

УДК 697.942

Уловлювання частинок бензолу в коксовому газі скруберами насадкового типу

О. Ф. Редько¹, Ю. І. Чайка², Ю. О. Бурда³¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262²к.т.н., доц. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, yuri.chayka@gmail.com, ORCID 0000-0001-7556-6306³аспірант. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Анотація. У даній роботі розглянуті особливості вловлювання часток бензолу в коксовому газі скруберами насадкового типу. Були проаналізовані й оброблені експериментальні та теоретичні данні щодо залежності кількості часток від температури та тиску. Отримано рівняння регресії, яке дозволяє розрахувати ефективність уловлення часток бензолу залежно від температури та тиску. На підставі статистичного аналізу рівняння регресії експериментальних даних виявлено фактор, що найбільше впливає на ефективність уловлювання частинок бензолу. Цим фактором є температура. Точковий коефіцієнт еластичності для цього фактора перевищує три, а для інших факторів цей коефіцієнт значно менший за одиницю. Показано, що для інтенсифікації вловлювання необхідно максимально знижувати температуру перебігу процесу. За рівнянням регресії побудовано графік.

Ключові слова: скрубер, коксовий газ, бензол, викиди в атмосферу, насадка, коксова промисловість.

Вступ. Скрубер насадкового типу – апарат для промивання рідинами газів з метою їхнього очищення та для добування одного або декількох компонентів, а також барабанна машина для промивання корисних копалин. Скрубер насадкового типу широко використовується при уловлюванні продуктів коксування та очищенні промислових газів від пилу, для зволоження і охолодження газів, в різних хіміко-технологічних процесах (рис. 1).

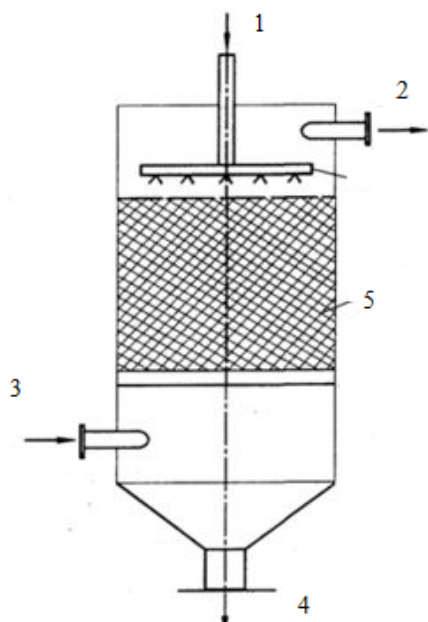


Рис. 1. Скрубер насадкового типу
1 - рідина; 2 - очищені гази; 3 - гази на очищення;
4 - шлам; 5 - насадка

Процес мокрого пиловловлення заснований на контакті запиленого газового потоку з рідиною, яка захоплює зважені частинки і забирає їх з апарату у формі шламу. Метод мокрого очищення газів від пилу вважається досить простим і в той же час досить ефективним способом знепилювання [1, 2, 3, 4].

Актуальність дослідження. Атмосферне повітря – невичерпний ресурс. Але в окремих регіонах земної кулі він потрапляє під такий сильний антропогенний вплив, що виникає проблема якісного складу атмосфери, особливо у великих промислових центрах.

Атмосферне повітря забруднюється шляхом привнесення в нього або утворення в ньому забруднювальних речовин у концентраціях, що перевищують нормативи якості або рівня природного вмісту [5, 6].

Забруднювальні речовини – домішки в атмосферному повітрі, які чинять при певній концентрації несприятливий вплив на здоров'я людини, рослинний і тваринний світ та інші компоненти навколишнього природного середовища або спричиняють пошкодження матеріальних цінностей.

Процеси виплавки чавуну й переробки його на сталь супроводжуються викидом до атмосфери різних газів. Викид пилу в розрахунку на 1 т придатного чавуну складає 4,5 кг, сірчистого газу – 2,7 кг, марганцю – 0,1...0,6 кг. Разом із доменним газом до атмосфери в невеликій кількості викидаються також сполу-

ки миш'яку, фосфору, сурми, свинцю, ртуті і рідких металів, ціанистий водень і смолисті речовини [7].

Більшість сучасних заводів чорної металургії мають цехи коксування вугілля та відділення переробки коксового газу. Коксохімічні виробництва забруднюють атмосферне повітря пилом і сумішшю летких сполучень. У деяких випадках, наприклад, коли порушується режим роботи, в атмосферу викидається значна кількість неочищеного коксового газу [8, 9, 10].

Зменшення викидів шкідливих речовин є пріоритетною задачею для всіх країн світу. Для зменшення шкідливих викидів від промисловості найбільш актуальним є скруббер, що вимагає незначних капіталовкладень і забезпечує ефективність роботи.

Вихідні дані. У даному дослідженні були взяті емпіричні дані першого ступеня охолодження коксового газу для порівняння ефективності вловлювання парів бензолу в скруббері насадкового типу (табл. 1).

Таблиця 1

Емпіричні дані першого ступеня охолодження коксового газу для порівняння ефективності уловлювання парів бензолу в скруббері насадкового типу

Компоненти	Кількість, г/м ³	Після першого рівня охолодження
	Прямий газ	
Водяні пари	250- 450	120-180
Пари смоли	80-150	20-50
Вуглеводи	30-40	10-16
Бензол	8-13	7-11
Сірководень	6- 40	5-20

При розвиненій поверхні крапель смоли, зважених у газі (до 300 м² в 1 м³ газового об'єму) пари фракцій смоли, сирого бензолу перебувають у стані, близькому до рівноваги з конденсованою смолою. Зміна температури, вмісту аерозолів смоли в газі, складу смоли справляють істотний вплив на вміст бензолу в газі.

Залежність тиску насичених парів бензолу від температури може бути розрахована за емпіричним рівнянням:

$$L_g P_t^B = 5,8099 - \frac{978,66}{118,31} + t, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де L_g – розмірний коефіцієнт, мм. рт. ст. / $^\circ\text{C}$; P_t^B – тиск, мм. рт. ст., насичених парів бензолу при температурі t , $^\circ\text{C}$; 5,8099, 978,66 і 118,31 – розмірні константи.

Рівень насичених парів бензолу C_t у кок-

совому газі розраховується за формулою:

$$C_t = \frac{P_t^B M \cdot 10^5}{760 + \frac{P^F}{13,6} - P_t^B - 22,4 P_t^B}, \text{ г/нм}^3, \quad (2)$$

де P^F – надлишковий тиск коксового газу, мм. рт. ст.; M – молекулярна маса бензолу, г/моль; 760 – тиск при нормальних умовах, мм. рт. ст.; P_t^B – тиск води, мм. рт. ст., 10^5 – розмірний коефіцієнт.

У табл. 1 наведені розрахункові дані щодо вмісту парів бензолу в насиченому вологою коксовому газі, отримані нами для умов охолодження газу в первинних газових холодильниках до зниженої температури й обробки газу в абсорберах сірководню, аміаку й кінцевих газових холодильниках. При вмісті парів бензолу в газі вище зазначених величин спостерігатиметься його сублімаційна конденсація, якщо бензол не абсорбується (табл. 2).

Таблиця 2

Температура, $^\circ\text{C}$	Вміст парів бензолу (г/100 нм ³ газу) при заданому тиску, Па				
	-1000	-500	1000	1500	2000
10	0,004	0,004	0,03	0,03	0,004
15	0,017	0,016	0,04	0,03	0,013
20	0,058	0,055	0,08	0,06	0,044
25	0,180	0,170	0,147	0,141	0,135
30	0,500	0,473	0,408	0,390	0,374
35	1,277	1,208	1,039	0,993	0,951
40	3,029	2,863	2,457	2,346	2,245
45	6,752	6,371	5,448	5,197	4,968
50	14,274	13,442	11,441	10,900	10,408

Для більш детального аналізу розрахуємо рівняння регресії та побудуємо графік залежності.

Рівняння множинної регресії може бути представлено у вигляді:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (3)$$

де $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор незалежних (пояснювальних) змінних; β – вектор параметрів $\beta_k, k = 0 \dots m$ (що підлягають визначенню); ε – випадкова похибка (відхилення); Y – залежна (пояснювана) змінна.

Теоретичне лінійне рівняння множинної регресії (3) має вигляд:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_m \cdot X_m + \varepsilon, \quad (4)$$

де β_0 – вільний член, який визначає значення Y у випадку, коли всі пояснювальні змінні X_j дорівнюють нулю.

Перейдемо до статистичного аналізу отриманого рівняння регресії (4): перевірці значимості рівняння та його коефіцієнтів, дослідження абсолютних і відносних похибок регресії.

Для незміщеної оцінки дисперсії необхідно виконати наступні обчислення. Незміщена похибка $\varepsilon = Y - Y(X) = Y - X \cdot s$ (абсолютна похибка апроксимації).

Рівняння регресії (оцінка рівняння регресії)

$$Y = -4,99 + 0,000499X_1 + 0,25X_2, \text{ г/100 нм}^3, \quad (5)$$

де X_1 – значення тиску, мм. рт. ст., X_2 – значення температури, °C, Y – значення вмісту парів бензолу г/100 нм³ газу.

Модель регресії в стандартному масштабі. Модель регресії в стандартному масштабі припускає, що всі значення досліджуваних ознак переводяться в стандарти (стандартизовані значення) за формулами:

$$t_j = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{S(x_j)} \quad (6)$$

де x_{ji} – значення змінної x_j в i -му спостереженні; риска над змінною означає середнє значення.

За формулою (6) початок відліку кожної стандартизованої змінної поєднується з її середнім значенням, а одиницею зміни є її середньоквадратичне відхилення S .

Якщо зв'язок між змінними в природному масштабі лінійний, то зміна початку відліку та одиниці вимірювання цієї властивості не порушуються, так що і стандартизовані змінні будуть пов'язані лінійним співвідношенням:

$$t_y = \sum \beta_j t_{xj}. \quad (7)$$

Для оцінки β -коефіцієнтів у рівнянні (7) можна застосувати метод найменших квадратів. При цьому система нормальних рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases} r_{x1y} = \beta_1 + r_{x1x2}\beta_2 + \dots + r_{x1xm}\beta_m; \\ r_{x2y} = r_{x2x1}\beta_1 + \beta_2 + \dots + r_{x2xm}\beta_m; \\ \dots \\ r_{xmy} = r_{xmx1}\beta_1 + r_{xmx2}\beta_2 + \dots + \beta_m. \end{cases} \quad (8)$$

Для наших даних (беремо з матриці парних коефіцієнтів кореляції) система рівнянь (5):

$$\begin{cases} -0,0771 = \beta_1 + 0\beta_2; \\ 0,793 = 0\beta_1 + \beta_2. \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язок системи рівнянь (9):

$$\beta_1 = 0,0771; \beta_2 = 0,793.$$

Стандартизована форма рівняння регресії має вигляд:

$$y^0 = 0,0771x_1 + 0,793x_2. \quad (10)$$

Знайдені з системи рівнянь (8) β -коефіцієнти дозволяють визначити коефіцієнти регресії в природному масштабі за формулами:

$$b_j = \beta S(y) / S(x_j); \quad (11)$$

$$a = \bar{y} - \sum \beta_j \bar{x}_j. \quad (12)$$

Аналіз параметрів рівняння регресії.

Перейдемо до статистичного аналізу отриманого рівняння регресії: перевірці значимості рівняння та його коефіцієнтів, дослідження абсолютних і відносних похибок апроксимації. Для незміщеної оцінки дисперсії виконуємо наступні обчислення:

Незміщена похибка $\varepsilon = Y - Y(x) = Y - Xs$ (абсолютна помилка апроксимації).

Визначаємо середню похибку апроксимації. Оцінка дисперсії дорівнює:

$$A = \sum |\varepsilon| : Y \cdot n \cdot 100\% = 3423,83745 \cdot 100\% = 7608,53\%;$$

$$s_e^2 = (Y - X \cdot Y(X))^T (Y - X \cdot Y(X)) = 292,63 \text{ г}^2/\text{нм}^6.$$

Незміщена оцінка дисперсії дорівнює:

$$S^2 = s_e^2 / (n - m - 1) = 292,63 / (45 - 3 - 1) = 7,14 \text{ г}^2/\text{нм}^6.$$

Оцінка середньоквадратичного відхилення (стандартна помилка для оцінки Y):

$$S = (S^2)^{1/2} = 7,14^{1/2} = 2,67 \text{ г/нм}^3.$$

Знайдемо оцінку матриці вектора

$$k = S^2 \cdot (X^T \cdot X)^{-1}. \quad (13)$$

Дисперсії параметрів моделі визначаються співвідношенням $S_i^2 = K_{ii}$, тобто це елементи, що лежать на головній діагоналі

$$\begin{aligned} S_{b0} &= 1,288^{1/2} = 1,135; \\ S_{b1} &= (10^{-6})^{1/2} = 0,00087; \\ S_{b2} &= (0,00121)^{1/2} = 0,0347; \end{aligned}$$

Проаналізуємо показники тісноти зв'язку факторів з результатом. Якщо факторні ознаки різні по своїй суті і (або) мають різні одиниці вимірювання, то коефіцієнти регресії b_j при різних факторах є непорівнянними. Тому рівняння регресії доповнюють порівняними показниками тісноти зв'язку фактора з результатом, що дозволяють ранжувати фактори за силою впливу на результат.

До таких показників тісноти зв'язку відносять: точкові коефіцієнти еластичності, β -коефіцієнти, точкові коефіцієнти кореляції.

З метою розширення можливостей змістовного аналізу моделі регресії використовуються точкові коефіцієнти еластичності,

які визначаються за формулою:

$$E_i = b_i \bar{x}_i / \bar{y}. \quad (14)$$

Точковий коефіцієнт еластичності (14) показує, на скільки відсотків у середньому змінюється ознака-результат y зі збільшенням ознаки-фактора x_i на 1 % від свого середнього рівня при фіксованому положенні інших факторів моделі. За формулою (14) з урахуванням рівняння (5)

$$E_1 = 0,000499 \cdot 600 / 2,46 = 0,12.$$

Точковий коефіцієнт еластичності $|E_1| < 1$. Отже, вплив X_1 на результативну ознаку Y незначний.

$$E_2 = 0,25 \cdot 30 / 2,46 = 3,09.$$

Точковий коефіцієнт еластичності $|E_2| > 1$. Отже, X_2 істотно впливає на результативну ознаку Y .

За вищевказаними даними побудовано графік регресії (рис. 2) за рівнянням (5).

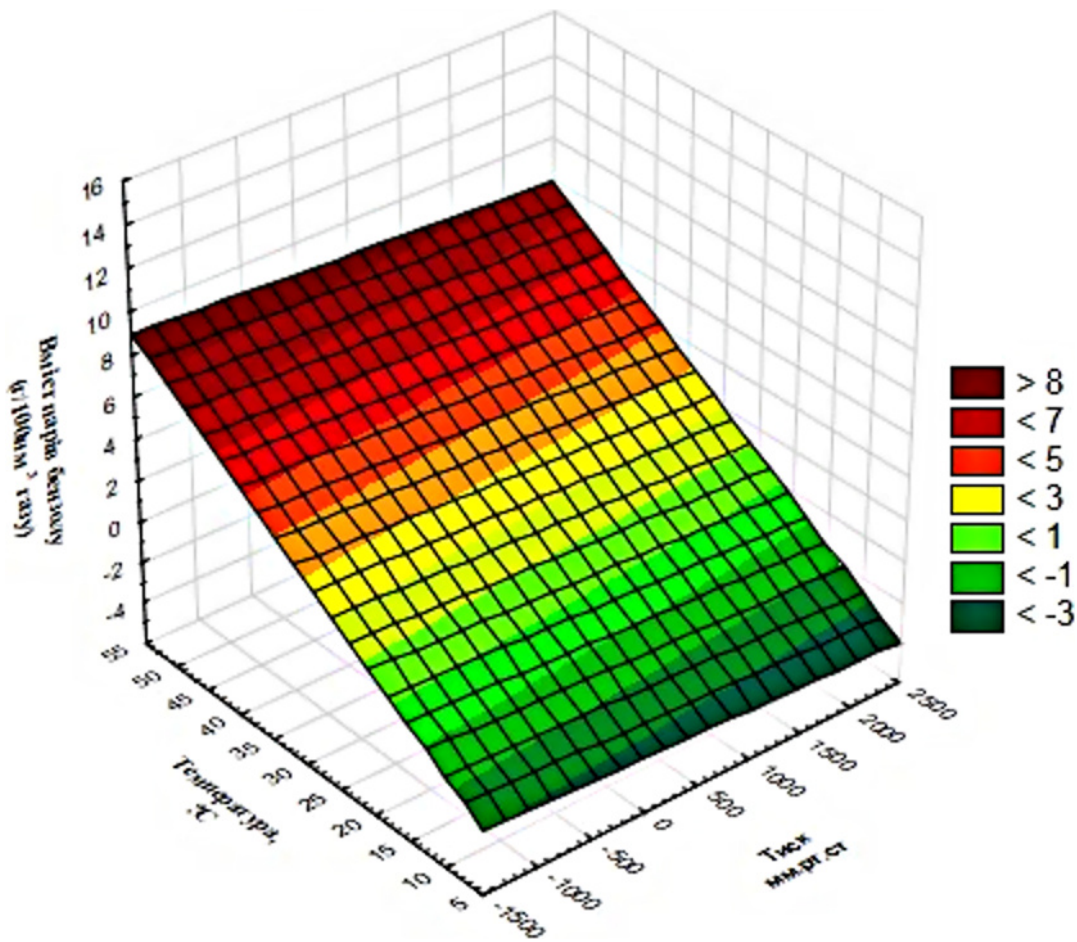


Рис. 2. Регресія залежності вмісту бензолу в коксовому газі від температури та тиску.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було встановлено, що охолодження газу перед його очищенням має важливу роль. При охолодженні від 55 до 5 °С ефективність уловлювання бензолу збільшується на 55 %.

Перспективи подальших досліджень. Дані дослідження проводилися з однією складовою коксового газу. Важливо вивчити вплив охолодження на інші складові.

Література.

1. Алексеев В. Аппараты вихревого типа, применяемые для мокрой очистки газов / В. Алексеев, В. Булкин, И. Поникаров, А. Галлеев. – Казань, 1987. – 22 с.
2. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. – Москва: Металлургия, 1986. – 320 с.
3. Андоньев С. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии / С. Андоньев, О. Филиппев. – Москва: Металлургия, 1979. – 60 с.
4. Апостолук С. Промислова екологія / С. Апостолук. – Київ: Знання, 2012. – 300 с.
5. Ветошкин А. Процессы и аппараты пылеочистки: учеб. пособ. / А. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
6. Алиев Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. – Москва: Металлургия, 1990. – 240 с.
7. Диденко В. Интенсификация обеспыливания и очистки вентиляционных выбросов на основе вихревых эффектов / В. Диденко, Т. Малахова. – Волгоград: Волгогр. Гос. Архит.-строит. Акад., 1998. – 144 с.
8. Дытнерский Ю. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Ю. Дытнерский. – Москва: Химия, 1991. – 496 с.
9. Козлова С. Оборудование для очистки газов промышленных печей: Электронный конспект лекций / С. А. Козлова, И. М. Шалаев, О. В. Раева, А. В. Киселев. – Красноярск: СФУ, 2007. – 156 с.
10. Коробчанский И. Расчеты аппаратуры для улавливания химических продуктов коксования / И. Коробчанский, М. Кузнецов. – Москва: Металлургия. 1972, 2-е изд. – 296 с.

References

1. Alekseev V., Bulkin V., Ponikarov I., Galleev A. *Apparatyi vihvovogo tipa, primenyaemye dlya mokroy ochistki gazov*, Kazan, 1987.
2. Aliev G.M.-A. *Tekhnika pyileulavlivaniia i ochistki promyshlennykh gazov*, Metallurgii, 1986.
3. Andonev S., Filipev O. *Pyilegazovye vybrosy predpriyatii chernoii metallurgii*, Metallurgii, 1979.
4. Apostoliuk S. *Promyslova ekologiia*, Znannia, 2012.
5. Vetoshkin A. *Protsessy i apparaty pyleochistki*. Izd-vo Penz. gos. Un-ta, 2005.
6. Aliev G.M.-A. *Tekhnika pyileulavlivaniia i ochistki promyshlennykh gazov*, Metallurgii, 1990.
7. Didenko V., Malakhova T. *Intensifikatsiia obespylivaniia i ochistki ventiliatsionnykh vybrosov na osnove vikhrevykh effektov*, Volgogr. Gos. Arkhit.-stroit. Akad., 1998.
8. Dytnerskii Yu. *Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii*. Posobie po proektirovaniyu, Himiya, 1991.
9. Kozlova S. i dr. *Oborudovanie dlia ochistki gazov promyshlennykh pechei*, SFU, 2007.
10. Korobchanskii I., Kuznetsov M. *Raschety apparatury dlia ulavlivaniia khimicheskikh produktov koksovaniia*, Metallurgii. 1972.

УДК 697.942

Улавливание частиц бензола в коксовом газе скрубберами насадочного типа

А. Ф. Редько¹, Ю. И. Чайка², Ю. А. Бурда³

¹д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, Украина, redko.af@gmail, ORCID 0000-0002-9375-1262

²к.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, Украина, yuri.chayka@gmail.com, ORCID 0000-0001-7556-6306

³аспирант Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, Украина, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Аннотация. В данной работе рассмотрены особенности улавливания частиц бензола в коксовом газе скруббером насадочного типа. Были проанализированы и обработаны экспериментальные и теоретические данные зависимости количества частиц от температуры и давления. Получено уравнение регрессии, которое позволяет рассчитать эффективность улавливания частиц бензола в зависимости от температуры и давления. На основании статистического анализа уравнения регрессии экспериментальных данных выявлено фактор, который более всего влияет на эффективность улавливания частиц бензола. Этим фактором является температура. Точечный коэффициент эластичности для этого фактора превышает три, а для других факторов этот коэффициент значительно меньше единицы. Показано, что для интенсификации улавливания необходимо максимально снижать температуру протекания процесса. По уравнению регрессии построен график.

Ключевые слова: скруббер, коксовый газ, бензол, выбросы в атмосферу, насадка, коксовая промышленность

UDC 697.942

Capture of Particles of Benzene in the Coke Oven Gas by Packed-Type Scrubbers

O. Redko¹, Y. Chayka², Y. Burda³

¹Sc.D, professor, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²Sc.D, a.P, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, yuri.chayka@gmail.com ORCID 0000-0001-7556-6306

³PhD student Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Abstract. In this paper, we consider the peculiarities of capture of the particles of benzene in coke oven gas by a packed-type scrubber. Experimental and theoretical data on the dependence of the number of particles on temperature and pressure were analysed and processed. The regression equation is obtained, which allows calculating the efficiency of capturing of benzene particles as a function of temperature and pressure. Based on the statistical analysis of the equation of regression of experimental data, the factor that most influences the efficiency of capturing of benzene particles is revealed. This factor is the temperature. The point elasticity coefficient for this factor exceeds three, and for other factors, this coefficient is much less than one. It is shown that in order to intensify the capturing it is necessary to minimize the process temperature as much as possible. The graph is built by the regression equation.

Keywords: scrubber, coke oven gas, benzene, emissions, cap, coke industry

Надійшла до редакції / Received 25.09.2017