубки, між і під якими розташовані розподільні пластини.

Рідина витікає окремими струменями на пластини, утворюючи над їх поверхнею рівномірну плівку.

Жолобчатий зрошувач

Зрошувач встановлюється на висоті 1,2...1,4 м над шаром насадки. Використовуються в колонах з нерегулярною насадкою. Замість колекторних трубок застосовуються горизонтально розташовані жолоби з вирізами або отворами в бокових стінках (рис. 2.18).

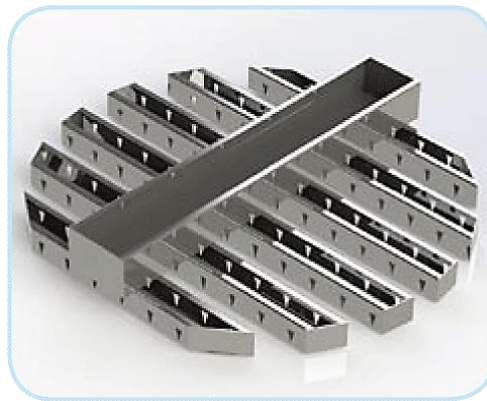


Рисунок 2.18 – Жолобчатий зрошувач

Зрошувач має V-подібні прорізи або отвори у бічних стінках жолобів. На рисунку 2.19 наведена можлива конструкція жолобу.

Жолобчатий зрошувач використовується у системах з інтенсивним утворенням осадів, може використовуватися як перерозподілення рідини між шарами.



Рисунок 2.19 – Жолоб з прорізами

Перевагою жолобчатого зрошувача є простота, проте для надійної роботи необхідна висока точність виготовлення і розташування.

Форсуночний розподільник

Пристрій простий, дешевий, легко монтується, має низький гідравлічний опір, має можливість огляду, очищення і ремонту (рис. 2.20).



Рисунок 2.20 – Форсуночний розподільник

Недоліки: мала ефективність, значна витрата енергії на розпилення рідини, трудність роботи з забрудненими рідинами (мали отвори форсунок легко забиваються).

Питання для самоконтролю до підрозділу 2.3

1. Пояснити необхідність застосування розподільчих пристроїв.
2. Навести вимоги до зрошення насадкової колони.
3. Надати конструкцію розподільної тарілки.
4. Навести конструкції розподільчих пристроїв.
5. Обґрунтувати умови застосування форсуночного розподільника.

2.4. Перерозподільні пристрої

Щільність зрошення по висоті насадкового шару в колоні не однакова. При стіканні рідини по насадці змінюється характер розподілу рідини по висоті колони. Рідина розтікається до стінок колони (рис. 2.21). При великій висоті шару насадки всередині колони утворюється так званий «сухий конус», в якій прямує газовий потік.

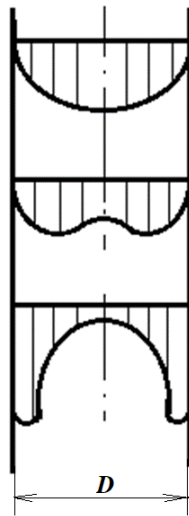


Рисунок 2.21 – Розподіл рідини по висоті насадки

Критичною висотою насадкового шару $H_{кр}$ називається така висота, при якій з'являються ознаки нерівномірності розподілу компонентів. $H_{кр}$ залежить від типу насадки, її питомої поверхні a і діаметра апарата D .

$$\text{Для кілець Рашига } H_{кр} = (2,5 \dots 3D)$$

$$\text{Для кілець Палля } H_{кр} = (5 \dots 10D)$$

$$\text{Для сідел Берля і «Інталокс» } H_{кр} = (5 \dots 8D)$$

$$\text{Для регулярної насадки } H_{кр} = (8 \dots 10D)$$

Таким чином, якщо розрахункова висота насадки більше критичної висоти $H_{кр}$, тоді насадку слід поділити на секції з висотою $H_i \leq H_{кр}$.

Для зрошення кожної секції можна використовувати окремі зрошувачі або перерозподільчі пристрої, які збирають і перерозподіляють рідину, яка стікає по колоні.

Перерозподіл газу між секціями насадки не потребує встановлення спеціальних пристроїв. Рівномірний розподіл газу легко здійснюється в колосникових решітках над насадкою (рис. 2.22), якщо вільний переріз решітки більше вільного перерізу насадки.

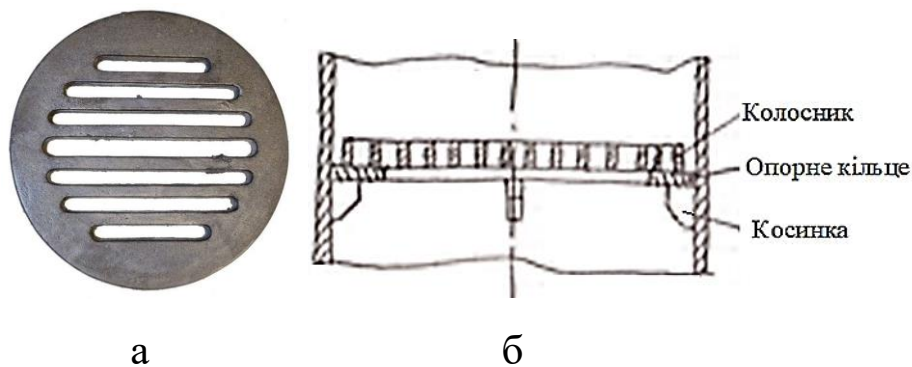


Рисунок 2.22 – Колосникова решітка (а) і її розміщення в колонному апараті (б)

Решітка складається з колосників товщиною 4...10 мм, виготовляється зі штабової вуглецевої або легованої сталі.

Відстань між колосниками виконується на 25–30% менше розмірів насадкових тіл для виключення їх випадання крізь решітку.

Колосникова решітка може бути суцільною, зварною або зібраною з окремих секцій і стягнутою шпильками.

Решітка укладається на опорне кільце, яке підтримується приварними до корпусу косинками або приварними опорними балками.

Під колосниковою решіткою між шарами насадки встановлюють перерозподільні тарілки (рис. 2.23).

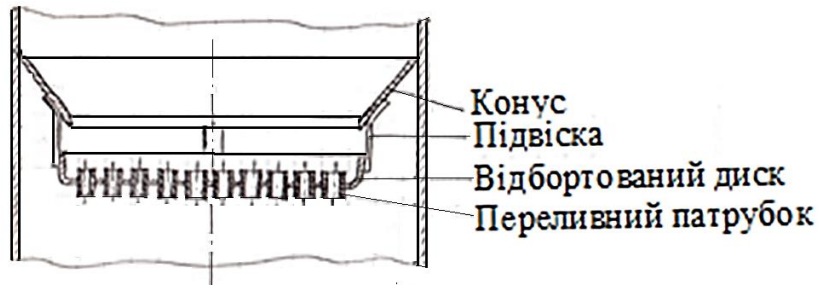


Рисунок 2.23 – Перерозподільна тарілка

Питання для самоконтролю до підрозділу 2.4

1. Обґрунтувати необхідність застосування перерозподільчих пристроїв.
2. Пояснити виникнення щільності зрошення по висоті насадкового шару в колоні.
3. Дати визначення критичній висоті насадкового шару $H_{кр}$.
4. Пояснити від чого залежить критична висота насадкового шару $H_{кр}$.
5. Обґрунтувати визначення розрахункової висоти насадки.
6. Навести конструктивне виконання колосникових решіток під шар насадки.
7. Навести конструкцію перерозподільної тарілки.

2.5. Відбійні пристрої

При викиді газовим потоком зрошуючої рідини з масообмінного апарата знижується якість поділу, відбувається втрата цінних або екологічно небезпечних продуктів. Виніс рідини може спричинити корозію газоходів або їх «заростання», наприклад при великому виносі $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Для виключення виносу рідини у верхній частині апарата над розподільником рідини встановлюють сепараційні (відбійні) пристрої.

Відбійники характеризуються 2 основними показниками: часткою вільного перерізу і питомою поверхнею.

Збільшення вільного перерізу відбійника підвищує його продуктивність, а чим більша питома поверхня, тим краще здійснюється сепарації крапель.

Інерційні сепаратори

Процес уловлювання крапельної вологи виникає за рахунок укрупнення найдрібніших крапель, які осідають на робочих поверхнях сепаратора при ударах і поворотах газорідного потоку, і наступного стікання.

Секції відбійників складаються з пластин, кутків, лопатей і т. ін. (рис. 2.24, 2.25).



Рисунок 2.24 – Відбійник лопатевого типу

Обтічні лопаті змінюють напрями потоків газу та рідини, за рахунок чого досягається більш якісний поділ суміші.

Відбійник може бути виготовлений з алюмінію, оцинкованої сталі та нержавіючої сталі. Завдяки інерції та відцентровій силі, краплі стикаються з лезом сепаратора, збираються та формують потік води, який стікає вниз.

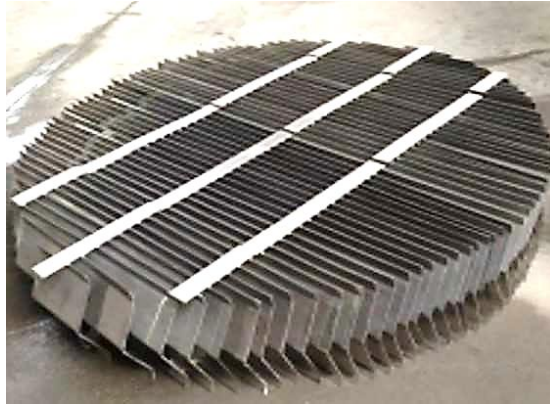


Рисунок 2.25 – Відбійник жалюзійного типу

Наведені конструкції відбійників мають відносно невеликий вільний переріз, тому у високопродуктивних установках не використовуються.

Відбійники з металевої сітки

Відбійники мають високу ефективність. Частка вільного перерізу складає до 97%. Значна поверхня контакту забезпечується збільшенням числа сіток в пакеті.

Сітку виготовляють з дроту $\varnothing 0,25$ мм зі сталі 12X18H10T, а потім гофрують. Висота гофр складає біля 10 мм (рис. 2.26).

Можливе встановлення над сітчастими відбійниками колектору для промивної рідини.

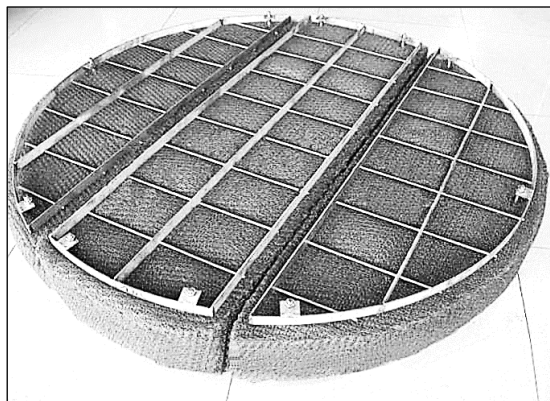


Рисунок 2.26 – Відбійники з металевої сітки

Тарілка, яка підтримує сітчасті пакети, має більший вільний переріз, ніж елементи відбійника.

Відбійник з вертикальним розташуванням елементів

Відбійники (рис. 2.27) застосовують при великій продуктивності по газу.

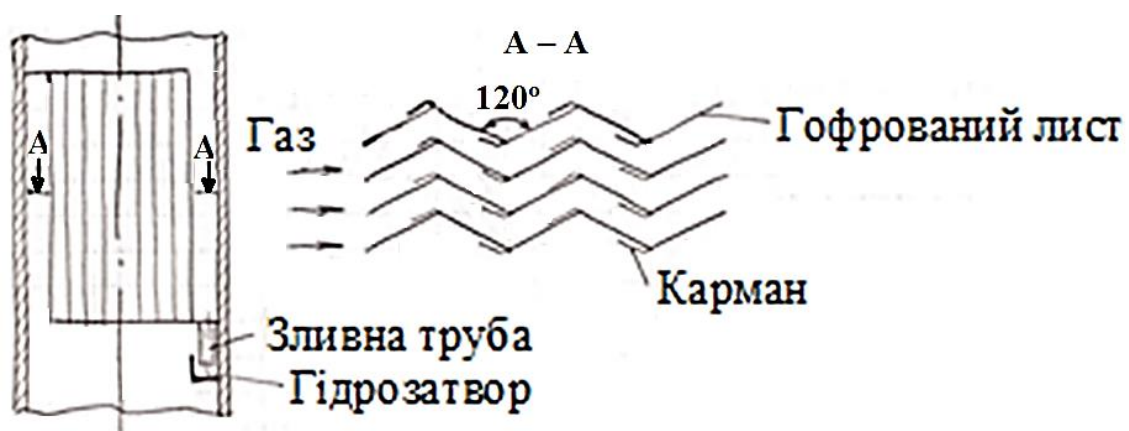


Рисунок 2.27 – Відбійник з вертикальним розташуванням елементів

Зливна труба занурена у рідину гідрозатвора для виключення проходження через трубу газу.

Відцентровий сепаратор

Робота відцентрових сепараторів базується на виділенні під дією відцентрової сили рідкої фази з газорідкого потоку, що обертається.

Газорідка суміш постуває через тангенціальні прорези в нижній частині патрубків, які укріплюються на тарілці. Суміш отримує об'овий і обертальний рух. В результаті рідина концентрується на периферії патрубка і відбійником відводиться у міжтрубний простір (рис. 2.28).

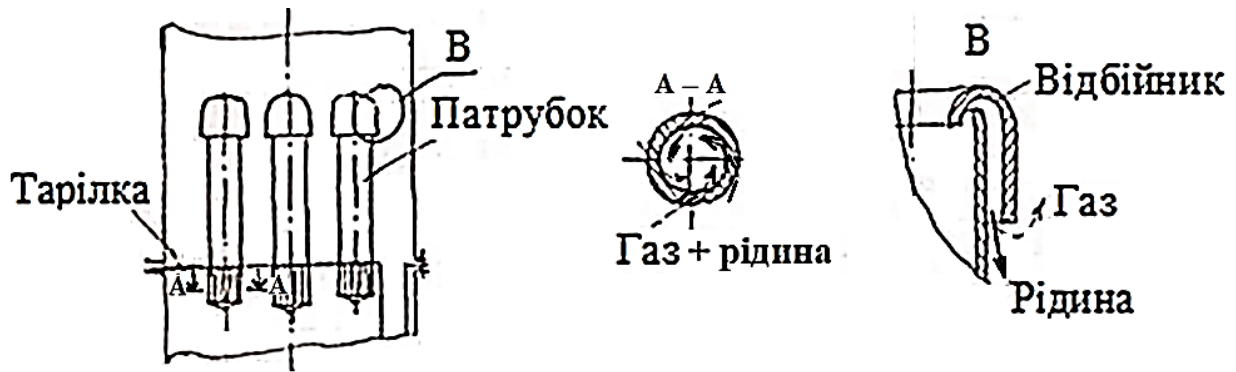


Рисунок 2.28 – Відцентровий сепаратор

Відцентровий сепаратор циклонного типу

В цьому сепараторі газорідинна суміш проходить крізь циклонну камеру, яка вбудована в колону.

Питання для самоконтролю до підрозділу 2.5

1. Обґрунтувати застосування відбійних пристроїв.
2. Навести конструкції відбійних пристроїв.
3. Яким чином здійснюється уловлювання крапельної вологи в інерційних сепараторах?
4. Від чого залежить продуктивність відбійника?
5. Навести характеристики відбійних пристроїв.

3. ТАРИЛЧАСТА КОЛОНА

Розділ містить особливості конструкцій тарілчастих колонних апаратів.

3.1. Конструкція тарілчастої колони

Схема тарілчастого колонного апарата подана на рисунку 3.1.

Для зручності монтажу і ремонту тарілок відстань між ними приймають не менше 450 мм. Монтаж і обслуговування тарілок здійснюється через люки в апаратах з суцільно зварним корпусом.

Люки на корпусі розташовують через 5...10 тарілок. Діаметр люків становить 450...600 мм. Відстань між тарілками в місті встановлення люка – 800...1000 мм.

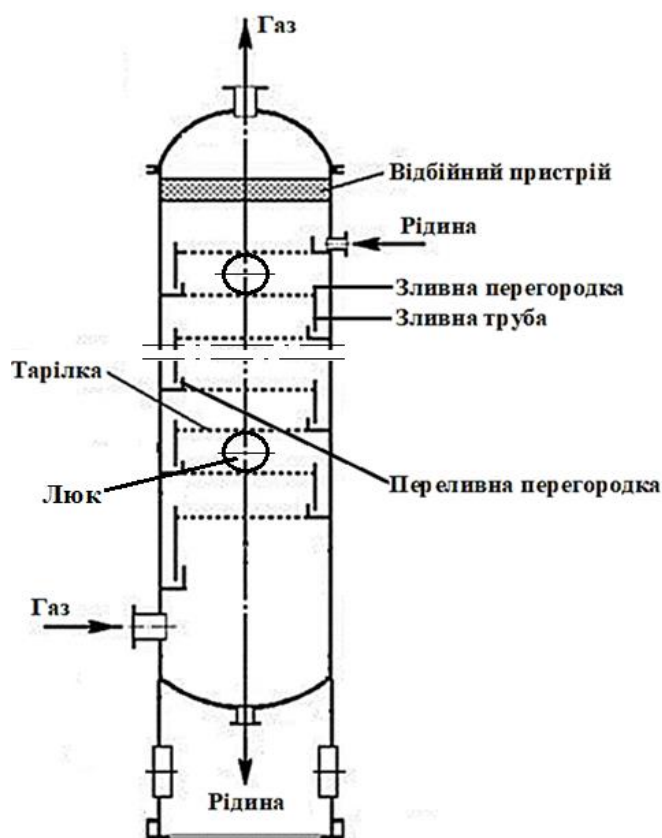


Рисунок 3.1 – Схема тарілчастого колонного апарата з переливними пристроями

Корпуси апаратів, які працюють при великих робочих тисках, а також при діаметрах колон більше 1200 мм, виконуються суцільнозварними. Апарати діаметром 400...1000 мм складаються з царг, якщо розрахунковий тиск в них не перевищує 1,6 МПа.

Апарати у царговому виконанні мають нероз'ємні тарілки, які являють собою відбортований металевий диск з пристроями для введення газу на тарілку і зливу рідини.

Питання для самоконтролю до підрозділу 3.1

1. Як розміщують тарілки в колонному апараті?
2. Обґрунтувати застосування колонних апаратів з суцільно зварним корпусом і у царговому виконанні.
3. Яким чином здійснюється монтаж і обслуговування тарілок?
4. Навести опис тарілчастого колонного апарата.

3.2. Царга тарілчастої колони

Конструкція царги тарілчастої колони наведена на рисунку 3.2.

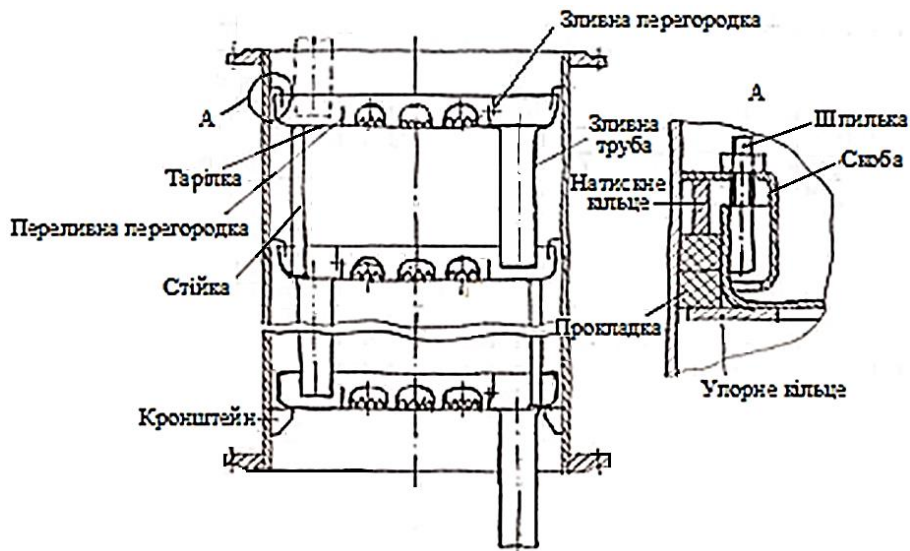


Рисунок 3.2 – Царга тарілчастої колони

Зливна і переливна перегородки виконуються для створення необхідного рівня рідини на тарілці.

Висота переливної перегородки постійна, вона створює переливний карман, в який занурена зливна труба тарілки, яка розташована вище.

Висота зливної перегородки регулюється для підтримання необхідного рівня рідини на тарілці.

Нижня тарілка встановлюється на кронштейні, інші – на стійках.

Герметизація тарілки здійснюється прокладкою (часто азбестовим шнуром), яка розташована на упорному кільці в зазорі між тарілкою і корпусом, скобами і шпильками.

Тарілки розбірної конструкції використовуються в апаратах діаметром більше 1200 мм.

3.3. Вузол кріплення тарілки до корпусу

Тарілки кріпляться до опорної рами струбцинами, болтами з гайками і притискними планками (рис. 3.3).

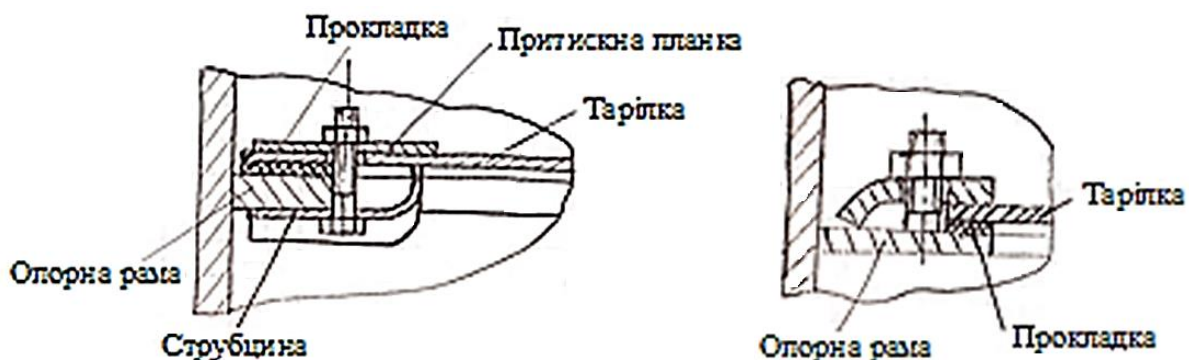


Рисунок 3.3 – Приклади виконання вузлів кріплення тарілки до корпусу

Герметичність з'єднання забезпечується прокладками.

3.4. Вузли вводу сировини в колону

Введення рідкого продукту в колону

Конструкція вузла вводу залежить від фазового стану суміші, яка поступає в колону. Рідке живлення, а також флегма вводяться безпосередньо у переливні кармани тарілок. Переливні кармани, куди вводится рідина, заглиблені нижче тарілки (рис. 3.4).

Відбивна пластина слугує для гашення енергії струменя.

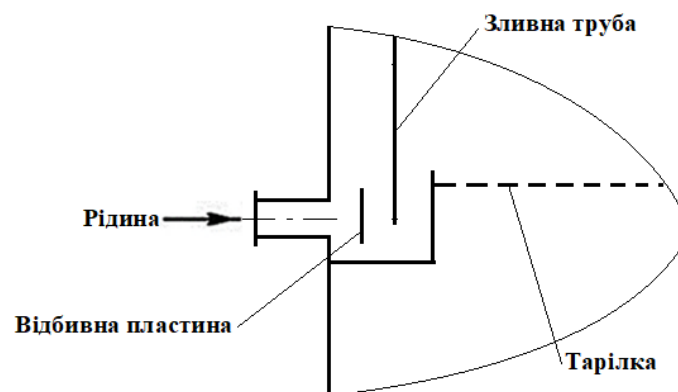


Рисунок 3.4 – Вузол введення рідкого продукту в колону

Введення газорідкого продукту в колону

Якщо в колону подається газорідка сировина, вона звичайно має велику швидкість, що призводить до зношення корпусу. Тому для захисту колони від ерозії застосовуються відбійний лист або спеціальний пристрій – уліту (рис. 3.5).

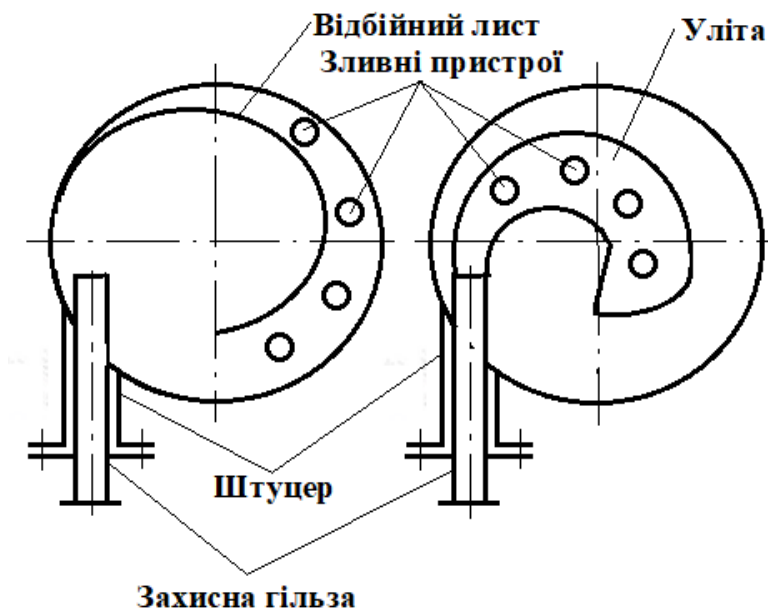


Рисунок 3.5 – Приклади виконання вузлів введення газорідкого продукту в колону

Захисна гільза застосовується для захисту штуцера від ерозії, заміна якої при зношуванні не складна.

Введення газорідкої сировини в колону може здійснюватися також двома потоками одночасно. В цьому випадку відповідно будуть змінюватися конструкції відбійних листів і уліт.

3.5. Вузол виведення рідини з колони

Виведення рідини з колони здійснюється з заглиблених переливних карманів. При цьому зливна труба повинна бути зануреною в рідину для унеможливлення виходу газу через цю трубу (рис. 3.6).

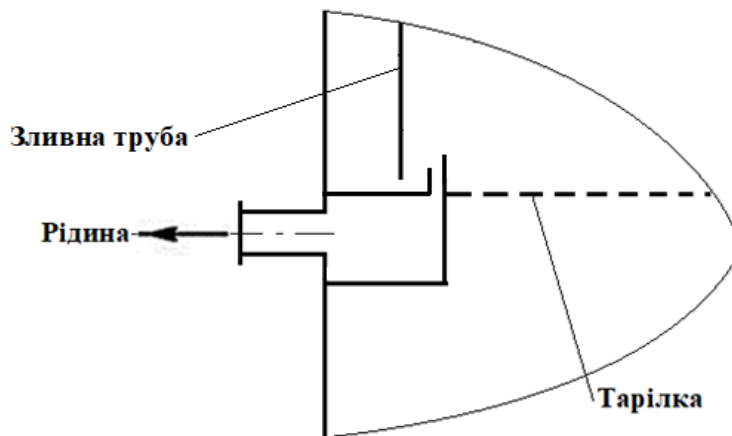


Рисунок 3.6 – Вузол виведення рідини з колони

Питання для самоконтролю до підрозділів 3.2–3.5

1. Надати конструкцію царги тарілчастої колони.
2. Яким чином утворюється необхідний рівень рідини на тарілці?
3. Навести конструкції вузлів кріплення тарілки до корпусу.
4. Яким чином вводиться рідкий продукт в колону?
5. Яким чином вводиться газорідкий продукт в колону?
6. Обґрунтувати застосування захисної гільзи.
7. Обґрунтувати застосування уліти.
8. Надати конструкцію вузла виведення рідини з колони.

3.6. Конструкції тарілок

Класифікація тарілчастих контактних пристроїв

- 1) За способом зливу рідини з тарілки на тарілку:

тарілки зі зливними пристроями;

тарілки без зливних пристроїв.

- 2) За напрямком руху газової і рідинної фаз в зоні контакту:

тарілки з протитоком;

тарілки з прямотоком;

тарілки з перехресним током.

3) Залежно від діаметра колони і тиску:

нероз'ємні тарілки;

тарілки розбірної конструкції.

Ковпачкові тарілки

Ковпачкові тарілки найбільш поширені через простоту експлуатації і універсальність.

Рідина рухається вздовж тарілки і переливається з верхньої тарілки на нижню. Газ рухається протитечією, подається під ковпачки, проходить через шар рідини і виходить через прорізи у нижній частині ковпачків у вигляді бульбашок. Прорізи виконуються для рівномірного виходу газу з-під ковпака (рис. 3.7).

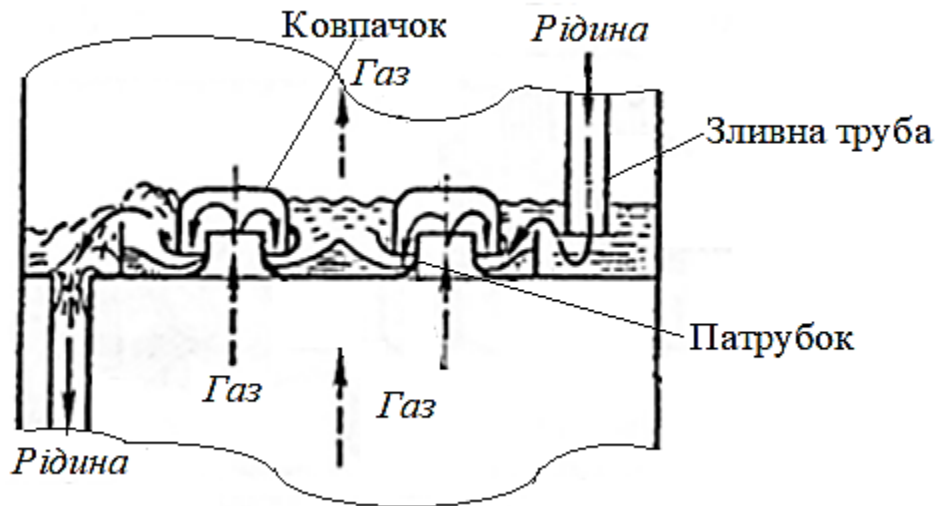


Рисунок 3.7 – Кувачкова тарілка

Полотна тарілок можна виготовляти зі зварних листів, при цьому зварні шви повинні бути зачищені урівень з основним металом з обох сторін [5].

Варіанти кріплення ковпачків

Конструкція з регулюванням положення ковпачка по висоті

Ковпачок закріплений гайками на шпильці. Шпилька приварюється до патрубку (рис. 3.8).

Положення ковпачка по висоті регулюється його обертанням. При цьому одночасно обертається і нижня гайка, яка приварена до ковпачка.

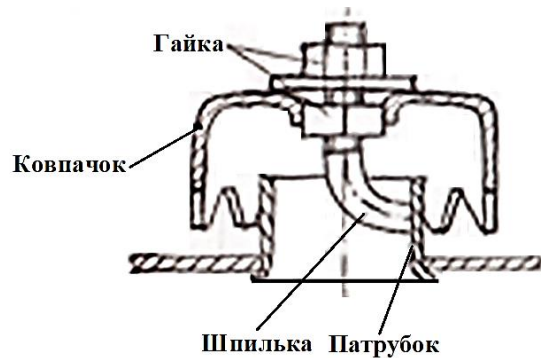


Рисунок 3.8 – Закріплення ковпачка на тарілці з регулюванням його положення по висоті

Ковпачки без регулювання положення по висоті

Ковпачок упирається нижніми кромками прорізей в полотно тарілки або встановлюється на 3 опорних ребрах (рис. 3.9).

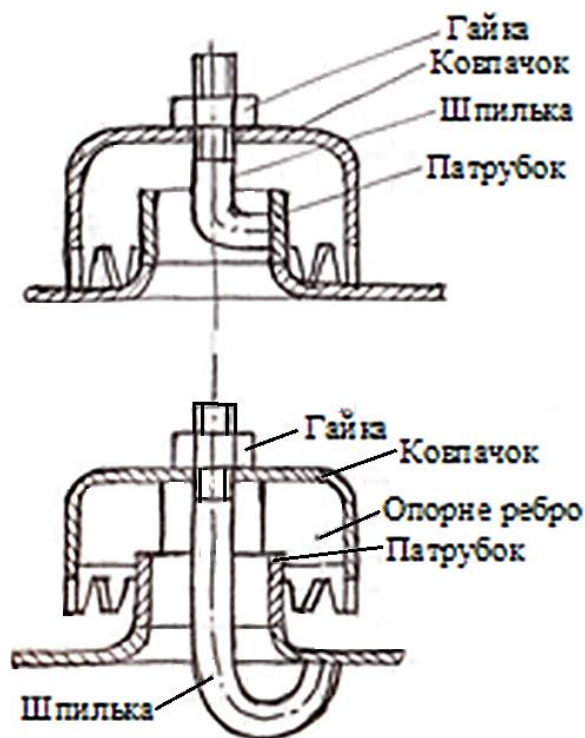


Рисунок 3.9 – Закріплення ковпачка на тарілці без регулювання його положення по висоті

При нерегульованому кріпленні ковпачків неточність встановлення патрубків призводить до неправильного положення ковпачків по висоті або перекосу, що спричиняє їх нерівномірну роботу.

Патрубки кріпляться до полотна тарілки розвальцюванням або зваркою. Розвальцювання потребує більшої товщини полотна тарілки.

Приварка патрубка дозволяє зменшити товщину полотна до 1,5...2 мм. Для запобігання короблення при зварюванні полотно в місці кріплення патрубка відбортовують.

Стандартні капсульні ковпачки мають діаметр 50-150 мм. Ковпачки виготовляють штампованими з вуглецевої сталі товщиною 2...4 мм, з легованої сталі товщиною 1,5...2 мм, з чавуну литими товщиною 5 мм, з міді, алюмінієвих сплавів, кераміки, пластмаси і т. ін.

По колу ковпачка для проходу газу виконано 20–40 прорізів висотою 20...30 мм.

Переваги ковпачкових тарілок. Відносно високий ККД (0,75–0,8), працюють у широкому діапазоні продуктивності по газу.

Можна використовувати при нестабільних навантаженнях по рідині і газу.

Недоліки ковпачкових тарілок. Висока металоємність і трудомісткість виготовлення.

Тарілки з тунельними ковпачками

Тарілки складаються з штампованих жолобів, укладених вздовж ходу рідини на опорні кутки і накритих ковпачками (рис. 3.10).

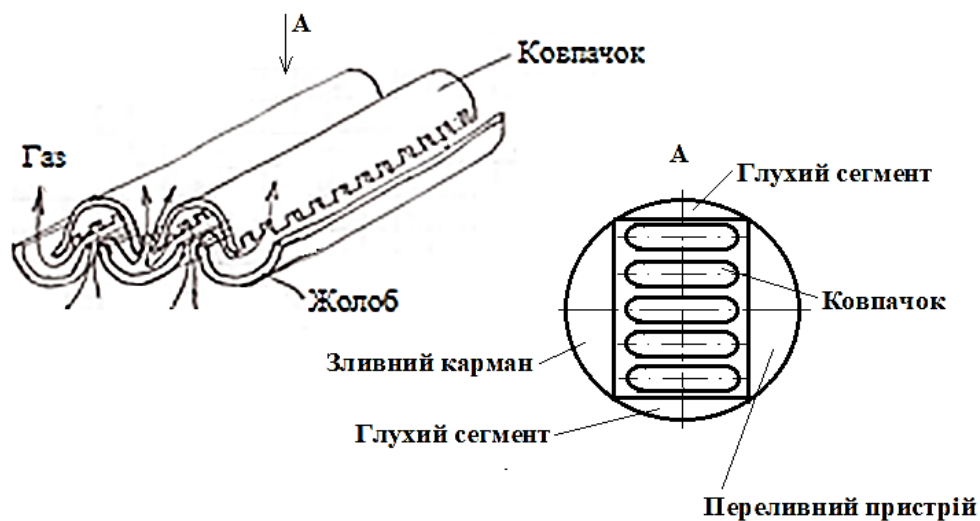


Рисунок 3.10 – Тарілка з тунельними ковпачками

Між жолобами і ковпачками утворюються канали для газу.

Для рівномірного розподілу газу ковпачки у нижній частині мають трапецієподібні прорізи.

Ковпачки кріпляться на полотні тарілки шпильками.

Рідина, яка стікає з розташованої вище тарілки, попадає в зливний сегментний карман. Верхня кромка сегментного карману має трикутні вирізи для рівномірного розподілу рідини по ширині тарілки.

Рівень рідини на тарілці регулюється переміщенням зливної планки.

Переваги тарілок з тунельними ковпачками. Невелика кількість ковпачків і можливість їх очищення.

Недоліки тарілок з тунельними ковпачками. Невисока ефективність, мала продуктивність, велика металоємність.

Тарілки з S-подібними елементами

S-подібні елементи (рис. 3.11) встановлюються перпендикулярно напрямку руху рідини на тарілці.

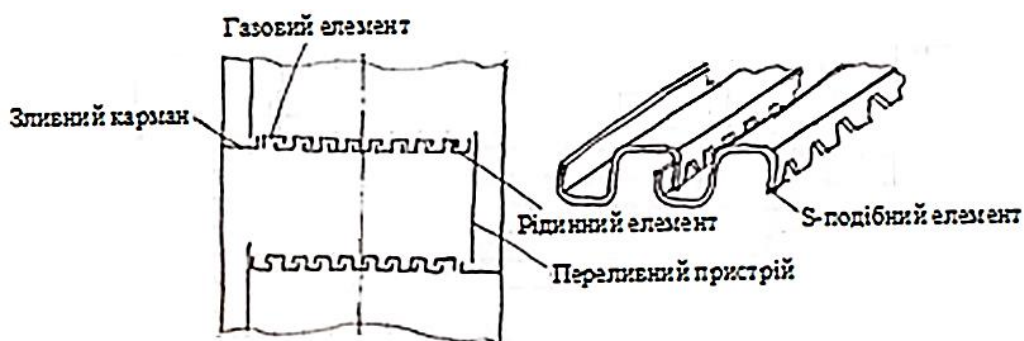


Рисунок 3.11 – Тарілки з S-подібними елементами

З торців канали закриваються заглушками для запобігання виходу рідини і газу.

S-подібний елемент утворює одночасно порожнини для рідини і для газу. У вертикальній стінці елемента, як і у капсульних ковпачках, виконані трапецієподібні прорізи. На початку тарілки встановлений газовий елемент, біля зливу з тарілки – рідинний елемент.

Шар рідини рухається потоком у напрямку до зливу, проходить над S-подібними елементами і переливається через них.

Газ проходить через прорізи S-подібних елементів, барботує через рідину і при цьому сприяє його руху по тарілці.

Кріплять S-подібні елементи болтами до опорного кільця або до опорних балок.

Переваги тарілок з S-подібними елементами. S-подібний елемент має підвищену жорсткість порівняно з елементами жолобчастої тарілки, що дозволяє виконувати ці елементи з меншою товщиною стінки.

Більш повно використовується переріз колони і має вищу продуктивність, ніж тарілка з тунельними ковпачками.

Простота конструкції, що дозволяє швидко збирати і розбирати тарілку.

Металоемність удвічі менша, а продуктивність на 20–30% більша порівняно з тарілками з капсульними ковпачками. ККД дорівнює 0,6...0,8.

Клапанні тарілки

Клапанні тарілки являють собою листи з отворами, які споряджені дисковими або прямокутними клапанами (рис. 3.12).

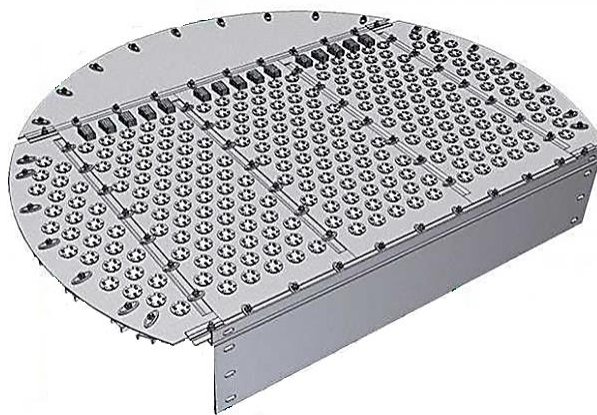


Рисунок 3.12 – Клапанна тарілка

Діаметр дискових клапанів звичайно 50 мм, діаметр отвору під клапаном в полотні тарілки – 30...40 мм.

Площа поперечного перерізу отворів складає 10...15% площі поперечного перерізу колони.

У робочому стані під тиском газового потоку клапан піднімається і газ проходить крізь шар рідини у вигляді бульбашок.

Висота підйому клапану – 6...8 мм.

При повному підйомі пластини клапану площа прохідного перерізу щілини між тарілкою і пластиною клапану трохи менше площі отвору під клапаном (рис. 3.13).

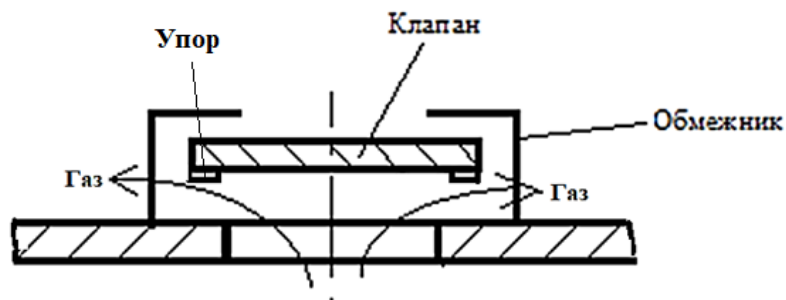


Рисунок 3.13 – Клапан

Клапани підйомно-поворотного типу

Клапан підйомно-поворотного типу подано на рисунку 3.14.

В нижньому положенні диск клапану опирається на спеціальні упори, що забезпечує мінімальний зазор між тарілкою і диском 1...1,5 мм, необхідний для виключення можливого прилипання диска до тарілки (рис. 3.15а).

Дисковий клапан має 3 напрямні, які розташовані під кутом 120° в плані. Дві напрямні мають більшу довжину і більшу вагу.

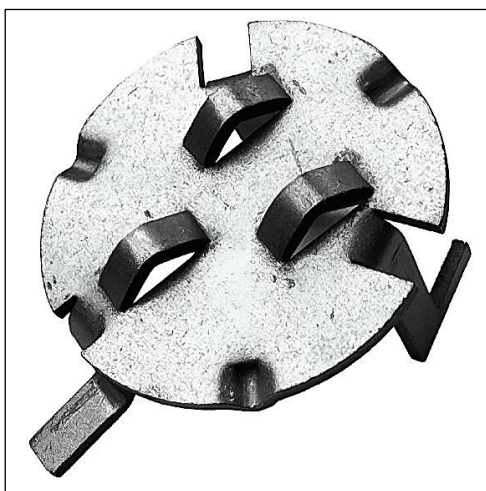


Рисунок 3.14 – Клапан підйомно-поворотного типу

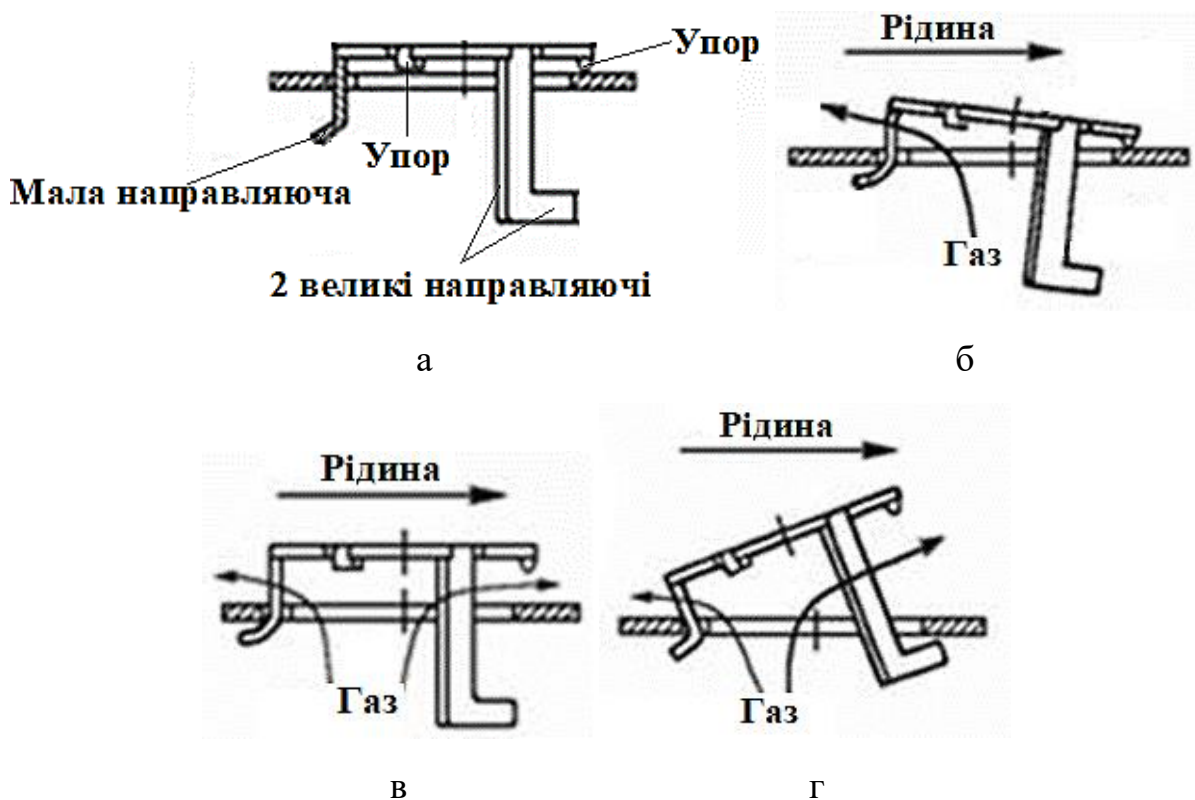


Рисунок 3.15 – Схема роботи підйомно-поворотного клапана

Зі збільшенням швидкості газу спочатку підіймається легка частина клапану і газ виходить у напрямку, що протилежному напрямку руху рідини (рис. 3.15б). Потім поступово диск клапану приймає положення, при якому

газ виходить у уздовж руху рідини, а також у зворотному напрямку (рис. 3.15в). При високій продуктивності газу клапан підводиться повністю до упору і нахиляється під кутом $12...15^\circ$ до площини тарілки, а напрямки руху рідини і газу співпадають (рис. 3.15г) [6].

Коротка ніжка клапану розташована у вирізі на краю отвору, що забезпечує задане положення клапану при його підйомі.

Конструкція переливних пристроїв така ж, як і у ковпачкових тарілках.

Переваги тарілки з підйомно-поворотними клапанами. Забезпечення ефективного масообміну у великому інтервалі робочих навантажень по газу, який у 3...5 разів більший порівняно з ковпачковими тарілками.

Простота.

Низька металоємність і вартість, яка на 30...40% менша порівняно з ковпачковими тарілками.

Невеликий гідравлічний опір під час саморегульованої роботи.

Недолік тарілки з підйомно-поворотними клапанами. Можливе заклинювання клапанів, що призводить до погіршення масообмінного процесу.

Баластні клапанні тарілки

Тарілки використовуються для підвищення продуктивності і діапазону стійкої роботи, характеризуються більш рівномірною роботою.

Клапани таких тарілок можуть мати індивідуальний або груповий баласт (рис. 3.16).

Під час роботи спочатку підіймається легка пластина клапану. Потім пластина упирається в баласт і підіймається разом з баластом.

Упори виконуються для виключення прилипання.

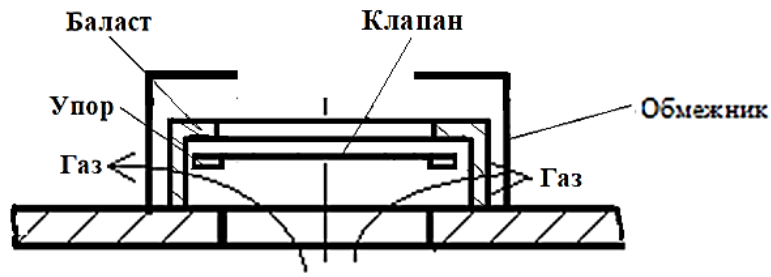


Рисунок 3.16 – Клапан з баластом

Сітчасті тарілки

Застосовуються в апаратах діаметром 400...4000 мм при відстані між тарілками 200 мм і більше.

Тарілки являють собою металевий диск з отворами діаметром $d = 2...8$ мм з зливними пристроями.

Режим роботи в таких тарілках важко регулювати.

Отвори розташовуються по вершинах рівнобічних трикутників з кроком $t = (3...5) d$ (рис. 3.17).

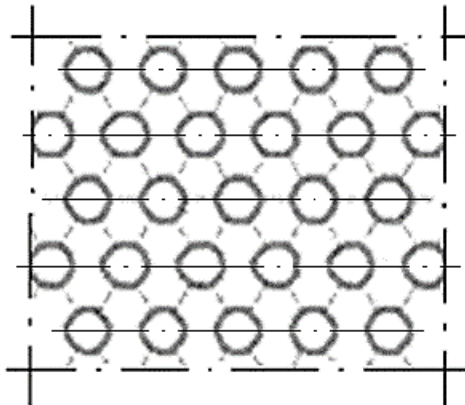


Рисунок 3.17 – Фрагмент сітчастої тарілки

Площа отворів залежно від продуктивності тарілки по газу складає 8...30 % від площі перерізу колони.

В колонах діаметром більше 800 мм тарілки складаються з окремих секцій.

Кріплення тарілки до корпусу і пристрої переливу ті ж самі, як у ковпачкових і клапанних тарілок.

Газ повинен рухатися зі швидкістю достатньою для подолати тиску шару рідини на тарілці і запобіганню витіканню рідини через отвори.

Переваги сітчастої тарілки:

малий гідравлічний опір;

стабільна робота у широкому діапазоні швидкостей газу.

Недоліки сітчастої тарілки:

чутливість до забруднень і відкладень;

необхідність підтримки стабільної подачі газу для здійснення робочого процесу;

необхідність встановлювання строго горизонтального положення тарілок для забезпечення стійкої роботи колонного апарата.

Сітчасто-клапанна тарілка

Для розширення діапазону стійкої роботи сітчастих тарілок їх комбінують з клапанними пристроями (рис. 3.18).

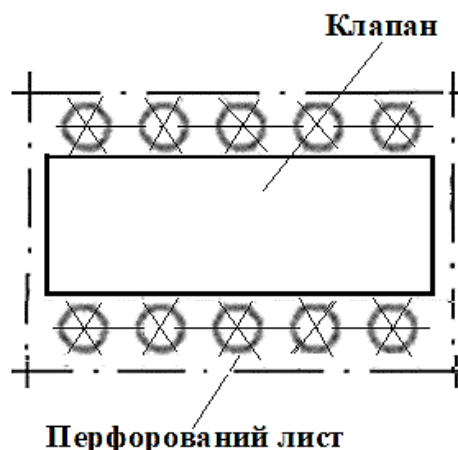


Рисунок 3.18 – Фрагмент сітчасто-клапанної тарілки

При малих навантаженнях по газу тарілка працює як звичайна сітчаста тарілка. З підвищенням витрати газу клапан підіймається, між тарілкою і клапаном утворюється щілина, куди прямує газ у напрямку руху рідини по тарілці.

Переваги сітчастих і сітчасто-клапанних тарілок. Великий переріз отворів і, відповідно, велика продуктивність по газу (на 30...40 % вище ніж у ковпачкових тарілок).

Простота виготовлення.

Низька металоємність.

Недоліки сітчастих і сітчасто-клапанних тарілок. Висока чутливість до точності встановлення.

Не рекомендується до роботи з забрудненими середовищами, що може призвести до забивання отворів.

Пластинчасті тарілки

Пластини нахилені до площини тарілки під кутом 10...15°, газ виходить з великою швидкістю у напрямку руху рідини, що призводить до підвищення продуктивності по газу і по рідині (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 – Пластинчасті тарілки

Тарілки працюють у прямоточному режимі, а сама колона – у протиточному.

Переваги пластинчастих тарілок. Підвищують навантаження по рідині і по газу.

Низький гідравлічний опір.

Можливість роботи з забрудненими рідинами.

Низька металоємність.

Недоліки пластинчастих тарілок. Важкість підведення і відведення тепла.

Низька ефективність при невеликих витратах рідини.

Струменеві тарілки

Використовуються при менших витратах рідини, ніж пластинчасті тарілки.

Струменеві тарілки являють собою полотно з вікнами і відігнутими пелюстками (рис. 3.20). Тарілки працюють так, як пластинчасті тарілки.

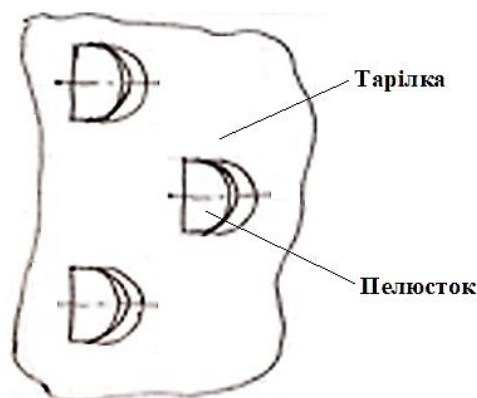


Рисунок 3.20 – Фрагмент струменевої тарілки

Інколи такі тарілки мають додаткові перегородки для забезпечення необхідного шару рідини на тарілці і регулювання потоку рідини.

Провальні тарілки

Провальні тарілки не мають зливних пристроїв, газ і рідина проходять через ті самі отвори або щілини. Площа живого перерізу отворів становить 10...30% площі живого перерізу колони.

На тарілці утворюється шар рідини, через який проходить газ. Одночасно з барботажем газу здійснюється злив рідини («провальювання») через окремі отвори, а через інші отвори – проходження газу. Періодично місця зливу рідини і проходження газу на тарілці змінюються.

Тарілки стабільно працюють при середніх і високих навантаженнях по рідині.

Провальні сітчасті тарілки

Провальні сітчасті тарілки являють собою металеві полотна з круглими отворами (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Провальна сітчаста тарілка

Діаметр отворів в тарілках становить 4...10 мм.

Провальні решітчасті тарілки

Провальні решітчасті тарілки являють собою металеві полотна з щілинами шириною 3...8 мм (рис. 3.22).

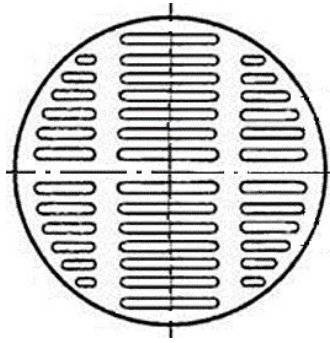


Рисунок 3.22 – Провальна решітчаста тарілка

Суміжні тарілки за висотою колонного апарата повинні бути повернуті в горизонтальній площині на 90° одна відносно одної [5].

Для роботи у більш широкому інтервалі навантажень застосовують хвилясті провальні тарілки.

Переваги провальних сітчастих і решітчастих тарілок.

Простота конструкції.

Низькі металоємність і вартість.

Низький гідравлічний опір.

Можливість роботи з забрудненими рідинами при достатній ширині щілини або діаметра отвору.

Можливість роботи при значних навантаженнях по фазах.

Недоліки провальних сітчастих і решітчастих тарілок.

Вузький діапазон змінювання швидкостей газу і рідини, при яких забезпечується стійка і ефективна робота тарілок.

Складність забезпечення рівномірного розподілу зрошення по поверхні тарілок на початку процесу.

Трубчасті провальні тарілки

Трубчасті провальні тарілки являють собою решітки, які утворені з паралельних труб, що приєднані до колектору.

Перевагою є легкість відведення тепла від шару рідини на тарілці охолоджуючим агентом, який подається у труби.

Недолік: більш складна конструкція порівняно з сітчастими і решітчастими провальними тарілками.

Питання для самоконтролю до підрозділу 3.6

1. Надати класифікацію тарілчастих контактних пристроїв.
2. Навести варіанти кріплення ковпачків на тарілці.
3. Навести переваги і недоліки ковпачкових тарілок.
4. Навести конструкції тарілок з тунельними ковпачками.
5. Описати роботу тарілок з S-подібними елементами.
6. Обґрунтувати особливості роботи клапанних тарілок.
7. Навести різновиди клапанних тарілок.
8. Пояснити відмінність сітчастих тарілок від сітчасто-клапанних тарілок.
9. Пояснити принцип роботи пластинчастих тарілок.
10. Обґрунтувати умови застосування струменевих тарілок.
11. Пояснити особливості конструкції провальних тарілок.
12. Навести переваги і недоліки провальних сітчастих і решітчастих тарілок.
13. Навести різновиди провальних тарілок.

4. РОЗРАХУНОК ВНУТРІШНІХ ПРИСТРОЇВ КОЛОННИХ АПАРАТІВ

В розділі наведені розрахунки на міцність і жорсткість плоских тарілок, опорного перфорованого диска під насадку, розрахунок на міцність опорних балок під тарілки і конструктивний розрахунок капсульних ковпачків. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість подано у посібнику [4].

4.1. Розрахунок товщини плоскої круглої тарілки (опорного перфорованого диска під насадку)

Виконавча товщина тарілки розраховується за формулою:

$$S = 0,45D_T \sqrt{\frac{p}{[\sigma]\varphi_0}} + C,$$

де 0,45 – конструктивний коефіцієнт; D_T – діаметр тарілки, м; p – сумарний (розрахунковий) тиск на тарілку, МПа; $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу тарілки при розрахунковій температурі, МПа; φ_0 – коефіцієнт ослаблення тарілки отворами; C – сума додатків до розрахункової товщини стінки, м.

Сумарний (розрахунковий) тиск на тарілку:

$$p = p_n + p_p,$$

де p_n – тиск на диск від сухої насадки, МПа; p_p – тиск на диск від рідини, яка утримується насадкою, МПа.

Тиск на диск від сухої насадки:

$$p_n = m_n g / F,$$

де m_n – маса насадки, кг; $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння; F – площа живого перерізу колони, м².

Тиск на диск від рідини, яка утримується насадкою:

$$p_p = m_p g / F$$

де m_p – маса рідини, яка утримується насадкою, кг.

Коефіцієнт ослаблення тарілки отворами:

$$\varphi_0 = (t - d) / t,$$

де t – крок між отворами, м; d – діаметр отворів, м.

Суму додатків до розрахункової товщини C належить визначати за формулою

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

де C_1 – додаток для компенсації корозії і (або) ерозії, м; C_2 – додаток для компенсації мінусового допуску, м; C_3 – технологічний додаток, м.

Додаток для компенсації корозії і ерозії:

$$C_1 = v_{кор} \tau + C_e,$$

де $v_{кор}$ – швидкість корозії (проникність), м/рік; τ – строк служби елемента у роках; C_e – додаток для компенсації ерозії, м.

Звичайно, при $v_{кор} \leq 5 \cdot 10^{-5}$ м/рік додаток для компенсації корозії не розраховують за вищенаведеною формулою, а приймають 10^{-3} м. Якщо у довідковій літературі немає даних о величині $v_{кор}$, але відомо, що у робочих умовах елемент, який розраховується, стійкий до середовища, що його оточує, складова додатку C_1 для компенсації корозії приймається $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Додаток C_1 при двобічному контакті з корозійним і (або) ерозійним середовищем належить відповідно збільшувати.

Додаток для компенсації корозії до товщини внутрішніх елементів повинен бути:

$2C_1$ – для незнімних навантажених елементів;

$0,5C_1$, але не менше 2 мм – для знімних навантажених елементів;

C_1 – для незнімних ненавантажених елементів.

При наявності на тарілці (опорному перфорованому диску під насадку) канавок додаток для компенсації корозії приймається з урахуванням глибини цих канавок.

Для внутрішніх знімних ненавантажених елементів додаток для компенсації корозії не враховується.

Додаток C_e належить враховувати у таких випадках:

- 1) при переміщенні середовища зі значними швидкостями (для рідких середовищ – більше 20 м/с, для газоподібних – більше 100 м/с);
- 2) при наявності у рухомому середовищі абразивних твердих частинок;
- 3) при ударній дії середовища на деталь.

Додаток на компенсацію мінусового допуску C_2 і технологічний додаток C_3 враховують у випадках, коли їх сумарне значення перебільшує 5% номінальної товщини листа.

Технологічний додаток C_3 передбачає компенсацію стоншення стінки елемента посудини при технологічних операціях: витяжці, штампуванні, гнутті і т. ін. Залежно від прийнятої технології цей додаток належить враховувати при розробці робочих креслень. Технологічний додаток C_3 не включає в себе округлення розрахункової товщини до стандартної товщини листа.

4.2. Розрахунок товщини плоскої тарілки (опорного перфорованого диска під насадку), яка складена з окремих прямокутних секцій

Виконавча товщина:

$$S = kb \sqrt{\frac{p}{[\sigma]\varphi_0}} + C,$$

де k – коефіцієнт; a – більша сторона прямокутника, м; b – менша сторона прямокутника, м.

Коефіцієнт $k = f(a/b)$ – визначається з графіка (рис. 4.1).

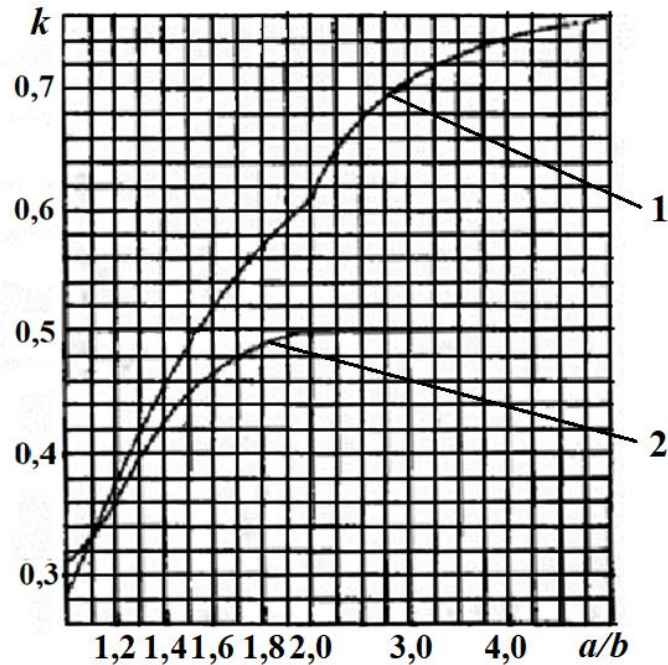


Рисунок 4.1 – Графік для визначення коефіцієнта k :
1 – шарнірне закріплення, 2 – жорстке закріплення

Питання для самоконтролю до підрозділів 4.1, 4.2.

1. Пояснити відмінності в розрахунках товщини плоскої круглї тарілки і окремої прямокутної секції.
2. Як визначається коефіцієнт ослаблення тарілки отворами φ_0 ?
3. Навести складові сумарного розрахунковий тиску на тарілку.
4. Навести складові додатку до розрахункової товщини S .

4.3. Розрахунок тарілок на жорсткість

При прогинанні тарілка працюватиме нерівномірно, тому максимальний прогин f не повинен перевищувати допустимого прогину $[f]$:

$$f \leq [f]$$

$$[f] = 1/500$$

Абсолютний прогин плоскої круглої тарілки без врахування перфорації

$$f = k_f \frac{D_T^4 p}{E(S - C)^3}$$

Абсолютний прогин окремої прямокутної секції тарілки без врахування перфорації

$$f = k_f \frac{pb^4}{E(S - C)^3}$$

Коефіцієнт k_f :

$k_f = 0,0106$ – для жорстко закріпленої круглої тарілки;

$k_f = 0,0437$ – для вільно опертої круглої тарілки.

Для окремої прямокутної секції, якщо секція жорстко закріплена по периметру:

$$k_f = 0,017 \text{ при } \frac{a}{b} = 1;$$

$$k_f = 0,017 + 0,003 \frac{a}{b} \text{ при } 1 < \frac{a}{b} < 2;$$

$$k_f = 0,024 \text{ при } \frac{a}{b} \geq 2.$$

Для окремої прямокутної секції, якщо секція вільно оперта по периметру k_f визначається з графіка залежно від відношення a/b за рисунком 4.2.

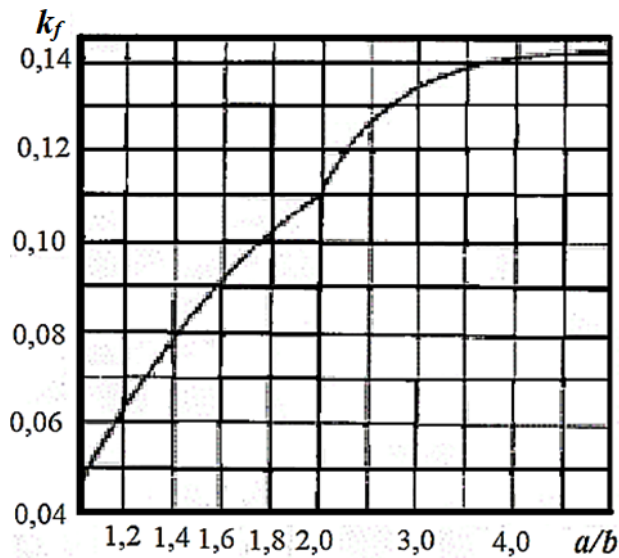


Рисунок 4.2 – Графік для визначення коефіцієнта k_f для окремої прямокутної секції тарілки

Питання для самоконтролю до підрозділу 4.3

1. Навести умову жорсткості тарілки.
2. Як розраховується прогин тарілки?
3. Пояснити відмінності в розрахунках жорсткості плоскої круглої тарілки і окремої прямокутної секції.

4.4. Розрахунок опорних балок під тарілки

Розміщення балок може бути паралельним або радіальним (рис. 4.3):

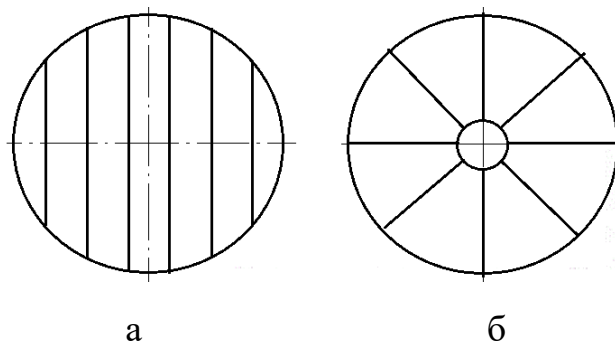


Рисунок 4.3 – Розташування балок: паралельне (а), радіальне (б)

Найчастіше використовується паралельне розташування балок.
Поперечний переріз балок звичайно двотавровий або швелерний.

Паралельне розміщення балок

У випадку паралельного розташування балок розглядають більше за довжиною ребро (яке сприймає максимальне навантаження), як балку вільно оперту по кінцях і навантажену рівномірним тиском по заштрихованій площі (рис. 4.4).

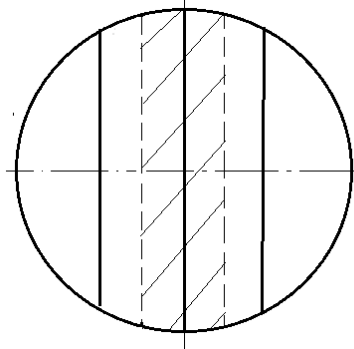


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема паралельного розташування опорних балок під тарілки

Вважаємо, що ребра сприймають половину всього навантаження на тарілку. Надалі необхідно перевірити правильність прийнятої умови, розглядаючи роботу балок сумісно зі стінкою.

Максимальний згинальний момент посередині балки:

$$M \approx \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{D}{8},$$

де z – кількість балок, D – внутрішній діаметр колони, м.

Розрахунковий момент опору:

$$W_R = \frac{M}{[\sigma]}.$$

Профіль і розміри поперечного перерізу балки вибираються з умови, що момент опору балки повинен бути більшим за розрахунковий момент опору $W > W_R$.

Наприклад, для балки прямокутного перерізу (рис. 4.5) момент опору W розраховується за формулою:

$$W = \frac{bh^2}{6},$$

де b – ширина балки, м; h – висота балки, м.

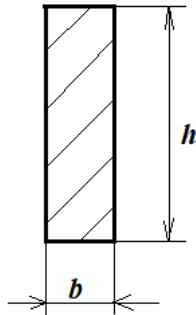


Рисунок 4.5 – Поперечний переріз балки

Приймаючи рекомендоване відношення ширини до висоти балки $b/h = 1/5$ і визначивши розрахунковий момент опору можна знайти розміри поперечного перерізу прямокутної балки.

При використанні сортового прокату для балки (куток, швелер, двотавр і т. ін.) вибирають № профілю з умови: $W > W_R$ з урахуванням двобічної добавки на корозію.

Радіальне розміщення балок

Розглядають діаметральне ребро, як балку вільно оперту по кінцях і навантажену рівномірним тиском по заштрихованій площі (рис. 4.6).

Приймаючи ті ж самі умови, що і при паралельному розташуванні балок, напишемо:

Максимальний згинальний момент посередині балки:

$$M = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{1}{z} \left(\frac{D}{2} - \frac{D}{3} \right)$$

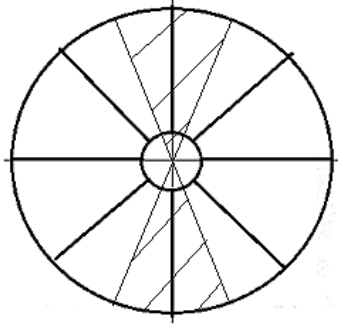


Рисунок 4.6 – Розрахункова схема радіального розташування опорних балок під тарілки

Розрахунковий момент опору:

$$W_R = \frac{M}{[\sigma]}$$

№ профілю вибирають з умови, що момент опору $W > W_R$ з урахуванням двобічної добавки на корозію.

Питання для самоконтролю до підрозділу 4.4

1. Пояснити відмінності в розрахунках балок, які розташовані паралельно і радіально.
2. Навести припущення, які приймаються при визначенні згинального моменту, що діє на балку.
3. Навести умови вибору розмірів поперечного перерізу балки.

4.5. Конструктивний розрахунок капсульних ковпачків

Розрахункова схема капсульного ковпачка наведена на рисунку 4.7.

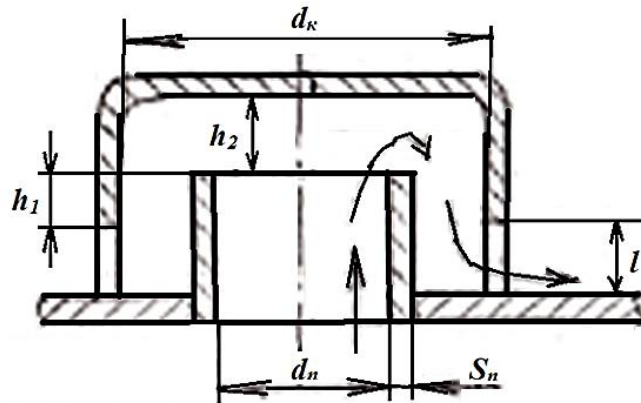


Рисунок 4.7 – Розрахункова схема капсульного ковпачка

Ковпачки розташовуються на тарілці у шаховому порядку у напрямку руху рідини.

Площа живого перерізу всіх газових патрубків на тарілці приймають рівною 10–30% площі живого перерізу колони:

$$\frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} n = \alpha \frac{\pi D^2}{4},$$

де d_n – внутрішній діаметр газового патрубка, м; n – кількість ковпачків; α – коефіцієнт, що показує яку частину живого перерізу колони займає живий переріз всіх газових патрубків.

Звідки знаходимо кількість ковпачків:

$$n = \alpha \frac{D^2}{d_{\text{п}}^2}$$

Для абсорберів $\alpha = 0,1 \dots 0,3$;

для ректифікаційних колон $\alpha = 0,1 \dots 0,2$;

для провальних тарілок $\alpha = 0,3$.

Висоту ковпачка над газовим патрубком h_2 знайдемо з умови рівності площ живих перерізів, що забезпечує рівність швидкості газу при русі по ковпачку.

$$\frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} = \pi d_{\Pi} h_2,$$

Звідки:

$$h_2 = \frac{d_{\Pi}}{4} = 0,25d_{\Pi}.$$

Діаметр ковпачка d_k знайдемо з умови рівності швидкостей газу в патрубку і кільцевому перерізі (розглянемо рівності відповідних площ):

$$\frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} = \frac{\pi}{4} [d_k^2 - (d_{\Pi} + 2S_{\Pi})^2],$$

де d_k – внутрішній діаметр ковпачка, м; S_{Π} – товщина стінки патрубку, м.

Звідки:

$$d_k = \sqrt{d_{\Pi}^2 + (d_{\Pi} + 2S_{\Pi})^2}.$$

Відстань від нижнього краю зубця ковпачка до тарілки $h_0 = 0 \dots 25$ мм.

Висота рівня рідини над верхнім обрізом прорізів ковпачків $h_1 = 15 \dots 40$ мм.

Висота прорізів l визначають з умови оптимального барботажу, що відповідає повному відкриттю прорізів для газу:

$$l = \frac{\xi \omega_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}}{g \rho_p},$$

де ω_{Γ} – швидкість газу, м/с; $\xi = 1,5 \dots 2,5$ – коефіцієнт гідравлічного опору ковпачкової тарілки; ρ_{Γ} – густина газу, кг/м³; ρ_p – густина рідини, кг/м³.

Швидкість газу ω_{Γ} через витрату V_{Γ} :

$$\omega_{\Gamma} = \frac{4V_{\Gamma}}{\pi d_{\Pi}^2 n}$$

Ширина прорізів b і їх кількість i визначаються відповідно до схеми, яка наведена на рисунку 4.8.

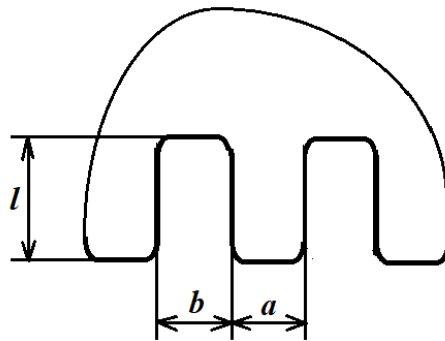


Рисунок 4.8 – Розрахункова схема до розрахунку ширини прорізів і їх кількості.

Приймаємо, що площа живого перерізу прорізів при їх повному відкритті дорівнює площі живого перерізу патрубку:

$$\frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4} = ibl.$$

В формулі дві невідомі величини: b і i .

Тому напишемо ще формулу довжини кола ковпачка:

$$\pi d_{\text{к}} = (a + b)i.$$

Вирішуючи спільно два рівняння, знаходимо ширину прорізів b і їх кількість i .

Питання для самоконтролю до підрозділу 4.5

1. Які величини визначаються в конструктивному розрахунку капсульних ковпачків?
2. Надати умову визначення кількості ковпачків на тарілці.
3. Надати умову визначення висоти ковпачка над газовим патрубком.
4. Як розраховується діаметр ковпачка?
5. Як розраховуються розміри прорізів і їх кількість в ковпачках?

ДОДАТОК А. Основні стандартизовані терміни та визначення

Нижче наведені основні стандартизовані терміни та визначення, які стосуються колонних апаратів, решта – у термінологічному словнику [2]. Галузь застосування багатозначного терміну в цьому розділі подана в круглих дужках світлим шрифтом після терміну. Недозволені до вживання терміни-синоніми наведені у лівій колонці в круглих дужках після основного терміну з позначкою "Нд".

Апарат	Посудина, яка обладнана внутрішніми пристроями та призначена для проведення хіміко - технологічних процесів (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Арматура (трубопровідна загальнопромислового призначення)	Сукупність пристроїв і приладів, установлюваних на трубопроводах та ємностях, які забезпечують керування потоком робочого середовища шляхом змінювання прохідного перерізу (ДСТУ 2611–94)
Балка	Стрижень, що зазнає здебільшого згину (ДСТУ 2825–94)
Вузол	Складальна одиниця, яка може складатися окремо від інших складових частин виробу чи виробу в цілому та виконувати певну функцію у виробі одного призначення лише разом з іншими складовими частинами (ДСТУ 2390–94)
Деформація	Відносна величина взаємного зміщення точок об'єкта в результаті його деформування (ДСТУ 2825–94)
Деформування	Процес взаємного зміщення точок об'єкта під час його навантажування (ДСТУ 2825–94)

**Діаметр
номінальний**

Параметр, що використовується як характеристика, загальна для всіх компонентів трубопроводів, крім таких, що характеризуються зовнішнім діаметром або діаметром різьби (ДСТУ 2485–94). Номінальний діаметр приблизно дорівнює внутрішньому діаметра трубопроводу в міліметрах і не має розмірності. Позначення номінального діаметра складається з літерного сполучення DN і числа, що вибирається з ряду, наведеного в ДСТУ ГОСТ 28338:2008, яке приблизно дорівнює внутрішньому діаметра трубопроводу в міліметрах (так, номінальний діаметр компонентів трубопроводів з внутрішнім діаметром приблизно 125 мм повинен позначатися DN125)

Днище

Невід'ємна частина корпусу посудини, яка обмежує внутрішню порожнину з торця (СОУ МПП 71.120–217:2009)

Ерозія

Руйнування поверхні в потоці газу або рідини, а також під дією механічного впливу або електричних розрядів (ДСТУ Б А.1.1-5–94)

Заглушка

Знімна деталь, яка дозволяє герметично закривати отвори штуцера або бобишки (СОУ МПП 71.120–217:2009)

**З'єднання зварне;
звар**

Нерознімне з'єднання заготовок, яке виконується зварюванням (ДСТУ 3761.3–98)

З'єднання різьбове

З'єднання складових частин виробу із застосуванням деталі, що має різьбу (ДСТУ 2390–94)

**З'єднання
розвальцьоване**

З'єднання складових частин виробу шляхом розширення охоплюваної деталі або стиснення охоплювальної деталі (ДСТУ 2390–94)

**З'єднання рознімне
(Нд З'єднання
розбірне)**

З'єднання, яке розбирається без порушення цілісності складових частин виробу (ДСТУ 2390–94)

З'єднання фланцеве	<p>Нерухоме рознімне з'єднання оболонки, герметичність якого забезпечується шляхом стискання ущільнювальних поверхонь безпосередньо одна з одною або за допомогою розміщених між ними прокладок із більш м'якого матеріалу, стиснених кріпильними деталями (ДНАОП 0.00-1.07–94).</p> <p>З'єднання складових частин виробу із застосуванням фланців (ДСТУ 2390–94)</p>
Знос	Наслідок зношування, визначений у прийнятих одиницях (одиницях довжини, об'єму, маси та ін.) (ДСТУ 2823–94)
Корозія	Процес руйнування металеві поверхні об'єкта внаслідок хімічної чи електрохімічної взаємодії з активним середовищем (агресивна атмосфера, розчин кислот, лугів, солей тощо) (ДСТУ 2860–94)
Корпус	Основна складальна одиниця, яка складається з обичайки і днища (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Кришка	Знімна частина посудини, яка закриває внутрішню порожнину (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Люк	Пристрій, який забезпечує доступ у внутрішню порожнину посудини (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Міцність	Властивість матеріалу чинити опір навантаженням без руйнування (міцність матеріалу оцінюють границею міцності (тимчасовим опором) – максимальним умовним напруженням, яке витримує зразок) (ДСТУ 2860–94).
Модуль пружності під час розтягу (Нд Модуль Юнга)	Відношення нормального напруження до відповідної лінійної деформації за лінійного напруженого стану до границі пропорційності (ДСТУ 2825–94)

Момент згинальний	Момент внутрішніх сил у перерізі об'єкта відносно осі, заданої в площині перерізу (ДСТУ 2825–94)
Навантаження	Чинник або сукупність чинників, дія яких на об'єкт призводить до зміни його напружено-деформованого стану (ДСТУ 2825–94)
Напруження	Вектор внутрішніх сил, що діють на одиницю площі даної елементарної площадки під час стягування її у точку (ДСТУ 2825–94)
Напруження допустиме	Відношення граничного напруження до коефіцієнта запасу міцності, регламентованого нормативними документами (ДСТУ 2825–94)
Обичайка	Циліндрична або конічна оболонка замкнутого профілю, відкрита з торців. (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Оболонка	Об'єкт, обмежений двома поверхнями, відстань між якими значно менша від інших його розмірів (ДСТУ 2825–94)
Опора	Пристрій для встановлення посудини в робочому положенні й передавання навантажень від посудини на фундамент або несучу конструкцію (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Розподіл навантаження [напруження, деформації]	Сукупність значень, навантаження [напруження, деформації] чи їх частостей, яка визначає міру імовірності кожної величини (ДСТУ 2444–94)
Сила зовнішня	Механічна дія на об'єкт розрахунку з боку об'єкта, усуненого під час розрахункової схематизації (ДСТУ 2825–94)
Сила нормальна	Поздовжня складова рівнодійної внутрішніх сил у перерізі об'єкта (ДСТУ 2825–94)
Сила поперечна	Дотична складова рівнодійної внутрішніх сил у перерізі об'єкта (ДСТУ 2825–94)

Тарілка	Контактний пристрій колони, який складається з напрямного апарата, що забезпечує взаємодію фаз і ступінчасту зміну концентрації або (та) температури по висоті колони (ГОСТ 16322–70)
Термін служби	Календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан (ДСТУ 2860–94)
Тиск внутрішній	Надлишковий тиск, який діє на внутрішню поверхню стінки посудини (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Тиск зовнішній	Надлишковий тиск, який діє на зовнішню поверхню стінки посудини (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Тиск надлишковий	Різниця абсолютного тиску й тиску навколишнього середовища, показаного барометром (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Тиск номінальний (Нд <i>Тиск умовний</i>)	Літерно-числове позначення, що характеризує надлишковий тиск, за якого забезпечується заданий термін служби арматури та з'єднань трубопроводів за температури робочого середовища 293 К (20 °С) (ДСТУ 3543–97). Позначення тиску складається з літерного сполучення «PN» та числової частини, що є значенням тиску в кГ/см^2 , на якій проведено розрахунок на міцність арматури та з'єднань трубопроводів за характеристиками міцності вибраних матеріалів, що відповідають температурі 293 К (20 °С) (наприклад, PN10)
Тиск пробний	Надлишковий тиск, при якому треба проводити гідравлічне випробування посудини або її елементів на міцність (щільність). (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Тиск робочий	Максимальний надлишковий тиск за нормальних умов експлуатації (СОУ МПП 71.120–217:2009)

Тиск розрахунковий	Максимальний надлишковий тиск, на який здійснюється розрахунок посудини на міцність (СОУ МПП 71.120–217:2009)
Тиск умовний	Розрахунковий тиск при температурі 20 °С, який використовується при розрахунку на міцність стандартних посудин (вузлів, деталей, арматури) (СОУ МПП 71.120–217:2009).
Штуцер	Елемент, призначений для приєднання до посудини трубопроводів, трубопровідної арматури, контрольно-вимірювальних приладів тощо (СОУ МПП 71.120–217:2009); штуцер звичайно складається з патрубка та фланця

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок основних елементів посудин та апаратів: підруч. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 428 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/65136>.
2. Андреев І. А., Мікульонок І. О. Розрахунок, конструювання і надійність обладнання хімічних виробництв: термінологічний словник. Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2002. 216 с.
3. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонок І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1999. 148 с.
4. Андреев Ігор. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38716>.
5. СОУ МПП 71.120–217:2009. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови. (стандарт Міністерства промислової політики України). [Чинний від 2009-07-07]. Вид. офіц. К.: Міністерство промислової політики України, 2009. 339 с.
6. Масообмінне обладнання газороздільних установок. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:a431440315da9066760766d0c931a08acfc9ca64/latest/316645/index.html.