

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”.**

**ЛАВРОВА ІННА ОЛЕГІВНА**

**УДК 622.794.2**

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МАСООБМІНУ В БЕНЗОЛЬНИХ  
СКРУБЕРАХ З РЕГУЛЯРНИМИ НАСАДОЧНИМИ  
ЕЛЕМЕНТАМИ**

Спеціальність: 05.17.08 - процеси й обладнання хімічної технології

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Харків-2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Технологія палива та вуглецевих матеріалів" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Шустіков Валентин Іванович**, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри органічної хімії

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Перцев Леонід Петрович**  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник **Данилов Юрій Борисович**,  
Український науково-дослідний та конструкторський інститут хімічного машинобудування (ВАТ "УкрНДХіммаш"), Міністерства промислової політики України, м. Харків, заст. директора

**Провідна установа:** Сумський державний університет Міністерства освіти і науки України, м. Суми.

Захист відбудеться 30.09.2004 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.05 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий 27.08.2004 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Тимченко В.К.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Бензолні вуглеводні є одним з важливих продуктів, на яких базується промисловість органічного синтезу. В усіх технічно розвинених країнах спостерігається тенденція до постійного підвищення попиту на бензол, толуол, ксилоли, котрі є головними продуктами, що виробляються з сирого бензолу.

В сучасній Україні з розвинутою коксохімічною промисловістю та обмеженими промисловими запасами нафти коксохімічна промисловість є головним постачальником бензолних вуглеводнів. Проте, значне скорочення об'єму виробництва коксу та нестабільність сировинної бази коксування, веде до поступового зниження випуску цієї важливої сировини та погіршенню її якості. У зв'язку з цим набуває актуальності необхідність розробки комплексу дій, здатних за умов нестабільних газових потоків, посередньої якості поглинального масла та важких технологічних умов забезпечити стабільне виробництво цінної ароматичної сировини.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація була виконана на кафедрі технології палива та вуглецевих матеріалів НТУ “ХПІ” у рамках держбюджетної теми “Розробка наукових критеріїв та технологічних параметрів виробництва органічних речовин на основі термолізу малометаморфізованого вугілля” та госпдоговірних робіт: “Підвищення ефективності вилучення бензолних вуглеводнів з коксового газу на ВАТ “Алчевськкокс”” (договор № держ. реєстрації О 102 У 006075, м. Алчевськ) та “Вибір основних технологічних та конструктивних параметрів скрубера 1 ступеня вакуум-карбонатної сіркоочистки коксового газу”(ВАТ “Ясинівський коксохімічний завод”, м. Макєєвка).

**Мета і задачі дослідження.** Інтенсифікувати основні параметри установок для процесу абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу на основі комплексного підходу, що розглядає фізико-хімічні, технологічні, апаратурно-конструктивні та економічні аспекти досліджуваного процесу. Розробити практичні рекомендації для проектування бензолних установок з малоенергомісткими та економічними скруберами.

*Об'єкт дослідження* – процес вилучення бензолних вуглеводнів з коксового газу і отримання сирого бензолу.

*Предмет дослідження* – інтенсифікація процесу абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу поглинальним маслом при нормальних тиску і температурі в скруберах з регулярними насадками.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати низку задач:

- На основі комплексного підходу визначити основні параметри бензолних установок. Виявити вплив на процес абсорбції бензолних вуглеводнів якісних показників фаз, що взаємодіють, та окремих технічних факторів.

- Розробити математичний опис процесу абсорбції бензольних вуглеводнів, що встановлює зв'язок між основними технологічними, фізико-хімічними, гідродинамічними факторами і основними параметрами установок.
- Розробити метод прогнозування ефективності використання досліджуваної насадки порівняно з відомою на базі гідродинамічного моделювання, на основі цього методу розробити нові насадочні елементи і спрогнозувати їх масообмінні характеристики
- Розробити практичні рекомендації для проектування бензольних установок з малоенергомісткими та економічними скруберами.

*Методи дослідження.* В роботі застосовувались методи фізичного та математичного моделювання досліджуваного процесу. Під час фізичних досліджень застосовувались методи фізико-хімічного аналізу. Обробка результатів досліджень проводилась із застосуванням статистичних методів.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Наукова новизна одержаних результатів обумовлена усестороннім аналізом методів та промислових технологічних установок для абсорбції бензольних вуглеводнів поглинальними маслами, вибором для досліджень перспективного напрямку та отриманими в роботі даними по проведенню процесу в апаратах з новими регулярними насадочними елементами.

В дисертації:

- Визначені напрямки інтенсифікації процесу абсорбції бензольних вуглеводнів на базі обраних науково обґрунтованих критеріїв ведення процесу (питома поверхня насадки, необхідна для досягнення потрібного ступеню вилучення, а також втрати напору в установці).
- Для процесу, що вивчається, отриманий математичний опис, який дозволяє визначати основні параметри установок, а також проводити оптимізацію цих параметрів.
- Виявлено вплив окремих фізико-хімічних, технічних та гідродинамічних факторів на обрані критерії процесу, що дозволяє інтенсифікувати процес з урахуванням реальних можливостей конкретної установки.
- Проведено порівнювальний аналіз основних технічних показників (ефективність, втрати напору) цілої низки сучасних бензольних установок, який висвітив найбільш слабкі місця порівнюваних зразків. Встановлено, що тільки за рахунок раціонального підходу до розподілу та перерозподілу поглинального масла в діючих установках, можливе 20-25% зниження втрат напору; подальше зниження останніх (до 50%) можливе при переході на установки з одним бензольним скруберам.
- Вперше розроблено метод і отримано рівняння, що дозволяє на базі гідродинамічних досліджень прогнозувати ефективність нових насадок порівняно з відомими. За допомогою цього методу розроблено новий тип насадки (стільникової), використання якої забезпечує необхідний ступінь вилучення при тридцяти відсотковому зниженні висоти зони контакту газу та поглинального масла в скрубери.

- Удосконалене положення про подальшу інтенсифікацію шляхом підвищення швидкості газу (на 25-30%) та відповідних питомих навантажень по поглинальному маслу на одиницю об'єму насадки з урахуванням обмежень по гідравлічному опору установки.

- Показана можливість проведення досліджуваного процесу в однокрубній установці, що при раціональній комбінації основних технічних факторів у сполученні з оптимальним гідродинамічним режимом та необхідною поверхнею стільникової насадки забезпечує ефективне вилучення бензольних вуглеводнів (>92%) у діапазоні швидкостей 1-4 м/с при втратах напору, що не перебільшують 1,5 кПа.

**Практична цінність і реалізація результатів роботи.** Розроблено методи моделювання процесу вилучення бензольних вуглеводнів, що дають змогу виконувати як проектні розрахунки досліджуваного процесу, так і мінімізувати втрати бензольних вуглеводнів з газом після його обробки. Також впроваджено метод, який дозволяє прогнозувати ефективність нових насадок в співвідношенні з існуючими завдяки порівнянню їх масообмінних і гідродинамічних характеристик в однакових умовах. На цій підставі розроблені рекомендації по проектуванню установок, які відрізняються від існуючих покращеними масообмінними показниками та малим падінням тиску в апараті. Одержані результати використані при розробці рекомендацій для модернізації діючих установок на ВАТ "Харківський коксохімічний завод", "Ясинівський коксохімічний завод", "Алчевськ" та інш. Результати роботи використовуються також кафедрою ТПта ВМ НТУ "ХП" при викладанні навчальних курсів "Основи технології переробки паливних копалин" та "Технологія коксохімічного виробництва".

**Особистий внесок здобувача** у розробку результатів, що виносяться на захист. Всі результати роботи здобувачем отримані особисто, серед них :обґрунтування напрямків удосконалення бензольних установок коксохімічного виробництва на базі аналізу існуючих промислових методів рішення цієї задачі; розробка основних рівнянь математичного опису процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу і перевірка їх адекватності на показниках роботи промислових установок; здобуток експериментальних даних по гідродинамічному моделюванню нових насадочних елементів;обґрунтування необхідності сумісного аналізу ефективності і втрат напору у кожному з рекомендованих рішень; пропозиція ефективних технічних рішень по розробці нових та модернізації діючих промислових установок;

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи доповідались на засіданні наукового семінару кафедр "Хімічна техніка та промислова екологія" та "Хімічна технологія палива та вуглецевих матеріалів" Національного технічного університету "ХП"(1997 – 2004р.р.), на міжнародній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". Харків, Мішкольц, 1995 р., на засіданнях технічних рад ВАТ "ХКЗ" та Українського державного вуглехімічного інституту (2002р.)

**Публікації.** Основний зміст дисертації опублікований у 6 наукових статтях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації 130 сторінок, 18 рисунків та 7 таблиць по тексту, 1 таблиця на двох сторінках, список використаних джерел із 90 назв на 9 сторінках, додатки на 19 стор

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ.**

**У введенні** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність та наукову новизну, практичну цінність, сформульовано мету і задачі роботи.

**У першому розділі** „Способи уловлювання бензольних вуглеводнів з коксового газу та вилучення сирого бензолу з насиченого поглинального масла” приведено аналітичний огляд існуючих в Україні і у світі процесів та апаратів, що використовуються для уловлювання бензольних вуглеводнів з коксового газу, виявлено їх можливості та умови використання. З аналізу існуючого стану речей випливає, що можливості інтенсифікації процесу, що досліджується, далеко не вичерпані, це і обумовило актуальність даної роботи.

**У другому розділі** „Дослідження процесу абсорбції бензольних вуглеводнів поглинальними маслами з метою його інтенсифікації” на основі сучасних уявлень про теорію процесу масопередачі отримане співвідношення, яке дозволяє визначати основні параметри установок для абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, та проводити оптимізацію цього процесу. Також у другій главі розроблене теоретичне обґрунтування інтенсифікації процесу абсорбції бензольних вуглеводнів.

Під інтенсивністю процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу мається на увазі кількість вилученого цільового компонента, що одержується з одиниці об'єму скрубєрів:

$$G/V = \Delta P_{cp} * a * K \quad (1)$$

де  $G/V$  - зйом вилученого сирого бензолу з одиниці об'єму скрубєрів в одиницю часу,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{год}$ ;  $a$  - питома поверхня контакту фаз,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\Delta P_{cp}$  - середньологарифмічна рушійна сила процесу, Па;  $K$  - коефіцієнт абсорбції,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{год} * \text{Па}$ .

Зростання кількості вилученого сирого бензолу за одиницю часу можна здійснити за рахунок зростання кожної з багатofакторних перемінних, що входять до рівняння (1). Однією з таких перемінних, що можуть значно вплинути на інтенсивність процесу, є середньологарифмічна рушійна сила. Її значення можна підвищити відомими методами: зниженням температури поглинального масла; поглибленням ступеню знебензолєння насиченого масла; підвищенням кількості поглинального масла; поліпшенням якості останнього.

Другою перемінною, що значно впливає на досліджуваний процес, є питома поверхня контакту фаз ( $a$ ) - величина, за звичай не відома навіть для насадочних елементів. Поверхня насадки може

стати поверхнею контакту фаз, якщо вона змащена плівкою поглиначу, що рухається. Проте, дослідним шляхом встановлено, що при інших рівних параметрах питома поверхня контакту вище для насадок з більшою поверхнею, що змащується більшими об'ємами розподіленого по цій поверхні поглиначу.

Третя перемінна, що залежить від багатьох факторів, і рішуче впливає на інтенсивність процесу, це коефіцієнт абсорбції (K). Згідно з сучасними поглядами, коефіцієнт абсорбції виражають на основі уявлень про міжфазну турбулентність. Для турбулентного режиму, у якому працюють сучасні установки, коефіцієнт абсорбції можна виразити у вигляді залежності:

$$K = A * \frac{D^{1/3}}{\nu^{1/3}} * w^{0,8} * (1 + \Phi) * d_3^{0,2} \quad (2)$$

де D - коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $\nu$  - кінематична в'язкість, см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>; w - лінійна швидкість газу, м/с;  $\Phi$  - фактор гідродинамічного стану системи, що є еквівалентом роботи, яка витрачена на утворення поверхні контакту фаз;  $d_3$  - еквівалентний діаметр насадки, м<sup>-1</sup>.

Для зростання значення коефіцієнту абсорбції, у першу чергу, необхідно забезпечити зростання швидкості газу та фактору гідродинамічного стану системи ( $\Phi$ ). В свою чергу,  $\Phi$  залежить від питомих навантажень по поглиначу (пропорційно швидкості газу) та конструктивних особливостей насадки.

Таким чином, інтенсивність процесу, що розглядається, є складною багатофакторною величиною, що залежить від багатьох перемінних. Тому подальший аналіз та розробка практичних рекомендацій будуть проводитись на базі одержаних нами рівнянь, що встановлюють зв'язок між окремими групами факторів, що приведені вище.

При виборі бензольних установок з насадочними елементами як показник, що характеризує інтенсивність процесу, нами обрано поверхню насадки, необхідну для досягнення потрібного ступеню вилучення сирого бензолу при обробці 1000 м<sup>3</sup> коксового газу\*. Найкращою установкою слід вважати таку, для якої величина цього показника буде мінімальною.

Виходячи з основного рівняння масопередачі та рівняння матеріального балансу процесу, що виражені відносно основної речовини (бензолу), було одержане рівняння для визначення необхідної поверхні насадки в залежності від основних технічних факторів:

$$\Delta f = \frac{78 * \ln * \left( \frac{my_1 - tx_1 * \frac{M * P_i}{2,24 * P}}{ny_2 - ix_2 * \frac{M * P_m}{2,24 * P}} \right)}{K * \left( 22,4 * P - \frac{M * P^*}{\Delta L} \right)}, \quad \text{де} \quad P^* = \frac{P_i * \left( tx_1 - ix_2 * \frac{P_m}{P_i} \right)}{tx_1 - ix_2} \quad (3)$$

\*Необхідна поверхня насадки є величиною, зворотною щодо зйому продукції з одиниці об'єму установки.

де  $x_1$  та  $x_2$  - вміст бензольних вуглеводнів відповідно у насиченому та поступаючому поглиначі, % (масові доли);  $P$  - абсолютний тиск в апараті, Па;  $P_1, P_M$  - пружність парів чистого бензолу при температурі відповідно насиченого та поступаючого масла, Па;  $M$  - молекулярна маса масла.

В свою чергу, коефіцієнт абсорбції насадки, що досліджується ( $K_2$ ), може бути визначений із одержаного нами рівняння:

$$K_2 = K_1 * \left( \frac{d_{\alpha_1}}{d_{\alpha_2}} \right)^{0,2} * \left( \frac{w_2}{w_1} \right)^{0,8} * \left( \frac{1 + \Phi_2}{1 + \Phi_1} \right), \quad (4)$$

де  $K_1$  - коефіцієнт абсорбції відомої насадки.

Представлене рівняння дозволяє шляхом розрахунку визначити величину коефіцієнту абсорбції для насадки, що досліджується, у вигляді співвідношення коефіцієнту відомої насадки з урахуванням поправок на співвідношення еквівалентних діаметрів, швидкостей газу та еквівалентів значення роботи, що витрачається на утворення поверхні контакту фаз. Останній множник рівняння (4) є невідомою величиною, яку необхідно визначити експериментальним шляхом методом гідродинамічного моделювання.

Для росту значення коефіцієнту абсорбції, у першу чергу, необхідно прагнути до підвищення фактору гідродинамічного стану системи  $\Phi$  при максимально можливих швидкостях газу. Проте, підвищення швидкості газу веде до значного росту гідравлічного опору в установці, що є основним стримуючим фактором. Тому, приведені вище рівняння (3 і 4) необхідно доповнити рівнянням (5), що визначає гідравлічний опір всієї установки ( $P_B$ ) як суму опорів окремих її елементів:

$$P_B = \sum_{i=1}^n \Delta P_{B_i} \quad (5)$$

де  $\Delta P_{B_i}$  - гідравлічні опори насадочних елементів, розподільних та перерозподільних пристроїв, бризковідбійників, підтримуючих ґрат і т.ін..

Приведені вище рівняння (3,4,5) складають основу математичного опису процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, що дозволяє проводити як аналіз, так і вибір основних параметрів установки в залежності від основних технологічних та гідродинамічних факторів.

Раціональне комбінування різноманітних технічних факторів у сполученні з гідродинамічним режимом, при якому забезпечується необхідна поверхня контакту, що досягається шляхом використання довершених насадок, здатних працювати при підвищених швидкостях газу, є основою запропонованого нами напрямку інтенсифікації.

**Третій розділ** „Експериментальні дослідження по інтенсифікації вилучення бензольних вуглеводнів з коксового газу у промислових та напівпромислових умовах” присвячена вивченню масо-



обмінних та гідродинамічних характеристик промислових установок з сучасними скруберами. У цій главі представлено розроблений метод, що дозволяє на базі гідродинамічних досліджень і вперше отриманого рівняння прогнозувати ефективність нових насад очних елементів порівняно з існуючими. Також подано результати дослідно-промислового експерименту щодо характеристик розробленої у цій роботі стільникової насадки.

В коксохімічному виробництві країн СНД на зміну технічним установкам з дерев'яною хордовою насадкою прийшли установки з регулярними листовими насадками.

На декотрих підприємствах України експлуатуються установки з Z-подібною насадкою та форсуночним розподілом поглиначу. Ціла низка підприємств Росії експлуатують установки із скруберами з пласкопаралельною насадкою, тарільчатим розподілом та перерозподілом поглинального масла по висоті апарату. Умовно назвемо ці установки варіантом 1 .

Пізніше на деяких коксохімічних виробництвах України з'явилися скрубери з пласкопаралельною насадкою та новими тарільчатими пристроями для розподілу та перерозподілу газу та поглинального масла (варіант 2). Всі вище означені технічні установки спочатку розраховувались на пропускну здатність по газу  $\sim 100\ 000\ \text{м}^3/\text{год}$ . У всіх установках розміщено тотожну кількість насадки у двох послідовно увімкнених скруберах діаметром 3,6 м. Фактичні показники ефективності розглянутих вище технологічних установок приведені в табл. 1.

З даних, поданих в табл.1 видно, що бензолні установки з пласкопаралельною насадкою (перший варіант) мають вищі показники по потужності та ефективності при припустимих втратах напорі. Установки з Z-подібною насадкою та форсуночним розподілом поглиначу дещо поступаються по показникам ефективності та сумарним втратам напорі. Згадані вище установки мають значні переваги перед другим варіантом з пласкопаралельною насадкою як за показниками ефективності, так і за працездатністю установки в цілому.

Для практичної реалізації пропозицій по подальшому підвищенню швидкості (а також і навантажень по поглиначу на одиницю поверхні насадки) нами побудовані епюри втрат напорі у розглянутих скруберах (рис.1), розраховані по відповідним залежностям.

З представлених даних витікає, що сумарні втрати напорі другорядних елементах вище, ніж втрати напорі в насадці.

Очевидно, що при виборі найменш енергомістких елементів з цих типів скруберів можливо значно скоротити сумарні втрати напорі. Подальше значне скорочення сумарних втрат напорі в установці (>50%) можливе за рахунок формування необхідної поверхні контакту в одному скрубери. Ця пропозиція пов'язана з використанням насадок, які поєднують високу ефективність з малими втратами напорі при підвищених швидкостях газу порівняно з тими, що використовуються в описаних вище скруберах.

Сучасною теорією та практикою визначені численні фактори, які впливають на ефективність насадок.

**Таблиця 1.**

Основні показники роботи порівнюваних бензольних установок.

Показники	Установки із скруберами		
	з пласкопаралельною насадкою		с Z - подібною насадкою
	варіант 1	варіант 2	
Пропускна спроможність по газу (факт.), тис. м <sup>3</sup> /год	100-110	50-70	80-90
Витрати кам'яновугільного поглинального масла, м <sup>3</sup> /год	150 - 160	150 - 160	150 - 160
Температура масла, °С	30	30	30
Залишковий вміст бензольних вуглеводнів в очищеному газі, г/м <sup>3</sup>	3	5-6	4,5
Втрати напору в одному скрубєрі, кПа	0,8-1	1,7 - 4*	1,2-1,4

\*Максимальні значення одержано при забивці означених в тексті елементів.

В цій роботі вибір основних параметрів насадки виконано на основі вперше розробленого рівняння, що базується на порівнянні параметрів досліджуваної та відомої насадки в тотожних умовах конкретного процесу. Це може бути виражено у вигляді:

$$h_2 = h_1 * \frac{(1 + \Phi_1)}{(1 + \Phi_2)} * \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^{1,2} * \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^{0,8} * \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{0,8} \quad (6)$$

де  $h_1$  та  $h_2$  - висота одиниці переносу у відомій та досліджуваній насадках.

З аналізу поданого рівняння витікає, що поставлене завдання зниження  $h_2$  порівняно з  $h_1$  буде відповідати насадці, що має підвищені показники по питомій поверхні контакту фаз та енергії, витраченій газовим потоком на тертя між газом та рідиною при тотожних значеннях швидкості газу та вільного перетину насадок.

Як відомий зразок прийнята пласкопаралельна насадка, геометричні параметри якої наведені в табл.2; в цій же таблиці наведено геометричні параметри сотової насадки 25x25 мм, обраної нами як досліджуваний зразок.

У рівнянні (6) єдиною невідомою величиною є фактор гідродинамічного стану системи ( $\Phi$ ).

**Таблиця 2.**

Порівняна характеристика основних геометричних параметрів порівнюваних насадок.

Найменування насадки	Відстань між суміжними пластинами в насадці	Висота пакетів насадки, мм	Питома поверхня насадки, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Відносний вільний перетин, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
Стільникова насадка з квадратною чашечкою	25 x 25	100	145*	0,92
Пласкопаралельна	16	1000	125	0,96

\*Поверхня стільникової насадки зменшена на величину, еквівалентну різниці між висотою пакету насадки та висотою пластин в насадці.

Фактор гідродинамічного стану системи ( $\Phi$ ), еквівалентний енергії газового потоку, витраченій на тертя між газом та поглиначем.  $\Phi$  визначається з рівняння:

$$\Phi = \frac{\Delta P_{г-ж} - \Delta P_{г}}{\Delta P_{г}} \quad (7)$$

де  $\Delta P_{г-ж}$  и  $\Delta P_{г}$  - втрати напору у двофазному та однофазному потоках відповідно при одних й тих самих витратах газу, Па. Величини  $\Delta P_{г-ж}$  и  $\Delta P_{г}$  можуть бути визначені на основі гідродинамічного моделювання насадочних елементів в системі повітря – вода, що і було зроблено у ході експериментальних досліджень.

На рис. 2 представлено схему установки для визначення гідродинамічних характеристик насадок. Установка являє собою елемент дослідно-промислового скрубера діаметром 355мм і висотою насадки ~ 3,5м, оснащений вимірювальним комплексом (для вимірювання витрат повітря та зрошувальної рідини, тиску, температури та втрат напору).

Вимірювання гідравлічного опору сухих та зрошуваних насадок проводилося згідно з відомою методикою на пакеті насадки сумарною вишиною 1м при діаметрі пакету, що дорівнює діаметру скрубера установки. Як моделююче середовище використовувались повітря та вода з подальшим перерахуванням на коксовий газ, виходячи з умов тотожності значень чисел Рейнольдса для повітря та коксового газу. У кожному досліді проводилося 5 – 7 паралельних серій вимірів падіння тиску при різних швидкостях повітря у інтервалі 1,56 – 3 м/с, що еквівалентно швидкості коксового газу 2,4-4,6 м/с.

Із даних, що приведені у табл. 3 витікає, що у даному варіанті стільникової насадки при підвищеній питомій поверхні насадки (десь на 16%), при практично тотожних втратах напору для сухих насадок значно підвищені втрати для зрошуваних насадок.

Згідно прийнятій аналогії між масопереносом та тертям це останнє вказує на підвищені витрати енергії газового потоку на утворення поверхні контакту фаз. При підстановці відпові-

дних значень в рівняння (6) отримуємо, що висота досліджуваної стільникової насадки, еквівалентна за ефективністю плоскопаралельній складає величину  $h_2 = 0,68h_1$ .

Таким чином, при використанні стільникової насадки з квадратною чашечкою 25x25 мм та з зазором між пластинами в наступних пакетах ~ 20мм, розрахована висота стільникової насадки, що відповідає одиниці переносу (а також і загальна висота насадженої частини апарату) на 30 – 32% менше, ніж для відомої плоскопаралельної насадки.

На рис.3. показана залежність гідравлічного опору різних насадок від швидкості повітря.

**Таблиця 3.**

Експериментальні значення втрат напору в порівнюваних насадках.

Насадка	Швидкість в насадці, м/с		Втрати напору в насадці, Па			Фактор гідродинамічного стану системи	
	повітря	еквівалент коксового газу	сухий	зрошуваний при різних питомих витратах поглинача, л/м <sup>3</sup> газу		$\Delta L=1,7$	$\Delta L=2,3$
				$\Delta L= 1,7$	$\Delta L= 2,3$		
Плоскопаралельна	1,3	2,0	6,9	7,9	8,6	0,145	0,247
	1,5	2,31	8,8	10,1	11,0	0,148	0,250
	1,8	2,77	12,2	15,0	15,6	0,230	0,279
	2,3	3,54	18,5	23,2	23,8	0,254	0,286
	2,8	4,31	25,2	31,9	32,8	0,266	0,300
	3,0	4,62	29,5	37,3	38,7	0,278	0,312
Стільникова 25x25 (пакети встановлено з поворотом на 45°)	1,56	2,4	9,8	12,9	13,9	0,316	0,418
	1,95	3,0	13,5	19,0	20,0	0,408	0,483
	2,34	3,6	17,9	26,1	27,2	0,458	0,52
	2,61	4,02	22,4	33,2	35,0	0,473	0,56
	2,8	4,3	25,3	37,8	40,0	0,49	0,58
	3,0	4,62	27,6	41,1	44,2	0,51	0,60

Перевірку основних висновків щодо підвищення характеристик стільникової насадки, що пропонується нами, проводили в дослідно-промислових умовах на установці, що складається із скрубера діаметром 355 мм та висотою 16 м, оснащеного відповідними комунікаціями та вимірювальним комплексом. Цей скрубер в складі установки з двох послідовно з'єднаних апаратів раніш використовувався для дослідження плоскопаралельної, просічної та інших насадок.

На рис. 4 схематично показано скрубер, в якому розміщено пакети стільникової насадки, причому кожний наступний з поворотом на 45° по відношенню до попереднього.

Після п'ятиметрового блоку сотової насадки 1 встановлено перерозподільник газу і масла - перфоровану тарілку 2, що розміщена у розширювальній камері 3. Над перерозподільним пристроєм розміщено другий блок насадки 4 загальною висотою 4 м. В якості первісного розподільника поглинального масла використовувалась струменево-вихорова форсунка 6.

Основні показники процесу абсорбції в скрубєрі з стільниковою насадкою приведені в табл.4. Отримані результати (коефіцієнти абсорбції, залишковий вміст бензольних вуглеводнів) при використанні одного скрубєра з стільниковою насадкою подібні до результатів, отриманих раніше при використанні двох послідовно увімкнених скрубєрів з плоскопаралельною насадкою. Для зручності аналізу ці результати подано у вигляді графічних залежностей об'ємних коефіцієнтів абсорбції від швидкості газу. З приведених даних витікає, що досліджувана стільникова насадка має підвищену ефективність (на 30 - 35%) у широкому діапазоні швидкостей газу порівняно з широко розповсюдженою плоскопаралельною насадкою при практично тотожних втратах напору.

**Таблиця 4.**

Основні показники процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу в абсорбері з стільниковою насадкою.

Швидкість газу, м/с	Питомі втрати масла, л/нм <sup>3</sup>	Температура, °С		Опір скрубєра, Па	Вміст бензольних вуглеводнів в газі, г/м <sup>3</sup>		Коефіцієнт абсорбції, кг/м <sup>3</sup> ч•Па
		газу	масла		до скрубєрів	після скрубєрів	
1	2	3	4	5	6	7	8
2,05	2,8	24	32	300	26,9	4,2	9,8
2,14	2,36	20	29	350	26,2	4,35	10,9
2,31	1,84	23	33	420	26,87	6,5	11,0
2,5	2,0	25	30	520	29,3	5,4	12,1
2,7	2,0	26	32	580	31,0	5,7	12,5
1	2	3	4	5	6	7	8
3,0	1,9	25	32	620	30,0	5,0	13,9
3,2	1,84	27	32	700	29,3	4,9	14,5
3,4	1,8	26	33	720	29,6	5,1	15,8
3,7	1,7	23	28	800	30,3	4,0	17,4
3,75	1,8	24	33	820	29,4	4,2	18,1
4,0	1,8	25	32	850	28,5	4,3	19,0

\*Вміст бензольних вуглеводнів у знебензоленому маслі складав 0,3 – 0,64% (об'ємних)

\*\*молекулярна маса масла – 195-200.

Використання сотової насадки дозволить створювати установки, що забезпечать розрахований ступінь вилучення бензольних вуглеводнів в одному технічному апараті реальної висини.

**Розділ 4** “Пропозиції по удосконаленню і оптимізації установок для проведення процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу” присвячена обґрунтуванню та вибору основних технічних параметрів ведення досліджуваного процесу у промислових умовах. Розроблена удосконалена схема абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу та одержання сирого бензолу на базі технічних рішень, представлених у даній роботі.

Найбільш достеменно і просто вибір оптимальних технологічних параметрів установки проводиться на основі розробленого нами математичного опису процесу (рівняння (3 - 4)). Результати аналізу впливу основних технологічних факторів на величину необхідної поверхні ( $\Delta f$ ) подано у вигляді графічних залежностей.

Для розрахунків використані характеристики установки із скруберами з пласкопаралельною насадкою (перший варіант), потужністю по газу 110 тис. м<sup>3</sup>/год. Вищезгадані графіки досить точно пояснюють тенденції впливу кожного з розглянутих технологічних та гідродинамічних факторів на процес, що вивчається, і для установок з іншими насадками також.

На рис. 6 подано залежність питомої поверхні насадки від температури кам'яно-вугільного поглинального масла, з якої видно, що при зростанні температури з 25 до 35°C необхідна питома поверхня зростає в 1,6 -1,8 разів. Якщо це зростання не забезпечується, то зростають втрати бензольних вуглеводнів із зворотним газом. Таким чином, зниження температури знебензоленого масла (і відповідне зниження температури газу) є одним з найважливіших факторів, що повинні бути враховані при виборі конкретної бензольної установки.

Рис.7 ілюструє взаємозв'язок необхідної поверхні та температури масла, причому при різних рівнях температури масла температура газу лишалася незмінною і дорівнювала 28°C.

В діапазоні змінення температур від 30 до 36°C необхідна питома поверхня виростає у 1,25–1,5 рази. Очевидно, що зростання різниці температур між маслом та газом негативно впливає на ефективність процесу абсорбції.

У зв'язку з цим рекомендації ПТЕ у питанні запобігання обводненню поглинального масла в скруберах в зимовий період шляхом підвищення цієї різниці температур до 8-9°C повинні вирішуватись іншим шляхом.

На рис.8 показано залежність необхідної питомої поверхні від молекулярної маси кам'яновугільного поглинального масла (M), з якої витікає, що питома поверхня росте пропорційно росту молекулярної маси масла.

Цей графік підтверджує відоме положення про необхідність підтримання молекулярної маси масла на якомога більш низькому рівні. Це досягається використанням якісного поглиначу з молекулярною масою  $\sim 150$  та безперервною організацією роботи вузла регенерації останнього.

На рис. 9 подано залежність необхідної питомої поверхні від вмісту бензольних вуглеводнів в поглинальному маслі ("дебензине") при різних питомих витратах останнього. З поданих даних витікає, що збільшення вмісту бензольних вуглеводнів в маслі "дебензине" з 0,3 до 0,5% веде до зростання необхідної питомої поверхні на 40%; зменшення цієї величини до 0,1% веде до зменшення необхідної поверхні на 20%. Таким чином, ефективність роботи установки для абсорбції бензольних вуглеводнів значною мірою визначається ефективністю роботи дистиляційної колони.

На рис. 10 представлено залежність питомої поверхні  $A_f$  від швидкості газу, яка розрахована нами по рівнянню, що розглядалося вище, через змінення коефіцієнту абсорбції в залежності від вказаної швидкості. З цих даних витікає, що питома по-верхня насадки зменшиться пропорційно швидкості газу у ступені 0,8. Саме цим пояснюється прагнення до підвищення швидкості газу в апаратах з регулярними насадочними елементами.

Таким чином, вибір оптимальної питомої поверхні насадки необхідно проводити з урахуванням реальних температурних характеристик газу та масла в конкретних умовах ведення процесу. У цьому зв'язку підвищення температури масла до  $35^\circ\text{C}$  (та вище), що майже усюди спостерігається в літній період, та пов'язане з ним підвищення необхідної питомої поверхні на 60 - 80% може бути значною мірою компенсовано шляхом використання сукупності наступних основних засобів: - підвищенням кількості оборотного поглинального масла, що подається на абсорбцію (з 1,6 до 1,9-2 л/м<sup>3</sup> газу); - зниженням молекулярної маси оборотного поглинального масла як за рахунок безперервного і дещо підвищеного виводу його на регенерацію, так і за рахунок вводу на стадії абсорбції свіжого кам'яновугільного поглинального масла з покращеними характеристиками (молекулярна маса 150-155); підвищенням ступеню дебензинації поглинального масла до 0,05 - 0,1%.

Результати представлених досліджень використані при розробці сучасних установок для абсорбції бензольних вуглеводнів. Ці рішення можуть бути використані як при технічному переозброєнні діючих, так і при будівництві нових установок. При цьому рекомендовано декілька варіантів виконання установок, що пропонуються

На рис. 11 представлено принципову схему абсорбції бензольних вуглеводнів і одержання сирого бензолу, що рекомендується, в першу чергу, при будівництві нових установок.

У склад цієї схеми входить розроблений на основі наших досліджень скруббер із стільниковою насадкою 1, трубчата піч 2, регенератор 3, колона для видалення сирого бензолу 4, сепаратор 5, відстійник нафталіну 6, сепаратор 7, паромасляний теплообмінник 8, конденсатор 9, теплообмінник "масло-масло" 10, холодильник 11.

Матеріальні потоки: I - коксовий газ, II - свіже масло, III - пар, IV - полімери, V - сирий бензол, VI - сепараторні води, VII - нафталін.

У табл. 5. представлені основні техніко-економічні показники найбільш широко використаних промислових установок та тієї, що рекомендується нами для процесу абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу.

**Таблиця 5.**

Основні техніко-економічні показники діючих та пропонованих установок.

Показники	Установки із скруберами з насадкою			
	орієнтованою	просічно-витяжною	пласко-паралельною	рекомендованою стільниковою
Пропускна здатність по газу, тис.м <sup>3</sup> /год	60	120	110	110
Питомі втрати поглиначу, кг/м <sup>3</sup> *год	2	1,4-1,5	1,6-1,8	1,6-1,8
Температура газу, °С	25	22-25	28	28
основні параметри скрубєрів	діаметр, м	2,5	5,4	3,6
	вишина, м	38,8	39	37,2
	кількість в установці, шт.	1	1	2
основні критерії порівняння	зйом продукції з одиниці об'єму	1	0,34	0,46
	Відносна питома втрата напору, Па	10-12	7-8	15-17

У розділі 5 проведено техніко-економічний розрахунок для газового потоку потужністю 120 тис.м<sup>3</sup>/год., який показав, що економічний ефект від реалізації запропонованих в цій роботі рішень складає приблизно 1 млн. грн.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.

У дисертаційній роботі наведене рішення науково-практичного завдання інтенсифікації процесу абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу, що виявляється у встановленні закономірностей досліджуваного процесу, на основі чого визначені основні умови його ефективного протікання та запропоновані нові конструкції насадочних елементів бензолних скрубєрів

1. На основі комплексного підходу визначені основні параметри установок для процесу абсорбції бензолних вуглеводнів з коксового газу і удосконалені останні шляхом інтенсифікації. Виявлено вплив на процес абсорбції бензолних вуглеводнів якісних показників фаз, що взаємодіють, та окремих технічних факторів.



2. На основі теоретичних та експериментальних досліджень одержано математичний опис процесу абсорбції бензольних вуглеводнів, що встановлює зв'язок між основними технологічними, фізико-хімічними, гідродинамічними факторами і основними параметрами установок. Цей опис дозволяє проводити вибір параметрів установки таким чином, щоб забезпечити необхідний ступінь вилучення цільового компоненту.

3. Вперше розроблено метод прогнозування ефективності використання досліджуваної насадки порівняно з відомою на базі гідродинамічного моделювання.

На основі експериментальних досліджень по гідродинамічному моделюванню вперше розроблена стільникова насадка і спрогнозовані її масообмінні характеристики для використання в якості насадки для бензольного абсорбера.

4. Проведена напівпромислова перевірка ефективності використання стільникової насадки у процесі абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, в результаті якої були підтверджені раніш спрогнозовані її масообмінні характеристики.

5. Розроблені практичні рекомендації для проектування бензольних установок з малоенергомісткими та економічними скруберами можуть бути використані як при модернізації діючих бензольних установок, так і для проектування нових. Так, для ВАТ “Харківський коксовий завод” та “Алчевськкокс” видані рекомендації по удосконаленню процесу абсорбції бензольних вуглеводнів та його апаратурного оформлення, які базуються на результатах цієї роботи. ВАТ “Ясинівський коксохімічний завод” запропоновано стільникову насадку, яка використовується в якості насадки для тепломасообмінних апаратів. Результати роботи можуть також бути використані для оптимізації процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, та при розробці АСУТП.

6. Порівняна техніко-економічна оцінка, проведена для кількох сучасних бензольних установок, підтверджує високі показники запропонованих технічних рішень. За даними техніко-економічного відділу УХІНу економічний ефект від реалізації цієї роботи у виробництво складатиме близько 800 тис. грн.

Основний зміст роботи було відображено в таких публікаціях.

1. Лаврова І.О. Вибір насадочних елементів для абсорбції бензольних вуглеводнів на основі математичної моделі // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999.– Вип. 55.– С. 76 - 77.

2. Лавров О.И., Лаврова И.О. Технологические аспекты интенсификации абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа // Углекислотный журнал. - Харків: УХІН, 1999. - № 1-2. - С. 47 - 50.

Здобувач розробляє математичний опис досліджуваного процесу, здійснює аналіз основних напрямків інтенсифікації на базі цього опису, приймає участь у експерименті з гідродинамічного моделювання та обробляє і узагальнює отримані результати.

3. Лаврова И.О., Шустиков В.И., Лавров О.И. Сравнительная оценка различных технологических установок для абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа // Углекислотный журнал. – Харків: УХІН, 2000. - №3-4. - С. 36 – 40.

Здобувач аналізує техніко-економічні показники роботи основних вітчизняних та закордонних просмислових установок для абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, порівнює їх ефективність з ефективністю установки із скруберами з розробленою сотовою насадкою.

4. Лаврова И.О., Шустиков В.И., Лавров О.И. Выбор основных параметров скрубберов на основе математической модели процесса извлечения бензольных углеводородов // Кокс и химия. - М: Металлургия, 1994. - №7. - С.22 - 23.

Здобувач розробляє основне рівняння математичного опису процесу абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, здійснює програмну реалізацію алгоритму на основі вищевказаного рівняння, перевіряє його адекватність.

5. Лаврова И.О., Шустиков В.И., Лавров О.И. Интенсификация абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа, // Кокс и химия. -М: Металлургия, 1997.- №7. -С.22-24.

Здобувач аналізує параметри роботи основних просмислових установок абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу, одержує чисельні результати, порівнює їх з експериментальними даними

6. Лаврова И.О. Разработка математической модели процесса абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа // Материалы междунар. научно-техн. конф. “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье” - Харьков, Мишкольц: ХГПУ, МУ. -1995. - С. 82.

## АНОТАЦІЯ

**Лаврова Інна Олегівна. Інтенсифікація вилучення бензольних вуглеводнів з коксового газу. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08. – процеси та обладнання хімічної технології. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертацію присвячено науковому обґрунтуванню та розробці напрямків інтенсифікації вилучення бензольних вуглеводнів з коксового газу з метою зниження втрат бензольних вуглеводнів із зворотним коксовим газом. Була показана можливість подальшої інтенсифікації шляхом підвищення

швидкостей газу з додержанням обмежень по гідравлічному опору установки з урахуванням її технічних особливостей.

На базі гідродинамічних досліджень вперше було розроблено метод і одержано рівняння, яке дозволяє прогнозувати ефективність нових насадок порівняно з відомими, завдяки співвідношенню їх масообмінних та гідродинамічних характеристик в тотожних умовах. На основі цього розроблено рекомендації по проектуванню нових установок, які відрізняються від існуючих покращеними масообмінними характеристиками та малим падінням тиску в апараті. Напівпромислові випробування розроблених насадок показали їх ефективність і працездатність та підтвердили спрогнозовані масообмінні характеристики та доцільність використання досліджуваного різновиду насадок в процесі абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу.

Результати представлених досліджень використані як при модернізації діючих, так і для проектування нових бензольних установок.

Ключові слова: бензольні вуглеводні, поглинач, абсорбція, бензольний абсорбер (скруббер), насадочні елементи, ступінь вилучення, гідравлічний опір.

## АННОТАЦИЯ

**Лаврова Инна Олеговна. Интенсификация извлечения бензольных углеводородов из коксового газа. — Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 - процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена научному обоснованию и разработке направлений интенсификации извлечения бензольных углеводородов из коксового газа с целью снижения их потерь с обратным коксовым газом.

Актуальность поставленных задач очевидна, т.к. наметившаяся в последнее время тенденция к снижению объемов производства кокса, а, следовательно, и бензольных углеводородов не может не настораживать, ввиду того, что коксохимическая промышленность в Украине - основной поставщик ароматического сырья.

В работе выявлены основные режимные и аппаратурно-конструктивные параметры, значимо влияющие на процесс извлечения бензольных углеводородов из коксового газа, установлена их взаимосвязь. На основе представлений о межфазной турбулентности разработаны основные уравнения математического описания процесса абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа. Адекватность уравнений мат. описания базируется на данных литературных источников и экспериментальных данных, полученных на промышленных бензольных скрубберах различных конструкций.

Анализ уравнений математического описания позволил определить основные направления интенсификации процесса абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа.

Была показана возможность дальнейшей интенсификации исследованного процесса путем повышения скоростей газа с соблюдением ограничений по гидравлическому сопротивлению установки с учетом ее технологических особенностей.

На базе гидродинамических исследований впервые был разработан метод и получено уравнение, которое позволяет прогнозировать эффективность новых насадок по сравнению с известными, благодаря сопоставлению их массообменных и гидродинамических характеристик в тождественных условиях. На этой основе разработаны рекомендации по проектированию установок, которые отличаются от существующих улучшенными массообменными характеристиками и малым падением давления в аппарате.

На основе экспериментальных исследований по гидродинамическому моделированию определены основные параметры разработанных насадочных элементов и впервые спрогнозированы массообменные характеристики их использования в качестве насадки для бензольных скрубберов.

Полупромышленные испытания выбранных насадок показали их эффективность и работоспособность и подтвердили спрогнозированные массообменные характеристики и целесообразность использования исследованной разновидности насадок в процессе абсорбции бензольных углеводородов из коксового газа.

Результаты представленных в диссертационной работе исследований использованы при разработке рекомендаций как для модернизации действующих, так и для проектирования новых бензольных установок.

Ключевые слова: бензольные углеводороды, поглотитель, абсорбция, бензольный абсорбер (скруббер), насадочные элементы, степень извлечения, гидравлическое сопротивление.

## THE SUMMURY

### **Lavrova I.O. Intensification of process of Absorption of Benzol Hydrocarbons from Coke Gas.**

Dissertation for scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) on speciality 05.17.08. – processes and equipment of chemical technology. - National Technical University “Kharkov Polytechnic Institution”, Kharkov, 2003. Manuscript.

Dissertation is devoted to scientific grounds and development methods of intensification of process of absorption of Benzol hydrocarbons from coke gas. The aim was to decrease the hydrocarbons losses with the reverse coke gas. The possibility of further intensification by means of augment of gas speed by limiting of hydraulic resistance of the set-up with regard to its technological peculiarities has been shown.

On the basis of hydrodynamic investigations the special method and the equation, which allows to make a prognosis of efficiency of new packing in comparison with known ones, have been developed. The comparison takes places by testing under the same conditions.

On this basis the recommendations for designing of new equipment units, which differ from known ones by improved mass-exchange characteristics and small rate of decrease of pressure in apparatus, has been developed. Semi - industrial testing of packings, which has been selected, demonstrated their efficiency and capacity for work. The predicted mass-exchange characteristics have been confirmed. The expediency of using of the packing family, which was developed, has been confirmed too.

The results of this investigations has been utilized as for modernization of working equipment units, as well as for the designing of new ones.

Key Words: Benzol hydrocarbons, absorber, absorption, Benzol absorber, packing elements, the extraction rate, the hydraulic resistance.