

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 669.162.22

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181435

© Кравченко В.П.<sup>1</sup>, Черевко О.О.<sup>2</sup>

### АВТОМАТИЧНЕ РОЗПОДІЛЕННЯ ВОДИ ПО ЯРУСАХ СКРУБЕРУ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗУ

Розглядаються дві структури систем автоматизації процесу розподілення води по ярусах скрубера мокрого очищення колошникового газу доменної печі, які забезпечують стабілізацію параметрів води (тиску і витрат) по кожному ярусу і концентрацію пилу у газі на виході скрубера. Структура таких систем базується на результатах розрахунку трубопроводу для розподілення води по ярусах скрубера, одержаних авторами раніше. Система першого типу містить локальні підсистеми автоматичного регулювання перепаду тиску води на горизонтальних ділянках трубопроводу по ярусах і систему автоматичного регулювання витрат води на скрубера в цілому, шляхом дроселювання потоку води на виході насоса з постійною продуктивністю. Задані перепади тиску по ярусах розраховуються шляхом вирішення системи алгебраїчних рівнянь, одержаної в результаті розрахунків трубопроводу скрубера як трубопроводу складного типу. Другий тип системи містить таку ж локальну підсистему автоматичного регулювання перепаду тиску води на горизонтальних ділянках трубопроводу по ярусах і підсистему автоматичного регулювання витрат води на скрубера, які забезпечують задану якість очищення газу від пилу. Для стабілізації якості очищення газу система обладнується датчиками контролю концентрації пилу на вході і виході скрубера. Задану кількість води, яка забезпечує потрібну якість очищення газу, система розраховує у спеціальному блоці з використанням енергетичного методу оцінки ступеня очищення газу. Робота запропонованих систем автоматичного розподілення води по ярусах скрубера і стабілізації вмісту пилу у газі була перевірена шляхом математичного моделювання при реальних значеннях основних параметрів. Результати моделювання показали, що система першого типу оперативно реагує на коливання витрат колошникового газу. Вона змінює загальну кількість  $Q_{62}(\tau)$ , початковий тиск  $P_{поч}(\tau)$  води та підтримує на потрібному рівні параметри води перед форсунками шляхом стабілізації перепадів тиску води по ярусах. При моделюванні роботи системи другого типу, для тих же вихідних даних, одержані результати показали, що трубопроводна система забезпечення скрубера водою не дозволяє стабілізувати якість очищення при малих концентраціях пилу на вході в скрубера (в межах 4-7 г/м<sup>3</sup>). Це пояснюється тим, що для таких концентрацій процес очищення потребує такої малої кількості води, яка не забезпечує потрібні перепади тиску води по ярусах і параметри води перед форсунками. Ці результати підтвердили встановлену на доменних печах практику підтримання витрат води на очищення на рівні 5-8 л/м<sup>3</sup> газу, незважаючи на фактичний діапазон зміни концентрації пилу на вході у скрубера.

**Ключові слова:** скрубера, колошниковий газ, мокре очищення, автоматичне розподілення води, системи автоматичного розподілення води, стабілізація вмісту пилу у очищеному газі.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» м. Маріуполь, [kravchenko\\_vp@ukr.net](mailto:kravchenko_vp@ukr.net)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» м. Маріуполь, [cherevkoea89@gmail.com](mailto:cherevkoea89@gmail.com)

*Кравченко В.П., Черевко Е.А. Автоматическое распределение воды по ярусам скруббера мокрой очистки колошникового газа. Рассматриваются две структуры систем автоматического распределения воды по ярусам скруббера мокрой очистки колошникового газа доменной печи, которые обеспечивают стабилизацию параметров воды (давления и расхода) по каждому ярусу и концентрацию пыли в газе на выходе скруббера. Структура таких систем базируется на результатах расчета трубопровода для распределения воды по ярусам скруббера, полученных ранее авторами. Система первого типа содержит локальные подсистемы автоматического регулирования перепадов давления воды на горизонтальных участках трубопровода по ярусам и подсистему автоматического регулирования расхода на скруббер в целом путем дросселирования потока воды на выходе насоса с постоянной производительностью. Заданные перепады давления по ярусам рассчитываются путем решения системы алгебраических уравнений, полученных в результате расчета трубопровода скруббера как трубопровода сложного типа. Второй тип системы содержит такую же локальную подсистему автоматического регулирования перепадов давления воды на горизонтальных участках трубопровода по ярусам и подсистему автоматического регулирования расхода воды на скруббер, величина которой обеспечивает заданное качество очистки газа от пыли. Для стабилизации качества очистки газа система имеет датчики контроля концентрации пыли в газе на входе и выходе скруббера. Заданное количество воды, обеспечивающее нужное качество очистки, рассчитывается в специальном блоке системы с использованием энергетического метода степени очистки газа. Работа предложенных систем автоматического распределения воды по ярусам скруббера и стабилизации содержания пыли в газе была проверена путем математического моделирования при реальных значениях основных параметров. Результаты моделирования показали, что система первого типа оперативно реагирует на колебания расхода колошникового газа. Она изменяет общее количество  $Q_{в\sum}(\tau)$ , начальное давление  $P_{нач}(\tau)$  воды и поддерживает на необходимом уровне параметры воды перед форсунками путем стабилизации перепадов давления воды по ярусам. При моделировании работы системы второго типа, при тех же исходных данных, полученные результаты показали, что трубопроводная система снабжения скруббера водой не позволяет стабилизировать качество очистки при малых концентрациях пыли на входе в скруббер (в пределах 4-7 г/м<sup>3</sup>). Это объясняется тем, что для указанных концентраций пыли процесс очистки требует такого малого количества воды, которое не обеспечивает требуемые перепады давления по ярусам и параметры воды перед форсунками. Эти результаты подтвердили существующую на доменных печах практику поддержания расхода воды на очистку на уровне 5-8 л/м<sup>3</sup> газа, несмотря на фактический диапазон изменения концентрации пыли на входе в скруббер.*

**Ключевые слова:** скруббер, колошниковый газ, мокрая очистка, автоматическое распределение воды, системы автоматического распределения воды, стабилизация содержания пыли в очищенном газе.

*V.P. Kravchenko, E.A. Cherevko. Automatic distribution of the water through the tiers of a scrubber of blast furnace gas wet purification. Two structures of automatic systems of water distribution through the tiers of a scrubber of blast furnace gas wet purification, which assure stabilization of water parameters (pressure and discharge) through each tier and concentration of dust in gas at the scrubber exit, are considered. The structure of such systems is based on the results of calculation of the pipeline for water distribution through the tiers of a scrubber, obtained earlier by the authors. The first type system contains local subsystems of automatic control of differential pressures of water in horizontal sections of the pipeline through the tiers and a subsystem of automatic control of a discharge for the whole scrubber, by throttling of water flow at the output of the pump with constant productivity. The set differential pressures through the tiers are calculated from the algebraic equations system received as a result of calculation of the scrubber pipeline as a sophisti-*

cated design pipeline. The second type system contains the same local subsystem of automatic control of water differential pressures in the pipeline horizontal sections through the tiers and a subsystem of automatic control of water consumption for a scrubber; its value providing the set quality of gas purification from dust. For stabilization the gas quality purification the system has sensors of control of dust concentration in gas at the input and the exit of the scrubber. The set amount of water providing the necessary quality of cleaning is calculated in the special block of the system, using a power method of gas purification extent. The work of the offered water automatic distribution systems through the tiers of the scrubber and stabilization of dust content in gas was checked by mathematical modelling at real values of the key parameters. The modelling results showed that the first type system quickly reacts to blast furnace consumption fluctuations. It changes the total quantity, the initial pressure of water and supports the water parameters before the nozzles at the necessary level through the stabilization of differential pressures of water through the tiers. When modelling the operation of the second type system; the basic data being the same, the received results showed that the pipeline supply system of a scrubber with water does not make it possible to stabilize the quality of cleaning with small dust concentration at an scrubber input (within  $4-7 \text{ g/m}^3$ ). This results from the fact that the specified dust concentration process of cleaning necessitates such small amount of water which does not assure the required differential pressures through the tiers and water parameters before the nozzles. These results confirmed the practice of maintenance of water consumption for cleaning, used for blast furnaces, at the level of  $5-8 \text{ l/m}^3$  of gas, despite the actual range of dust concentration change at a scrubber input.

**Keywords:** scrubber, blast furnace gas, wet cleaning, water distribution automatic system, stabilization of dust content in purified gas.

**Постановка проблеми.** На більшості доменних печей використовується мокрий спосіб очищення колошникового газу з використанням скрубєрів. У скрубєрі за рахунок протитечії газу, який подається знизу, і води, яка подається зверху, відбувається очищення газу. Ефективність очищення у такому скрубєрі, в значній мірі, залежить від кількості води, яка подається у скрубєр, правильного розподілення її по ярусах і щільності розпилення. Існуючі системи автоматизації скрубєру підтримують загальну кількість води на скрубєр і тиск води перед форсунками у певному співвідношенні з тиском колошникового газу у скрубєрі. Такі системи не підтримують потрібне розподілення води по ярусах і оптимізацію її кількості з метою забезпечення ефективного очищення, тобто одержання заданої концентрації пилу у очищеному газі. У зв'язку з цим, існує нагальна потреба у розробці і використанні систем автоматичного розподілення води по ярусах і регулюванні її параметрів, які б забезпечували задану чистоту газу на виході скрубєру. Цим питанням і присвячена дана робота.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Основні вимоги до технології мокрого очищення доменного газу і до параметрів скрубєра регламентуються галузевими нормами [1]. Вимоги до систем автоматизації скрубєрів регламентуються нормами [2]. Проблеми очищення газів у скрубєрах присвячена значна кількість робіт [3-6], але в них не відображені питання автоматизації процесу розподілення води по ярусах скрубєру.

Що стосується забезпечення скрубєра водою і її розподілення, то ці питання, в основному, розглядаються в літературі по гідравліці і розрахункам трубопроводів [7, 8]. Питання щодо розрахунків трубопроводів і систем автоматизації процесу забезпечення водою безпосередньо скрубєрів мокрого очищення в цих джерелах не відображені. В [9] розглядаються питання автоматизації насосних станцій і насосних установок з використанням регульованого приводу на базі частотних перетворювачів.

**Постановка задачі.** В роботі [3] розглядався трубопровід подачі і розподілення води по чотирьом ярусам скрубєра. Насос у нижній частині трубопроводу подає воду у кількості і з тиском, які відповідають його технічним характеристикам і характеристикам трубопроводу. Але для ефективного очищення газу на скрубєр треба подавати воду у заданій кількості  $Q_{e\Sigma}$  і з заданим початковим тиском  $P_{поч}$ . З цією метою на виході насосу встановлюється система автоматичного регулювання (САР) витрат води, яка забезпечує задане значення  $Q_{e\Sigma}$ . Окрім цього тре-

ба забезпечувати подачу води до форсунок кожного ярусу у певній кількості  $Q$  і з певним тиском  $P$  [1]. Тиск води перед форсунками залежить від тиску газу у скрубєрі, а от кількість води повинна визначатись вимогами до потрібної якості очищення газу. Існуючі системи автоматизації скрубєрів забезпечують тільки автоматичне регулювання тиску води перед форсунками, а її кількість (тільки загальна) встановлюється вручну дистанційно на основі практичного досвіду для кожного скрубєру. В роботі [3] одержана математична модель процесу керування розподіленням води по ярусах скрубєру, яка дозволяє визначити умови стабілізації параметрів води (тиску і витрат) перед форсунками кожного ярусу. Модель уявляє собою систему алгебраїчних рівнянь. Рішення системи дозволяє знайти перепади тиску води по ярусах, стабілізація яких забезпечує потрібні значення параметрів води на форсунки кожного ярусу.

**Мета статті** – на основі результатів, одержаних у [3], розробити систему автоматизації розподілення води по ярусах скрубєру, яка б забезпечувала перед форсунками стабілізацію параметрів води ( $P$  та  $Q$ ), незважаючи на коливання кількості колошникового газу, і промодельовати її роботу; доповнити вищезазвану систему підсистемою стабілізації вмісту пилу у газі на виході скрубєра при коливаннях кількості колошникового газу і початкової концентрації пилу у ньому, промодельовати її роботу.

**Виклад основного матеріалу.** Рішення першої задачі базується на використанні системи алгебраїчних рівнянь [3], за допомогою якої знаходяться потрібні перепади тиску у трубопроводах  $AB, CD, EF, ON$  по ярусах.

Система рівнянь (I) повинна вирішуватись у реальному часі через певні проміжки часу, які визначаються періодом коливань витрат колошникового газу.

$$\begin{aligned} \Delta P_{AB} &= P_{\text{поч}} - P - K_{\text{Л1}} (Q_{\Sigma})^2 - \rho gh_1; \\ \Delta P_{CD} &= \Delta P_{AB} - 9K_{\text{Л2}} Q^2 - \rho gh; \\ \text{(I)} \quad \Delta P_{EF} &= \Delta P_{AB} - (4K_{\text{Л3}} + 9K_{\text{Л2}}) Q^2 - 2\rho gh; \\ \Delta P_{ON} &= \Delta P_{AB} - (K_{\text{Л4}} + 4K_{\text{Л3}} + 9K_{\text{Л2}}) Q^2 - 3\rho gh; \\ Q &= \frac{Q_{\Sigma}}{4}. \end{aligned}$$

В результаті вирішення системи (I) одержуються задані перепади тиску води по ярусах  $\Delta P_{AB}, \Delta P_{CD}, \Delta P_{EF}, \Delta P_{ON}$ . Автоматична стабілізація знайдених перепадів забезпечує стабілізацію потрібного тиску води  $P$  перед форсунками і її витрат  $Q$  для кожного ярусу скрубєра. В систему рівнянь (I) входять загальна кількість води  $Q_{\Sigma}$  на скрубєр і її початковий тиск  $P_{\text{поч}}$ . Ці величини повинні забезпечуватись роботою насосу і САР витрат води у вертикальному трубопроводі. Необхідна загальна кількість води  $Q_{\Sigma}$  залежить від кількості колошникового газу  $Q_{\text{КГ}}$ , який проходить очищення у скрубєрі (як правило, пропорційно  $Q_{\text{КГ}}$ ), а тиск  $P_{\text{поч}}$  визначається робочими характеристиками насосу та трубопроводу.

На сучасних доменних печах тиск колошникового газу автоматично стабілізується на заданому рівні  $P_{\text{КГ}} = P_{\text{КГзад}}$ , а кількість газу  $Q_{\text{КГ}}$  може коливатися у певних межах. Для ефективного очищення газу необхідно мати:

– певні загальні витрати води на скрубєр  $Q_{\text{в}\Sigma}$ , пропорційні поточним витратам газу, який проходить очищення;

– тиск води перед форсунками скрубєра  $P = 2P_{\text{КГ}}$ .

Для вирішення цієї задачі пропонується система автоматизації процесу розподілення води по ярусах скрубєру, яка повинна забезпечувати стабілізацію параметрів води  $P$  і  $Q$  перед форсунками кожного ярусу, незважаючи на коливання параметрів газу. Структура такої системи представлена на рис. 1.

Для підтримання заданих значень тиску  $P$  і витрат води  $Q$  по ярусах скрубєру система у реальному часі контролює тиск  $P_{\text{КГ}}$  і витрати  $Q_{\text{КГ}}$  колошникового газу, по ним розраховує потрібну загальну кількість води  $Q_{\text{в}\Sigma\text{зад}}$  і тиск води  $P$  перед форсунками. Розрахована загальна кількість води  $Q_{\text{в}\Sigma\text{зад}}$  є заданою для автоматичного регулятора (АР) витрат, який і підтримує зага-

льну кількість на цьому рівні  $Q_{e\Sigma}(\tau) = Q_{e\Sigma\text{зад}}$ . Згідно робочій характеристиці трубопроводу по  $Q_{e\Sigma}(\tau)$  визначається відповідний початковий тиск води  $P_{\text{поч}}$ . З використанням одержаних даних вирішується система алгебраїчних рівнянь (I). В результаті рішення одержуються задані перепади тиску і задані кількості води по ярусах, які і стабілізує система.

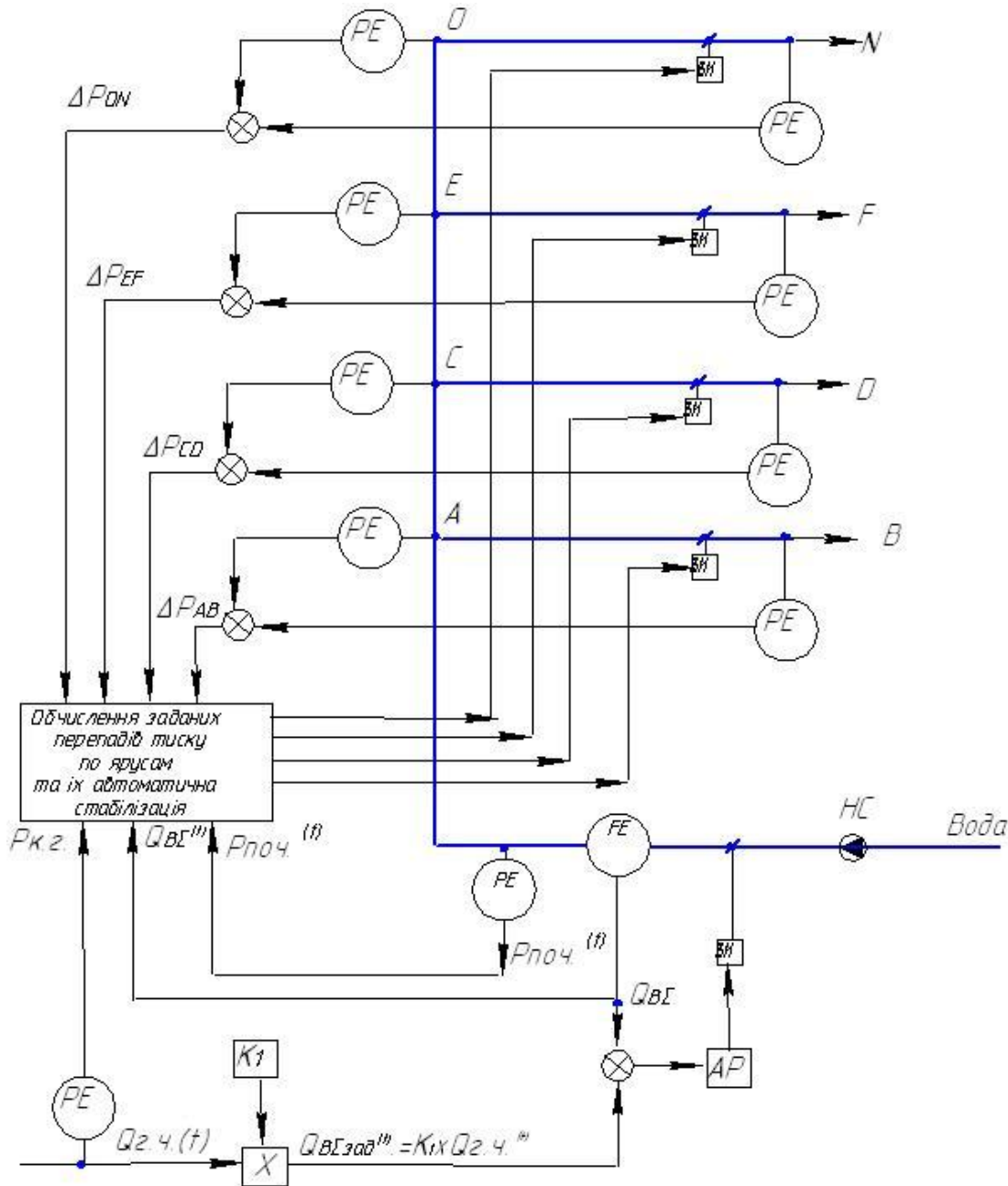


Рис. 1 – Система автоматичного розподілення води по ярусах скрубера зі стабілізацією загальних витрат води на скрубера

Робота запропонованої системи автоматичного розподілення води по ярусах скрубера була перевірена шляхом математичного моделювання при наступних вихідних даних:

- діаметр скрубера  $D_{\text{скр}} = 6$  м;
- вертикальний водопровід: довжина  $h_1 = 15$  м, діаметр  $D_1 = 0,4$  м;
- відстань між ярусами (горизонтальними трубопроводами)  $h = 3$  м;
- горизонтальний трубопровід на кожному ярусі: діаметр  $D_2 = 0,2$  м;

- максимальні витрати води на ярус  $Q = 750 \text{ м}^3/\text{год} = 0,2084 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- тиск води в горизонтальному водопроводі перед форсункою  $P = k_2 \cdot P_{КГ}$ , тут  $k_2 = 2$  – коефіцієнт перевищення тиску води  $P$  перед форсункою над тиском колошникового газу  $P_{КГ}$  у скрубєрі;
- максимальні витрати води на скрубєр  $Q_{\Sigma} = 2420 \text{ м}^3/\text{год} = 0,673 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- витрати колошникового газу  $Q_{КГ} = 180\,000 \div 220\,000 \text{ м}^3/\text{год} = 50 \div 61,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- тиск колошникового газу  $P_{КГ} = 1,3 \div 1,7 \text{ кг}/\text{см}^2$ ;
- параметри насоса води: максимальний тиск  $P_{\text{макс}} = 40,0 \text{ кг}/\text{см}^2$ , максимальна продуктивність  $Q_{\Sigma\text{макс}} = 3300 \text{ м}^3/\text{год}$ ;
- робочий діапазон витрат води на скрубєр:  $\min Q_{\Sigma} = 180 \text{ м}^3/\text{год} \div \max Q_{\Sigma} = 2200 \text{ м}^3/\text{год}$ ;
- робочий діапазон тиску води у вертикальному трубопроводі:  $\min P_{\text{поч}} = 5,8 \text{ кг}/\text{см}^2 \div \max P_{\text{поч}} = 27,8 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

Зміна витрат колошникового газу у часі моделювалась у діапазоні  $50 \div 61,1 \text{ м}^3/\text{с}$  за допомогою функції (random) генерації рівномірно розподілених чисел згідно формули:

$$Q_{КГ}(\tau) = 50 + 11,2 \cdot (\text{random}), [\text{м}^3/\text{с}].$$

Одержана зміна витрат колошникового газу на вході у скрубєр представлена на рис. 2.

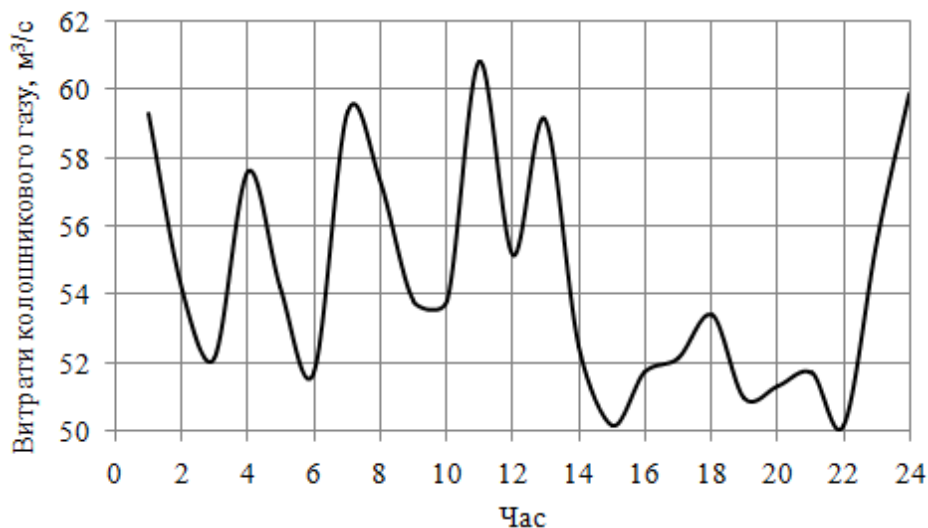


Рис. 2 – Коливання витрат колошникового газу на вході у скрубєр

По сигналу про розігране поточне значення витрат колошникового газу  $Q_{КГ}(\tau)$  шляхом множення на коефіцієнт пропорційності  $k_1 = 0,005$  (5 л на  $\text{м}^3$  газу) визначається задане значення загальних витрат води на скрубєр  $Q_{\Sigma\text{зад}}$ , яке підтримує САР витрат. Для цієї величини витрат по робочій характеристиці трубопроводу визначається тиск води  $P_{\text{поч}}(\tau)$ . Результати представлені на рис. 3.

Маючи поточні значення  $Q_{\Sigma}(\tau)$  та  $P_{\text{поч}}(\tau)$ , система розраховує необхідні значення перепадів тиску води по ярусах  $\Delta P_{AB}$ ,  $\Delta P_{CD}$ ,  $\Delta P_{EF}$  та  $\Delta P_{ON}$  і стабілізує їх на цьому рівні, стабілізуючі, таким чином, заданий тиск  $P$  і кількість води  $Q$  на форсунках кожного ярусу скрубєру.

Результати розрахунку перепадів тиску води по ярусах при тиску води перед форсунками  $P = 3,0 \text{ кг}/\text{см}^2$  представлені на рис. 4.

Як показують графіки, запропонована система автоматизації оперативно реагує на коливання витрат колошникового газу, змінюючи загальну кількість  $Q_{\Sigma}(\tau)$ , початковий тиск  $P_{\text{поч}}(\tau)$  води та підтримуючи на потрібному рівні параметри води перед форсунками шляхом стабілізації на розрахованих рівнях перепадів тиску води по ярусах.

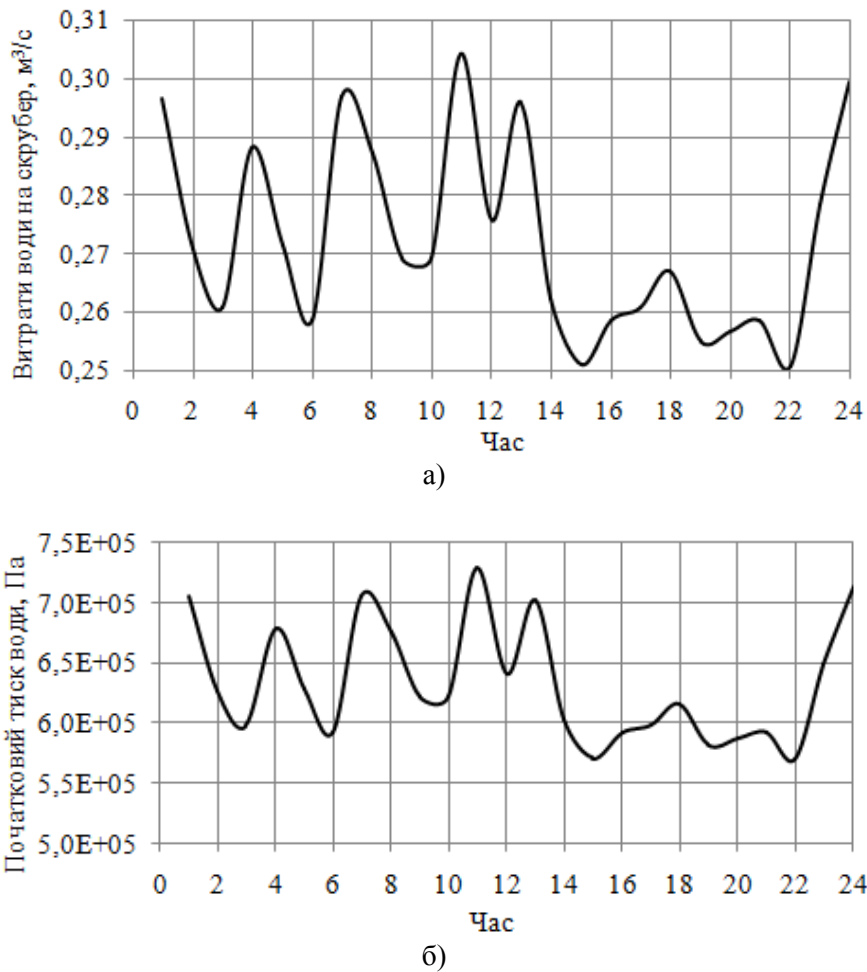


Рис. 3 – Зміна витрат (а) і початкового тиску (б) води на скруббер при коливаннях кількості газу, який проходить очищення

Для вирішення другої задачі, яка поставлена у даній роботі, а саме, стабілізації концентрації пилу у очищеному газі, доповнимо вищеповану систему стабілізації параметрів води по ярусах скрубера ще однією підсистемою, яка буде стабілізувати і вміст пилу у газі на виході скрубера. Така підсистема повинна розраховувати загальну кількість води на скруббер  $Q_{\Sigma}(\tau)$  не тільки в залежності від поточної кількості доменного газу  $Q_{KT}(\tau)$ , а і з урахуванням концентрації пилу на вході  $Z_{вх}(\tau)$  і заданої концентрації пилу на виході  $Z_{вих}(\tau)$  скрубера.

Залежності кількості води від кількості колошникового газу і його запиленості можуть бути знайдені з використанням енергетичного методу або теорії масообміну [5, 6]. Розглянемо систему, яка, окрім підсистем стабілізації перепадів тиску води по ярусах і регулювання заданої кількості води на скруббер, повинна мати підсистему стабілізації вмісту пилу у очищеному газі. Для цього вона повинна мати апаратуру контролю концентрації пилу в газі на вході і виході скрубера, а також блок розрахунку заданої кількості води на скруббер, яка б забезпечувала задану концентрацію пилу у очищеному газі. Для вирішення цієї задачі пропонується система (рис. 5).

Система має перший блок розрахунків, який по параметрам колошникового газу визначає потрібну загальну кількість води на скруббер  $Q_{\Sigma\text{зад}}$ . Колошниковий газ після сухого очищення у пиловій камері поступає до скрубера з концентрацією пилу  $Z_{ex}(\tau) = 4 \div 10 \text{ г/м}^3$ , а повинен виходити із скрубера з концентрацією  $Z_{вих}(\tau) = 1 \text{ г/м}^3$  [5]. Ступінь очищення газу у скрубері  $\eta'$  визначається виразом (1):

$$\eta'(\tau) = \frac{(Z_{ex}(\tau) - Z_{вих}(\tau))}{Z_{ex}(\tau)} \tag{1}$$

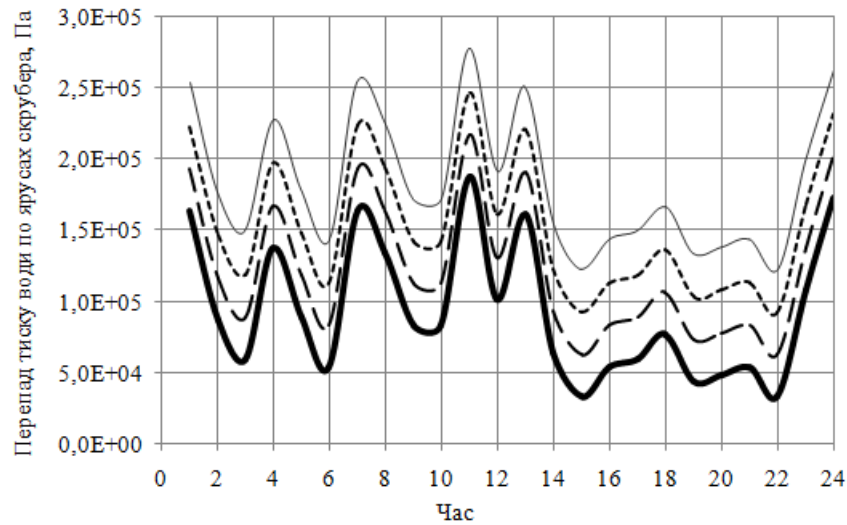


Рис. 4 – Графіки автоматичної зміни перепадів тиску води по ярусах скрубера, з метою стабілізації тиску  $P$  і витрат  $Q$  води перед форсунками, при коливаннях витрат колошникового газу; —  $\Delta P_{AB}$  ----  $\Delta P_{CD}$  - -  $\Delta P_{EF}$  —  $\Delta P_{ON}$

Потрібна кількість води  $Q_{KT}(\tau)$  розраховується на основі енергетичного методу [6] знаходження ступеню очищення газу  $\eta'(\tau)$  у скрубєрі. Згідно цього методу:

$$\eta'(\tau) = 1 - e^{\left(-B(K_{скф})^{\aleph}\right)}, \quad (2)$$

тут  $B$  та  $\aleph$  – безрозмірні коефіцієнти, які для доменного газу дорівнюють:  $B = 0,1925$ ,  $\aleph = 0,3255$ ;  $K_{скф}$  – сумарна енергія контакту фаз, [Дж/м<sup>3</sup>].

Із виразу (2) знаходиться величина  $K_{скф}$ :

$$K_{скф}(\tau) = \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{-\ln(1-\eta'(\tau))}{B}\right)}{\aleph}\right). \quad (3)$$

Після підстановки у цей вираз із (1) значення ступені очищення  $\eta'(\tau)$  величина  $K_{скф}(\tau)$  буде дорівнювати:

$$K_{скф}(\tau) = \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{-\ln\left(\frac{Z_{вих}(\tau)}{Z_{вх}(\tau)}\right)}{B}\right)}{\aleph}\right). \quad (4)$$

У скрубєрі сумарна енергія контакту фаз витрачається на додання гідравлічного опору самого скрубєру  $\Delta P_{ск}$  (перепад тиску на скрубєрі – 250 Па) плюс енергія на розбризкування води:

$$K_{скф}(\tau) = \Delta P_{ск} + P\left(\frac{Q_{в\Sigma}(\tau)}{Q_{д\Sigma}(\tau)}\right), \quad (5)$$

тут  $P$  – тиск води перед форсунками.

Тепер із (5) знаходиться потрібна кількість води:

$$Q_{в\Sigma зад}(\tau) = Q_{к\Sigma}(\tau) \frac{(K_{скф}(\tau) - \Delta P_{ск})}{P}. \quad (6)$$



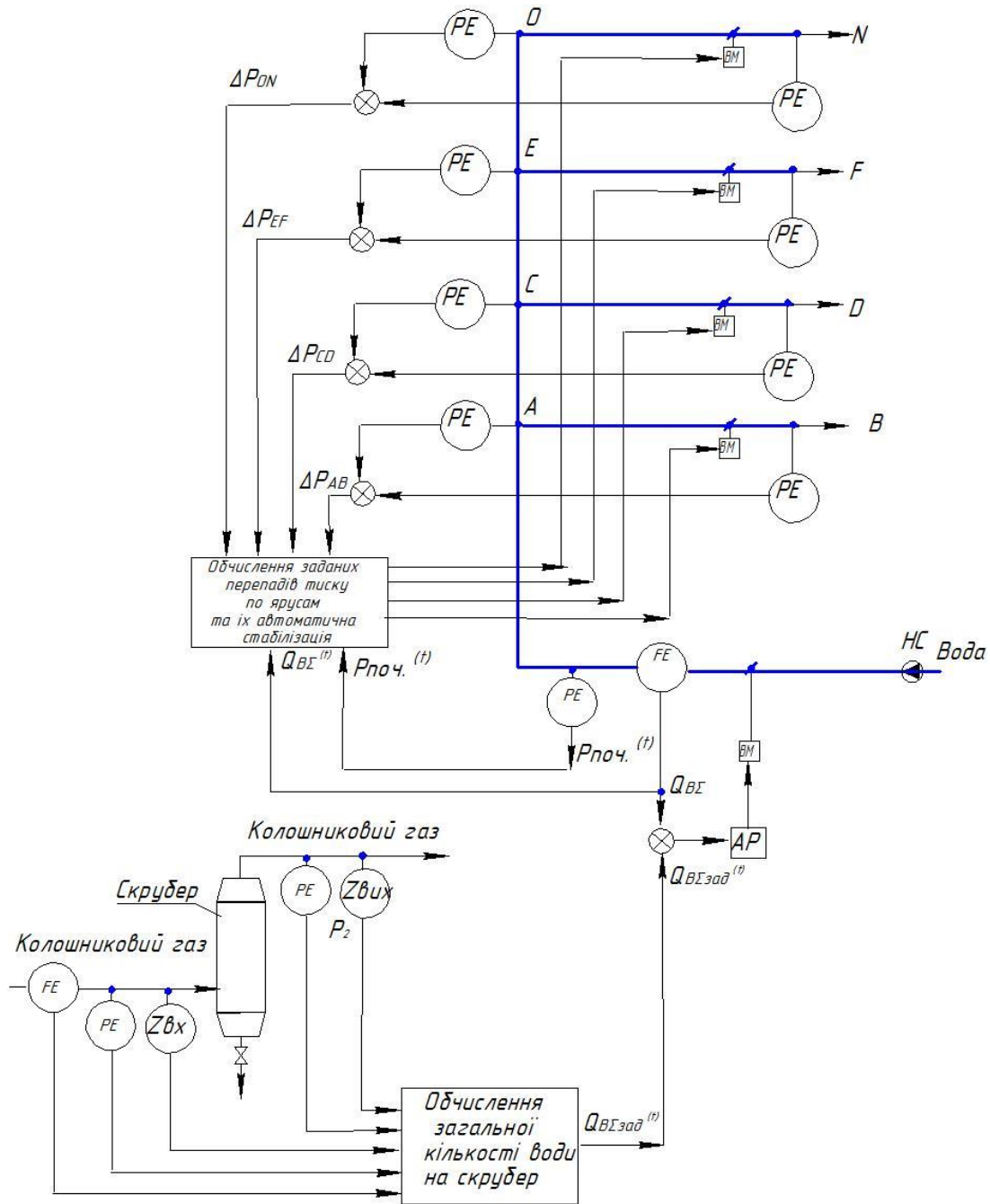


Рис. 5 – Структура системи автоматичного регулювання параметрів води на скруббер зі стабілізацією заданої концентрації пилу у очищеному газі

Підставляючи у (6) значення  $K_{скф}(\tau)$  із (4), остаточно величина  $Q_{в\sigma}^{зад}$  дорівнює:

$$Q_{в\sigma}^{зад}(\tau) = Q_{кг}(\tau) \frac{\exp\left(\ln\left(\frac{-\ln\left(\frac{Z_{вих}(\tau)}{Z_{вх}(\tau)}\right)}{B}\right)\right) - \Delta P_{ск}}{P}, \quad [M^3/c]. \quad (7)$$

Ця величина в системі є заданою для автоматичного регулятора (АР) витрат води на скруббер. Далі система визначає початковий тиск води на скруббер  $P_{поч}$ , розраховує і підтримує

задані перепади тиску води по ярусах. Таким чином, система забезпечує стабілізацію концентрації пилу на виході скрубера на заданому рівні. При цьому питомі витрати води (літри води на 1 м<sup>3</sup> газу) будуть дорівнювати:

$$\frac{Q_{e\Sigma\text{зад}}(\tau)}{Q_{\text{кг}}(\tau)} = 1000 \cdot \frac{\exp\left(\frac{\ln\left(\frac{-\ln\left(\frac{Z_{\text{вих}}(\tau)}{Z_{\text{вх}}(\tau)}\right)}{B}\right)}{\xi}\right) - \Delta P_{\text{ск}}}{P}, \text{ [л води/м}^3 \text{ газу]}. \quad (8)$$

Моделювання роботи системи виконано для тих же вихідних даних, що і для першої системи.

Зміна витрат колошникового газу у часі моделювалась у діапазоні 50÷61,2 м<sup>3</sup>/с за допомогою функції (random) генерації рівномірно розподілених чисел згідно формули:

$$Q_{\text{кг}}(\tau) = 50 + 11,2 \cdot (\text{random}), \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Аналогічно, зміна концентрації пилу  $Z_{\text{вх}}(\tau)$  у діапазоні 3÷10 г/м<sup>3</sup> газу на вході у скрубер розраховувалась згідно формули:

$$Z_{\text{вх}}(\tau) = 3 + 7 \cdot (\text{random}), \text{ [г/м}^3\text{]}.$$

При коливаннях запиленості газу на вході скрубера  $Z_{\text{вх}}(\tau)$  система розраховує і змінює загальну кількість води  $Q_{e\Sigma}(\tau)$ , яка повинна забезпечувати задану концентрацію пилу на виході. Моделювання роботи системи показало, що розраховані згідно формули (8) значення загальної кількості води на скрубера  $Q_{e\Sigma\text{зад}}(\tau)$  для забезпечення потрібного очищення газу не можуть бути реалізовані при концентраціях пилу у газі на вході скрубера нижче 8 г/м<sup>3</sup>. При малих концентраціях пилу на вході розрахована потрібна кількість води на скрубера  $Q_{e\Sigma\text{зад}}(\tau)$  настільки мала, що не забезпечує потрібні перепади тиску по ярусах і, відповідно, потрібний тиск  $P$  і витрати води  $Q$  перед форсунками (рис. 6).

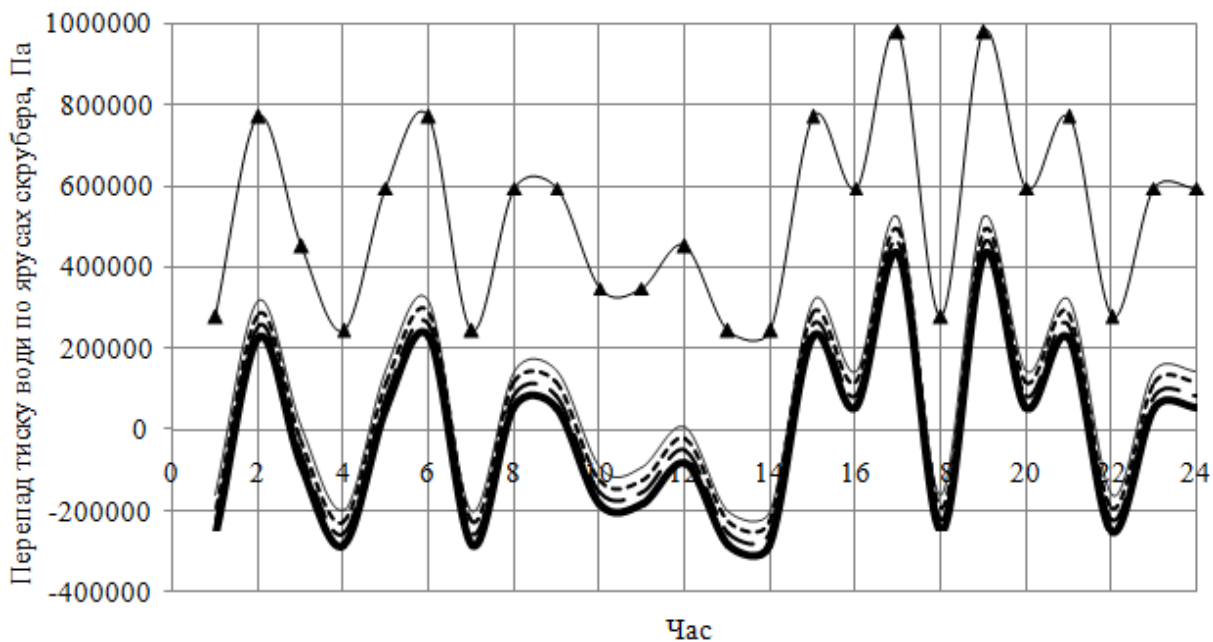
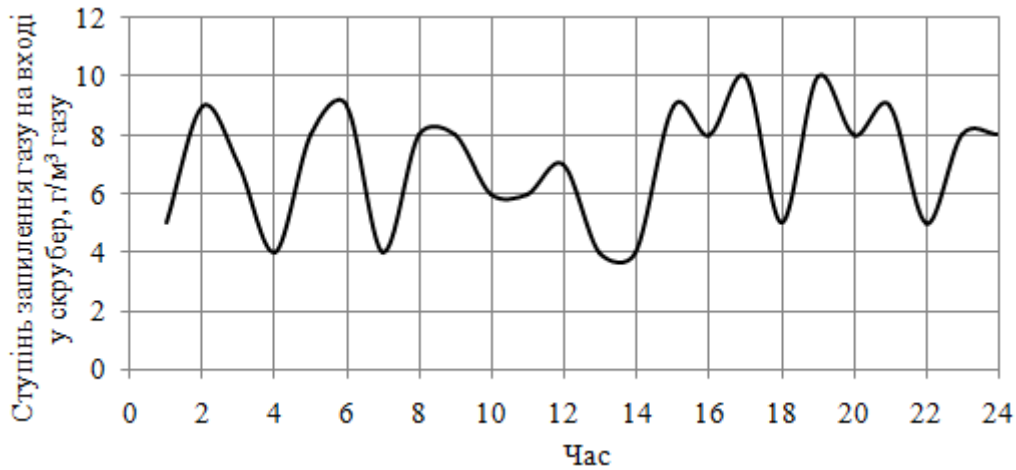


Рис. 6 – Зміна перепадів тиску по ярусах скрубера; — Δ PAB    ---- Δ PCD  
- - Δ PEF    — Δ PON    ▲ Рпоч

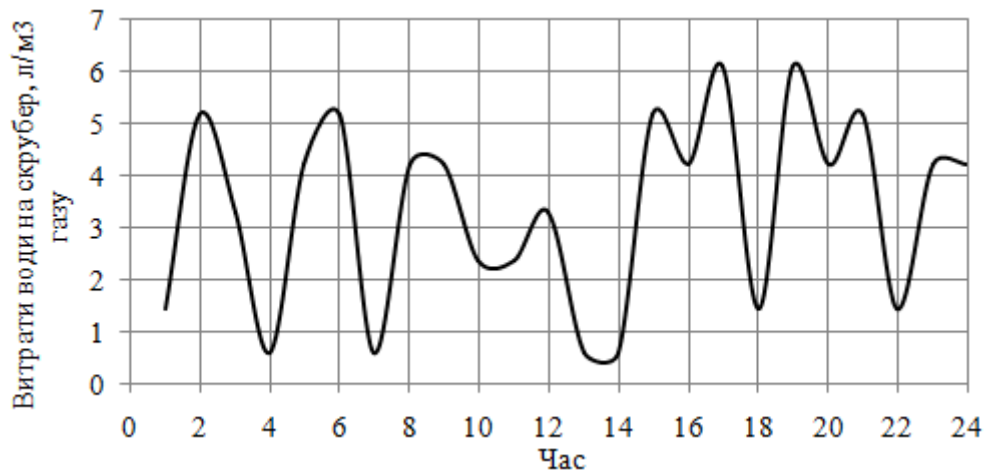
Таким чином, результати моделювання показали, що енергетичний метод розрахунку кількості води з метою стабілізації вмісту пилу у газі після очищення (при коливаннях концент-

рації пилу у газі на вході у скрубєр) не враховує гідродинамічні можливості водопроводу скрубєра і не дозволяє при малих концентраціях пилу на вході в межах  $4 \div 7 \text{ г/м}^3$  газу забезпечувати потрібні перепади тиску води по ярусах і параметри води перед форсунками.

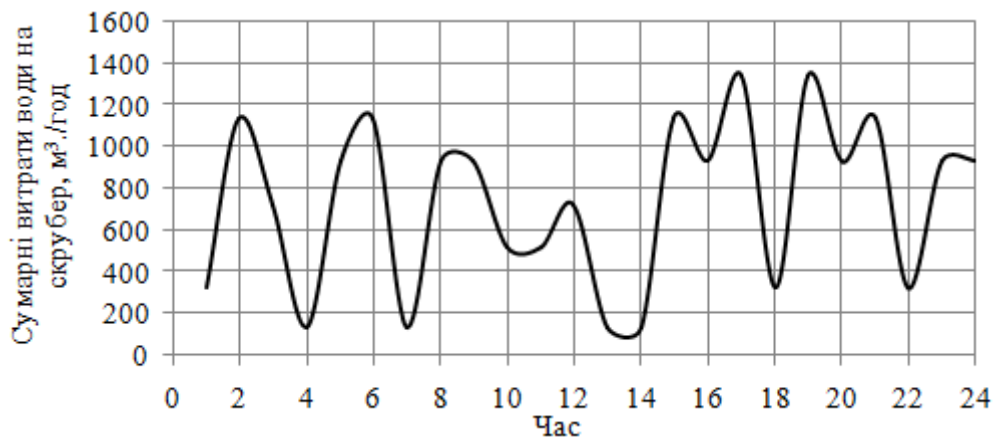
Результати моделювання роботи системи при  $P = 3 \text{ кг/см}^2$  представлені на рис. 6 та рис. 7 (а, б, в).



а)



б)



в)

Рис. 7 – Зміна концентрації пилу у колошниковому газі (а), витрат води на його очищення (б, в)

Таким чином, стабілізацію вмісту пилу у очищеному газі при коливаннях концентрації пилу на вході у межах  $4\div 11$  г/м<sup>3</sup> можна реалізувати одним з наступних способів. Перший – обмежити діапазон коливань вмісту пилу у газі перед скруббером шляхом попереднього очищення і для цього обмеженого діапазону концентрацій розрахувати відповідну схему забезпечення скрубера водою. Другий – використовувати для всього діапазону концентрацій пилу на вході у скруббер витрати води в межах  $4\div 7$  л/м<sup>3</sup> газу, яку може забезпечувати даний водопровід. Тобто, перевитрачаючи воду для концентрацій пилу менше 8 г/м<sup>3</sup> і оптимізуючи витрати води при концентраціях пилу більше 8 г/м<sup>3</sup>.

Сучасні технології очищення газу у скруберах доменних печей використовують другий спосіб – встановлюють витрати води на рівні  $5\div 8$  л/м<sup>3</sup> газу, тобто орієнтовані на максимальний вміст пилу у газі перед скруббером на рівні  $9\div 11$  /м<sup>3</sup> газу, незважаючи на фактичний діапазон зміни концентрації пилу на вході у скруббер.

### Висновки

1. Запропоновано два типи систем автоматизації процесу розподілення води по ярусах скрубера мокрого очищення колошникового газу доменної печі.
2. Перший тип системи автоматично стабілізує тиск  $P$  і витрати  $Q$  води перед форсунками кожного ярусу скрубера, незважаючи на коливання кількості газу, який очищується.
3. Другий тип системи одночасно стабілізує параметри води перед форсунками і концентрацію пилу у газі після скрубера.
4. Система автоматичної стабілізації параметрів води і заданої концентрації пилу у очищеному газі ефективно працює тільки в певному діапазоні концентрації пилу у газі на вході скрубера, оскільки при малих концентраціях пилу потрібна така кількість води, яка не забезпечує потрібні перепади тиску води по ярусах і, відповідно, тиск води перед форсунками.
5. Технологічний комплекс очищення колошникового газу кожної доменної печі повинен забезпечувати таку ступінь очищення колошникового газу до скрубера, щоб у скруббер надходив газ з якомога меншим діапазоном зміни концентрації пилу у ньому (конкретний для даної печі і даного скрубера).

### Перелік використаних джерел:

1. ОНТПУ-347-26-94. Нормы технологического проектирования газового хозяйства предприятий черной металлургии. – Днепропетровск, 1994. – 120 с.
2. НПАОП 27.1-1.09-09 (ПБГЧМ). Правила безпеки в газовому господарстві підприємств чорної металургії. – Київ, 2009. – 98 с.
3. Кравченко В.П. Математична модель процесу керування розподіленням води по ярусам скрубера мокрого очищення колошникового газу / В.П. Кравченко // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2018. – Вип. 37. – С. 165-176. – (Серія : Технічні науки).
4. Одельский Э.Х. Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения / Э.Х. Одельский. – Минск : Высшая школа, 1967. – 103 с.
5. Колошниковая пыль [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [www.metallischekiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie\\_gazov/ochistka\\_domennogo\\_gaza/4](http://www.metallischekiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/ochistka_domennogo_gaza/4). – Название с экрана.
6. Пылеулавливание в металлургии : справ. изд. / В.М. Алешина [и др.]. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
7. Розрахунки довгих трубопроводів [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: [www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки\\_довгих\\_трубопроводів](http://www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки_довгих_трубопроводів). – Назва з екрана.
8. Гідравлічний розрахунок трубопроводів [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: [www.studfiles.net/preview/5064502/page:13](http://www.studfiles.net/preview/5064502/page:13). – Назва з екрана.
9. Совершенствование системы очистки доменного газа [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [ispu.ru/files/73-75.pdf](http://ispu.ru/files/73-75.pdf). – Название с экрана.

### References:

1. *ОНТПУ-347-26-94. Normy tehnologicheskogo proektyrovaniya gazovogo hozjajstva predprijatyj chernoj metallurgyy* [ОНТПУ-347-26-94. Norms of technological design of the gas industry of ferrous metallurgy enterprises]. Dnipropetrovsk, 1994. 120 p. (Rus.)

2. *НРАОР 27.1-1.09-09 (PBGChM). Pravila bezpeki v gazovomu gospodarstvi pidpriemstv chornoj metalurgii* [NSAAP 27.1-1.09-09 (PGHChM). Safety rules in the gas industry of ferrous metallurgy enterprises]. Kiev, 2009. 98 p. (Ukr.)
3. Kravchenko V.P. Matematichna model' procesu keruvannya rozpodilennyam vodi po yarusam skruberu mokrogo ochishchennya koloshnikovogo gazu [Mathematical model of the process of control of water distribution in the tiers of scrubber wet cleaning of copper gas]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, no. 37, pp. 165-176. (Ukr.)
4. Odel'skij E.H. *Gidravlicheskij raschet truboprovodov raznogo naznacheniya* [Hydraulic calculation of pipelines for different purposes]. Minsk, Vyshejsya shkola Publ., 1967. 103 p. (Rus.)
5. *Koloshnykovaja pyl* [Butter dust] Available at: [www.metallicheckiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie\\_gazov/ochistka\\_domennogo\\_gaza/4](http://www.metallicheckiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/ochistka_domennogo_gaza/4) (accessed 09 April 2019) (Rus.)
6. Aleshina V.M. *Pyleulavlivanie v metallurgii: spravochnoe izdanie* [Dust collection in metallurgy: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 336 p. (Rus.)
7. *Rozrahunky dovygh truboprovodiv* [Calculation of long pipelines] Available at: [www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки\\_довгих\\_трубопроводів](http://www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки_довгих_трубопроводів) (accessed 09 April 2019) (Ukr.)
8. *Gidravlichnyj rozrahunok truboprovodiv* [Hydraulic pipeline calculation] Available at: [www.studfiles.net/preview/5064502/page:13](http://www.studfiles.net/preview/5064502/page:13) (accessed 09 April 2019) (Ukr.)
9. *Sovershenstvovanie sistemy ochistki domennogo gaza* [Improving the blast furnace gas cleaning system] Available at: [ispu.ru/files/73-75.pdf](http://ispu.ru/files/73-75.pdf) (accessed 09 April 2019) (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 10.04.2019

УДК 661.666

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181436

© Жученко О.А.<sup>1</sup>, Хібеба М.Г.<sup>2</sup>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРА В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СИРОВИНИ

*Виконано аналіз існуючих досліджень процесу термічної обробки вуглецевої сировини. Визначено, що поза увагою дослідників залишається дослідження впливу таких технологічних параметрів, як сила струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу на температурні поля робочого простору електрокальцинатора. Проведено дослідження зміни температурного поля робочого простору електрокальцинатора в залежності від сили струму, що підводиться, та швидкості завантаження/вивантаження матеріалу.*

**Ключові слова:** виробництво вуглецевих виробів, електрокальцинатор, електрична ніч шахтного типу, вуглецева сировина, термообробка.

*Жученко А.А., Хібеба М.Г. Исследование температурных полей рабочего пространства электрокальцинатора в процессе термической обработки углеродного сырья. Выполнен анализ существующих исследований процесса термической обработки углеродного сырья. Определено, что вне поля зрения исследователей*

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [azhuch@ukr.net](mailto:azhuch@ukr.net)

<sup>2</sup> аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [hibebe19@gmail.com](mailto:hibebe19@gmail.com)