



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
" КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО "**

А.Р.Степанюк

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З КРЕДИТНОГО МОДУЛЯ
«ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ – 1. БАЗОВІ
ПРИНЦИПИ ТЕОРІЇ ТЕПЛОМАСООБМІНУ»**

**“ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ
НАСАДКОВИХ КОЛОН”**

для студентів напрямку 6.050503 Машинобудування

КИЇВ 2017

УДК 532.52:66.045

Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт з кредитного модуля «Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну» «Дослідження гідравлічного опору насадкових колон» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / А. Р. Степанюк ; «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – Електронні текстові данні (1 файл: 474 Кбайт). – Київ : «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 13 с.

*Гриф надано Вченою радою
інженерно-хімічного факультету НТУУ „КПІ”
(Протокол № 1 від 30 січня 2017 р.)*

Для студентів інженерно-хімічного факультету.

Відповідальний редактор Дахненко Валерій Леонідович, доцент, к.т.н.

Рецензент:

Сокольський Олександр Леонідович, доцент, к.т.н.

Навчальне видання

Степанюк Андрій Романович, к.т.н., доц. кафедри МАХНВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КРЕДИТНОГО МОДУЛЯ

«Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії
тепломасообміну»

“ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ НАСАДКОВИХ КОЛОН”

для студентів спеціальності 6.050503 Машинобудування

спеціалізація 05050315 Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та
нафтопереробних виробництв

ВСТУП

У багатьох технологічних процесах (ректифікація, абсорбція, охолодження і зволоження промислових газів, виробництво ізотопів та речовин високої чистоти) для забезпечення якісного протікання процесів необхідно забезпечувати певні витрати компонентів (газів, рідин, парів, тощо).

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 пристроїв 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 в апараті.

Розглядаючи питання гідродинаміки 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 та порівняння отриманих експериментальних даних із результатами розрахунків за теоретичними формулами та даними інших авторів.

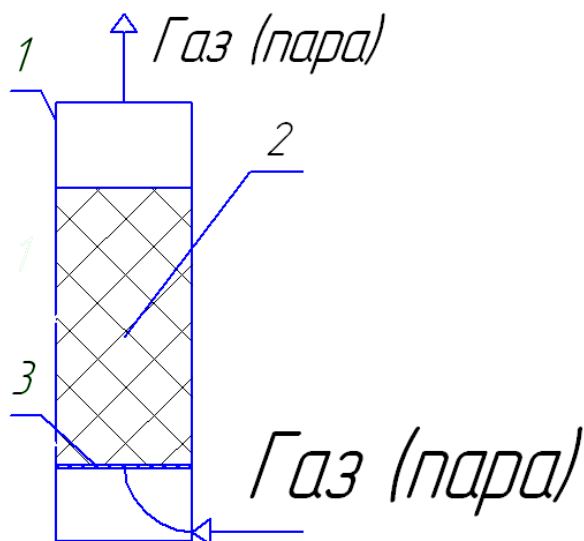
При складанні методичних вказівок використано матеріали методичних вказівок [1].

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 [2, 3]. Схему насадкової колони наведено на рисунку 1.

Корпус насадкової колони 1 виконується у вигляді циліндру, у нижній частині якого встановлена опорна (колосникова) решітка 3. На решітку насипом або правильними рядами вкладають насадку 2. У нижній частині апарата розташовано штуцер для подачі газу, штуцери для відведення газу розташовано у верхній частині апарата.

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 (рисунок 2). 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.



1 – корпус; 2 – насадка; 3 –
опорна решітка

Рисунок 1 – Схема насадкової колони
із суцільним завантаженням

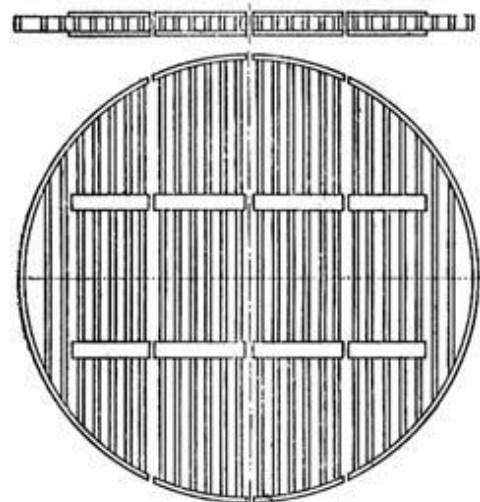


Рисунок 2. Опорна решітка

Решітки малих апаратів часто виготовляють суцільнозварними. Іноді для колон малого діаметра опорні решітки виготовляють з просічно-витяжного 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 3.

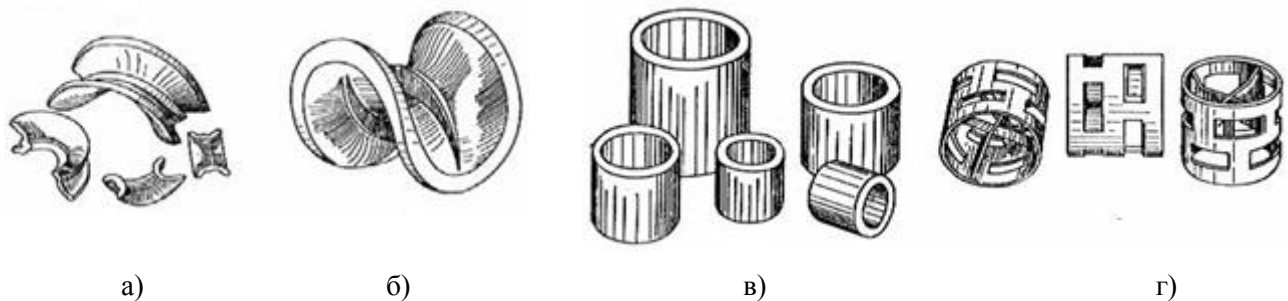


Рисунок 3. Типи насадок

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 спіральнопризматична насадка запропонована Левіним. Характеристику насадок наведено в літературі [2...4].

Різнманітність 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.

Насадки характеризують за наступними параметрами:

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 газ рухається по порожнинах між насадкою, в залежності від швидкості газового потоку можливі різні гідродинамічні режими: ламінарний, проміжний, турбулентний [6...7].

Завданням гідравлічного розрахунку насадкового апарата є визначення гідравлічного опору апарата P , тобто величини втрати тиску газу (пари), зв'язаної з проходженням середовища через апарат. Дані гідравлічних розрахунків – дуже істотні фактори для оцінки реальності конструкції апаратів та встановлення оптимальних умов їх роботи.

Гідравлічний опір апаратів визначається швидкістю газу та конструкцією насадки.

Для розрахунку гідравлічного опору апарата визначають опір сухої насадки. Гідравлічний опір сухої насадки, не зрошеної рідиною, розраховують за рівнянням [1 – 7], Па

$$\Delta P'_{\text{сух}} = \xi_0 \frac{w_\phi^2 \cdot \rho_2 \cdot f \cdot h_n}{8 \cdot V_f^3}, \quad (1)$$

де ξ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору сухої насадки; w_ϕ – швидкість руху газу, віднесена до всього перерізу апарата (приведена швидкість), м/с; ρ_2 – густина газу, кг/ м^3 ;

f – питома поверхня насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; h_n – висота шару насадки, м; V_f – вільний об'єм насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Приведена швидкість газу, м/с

$$w_\phi = \frac{V_2}{S}, \quad (2)$$

де V_2 – об'ємні витрати газу, $\text{м}^3/\text{с}$; S – площа перерізу колони, м^2 .

Коефіцієнт гідравлічного розрахунку ξ_0 залежить від типу насадки та режиму протікання газу. У спеціально поставлених дослідах із дрібною насадкою [2], були отримані рівняння, які дають залежність між коефіцієнтами тертя сухої насадки та значеннями критерію Рейнольдса :

для області $\text{Re}_2 < 80$

$$\xi_0 = \frac{400}{\text{Re}_2^{0,85}}, \quad (3)$$

для області $80 < \text{Re}_2 < 400$

$$\xi_0 = \frac{70}{\text{Re}_2^{0,45}}, \quad (4)$$

для області $\text{Re}_2 > 400$

$$\xi_0 = \frac{16,5}{\text{Re}_2^{0,2}}, \quad (5)$$

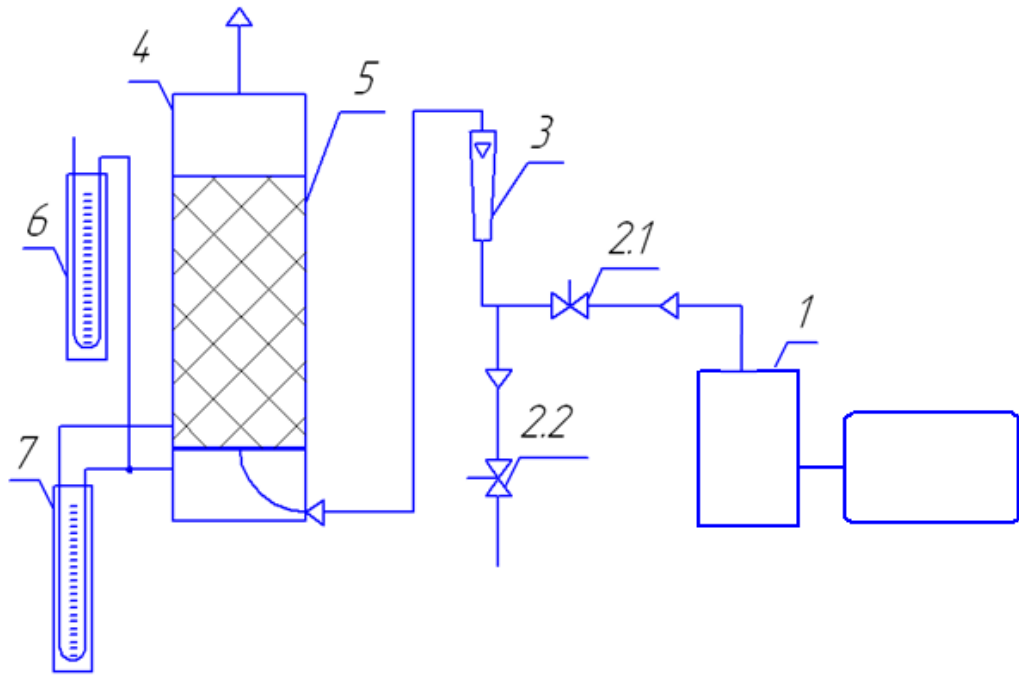
де Re_2 – критерій Рейнольдса для газової фази.

Критерій Рейнольдса для газової фази розраховується за виразом:

$$\text{Re}_2 = \frac{4 \cdot w_\phi \cdot \rho_2}{f \cdot \mu_2}, \quad (6)$$

2. СХЕМА ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Дослідна установка (рисунок 4) складається з насадкової колони 4 до якої подається повітря за допомогою компресора 1 через регулюючий вентиль 2.1. Контроль витрат повітря здійснюється ротаметром ротаметр 3.



1 – компресор; 2.1, 2.2 – запірні крани; 3 – ротаметр;
4 – насадкова колона; 6, 7 – дифманометри; 5 – насадка

Рисунок 4. Принципова схема установки

Гідравлічний опір опорної решітки визначається за допомогою дифманометра 6. Гідравлічний опір сухої насадки – за допомогою дифманометрів 6 та 7. 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	$7,085 \cdot 10^{-3}$
Характеристика насадки:	
– матеріал кераміка	
– еквівалентний діаметр $d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{q}$, мм	$4,16 \cdot 10^{-3}$
– вільний об'єм насадки ε , м ³ /м ³	0,52
– питома поверхня f , м ² /м ³	499
– висота насадки h_n , мм	450

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), балон (виконується зав. лабораторіями, навчальним майстром або лаборантом); перевірити положення усіх кранів (вентилів) установки – нормальне положення – закриті.

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

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

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

3.6. У разі виникнення аварійної ситуації необхідно спочатку припинити подачу повітря (закрити кран на редукторі 2.1).

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.

4.2. Дослідження гідравлічного опору сухої насадки

4.2.1. Підключити дифманометр 6 до штуцерів газорозподільної решітки "b" та "c", штуцер "a" – відкритий (положення 2.1).

4.2.2. Увімкнути компресор, по ротаметру 3 регулюючим вентилям 2.1 встановити задані витрати повітря (від 10 до 90 поділок з кроком 5 – 10 поділок). По тарувальному графіку встановити відповідність поділок витратам ($u \text{ м}^3/\text{с}$).

4.2.3. За допомогою дифманометра б виміряти гідравлічний опір газорозподільної решітки $P_{реш}$.

4.2.4. Переключити дифманометр б 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 $\Delta P_{сум}$ за допомогою дифманометра 2.

Результати вимірів занести до таблиці 4.1.

Примітка: після кожних 2 – 3 вимірів необхідно закрити вентиль 2.1 та переконатись, що дифманометр установлюється на "0".

Таблиця 4.1 – Таблиця даних експериментів на сухій насадці

Результати експериментів					Результати розрахунків				
№ досліду	Витрати повітря, V_2		Гідравлічний опір, мм. вод. ст.		Гідравлічний опір сухої насадки $\Delta P_{сух}$		Швидкість газу w_ϕ	Re_2	ξ'_2
	Поділок	м ³ /с	$\Delta P_{реш}$	$\Delta P_{сум}$	мм вод. ст.	Па	м/с		

4.4. Зупинка установки

4.4.1. Вимкнути компресор. Закрити вентиль 2.1 подачі повітря.

4.4.2. Вимкнути освітлення приладів.

5. АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

За даними дослідів (таблиця 4.1) розрахувати:

5.1. Емпіричний гідравлічний опір сухої насадки, мм вод. ст., Па

$$P_{сух} = P_{сум} - P_{реш}$$

5.2. Приведену швидкість повітря w_ϕ (у м/с) за виразом (2).

5.3. Критерій Рейнольдса Re_2 для газової фази за виразом (6).

5.4. Коефіцієнт опору сухої насадки ξ_0 за одним з виразів (3, 4 або 5), в залежності від області Re_2 .

5.5. Розрахунковий гідравлічний опір $\Delta P'_{сyx}$ сухої насадки, Па за виразом (1)

5.5 Результати розрахунків занести до таблиці 4.1.

5.6 Побудувати графіки залежності гідравлічного опору сухої насадки $\Delta P_{сyx}$ та $\Delta P'_{сyx}$ від приведеної швидкості газу w_ϕ .

5.7. Побудувати в графік (в логарифмічній сітці координат) залежності коефіцієнту опору сухої насадки ξ_0 , отримані за виразами (3...5) від критерію Рейнольдса Re_Γ .

5.8. На основі отриманих дослідних даних знайти вираз для коефіцієнта гідравлічного опору даної сухої насадки, розрахувавши константи "C" та "m" у рівнянні вигляду: $\xi'_0 = \frac{C}{Re_2^m} = C \cdot Re_2^{-m}$.

Коефіцієнт гідравлічного опору даної сухої насадки ξ'_0 може бути визначеним графічним шляхом з відношення:

$$C = \xi'_0 \cdot Re_2^{-m} \quad K = \frac{\tau}{j^n} \quad (3)$$

Показник степені m визначається, як $1 - \text{tg} \alpha$, де α – кут нахилу кривої, до горизонталі в логарифмічних координатах (рис. 6):

$$m = 1 - \text{tg} \alpha = 1 - \frac{\ln \xi'_{01} - \ln \xi'_{02}}{\ln Re_{22} - \ln Re_{21}} \quad (4)$$

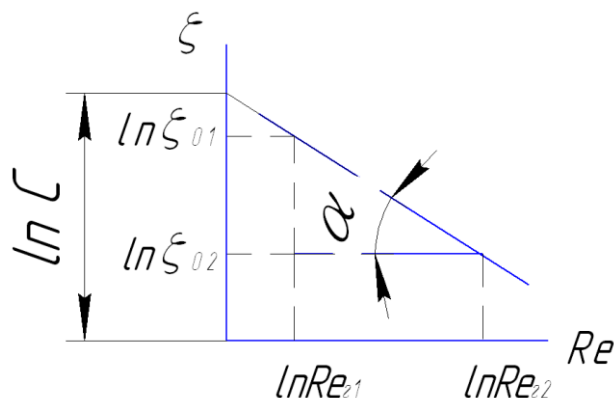


Рисунок 6. До визначення констант "C" та "m"

На рисунку 6 показано графічне визначення констант "C" та "m". Більш точно константи "C" та "m" можуть бути визначені по методу найменших квадратів на ЕОМ.

5.18. Порівняти та пояснити отримані результати.

Теплофізичні властивості сухого повітря [7]:

– густина, кг/м³: $\rho_n = 1,29281 - 4,782143 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,797631 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

– теплоємність, Дж/(кг·К): $C_{p,n} = 1005,952 - 1,285717 \cdot 10^{-4} \cdot t + 3,33332 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$

– теплопровідність, Вт/(м·К): $\lambda_n = 2,436667 \cdot 10^{-2} + 7,78571 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,379922 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с:

$$\nu_n = (3,45 + 0,07810715 \cdot t + 1,321419 \cdot 10^{-4} \cdot t^2) \cdot 10^{-6}$$

6. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Проаналізувати поняття ламінарний режим руху.
2. Проаналізувати поняття перехідний режим руху.
3. Проаналізувати поняття турбулентний режим руху.
4. Проаналізувати поняття коефіцієнт опору сухої насадки.
5. Що таке приведена та дійсна швидкості газу?
6. Які фактори впливають на гідравлічний опір у насадковій колоні?
7. Які бувають типи насадок?
8. Які основні характеристики насадок?
9. Які основні вимоги висувають до насадок?

Перелік посилань

1. Ракицький В.Л. Дослідження гідравлічного опору насадкових колон. Методичні вказівки / Уклад. В.Л. Ракицький. – К.: НТУУ “КПІ”, 2008.–24с. (Повний текст, pdf, 0.65 Mb) <http://ci.kpi.ua/uk>.
2. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая шк., 1962. – 656 с.
3. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
4. Методические указания к проведению НИРС по курсу "Процессы и аппараты химической технологии" – Исследование гидравлического сопротивления насадочной колонны//Сост. Тананайко Ю.М. – К.: КПИ, 1981. – 15с.
5. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245>. Свідоцтво ІХФ № 05/06-1.
6. Процеси первинної газо- нафтопереробки. Процеси первинної газо-нафтопереробки [Електронний ресурс] : навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 291 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 126 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ci.kpi.ua/metodopen> 126 с.
7. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков В.Н. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.