



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”



ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ КОЛОН

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З ДИСЦИПЛІНИ
«ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ
ВИРОБНИЦТВ" І "ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ"»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до проведення НДРС

З ДИСЦИПЛІНИ
"ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ
ВИРОБНИЦТВ" І "ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ"

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ
КОЛОН

для студентів усіх форм навчання інженерно-хімічного
та хіміко-технологічного факультетів

Київ НТУУ "КПІ" 2008

УДК 532.52:66.045

Дослідження гідравлічного опору насадкових колон: Методичні вказівки для студентів усіх форм навчання інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів з дисципліни "Процеси та апарати хімічних і нафтопереробних виробництв" і "Процеси та апарати хімічної технології" / Уклад. В.Л.Ракицький. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – 24 с.

Відповідальний

редактор

Я.М.Корнієнко, д-р техн. наук, професор НТУУ "КПІ"

Рецензенти:

І.В.Коваленко, канд. техн. наук, доц. кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування НТУУ "КПІ"

Затверджено на засіданні кафедри

машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

протокол № 4 від 15 жовтня 2008 р.

© В.Л.Ракицький, 2008

ВСТУП

У багатьох технологічних процесах (ректифікація, абсорбція, охолодження і зволоження промислових газів, виробництво ізотопів та речовин високої чистоти) потрібний максимальний контакт між оброблюваними рідиною і газом або парою. Рідина і пара контактують між собою за рахунок: поверхневого контакту на насадці або на поверхні рідини, що стікає тонкою плівкою; пропускання газу крізь простір, заповнений рідиною, яку розбризкують; барботування пари крізь шар рідини на тарілці.

Відповідно до способу створення контакту між фазами розрізняють: насадкові і тарілчасті колони, розпилувальні апарати.

При русі потоків газу (пари) та рідини через колони виникають гідродинамічні опори тертю та втрати, що викликані місцевими опорами. Величина гідродинамічних опорів та втрат напору контактних устроїв апаратів впливають на енергетичні витрати для проведення процесів.

Оскільки основні розміри апарата і оптимальний режим його експлуатації визначаються з гідравлічних залежностей, треба вивчити гідродинамічні процеси взаємодії двофазного потоку.

Розглядаючи питання гідродинаміки та масообміну в колонах із насадкою, слід мати на увазі, що узагальнення по насадковим колонам у відомих монографіях [1 – 6] відносяться в основному до крупних насадок з розмірами елементів більш 10 мм і не можуть бути розповсюджені на маломасштабні колони із високоефективними дрібними насадками через емпіричний характер відомих кореляцій.

Метою даної лабораторної роботи є експериментальне дослідження закономірностей впливу швидкості газу на гідравлічний опір дрібної сухої насадки, визначення гідравлічного опору при двофазному русі газу та

рідини, порівняння отриманих експериментальних даних із результатами розрахунків за теоретичними формулами та даними інших авторів.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Насадкові колони – це циліндричні апарати, наповнені тим чи іншим видом насадки, потрібної для збільшення поверхні фазового контакту і зміни гідродинаміки потоків останніх. Схему насадкової колони наведено на рисунку 1.1.

Насадкова колона виконується у вигляді циліндру, у нижній частині якого встановлена опорна (колосникова) решітка 1. На решітку насипом або правильними рядами вкладають насадку 2. У верхній частині колони змонтовані розбризкувальні пристрої 3 для рівномірного розподілу рідини по перерізу колони. У нижній частині апарата розташовані штуцери для подачі газу та відведення рідини. Штуцери для подачі рідини та відведення газу розташовані у верхній частині апарата. Рідина тонкою плівкою стікає по насадці вниз, а вгору протитечією підіймається газ (пара).

Але початковий розподіл потоків по висоті насадки майже ніколи не зберігається. Газовий потік, рухаючись вгору, поступово займає всю центральну область шару насадок, відтискаючи рідину до периферії колони й зменшуючи дійсну поверхню контакту фаз, утворюючи так званий сухий конус. Розтікання рідини до периферії пояснюється меншим гідравлічним опором насадки у стінок апарата порівняно із центром. Тому з метою збереження початкового розподілу фаз за перерізом колони шар насадок поділяють на декілька ярусів (секцій) і використовують перерозподільні пристрої 4 (рисунок 1.1, б).

З метою рівномірного розподілу рідини по поверхні насадки використовують тарілки типу ТСН-3, а з метою перерозподілу рідини по висоті колони – тарілки ТСН-2.

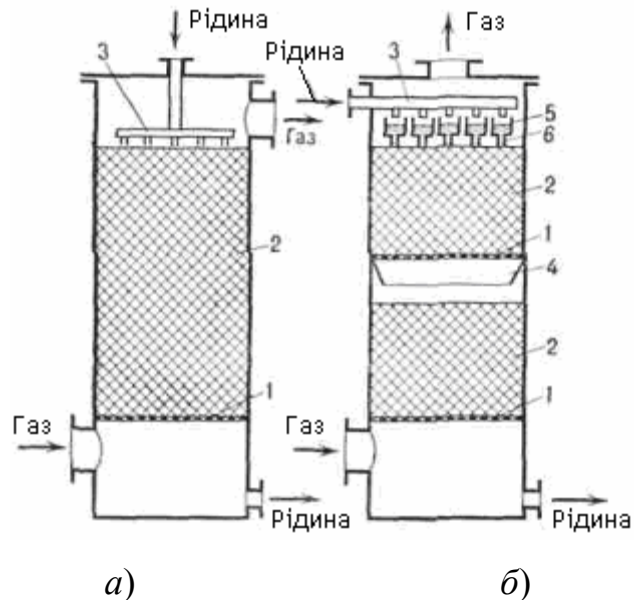


Рисунок 1.1. Схема насадкової колони: *а)*– із суцільним завантаженням ; *б)* – із пошаровим завантаженням
1 – опорна решітка; *2* – насадка; *3* – зрошувальний пристрій; *4* – перерозподільний пристрій; *5* – жолоб;
6 – патрубки

Опорні решітки. Насадку, і в першу чергу насипну, вкладають на опорну решітку (колосники), яка повинна мати невеликий гідравлічний опір і достатні механічну міцність і жорсткість, щоб витримати вагу насадки й рідини, що утримується насадкою.

Найчастіше опорні решітки виготовляють із вертикально розташованих штаб (полос), між якими встановлюють дистанційні втулки. Складену решітку стягують шпильками. Решітки більших розмірів виконують з кількох секцій, які вкладають на опорні балки (рисунок 1.2).

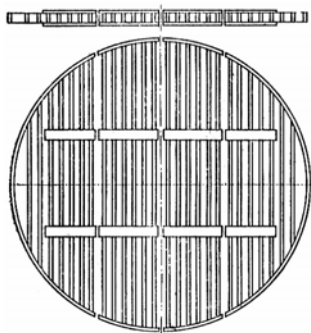


Рисунок 1.2. Складена опорна решітка

Решітки малих апаратів часто виготовляють суцільнозварними. Іноді для колон малого діаметра опорні решітки виготовляють з просічно-втяжного листа. Просвіт між штабами решітки повинен бути не більше 0,6–0,7 від найменшого розміру елемента насадок.

Насадки. Насадки є контактним елементом насадкової колони, від якого залежить ефективність роботи апарата. У колонних апаратах застосовується велика кількість різноманітних насадок, найпоширеніші з яких зображено на рисунку 1.3.

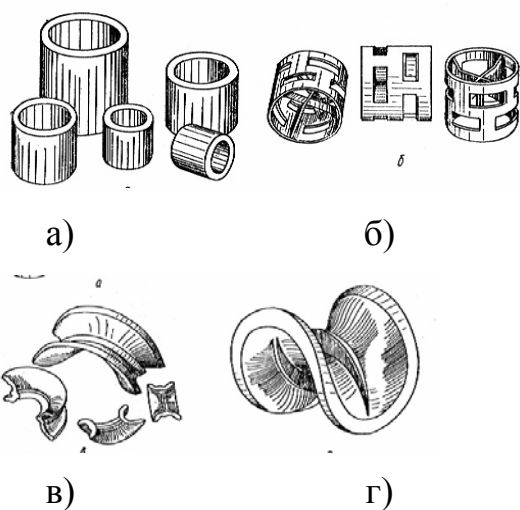


Рисунок 1.3. Типи насадок:

а) – кільця Рашига; б) – кільця Палля; в) – сідла «Інталлокс»; г) – сідла Берля;

Як дрібну насадку для заповнення маломаштабних колон використовують елементи різної форми розміром 1,5 – 5 мм. Такі насадки характеризуються сильно розвиненою поверхнею та капілярними властивостями, що сприяє більш повному змочуванню насадки і забезпечує високу ефективність розділення. Отримали використання дрібні насадки, головним чином у формі сідел, кілець, одно- та багатовиткових відрізків спіралі. Поодинокі металеві та скляні витки були впроваджені у

практику Фенске. Достатньо ефективною є спірально-призматична насадка запропонована Левіним. Характеристику насадок наведено в літературі [1 – 6].

Оскільки конструкція насадки є одним із найважливіших факторів, що визначає ефективність роботи колони, розробка різних нових форм є актуальною. Так, останнім часом з'явилися насадки нового покоління: металеві сідлоподібні насадки "Інталокс" (рисунок 1.4, а); каскадні міні-

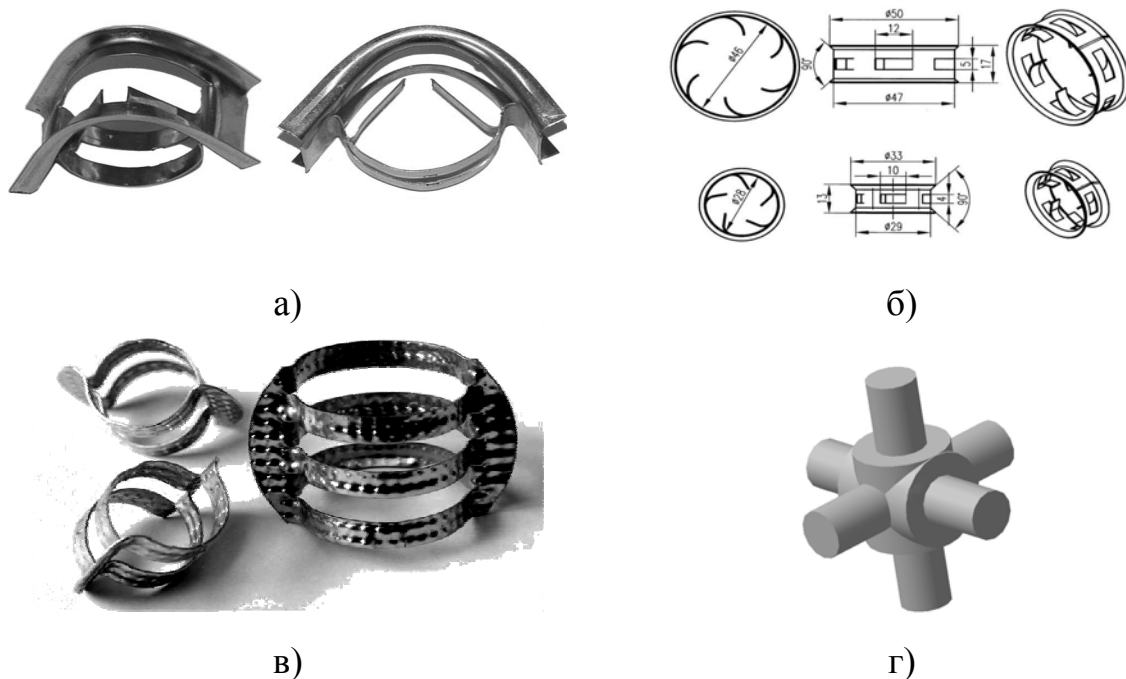


Рисунок 1.4. – Насадки нового покоління: а) металеві сідлоподібні "Інталокс"; б) каскадні міні-кільця; в) "ІНЖЕХІМ–2004"; г) тривимірні

кільця (рисунок 1.4, б); насадка "ІНЖЕХІМ–2004" [7] (рисунок 1.4, в); тривимірні насадка [8] (рисунок 1.4, г).

Насадку найчастіше усього виготовляють із кераміки або фарфору, рідше – із металів, вуглеграфітових та пластичних мас [7 – 9].

Різноманітність насадок, які використовуються, пояснюється вимогами, що висуваються до них. Насадки мають бути з: великою питомою поверхнею й великим вільним об'ємом; малою насипною вагою;

малим гідравлічним опором паровому (газовому) потоку; гарним змочуванням рідиною, що обробляється; рівномірним розподілом фаз за перерізом колони; механічною міцністю, жорсткістю й хімічною стійкістю в робочому середовищі; низькою вартістю.

Усім висунутим вимогам не задовольняє практично жодна з існуючих насадок, тому в кожному окремому випадку необхідно вибрати найбільш придатну.

Насадку характеризують такі дані:

1) питома поверхня f (в $\text{м}^2/\text{м}^3$), тобто поверхня одиниці об'єму насадки; ця величина показує, яка поверхня насадки заповнює 1 м^3 простору;

2) вільний об'єм V_f (в $\text{м}^3/\text{м}^3$), тобто об'єм порожнин в одиниці об'єму, заповненому насадкою; ця величина показує, який об'єм лишається незаповненим на 1 м^3 простору, заповненого насадкою;

3) маса 1 м^3 насадки, кг;

4) кількість елементів насадки в одиниці об'єму насадки n , шт/ м^3 ;

5) насипна густина ρ_n , тобто маса одиниці об'єму насадки, кг/ м^3 ;

6) еквівалентний діаметр елемента насадки d_e , м;

1.1. Гідродинамічні режими насадкових колон

У насадкових апаратах рідина рухається по поверхні насадки у вигляді тонких плівок, причому швидкість процесу залежить від товщини плівки і швидкості її течії. Залежно від швидкості газу плівка зрошувальної рідини може або стікати донизу, або рухатись у напрямі газового потоку.

Тому, в залежності від щільності зрошення та швидкості газового потоку насадкові колони можуть працювати у різних гідродинамічних режимах. Характеристика цих режимів графічно наведена на рисунку 1.5.

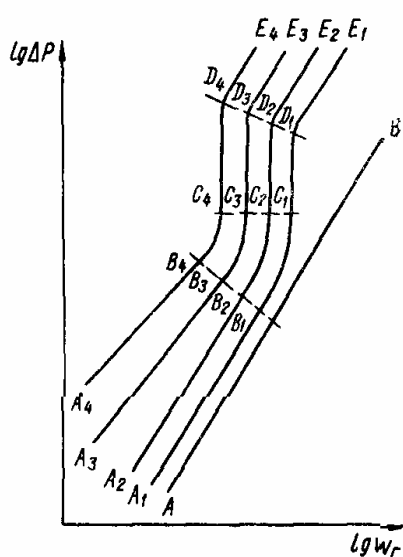


Рисунок 1.5. Криві режимів двофазної течії: AB – крива для сухої насадки; $A_n E_n$ – криві при постійній щільності зрошення (у порядку зростання щільності зрошення)

насадці. При цьому сили тяжіння врівноважують сили тертя, відбувається інверсія фаз, починається барботування газу через шар рідини, газ перетворюється у дисперсну фазу, різко зростає гідравлічний опір. Точки C на графіку називають точками інверсії або початку емульгування. При цьому поверхня контакту фаз максимальна.

Режим виносу настає, коли швидкість газу перевищує швидкість, що відповідає режиму захлинання. При цьому режимі газ знову стає суцільною фазою, але відбувається значний винос рідини із апарата у вигляді крапель. На графіку цей режим позначений ділянками кривих DE .

Плівковий режим характеризується невеликими навантаженнями по газу та рідині. На графіку плівковий режим відповідає ділянкам кривих AB . Точки перелому, що лежать у кінці прямолінійних ділянок, називають точками гальмування. Вони характеризують початок більш інтенсивної взаємодії газорідинних потоків.

Режим підвисання настає тоді, коли рідина гальмується потоком газу, швидкість її падає, зростає кількість рідини, що утримується на насадці. На графіку цей режим позначений ділянками кривих BC . Причому точки B називаються точками підвисання.

Режим емульгування настає внаслідок значного накопичення рідини у

Цей режим на практиці не використовується. Точки D , що відповідають режиму виносу, називають точками захлинання.

Таким чином, залежно від швидкостей потоків рідини і газу в насадкових колонах можливі різні гідродинамічні режими: ламінарний, проміжний, турбулентний, емульгаційний.

При ламінарному, проміжному і турбулентному режимах потік пари суцільний, безперервний і заповнює вільний об'єм насадки, а рідина стікає лише по поверхні насадки. За цих режимів дисперсною фазою є рідина, а суцільною – газ.

При ламінарному режимі взаємодія між фазами відбувається на поверхні змочених елементів насадки, при проміжному – на поверхні плівки і струмин газу, при турбулентному – на поверхні турбульованої плівки рідкої фази. Дальший розвиток турбулентного руху призводить до розриву граничної поверхні між потоками, внаслідок чого у потоці рідини утворюються газові вихори. При цьому виникає новий гідродинамічний режим – режим емульгування. У цьому режимі рідина заповнює весь вільний об'єм насадки і стає суцільною фазою, а газ – дисперсною. В режимі емульгування фази пронизані численними вихорами, при цьому відбувається їх інтенсивне перемішування, вони безперервно інверсують. У режимі емульгування насадкові колони працюють найефективніше. Щоб мати стійкий емульгаційний режим, створюють примусове емульгування за рахунок заповнення колони до певного рівня насадки

1.2. Гідравлічний опір насадкових колон

Завданням гідравлічного розрахунку насадкового апарата є визначення гідравлічного опору апарата ΔP , тобто величини втрати тиску газу (пари), зв'язаної з проходженням останнього через апарат. Дані

гідрравлічних розрахунків – дуже істотні фактори для оцінки реальності конструкції апаратів та встановлення оптимальних умов їх роботи.

Гідрравлічний опір апаратів визначається швидкістю газу, інтенсивністю зрошення насадок рідиною та конструкцією насадки.

Для розрахунку гідрравлічного опору апарата попередньо визначають опір сухої насадки. Гідрравлічний опір сухої насадки, не зрошуваної рідиною, розраховують за рівнянням [1 – 7], Па

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{w_{\phi}^2 \rho_{\Gamma} f h_{\text{н}}}{8 V_f^3} \quad (1.1)$$

де ξ_0 – коефіцієнт опору сухої насадки; w_{ϕ} – швидкість руху газу, віднесена до всього перерізу апарата (приведена швидкість), м/с; ρ_{Γ} – густина газу, кг/м³; f – питома поверхня насадки, м²/м³; $h_{\text{н}}$ – висота шару насадки, м; V_f – вільний об'єм насадки, м³/м³.

Приведена швидкість газу, м/с

$$w_{\phi} = \frac{V_{\Gamma}}{S}, \quad (1.2)$$

де V_{Γ} – об'ємні витрати газу, м³/с; S – площа перерізу колони, м².

Коефіцієнт ξ_0 залежить від типу насадки та режиму протікання газу. У спеціально поставлених дослідах із мілкою насадкою [1], були отримані рівняння, які дають залежність між коефіцієнтами тертя сухої насадки та значеннями критерію Рейнольдса :

для області $Re_{\Gamma} < 80$

$$\xi_0 = 400 / Re_{\Gamma}^{0,85}, \quad (1.3)$$

для області $80 < Re_{\Gamma} < 400$

$$\xi_0 = 70 / Re_{\Gamma}^{0,45}, \quad (1.4)$$

для області $Re_{\Gamma} > 400$

$$\xi_0 = 16,5 / Re_{\Gamma}^{0,2}, \quad (1.5)$$

де Re_r – критерій Рейнольдса для газової фази.

Критерій Рейнольдса для газової фази розраховується за формулою

$$Re_r = \frac{4w_\phi \rho_r}{f \mu_r}. \quad (1.6)$$

Гідравлічний опір зрошуваної насадки завжди більший, ніж сухої, він підвищується із збільшенням швидкості руху газу та інтенсивності зрошення і досягає максимуму при захлинанні апарата, тобто коли рідина захоплюється потоком газу, піднімається вгору і викидається з апарата.

Гідравлічний опір зрошуваної насадки визначається із співвідношення [5]

$$\Delta P_{op} = M \Delta P_{сух}, \quad (1.7)$$

де M – коефіцієнт ($M = \Delta P_{op} / \Delta P_{сух}$).

Значення M можна знайти із графіка (рисунок 1.6), попередньо визначивши коефіцієнт K :

$$K = 0,12 Fr_p Re_p^{-0,8} (1 + 7,5 \cdot 10^{-5} Re_r), \quad (1.8)$$

де Fr_p – критерій Фруда для рідкої фази; Re_p , Re_r – критерій Рейнольдса для рідкої та газової фаз відповідно.

Критерій Фруда для рідкої фази визначається за формулою

$$Fr_p = \frac{U^2 f}{g}; \quad (1.9)$$

а критерій Рейнольдса

$$Re_p = \frac{4U \rho_p}{f \mu_p}; \quad (1.10)$$

У рівняннях (1.6, 1.9, 1.10) U – шільність зрошення, $m^3/(m^2 \cdot c)$; ρ_p , ρ_r – густина рідини та газу відповідно, kg/m^3 ; μ_p , μ_r – в'язкість рідини та газу відповідно, $Pa \cdot c$.

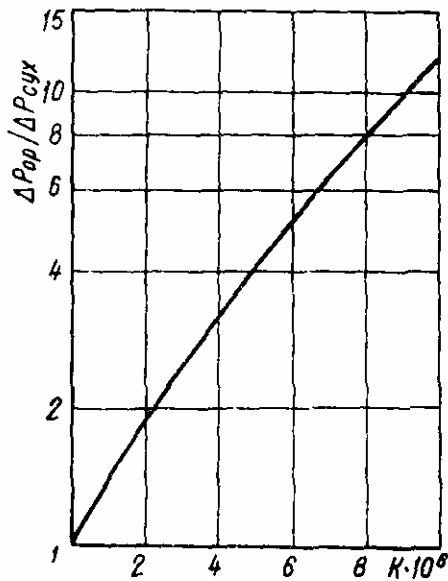


Рисунок 1.6. Залежність коефіцієнту M від коефіцієнту K : ($M = \Delta P_{ор} / \Delta P_{сух}$)

Крім того, відомо рівняння, яке отримано обробкою великої кількості дослідних даних по гідравлічному опору різних насадок [7], у вигляді

$$\xi_0 = 9879,1 Re_r^{-0,9734}. \quad (1.11)$$

При проведенні робіт на установці [10] була використана мілка комбінована насадка ($f = 499 \text{ м}^2/\text{м}^3$; $V_f = 0,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $d_e = 4,17 \text{ мм}$; висота засипки $h_n = 450 \text{ мм}$), коефіцієнт опору якої описується залежністю

$$\xi_0 = 9970 / Re_r. \quad (1.12)$$

2. СХЕМА ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Дослідна установка (рисунок 2.1) складається з абсорбера 7 для насичення води вуглецевим газом (CO_2), десорбера 1 насадкового типу для вилучення CO_2 з води повітрям, напірного бака 6, компресора 11, балона 10 із CO_2 , регулюючої арматури 4, 8, 9 та контрольно-вимірювальних приладів 2, 3, 5, 12.

Повітря з атмосфери подається компресором 11 до низу колони 1 через регулюючий вентиль 8.4 та ротаметр 5.3.

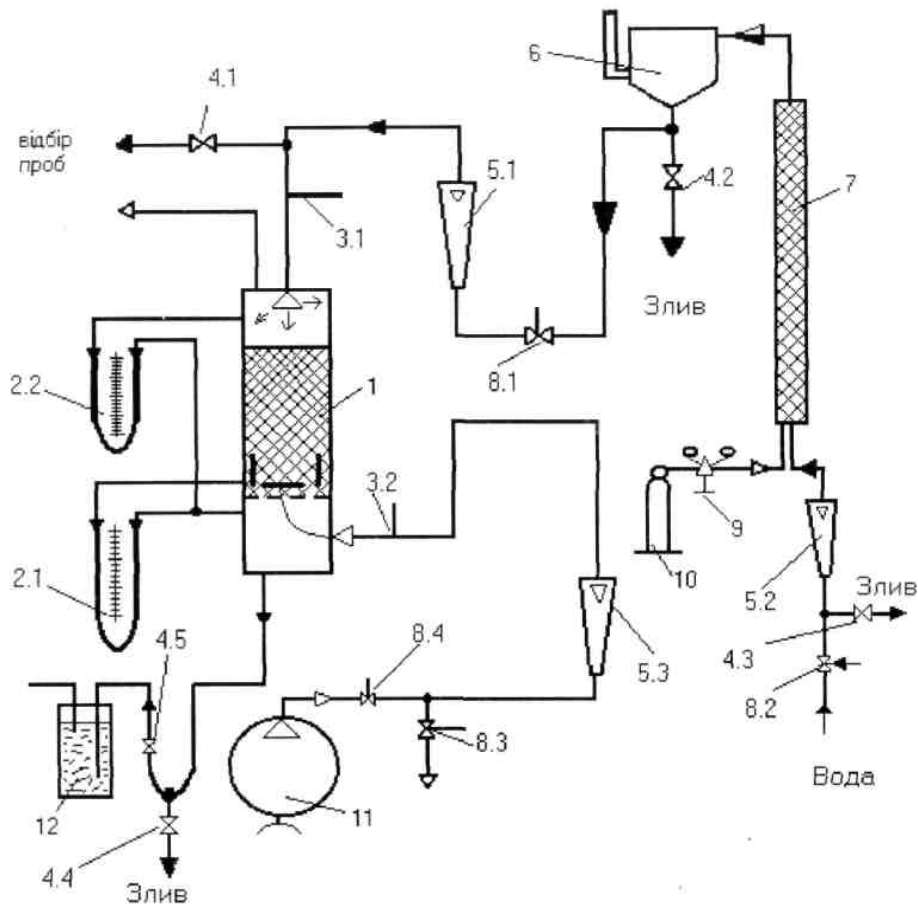


Рисунок 2.1. Принципова схема установки:

1 – десорбер; *2* – дифманометри; *3* – термометри; *4* – запірні крани; *5* – ротаметри; *6* – напірний бак; *7* – абсорбер; *8* – регулювальні вентиля; *9* – редуктор; *10* – балон з CO₂; *11* – компресор; *12* – мірна посудина

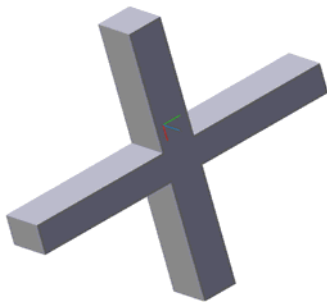
Вода на зрошення подається зверху колони *1* через регулюючий вентиль *8.1* та ротаметр *5.1* з напірного бака *6*.

Гідравлічний опір сухої та зрошеної насадки визначається за допомогою дифманометрів *2.1* та *2.2*. Технічна характеристика установки наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика установки

Робочий тиск у колоні p , МПа.....	0,1
Розміри колони:	
– внутрішній діаметр $D_{\text{вн}}$, мм	95
– площа поперечного перерізу S , м ²	$7,085 \cdot 10^{-3}$

На основі огляду літератури та теоретичного аналізу гідродинаміки газорідних насадкових апаратів запропоновано [8, 9] нову конструкцію нерегулярної дрібної насадки, яка використовується в роботі (рисунок 2.2).



Характеристика насадки:

– матеріал	поліпропілен
– розміри елемента, мм	20 x 2,5 x 1,5
– питома поверхня f , м ² /м ³	410
– вільний об'єм V_f , м ³ /м ³	0,75
– еквівалентний діаметр d_e , мм	7
– висота насадки h_n , мм	450
– кількість елементів, шт/м ³ ...	1700 000

Рисунок 2.2. – Елемент нерегулярної дрібної насадки

3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

3.1. На установці можуть працювати особи, які вивчили будову і роботу установки, техніку безпеки (про що розписалися у відповідній документації), отримали інструктаж та дозвіл викладача.

3.2. Перед початком роботи перевірити заземлення (занулення), стан компресора та балон (виконується зав. лабораторіями, навчальним майстром або лаборантом); перевірити положення усіх кранів (вентилів)

установки – нормальне положення – закриті (вентиль I на пульті керування завжди повинен бути відкритий).

3.3. Забороняється включати установку за наявності несправностей, або невиконаних регламентних робіт.

3.4. Забороняється різко відкривати крани, особливо крани газового балона.

3.5. Після включення компресора регулювання витрат води вентилем 8.1 не дозволяється. Перевірка та зміни витрат виконуються тільки після зупинки компресора.

3.6. Забороняється залишати установку, що працює, без догляду.

3.7. У разі виникнення аварійної ситуації необхідно спочатку припинити подачу газу (закрити кран на редукторі 9); відключити воду (вентиль 8.1, 8.2); вимкнути компресор 11; перекрити усі інші крани.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1. Підготовка установки до роботи

4.1.1. Увімкнути освітлення приладів.

4.1.2. Поставити двоходовий кран П.1 в положення “гідродинаміка”.

4.1.3. Відкрити повітряний кран верхньої головки мірного скла.

4.1.4. Вентилем 8.2 по ротаметру 5.2 встановити необхідні витрати води і заповнити напірний бак 6.

4.2. Дослідження гідравлічного опору сухої насадки

4.2.1. Підключити дифманометр 2 до штуцерів газорозподільної решітки "b" та "c", штуцер "a" – відкритий (положення 2.1).

4.2.2. Увімкнути компресор 11.

4.2.3. По ротаметру 5.3 регулюючим вентилям 8.4 встановити задані витрати повітря (від 10 до 90 поділок з кроком 5 – 10 поділок). По тарувальному графіку встановити відповідність поділок витратам (у м³/с).

4.2.4. За допомогою дифманометра 2.1 виміряти гідравлічний опір газорозподільної решітки $\Delta P_{\text{реш}}$.

4.2.5. Переключити дифманометр 2 зі штуцера "b" до штуцера "a" верхньої точки колони. При цьому штуцери "b" та "d" з'єднують між собою (положення 2.2).

4.2.6. При тих самих витратах повітря заміряти сумарний (решітка + насадка) гідравлічний опір $\Delta P_{\text{сум}}$ за допомогою дифманометра 2.

Результати вимірів занести до таблиці 4.1.

Примітка: після кожних 2 – 3 вимірів необхідно закрити вентиль 8.4 та переконатись, що дифманометр установлюється на "0".

4.3. Дослідження гідравлічного опору зрошеної насадки

Гідравлічний опір зрошеної насадки вивчається при одних витратах повітря та різних витратах води (задаються викладачем). Досліди провести змінюючи витрати води 6 – 7 раз. Витрати води встановлюються при вимкненому компресорі. По тарувальному графіку встановити відповідність поділок витратам (у м³/с).

Таблиця 4.1 – Таблиця даних на сухій насадці

Дослідна частина					Розрахункова частина				
№ досліду	Витрата повітря		Гідравлічний опір, мм вод. ст.		Гідравлічний опір сухої насадки		Швидкість газу	Re_T	ξ_0'
	Поділок	$V_T \cdot 10^5$	$\Delta P_{\text{реш}}$	$\Delta P_{\text{сум}}$	$\Delta P'_{\text{сух}}$		$w_{\text{ф}}$		
		м ³ /с			мм вод. ст.	Па	м/с		
1									
...									
Температура повітря, °С					–	–	–	–	–
Температура води, °С					–	–	–	–	–

4.3.1. По ротаметру 5.1 регулюючим вентилем 8.1 встановити задані витрати води L_p .

4.3.2. Увімкнути компресор 11.

4.3.3. По ротаметру 5.3 регулюючим вентилем 8.4 встановити задані витрати повітря V_T (60 – 70 поділок).

4.3.4. При даних витратах води заміряти сумарний (решітка + насадка) гідравлічний опір $\Delta P_{\text{сум.оп}}$ за допомогою дифманометра 2.

4.3.5. Вимкнути компресор 11.

4.3.6. По ротаметру 5.1 регулюючим вентилем 8.1 змінити витрати води L_p .

4.3.7. Увімкнути компресор 11.

4.3.8. При даних витратах води заміряти сумарний (решітка + насадка) гідравлічний опір $\Delta P_{\text{сум.оп}}$ за допомогою дифманометра 2.

4.3.9. Вимкнути компресор 11.

Результати вимірів занести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця даних на зрошеній насадці

Дослідна частина						Розрахункова частина	
№ досліду	Витрата повітря			Витрата води		K	M'
	Поділок	$V_T \cdot 10^5$	Re_T	Поділок	L_p		
		м ³ /с			м ³ /с		
1							
..							

4.4. Зупинка установки

- 4.4.1. Перекрити вентилі подачі води – 8.1, 8.2.
- 4.4.2. Вимкнути компресор.
- 4.4.3. Закрити вентиль 8.4 подачі повітря.
- 4.4.4. Злити воду з напірного бака в каналізацію.
- 4.4.5. Вимкнути освітлення приладів.

5. АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

За даними дослідів (таблиця 4.1) розрахувати:

5.1. Гідравлічний опір сухої насадки, мм вод. ст., Па

$$\Delta P'_{\text{сух}} = \Delta P_{\text{сум}} - \Delta P_{\text{реш}} .$$

5.2. Приведену швидкість повітря w_{ϕ} (у м/с) за формулою (1.2.).

5.3. Критерій Рейнольдса Re_T для газової фази за формулою (1.6).

5.4. Коефіцієнт опору сухої насадки ξ_0' з формул (1.3–1.5).

5.5 Результати розрахунків занести до таблиці 4.1.

5.6. Побудувати графіки залежності гідравлічного опору сухої насадки $\Delta P_{\text{сух}}$ та $\Delta P'_{\text{сух}}$ від приведеної швидкості газу w_{ϕ} .

5.7. Побудувати графіки (в логарифмічних координатах) залежності коефіцієнту опору сухої насадки ξ_0 за формулами (1.3–1.5, 1.11, 1.12) від критерію Рейнольдса Re_r .

5.8. На основі отриманих дослідних даних знайти вираз для коефіцієнта гідравлічного опору даної сухої насадки, розрахувавши постійні "C" та "m" у рівнянні вигляду: $\xi_0' = C / Re_r^m$.

За даними дослідів (таблиця 4.2) розрахувати:

5.9. Гідравлічний опір зрошеної насадки, мм вод. ст., Па

$$\Delta P'_{op} = \Delta P_{сум.ор} - \Delta P_{реш}.$$

5.10. Щільність зрошення $U = L_p / S$, м³/(м²с).

5.11. Критерій Рейнольдса Re_r для рідкої фази за формулою (1.10).

5.12. Критерій Фруда Fr_r для рідкої фази за формулою (1.9).

5.13. Коефіцієнт K за формулою (1.8).

5.14. Знайти значення $M = \Delta P_{op} / \Delta P_{сух}$ з графіка (рисунок 1.5).

5.15. Дослідне значення відношення $M' = \Delta P'_{op} / \Delta P'_{сух}$.

5.16. Результати розрахунків занести до таблиці 4.2.

5.17. Побудувати графіки залежності значення відношення M від коефіцієнту K . Побудувати окремий графік залежності $\Delta P'_{op} = f(U)$ – гідравлічного опору змоченої насадки від густини зрошення при постійній витраті газу $V_r = \text{const}$.

5.18. Порівняти та пояснити отримані результати.

За необхідності, теплофізичні властивості води та повітря можна розрахувати за наведеними нижче рівняннями [11].

Теплофізичні властивості води:

– густина, кг/м³

$$\rho_v = 1000 - 0,062t - 0,00355t^2;$$

– теплопровідність, Вт/(м·К)

$$\lambda_B = 0,5544 + 0,00246t - 0,00001184t^2;$$

– коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с

$$\mu_B = 0,59849(43,252 + t)^{-1,5423};$$

– теплоємність, Дж/(кг·К)

$$C_p = 4223,6 + 1,075t \ln|t/100|.$$

Теплофізичні властивості сухого повітря:

– густина, кг/м³

$$\rho_{\text{п}} = 1,29281 - 4,782143 \cdot 10^{-3}t + 1,797631 \cdot 10^{-5}t^2;$$

– теплоємність, Дж/(кг·К)

$$C_{p,\text{п}} = 1005,952 - 1,285717 \cdot 10^{-4}t + 3,33332 \cdot 10^{-6}t^2;$$

– теплопровідність, Вт/(м·К)

$$\lambda_{\text{п}} = 2,436667 \cdot 10^{-2} + 7,78571 \cdot 10^{-5}t - 2,379922 \cdot 10^{-8}t^2;$$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с

$$\nu_{\text{п}} = (13,45 + 0,07810715t + 1,321419 \cdot 10^{-4}t^2)10^{-6}.$$

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Наведіть приклади використання масообмінних процесів взаємодії газу (пари) з рідиною у хімічній промисловості?
2. Назвіть способи утворення поверхні фазового контакту в масообмінних процесах та конструкції контактних масообмінних елементів?
3. Які існують гідродинамічні режими у насадковій колоні?
4. Що таке приведена та дійсна швидкості газу?
5. Які фактори впливають на гідравлічний опір у насадковій колоні?
6. Які бувають типи насадок?
7. Які основні характеристики насадок?
8. Які фактори впливають на інтенсивність масообміну при роботі різних контактних пристроїв?
9. Які основні вимоги висувають до насадок?

ЛІТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая шк., 1962. – 656 с.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
3. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Основы расчета и конструирования массообменных колонн. – К.: Выща шк., 1989. – 223 с.
4. Кузнецов И.Е., Шмат К.И., Кузнецов С.И. Оборудование для санитарной очистки газов. – К.: Техника, 1989. – 304 с.
5. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.

6. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 448 с.

7. Гидродинамические исследования нерегулярной насадки "ИНЖЕХИМ-2004"//Д.Л.Семенов, М.И.Фролов, И.М.Шиганов, Н.Н.Маряхин. Электронный журнал "Исследовано в России". – С.1216–1221 (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/113.pdf>).

8. Патент №23562, Україна, МПК В01J 19/30. Елемент насадки масообмінного апарата. Жайворонок В.А., Мікульонок І.О., Ракицький В.Л. Опубл. 25.05.07 р., Бюл. №7, 2007 р.

9. Жайворонок В.А., Мікульонок І.О., Ракицький В.Л. Дрібна нерегулярна насадка для знешкодження газових викидів. Тези доповідей ІХ Міжнародної науково - практичної конференції "Екологія. Людина. Суспільство". – К.: 2007. – С. 186.

10. Методические указания к проведению НИРС по курсу "Процессы и аппараты химической технологии" – Исследование гидравлического сопротивления насадочной колонны//Сост. Тананайко Ю.М. – К.: КПИ, 1981. – 15 с.

11. Зайцев И.Д., Асеев Г.Г. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ. – М.: Химия, 1988. – 416с.

Навчальне видання

Ракицький Віталій Леонідович

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ КОЛОН

Методичні вказівки з проведення НДРС з дисципліни "Процеси та апарати хімічних і нафтопереробних виробництв" і "Процеси та апарати хімічної технології"