

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 669.162.22

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160286

© Кравченко В.П.\*

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯМ  
ВОДИ ПО ЯРУСАМ СКРУБЕРУ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ  
КОЛОШНИКОВОГО ГАЗУ**

Розглядається трубопровід розподілення води, розгалужений по ярусам скрубера, як складний об'єкт керування. Скрубер призначений для очищення колошникового газу доменної печі. Вхідними величинами цього об'єкту є тиск і загальна кількість води, яка подається на скруббер. Вихідними – тиск і кількість води перед форсунками на кожному ярусі. Для ефективного очищення газу необхідно підтримувати на кожному ярусі задані значення вихідних параметрів. Згідно технології очищення колошникового газу тиск води перед форсунками повинен бути для всіх ярусів однаковим і більшим ніж тиск газу у два рази, а витрати води по ярусам також однакові, а її загальна кількість на скруббер визначається співвідношенням 4-6 л на  $1 \text{ м}^3$  газу. Щоб забезпечити такі умови, треба знайти математичну залежність між вхідними і вихідними параметрами цього об'єкту. Для одержання такої залежності використано метод розрахунку трубопроводів складного типу з розгалуженням і роздаванням води в кінцевих точках. Це дозволило одержати математичну модель об'єкту у вигляді системи алгебраїчних рівнянь. Система містить перепади тиску води по ярусам скрубера, величину поточних витрат на ярус і відповідні коефіцієнти лінійних втрат тиску по довжині вертикального трубопроводу. Рішення даної системи дає змогу знайти перепади тиску води на кожному ярусі. Стабілізація цих перепадів забезпечує стабілізацію заданих параметрів води (тиску і витрат) на кожному ярусі скрубера. Одержана математична модель об'єкту може бути основою для розробки системи автоматичного керування розподіленням води. Така система буде підтримувати тиск і витрати води по ярусам скрубера на заданому рівні і тим самим буде забезпечувати ефективне очищення колошникового газу, незважаючи на коливання його тиску і витрат. В роботі розглянуто приклад вирішення системи алгебраїчних рівнянь для реальних даних скрубера і одержані значення потрібних перепадів тиску води по його ярусам.

**Ключові слова:** скруббер, колошниковий газ, мокре очищення, трубопровід розподілення води, об'єкт керування, тиск і витрати води перед форсунками, математична модель, система алгебраїчних рівнянь, рішення, стабілізація витрат і тиску води, ефективно очищення газу.

**Кравченко В.П. Математическая модель процесса управления распределением воды по ярусам скруббера мокрой очистки колошникового газа.** Рассматривается трубопровод распределения воды, разветвленный по ярусам скруббера, как объект управления. Скруббер предназначен для очистки колошникового газа доменной печи. Входными величинами этого объекта являются давление и расход воды, которая подается на скруббер. Выходными – давление и расход воды перед форсунками на каждом ярусе. Для эффективной очистки газа надо поддерживать на каждом ярусе заданные значения выходных параметров. Согласно технологии очистки колошникового газа давление воды перед форсунками должно быть для всех ярусов одинаковым и превышать давление колошникового газа в два раза, а ее

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

количество на скруббер должно составлять 4-6 л на  $1 \text{ м}^3$  газа. Чтобы обеспечить такие условия, необходимо определить математическую зависимость между входными и выходными параметрами этого объекта. Для получения такой зависимости использован метод расчета трубопроводов сложного типа с разветвлениями и раздачей воды в конечных точках. Это позволило получить математическую модель объекта в виде системы алгебраических уравнений. Система содержит перепады давления воды по ярусам скруббера, величину постоянных расходов на ярус и соответствующие коэффициенты линейных потерь давления по длине вертикального трубопровода. Решение данной системы дает возможность найти перепады давления воды на каждом ярусе. Стабилизация этих перепадов обеспечивает стабилизацию заданных параметров воды (давления и расхода) на каждом ярусе скруббера. Полученная математическая модель объекта может быть положена в основу создания системы автоматического управления распределением воды. Такая система будет поддерживать давление и расход воды по ярусам скруббера на заданном уровне, и тем самым будет обеспечивать эффективную очистку колошникового газа, несмотря на колебания его давления и расхода. В работе рассмотрен пример решения системы алгебраических уравнений для реальных данных скруббера и получены значения необходимых перепадов давления воды по его ярусам.

**Ключевые слова:** скруббер, колошниковый газ, мокрая очистка, трубопровод распределения воды, объект управления, давление и расход воды перед форсунками, математическая модель, система алгебраических уравнений, решение, стабилизация расхода и давления воды, эффективная очистка газа.

**V.P. Kravchenko. Mathematical simulation of the control process over water distribution in the tiers of the scrubber of blast-furnace gas wet cleaning.** The pipeline of water distribution, ramified for each of the tiers of the scrubber, has been examined, as an object of control. Scrubber is intended for cleaning blast-furnace gas. The input values for this object are pressure and common amount of water that is supplied to the scrubber. The output values are pressure and amount of water before the sprayers on each tier. To clean the gas effectively it is necessary to keep the pre-set values of output parameters on each of the tiers constant. According to the technology of cleaning blast-furnace gas the water pressure before the sprayers must be for all the tiers identical and twice that blast furnace gas, and its common amount for the scrubber is determined by the correlation 4-6 l. of water for  $1 \text{ м}^3$  of gas. To provide such terms it is necessary to find mathematical dependence between the input and output parameters of this object. To receive such a dependence the method of calculation of complex type pipelines is used with branching and water distribution in end points. It made it possible to get the mathematical model of an object as a system of algebraic equations. The system contains the pressure differentials of water for all the tiers of the scrubber, water constant amount for each tier and corresponding coefficients of linear losses of pressure along the length of vertical pipeline. The solution of this system gives an opportunity to find the water pressure differentials for each tier. Stabilizing these pressure differentials provides stabilizing preset water parameters (pressure and amount) on each tier of the scrubber. The obtained mathematical model of the object can be the basis for development of automatic control system of water distribution. Such system will keep pressure and water consumption constant for the tiers of the scrubber at pre-set level and will provide the effective cleaning of blast-furnace gas, without regard to his pressure and charges fluctuation. The paper furnishes an example of the system of algebraic equations for the real data scrubber; the values of necessary pressure differentials of water for the tiers have been obtained.

**Keywords:** scrubber, blast-furnace gas, wet cleaning, water distribution pipeline, object of control, water pressure and consumption before the sprayers, mathematical simulation model, system of algebraic equations, solution, stabilization of water pressure and consumption, efficient gas cleaning.

**Постановка проблеми.** При роботі доменних печей на підвищеному тиску газу на колошнику вміст пилу в газі на виході із печі становить 10-20 г/м<sup>3</sup>. При проходженні газом першого сухого ступеня очищення в пиловій камері вміст пилу зменшується до 3-10 г/м<sup>3</sup> і його фракційний склад має максимальний розмір часток 0,1 мм. Далі газ проходить другий ступінь очищення – напівтонкий, який відбувається, як правило, в агрегатах мокрого очищення – форсунокових порожнистих скруберах. На виході скрубера газ вже має вміст пилу на рівні 0,6-1,6 г/м<sup>3</sup> з максимальним розміром часток до 0,02 мм. Для очищення газу у скрубери по висоті на декілька рівнів (ярусів) подається вода, яка там розбризкується системою форсунок. Згідно нормативних матеріалів [1, 2] вода до форсунок кожного ярусу подається від відповідного зовнішнього кільцевого трубопроводу, до якого вода, в свою чергу, повинна подаватись від свого окремого вертикального стояка. На багатьох комбінатах з метою економії капітальних витрат на устаткування та монтаж скрубери використовують один спільний вертикальний стояк. При цьому відведення води від стояка на кільцеві трубопроводи відбувається послідовно від першого (нижнього) до четвертого (верхнього) ярусу скрубера. Таким чином, в цьому стояку по ходу руху води основний потік розгалужується на кожний ярус і, відповідно, зменшується як кількість, так і тиск води від нижнього до верхнього ярусу. При відсутності теоретичних розрахунків потрібних параметрів води (тиску і кількості) на кожному ярусі, а також ефективної системи керування її розподіленням відбувається нерівномірна подача води по ярусам (рис. 1). Це призводить до порушення технології очищення і погіршення якості очищення газу. Тому така система подачі і розподілення води вимагає відповідних розрахунків для визначення потрібних параметрів води (тиску і витрат), а також відповідної структури системи автоматичного керування подачею і розподіленням води. Ці питання і є предметом даного дослідження.

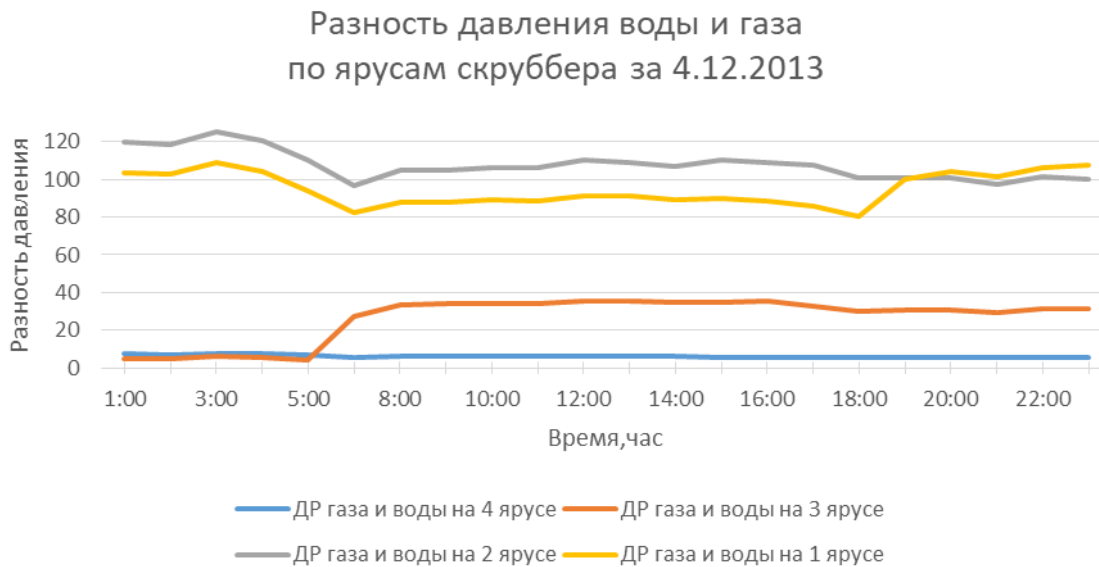


Рис. 1 – Зміна різниці тиску води та газу по ярусам скрубера

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні вимоги до технології мокрого очищення доменного газу і до параметрів скрубера регламентуються галузевими нормами [1]. Питанням теорії мокрого очищення газів у скруберах присвячена значна кількість робіт [2-5]. В роботі [2] розглядається вплив тиску води на вході форсунок на розмір крапель води, яка розбризкується. Показано, що для забезпечення заданого діаметру крапель треба підтримувати певний тиск води на вході форсунок, що є важливим для технології очищення газу у скруберах. В роботі [3] розглядаються процеси очищення газу в середині скрубера. Показано, що в скрубери існує три зони – зона випаровування води, зона конденсації пари і зона крапельного зрошування, кожна з яких впливає на якість очищення газу.

Що стосується забезпечення скрубера водою і її розподілення, то ці питання, в основному, розглядаються в літературі по гідравліці і розрахункам трубопроводів [6-10]. В цих роботах висвітлюються питання гідравлічних розрахунків трубопроводів різної конфігурації – від прос-

тих однолінійних до складних розгалужених. Питання щодо розрахунків трубопроводів, забезпечення водою безпосередньо скрубєрів мокрого очищення в цих джерелах не відображені.

**Ціль статті.** Згідно нормативних матеріалів [1] вода до форсунок кожного ярусу скрубєра подається від відповідного зовнішнього кільцевого трубопроводу, до якого вода, в свою чергу, повинна подаватись від свого окремого вертикального стояка. Це забезпечує рівномірне розподілення води по ярусам і, як наслідок, ефективне очищення газу. На металургійних комбінатах з метою економії капітальних витрат на устаткування та монтаж скрубєрів використовують один спільний вертикальний стояк. Причому відведення води від стояка на кільцеві трубопроводи відбувається послідовно від першого (нижнього) до четвертого (верхнього) ярусу скрубєра (рис. 2). Таким чином, в цьому стояку по ходу руху води основний потік розгалужується на кожний ярус і, відповідно, зменшується як кількість, так і тиск води від нижнього до верхнього ярусу.

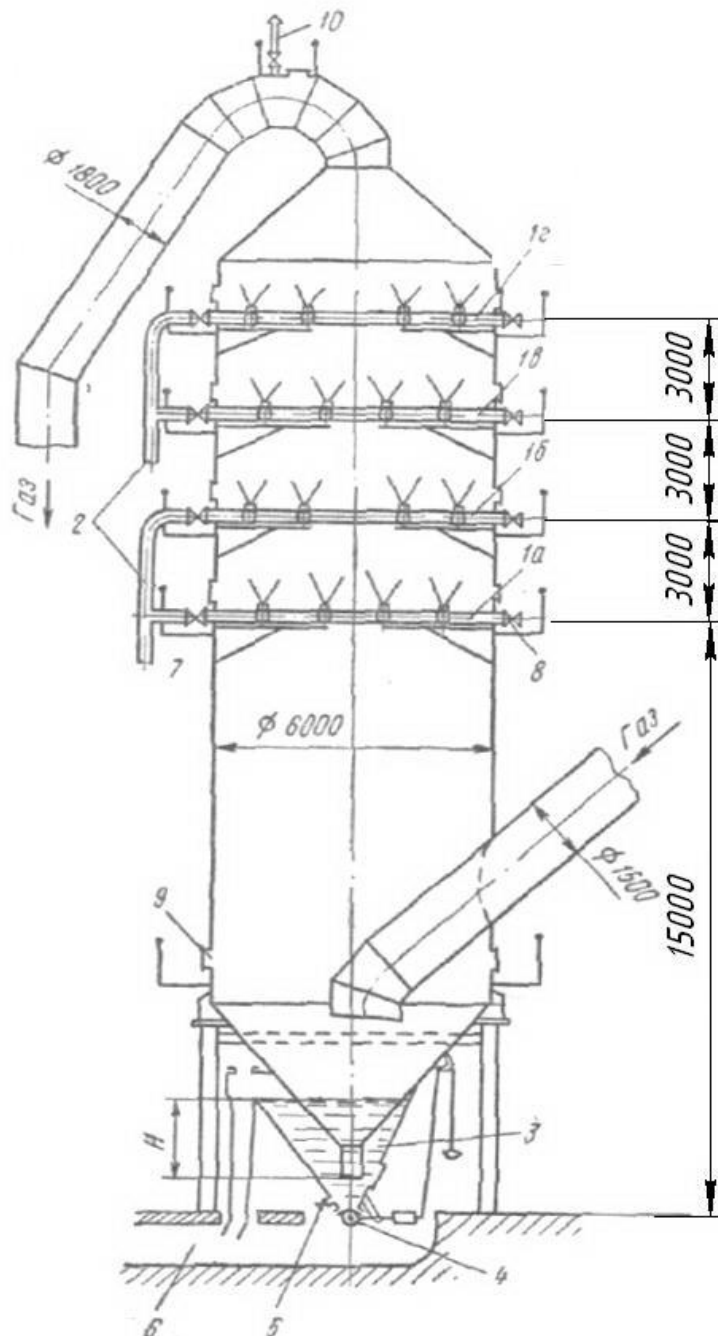


Рис. 2 – Скрубєр мокрого очищення доменного газу

Для рівномірній подачі води на кожний ярус, при такому способі її подачі на скруббер, необхідні теоретичні розрахунки параметрів водопроводу, насосу і води (тиску і витрат по ярусам). На підставі цих розрахунків повинна розроблятися відповідна структура системи автоматичного розподілення води по ярусам.

В даній роботі вирішується задача гідравлічного розрахунку трубопроводу з одним стояком для подачі води на яруси скруббера, при умові рівномірної подачі води на кожний ярус, і пропонується структура відповідної системи автоматичного керування розподіленням води.

Таким чином, для конкретного скруббера з заданими параметрами водопроводу розраховуються параметри води (тиск і витрати по ярусам) і у відповідності до цього пропонується структура системи автоматичного розподілення води по ярусам.

**Виклад основного матеріалу.** Стадія мокрого очищення доменного газу відбувається в скруббері (рис. 2) шляхом зрошування потоку брудного газу водою через форсунки на 4-х ярусах. Для забезпечення потрібної кількості води на зрошування необхідно підтримувати тиск води на кожному ярусі на 0,07-0,15 МПа вище тиску доменного газу у скруббері, а загальні витрати води на скруббер повинні бути в межах 4-6 л на м<sup>3</sup> газу. Для якісного очищення газу треба підтримувати на кожному ярусі однаковий тиск і витрати води в умовах коливань тиску і кількості доменного газу, який проходить через скруббер. Тиск води перед форсунками визначає діаметр крапель води при її розбризкуванні [2].

Для розбризкування води у скруббері застосовують тангенціальні (евольвентні) форсунки. Така форсунка має:

- радіус вхідного отвору –  $r_{\text{вх}};$
- середній радіус початкового січення форсунки –  $R;$
- радіус вихідного отвору (радіус зовнішнього кільцевого січення вихідного потоку води) –  $r_{\text{вих}};$
- радіус внутрішнього кільцевого січення вихідного потоку води –  $r_{\text{внутр}}.$

Діаметр краплі води на виході форсунки дорівнює:

$$d_k = 0,37 \cdot \sqrt[3]{\frac{r_{\text{вх}}^4}{p_{\text{вод}} \cdot R^2}}, \text{ м.}$$

Тут  $p_{\text{вод}}$  – тиск води на вході форсунки, м. вод. ст.

Для одержання заданого діаметра крапель необхідно мати тиск води на вході форсунки:

$$p_{\text{вод}} = \frac{r_{\text{вх}}^4}{\left(\frac{d_k}{0,37}\right)^3 R^2}, \text{ м. вод. ст.}$$

Підтримання заданого тиску і заданих витрат води вимагає відповідного гідравлічного розрахунку трубопроводу і відповідної структури системи автоматичного розподілення води по ярусам.

Представимо схематично трубопровід забезпечення водою скруббера мокрого очищення (рис. 3).

Позначимо відповідні точки розгалуження його по ярусам через  $A, B, C, D, E, F, O, N$ . Висота від нульової точки  $M$  до першого ярусу –  $h_1$ , а відстань між ярусами позначимо через  $h$ . Витрати води загальні на скруббер –  $Q_{\Sigma}$ , а витрати води на ярус –  $Q_B, Q_D, Q_F, Q_N$ . При цьому:

$$Q_B + Q_D + Q_F + Q_N = Q_{\Sigma}. \quad (1)$$

Тиск води в точці  $M$  позначимо  $P_{\text{нов}}$ , а тиск води перед форсунками ярусу, тобто в точках  $B, D, F$  і  $N$ , відповідно,  $P_B, P_D, P_F, P_N$ . При цьому вважаємо, що тиск води перед всіма форсунками ярусу однаковий. Згідно представленої схеми, трубопровід скруббера відноситься до трубопроводів складного типу з розгалуженням і з роздаванням води в кінцевих точках гілок. Такі трубопроводи розраховуються за допомогою відповідному методу [6, 7]. Починаючи з верхньої гілки трубопроводу, знайдемо тиск води для гілок  $EF$  та  $EON$ . Вочевидь для точок  $F$  та  $N$  тиски для цих гілок однакові:

$$P_{\text{см}F} + K_{EF} \cdot Q_F^2 = P_{\text{см}N} + K_{EN} \cdot Q_N^2. \quad (2)$$

Тут  $P_{\text{см}F} = (h_1 + h_2 + h_3) \cdot \rho \cdot g + P_F$  – статичний тиск в точці  $F$ ;  $P_F$  – тиск води у точці  $F$  (на

3-му ярусі перед форсунками);  $P_{cmN} = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N$  – статичний тиск в точці  $N$ ;  $P_N$  – тиск води у точці  $N$  (на 4-му ярусі перед форсунками);  $K_{EF} \cdot Q_F^2$  – падіння тиску на ділянці  $EF$ ;  $K_{EN} \cdot Q_N^2$  – падіння тиску на ділянці  $EON$ ;  $K_{EF}, K_{EN}$  – коефіцієнти втрати тиску у гілках  $EF$  та  $EON$ ;  $Q_F, Q_N$  – витрати води у гілках  $EF$  та  $EON$ .

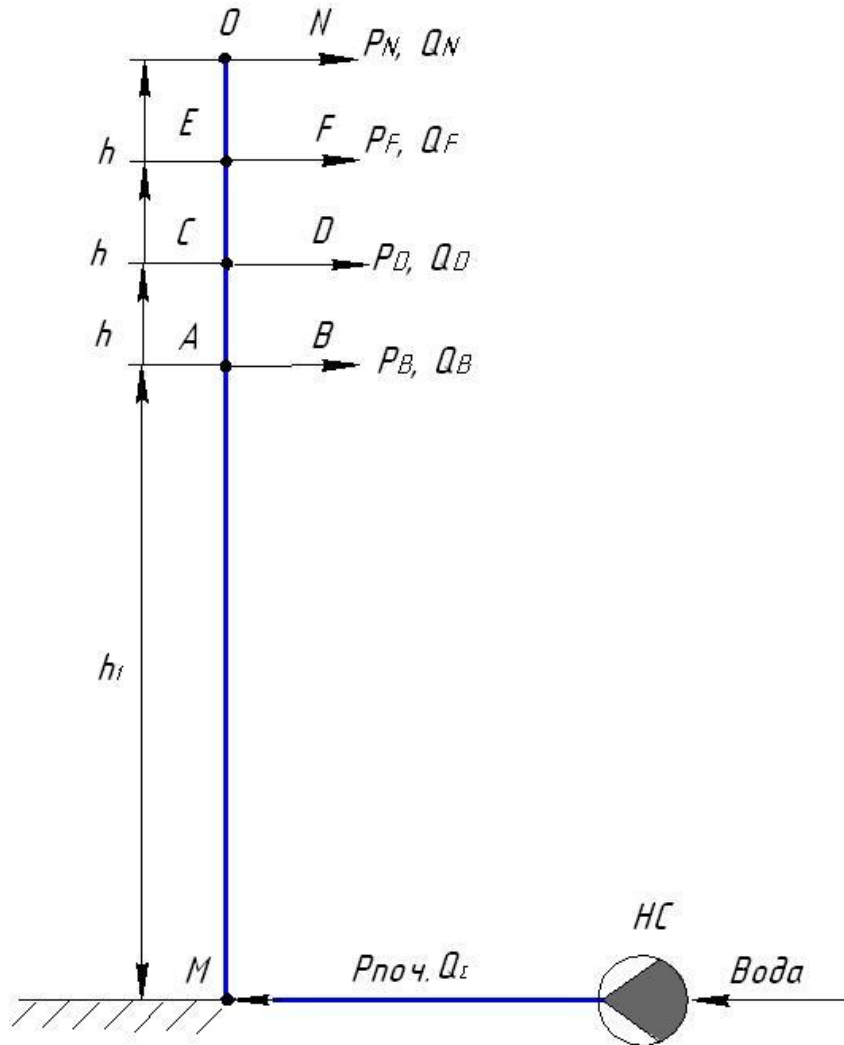


Рис. 3 – Схема трубопроводу забезпечення водою скрубера

Аналогічно для гілок  $CD$  та  $CEFN$ :

$$P_{cmD} + K_{CD} \cdot Q_D^2 = P_{cmN} + K_{EN} \cdot Q_N^2 + K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2. \quad (3)$$

Тут  $P_{cmD} = (h_1 + h_2) \cdot \rho \cdot q + P_D$  – статичний тиск у точці  $D$ ;  $K_{CD}$  – коефіцієнт втрат тиску у гілці  $CD$ ;  $Q_D$  – витрати води у гілці  $CD$ ;  $P_D$  – тиск води у точці  $D$  (на 2-му ярусі перед форсунками).

Рівність тисків для гілок  $AB$  та  $ACDEFON$ :

$$P_{cmB} + K_{AB} \cdot Q_B^2 = P_{cmN} + K_{EN} \cdot Q_N^2 + K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 + K_{AC} \cdot (Q_N + Q_F + Q_D)^2. \quad (4)$$

Тут  $P_{cmB} = h_1 \cdot \rho \cdot q + P_B$  – статичний тиск у точці  $B$ ;  $K_{AC}$  – коефіцієнт падіння тиску у гілці  $AC$ ;  $K_{AB}$  – коефіцієнт падіння тиску у гілці  $AB$ ;  $Q_B$  – витрати води у гілці  $AB$ ;  $P_B$  – тиск води у точці  $B$  (на 1-му ярусі перед форсунками).

Останнє рівняння балансу тисків для початкової ділянки  $MAV$ :

$$P_{cmB} + K_{AB} \cdot Q_B^2 + K_{MA} \cdot Q_{\Sigma}^2 = P_{поч}. \quad (5)$$

Таким чином, для даного трубопроводу маємо систему із п'яти рівнянь:

$$\begin{cases} Q_B + Q_D + Q_F + Q_N = Q_\Sigma; \\ P_{cmF} + K_{EF} \cdot Q_F^2 = P_{cmN} + K_{EN} \cdot Q_N^2; \\ P_{cmD} + K_{CD} \cdot Q_D^2 = P_{cmN} + K_{EN} \cdot Q_N^2 + K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2; \\ P_{cmB} + K_{AB} \cdot Q_B^2 = P_{cmN} + K_{EN} \cdot Q_N^2 + K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 + K_{AC} \cdot (Q_N + Q_F + Q_D)^2; \\ P_{cmB} + K_{AB} \cdot Q_B^2 + K_{MA} \cdot Q_\Sigma^2 = P_{noc}. \end{cases}$$

Перетворимо рівняння системи таким чином, щоб в правій частині були статичні тиски, а в лівій – динамічні (втрати тиску за рахунок руху води).

$$(I) \begin{cases} Q_B + Q_D + Q_F + Q_N = Q_\Sigma; \\ K_{EF} \cdot Q_F^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 = P_{cmN} - P_{cmF}; \\ K_{CD} \cdot Q_D^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 = P_{cmN} - P_{cmD}; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 - K_{AC} \cdot (Q_N + Q_F + Q_D)^2 = P_{cmN} - P_{cmB}; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 + K_{MA} \cdot Q_\Sigma^2 = P_{noc} - P_{cmB}. \end{cases}$$

У праву частину системи рівнянь (I) підставимо значення статичних тисків:

$$(II) \begin{cases} Q_B + Q_D + Q_F + Q_N = Q_\Sigma; \\ K_{EF} \cdot Q_F^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N - (h_1 + h_2 + h_3) \cdot \rho \cdot q - P_F; \\ K_{CD} \cdot Q_D^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N - (h_1 + h_2) \cdot \rho \cdot q - P_D; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 - K_{AC} \cdot (Q_N + Q_F + Q_D)^2 = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N - h_1 \cdot \rho \cdot q - P_B; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 + K_{MA} \cdot Q_\Sigma^2 = P_{noc} - h_1 \cdot \rho \cdot q - P_B. \end{cases}$$

Після перетворень система (II) буде мати вигляд:

$$(III) \begin{cases} Q_B + Q_D + Q_F + Q_N = Q_\Sigma; \\ K_{EF} \cdot Q_F^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 = h_4 \cdot \rho \cdot q + P_N - P_F; \\ K_{CD} \cdot Q_D^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 = (h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N - P_D; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 - K_{EN} \cdot Q_N^2 - K_{CE} \cdot (Q_N + Q_F)^2 - K_{AC} \cdot (Q_N + Q_F + Q_D)^2 = (h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot q + P_N - P_B; \\ K_{AB} \cdot Q_B^2 + K_{MA} \cdot Q_\Sigma^2 = P_{noc} - h_1 \cdot \rho \cdot q - P_B. \end{cases}$$

Згідно технології очищення доменного газу тиск води перед форсунками повинен бути для всіх ярусів однаковим і більшим від тиску газу у півтора два рази:

$$P_N = P_F = P_D = P_B = P = 2,0 \cdot P_{к.з}. \quad (6)$$

Витрати води по ярусам також повинні бути однаковими, а загальна кількість води на скрубєр визначається практикою роботи скрубєра і дорівнює 4-6 л води на 1м<sup>3</sup> газу, тобто:

$$Q_\Sigma = (0,004 - 0,006) \cdot Q_{д.з}. \quad (7)$$

$$Q_B = Q_D = Q_F = Q_N = Q = \frac{Q_\Sigma}{4}. \quad (8)$$

Розглянемо у рівняннях системи (III) коефіцієнти падіння тиску для кожної гілки. Згідно схеми трубопроводу (рис. 3) вертикальний трубопровід від точки M до першого ярусу (точка A)

має довжину  $h_1$ , а довжина його горизонтальних ділянок між ярусами однакова і дорівнює  $h$ :

$$h_2 = h_3 = h_4 = h. \quad (9)$$

Як відомо, коефіцієнти падіння тиску води у трубопроводі поділяються на лінійні  $K_{Li}$  та місцеві  $K_M$  [7, 8]. При цьому:

$$K_{Li} = \lambda_i \cdot \frac{8 \cdot h_i \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_1^5} \quad \text{та} \quad K_{Mi} = \xi_i \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_2^4} \quad (10)$$

Тут  $\lambda, \xi$  – коефіцієнти лінійних та місцевих втрат тиску;  $D_1$  – діаметр вертикального трубопроводу скрубера;  $D_2$  – діаметр горизонтального трубопроводу ярусу скрубера;  $h_i$  – довжина ділянки трубопроводу, на якій відбувається падіння тиску;  $\rho$  – густина води.

Згідно схеми трубопроводу (рис. 2), вертикальна частина трубопроводу скрубера є прямолінійною, тому будемо вважати, що на ній діє тільки лінійне падіння тиску. Горизонтальні трубопроводи кожного ярусу короткі (порядку 1 м) і на них основними будуть місцеві втрати (на розгалуженні та на регулюючому органі). З урахуванням цього, представимо всі коефіцієнти падіння тиску у системі (III), як коефіцієнти лінійних і місцевих падіннь тиску [10].

$$\begin{aligned} K_{MA} = K_{L1} &= \lambda_1 \cdot \frac{8 \cdot h_1 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_1^5}; \quad K_{AB} = K_{M1} = \xi_1 \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_2^4}; \\ K_{AC} = K_{L2} &= \lambda_2 \cdot \frac{8 \cdot h_2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_1^5}; \quad K_{CD} = K_{M2} = \xi_2 \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_2^4}; \\ K_{CE} = K_{L3} &= \lambda_3 \cdot \frac{8 \cdot h_3 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_1^5}; \quad K_{EF} = K_{M3} = \xi_3 \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_2^4}; \\ &K_{EN} = K_{EO} + K_{ON}; \\ K_{EO} = K_{L4} &= \lambda_4 \cdot \frac{8 \cdot h_4 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_1^5}; \quad K_{ON} = K_{M4} = \xi_4 \cdot \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot D_2^4}. \end{aligned} \quad (11)$$

У формулу коефіцієнту лінійних падіннь тиску  $K_{Li}$  входить коефіцієнт лінійних втрат тиску (коефіцієнт опору тертя)  $\lambda_i$ . Для знаходження цього коефіцієнту необхідно визначити величину критерію Рейнольдса  $Re$ , який залежить від швидкості руху води  $v_i$ , її в'язкості  $\nu$  та діаметру трубопроводу  $D_i$ :

$$Re_i = \frac{v_i \cdot D_i}{\nu}.$$

Залежність  $\lambda_i = f(Re)$  визначається числовою величиною критерія  $Re$  [10]. При  $Re < 2300$  режим руху води буде ламінарним і величина коефіцієнту  $\lambda_i$  визначається згідно виразу:

$$\lambda_i = \frac{64}{Re_i}.$$

При  $Re > 2300$  режим руху води буде турбулентним і величина коефіцієнту  $\lambda_i$  визначається по певним формулам [11, 12].

Для кожної ділянки між розгалуженням вертикального трубопроводу величина критерію  $Re_i$  буде різною, оскільки різною є швидкість руху води  $v_i$  (різна кількість води, яка протікає по цим ділянцям), а значить різними будуть коефіцієнти  $\lambda_i$  та  $K_{Li}$ .

З урахуванням (6), (8) та (9) перетворимо систему (III) і одержимо:

$$(IV) \quad \begin{cases} Q = \frac{Q_\Sigma}{4}; \\ K_{EF} \cdot Q^2 - K_{L4} \cdot Q^2 - K_{ON} \cdot Q^2 = \rho \cdot g \cdot h; \\ K_{CD} \cdot Q^2 - K_{L4} \cdot Q^2 - K_{ON} \cdot Q^2 - 4 \cdot K_{L3} \cdot Q^2 = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ K_{AB} \cdot Q^2 - K_{L4} \cdot Q^2 - K_{ON} \cdot Q^2 - 4 \cdot K_{L3} \cdot Q^2 - 9 \cdot K_{L2} \cdot Q^2 = 3 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ K_{AB} \cdot Q^2 + K_{L1} \cdot Q_\Sigma^2 = P_{ноч} - P - \rho \cdot g \cdot h_1. \end{cases}$$



У рівняннях системи (IV) члени  $K_{ON} \cdot Q^2$ ,  $K_{EF} \cdot Q^2$ ,  $K_{CD} \cdot Q^2$ ,  $K_{AB} \cdot Q^2$  є падіннями тиску води на відповідних ярусах трубопроводу:

$$K_{AB} \cdot Q^2 = \Delta P_{AB}; K_{CD} \cdot Q^2 = \Delta P_{CD}; K_{EF} \cdot Q^2 = \Delta P_{EF}; K_{ON} \cdot Q^2 = \Delta P_{ON}.$$

Підставляючи ці позначення у рівняння системи (IV) маємо:

$$(V) \begin{cases} Q = \frac{Q_{\Sigma}}{4}; \\ \Delta P_{EF} - K_{Л4} \cdot Q^2 - \Delta P_{ON} = \rho \cdot g \cdot h; \\ \Delta P_{CD} - K_{Л4} \cdot Q^2 - \Delta P_{ON} - 4 \cdot K_{Л3} \cdot Q^2 = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ \Delta P_{AB} - K_{Л4} \cdot Q^2 - \Delta P_{ON} - 4 \cdot K_{Л3} \cdot Q^2 - 9 \cdot K_{Л2} \cdot Q^2 = 3 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ \Delta P_{AB} + K_{Л1} \cdot Q_{\Sigma}^2 = P_{ноч} - P - \rho \cdot g \cdot h_1. \end{cases}$$

Рішенням системи (V) є знаходження значень перепадів тиску води по ярусам скрубера  $\Delta P_{AB}$ ,  $\Delta P_{CD}$ ,  $\Delta P_{EF}$ ,  $\Delta P_{ON}$ . Знайти ці перепади можливо знайшовши із рівняння (5) цієї системи перепад  $\Delta P_{AB}$ . Потім, підставляючи його в інші рівняння, послідовно знайдемо всі інші.

В результаті маємо систему рішень (VI):

$$(VI) \begin{cases} \Delta P_{AB} = P_{ноч} - P - K_{Л1} \cdot Q_{\Sigma}^2 - \rho \cdot g \cdot h_1; \\ \Delta P_{CD} = \Delta P_{AB} - 9 \cdot K_{Л2} \cdot Q^2 - \rho \cdot g \cdot h; \\ \Delta P_{EF} = \Delta P_{AB} - (4 \cdot K_{Л3} + 9 \cdot K_{Л2}) \cdot Q^2 - 2 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ \Delta P_{ON} = \Delta P_{AB} - (K_{Л4} + 4 \cdot K_{Л3} + 9 \cdot K_{Л2}) \cdot Q^2 - 3 \cdot \rho \cdot g \cdot h; \\ Q = \frac{Q_{\Sigma}}{4}. \end{cases}$$

Перше рівняння системи (VI) визначає перепад тиску води на трубопроводі першого ярусу  $\Delta P_{AB}$  через параметри насоса  $P_{ноч}$ ,  $Q_{\Sigma}$  заданим тиском води  $P$  перед форсунками та падінням тиску на вертикальній ділянці трубопроводу води до першого ярусу  $-(K_{Л1} \cdot Q_{\Sigma}^2 + \rho \cdot g \cdot h_1)$ . Перепади тиску води на горизонтальних трубопроводах всіх інших ярусів залежать від  $\Delta P_{AB}$ , а також від падіння тиску на відповідних ділянках вертикального трубопроводу. Як бачимо, система розподілення води по ярусам скрубера є взаємно пов'язаною. Із цього витікає принцип реалізації системи автоматичного керування розподіленням води по ярусам скрубера – необхідно спочатку розраховувати потрібний перепад  $\Delta P_{AB}$  на першому ярусі, а перепади тиску по всім іншим підтримувати у заданому співвідношенні з  $\Delta P_{AB}$ .

Система рішень (VI) може бути основою для розробки системи автоматичного керування розподіленням води, яка підтримує тиск і витрати води по ярусам на заданому рівні при коливаннях тиску і витрат колошникового газу.

Розглянемо приклад розрахунку вертикального трубопроводу (рис. 3), який забезпечує подачу води з заданими параметрами по ярусам скрубера.

Характеристика скрубера:

- загальна висота 30 м;
- висота першого ярусу  $h_1 = 15$  м;
- відстань між ярусами  $h = 3$  м;
- діаметр трубопроводу стояка  $D_1 = 0,4$  м;
- діаметр трубопроводу на ярус  $D_2 = 0,2$  м;
- максимальні витрати води на ярус:  $Q = 250 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0694 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- максимальні загальні витрати води на скрубера:  $Q_{\Sigma} = 1000 \text{ м}^3/\text{год} = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- параметри насоса води – тиск  $P_{ноч} = 0,6$  МПа, максимальна продуктивність –  $Q_{\text{макс}} = 1200 \text{ м}^3/\text{год}$ ;

- тиск доменного газу у скрубєрі  $P_{д.г.ск} = 0,15$  МПа;
- тиск води в колекторі ярусу перед форсунками  $P = P_{яп} = 0,3$  МПа.

Визначимо для цих умов якими повинні бути перепади тиску на ярусах  $\Delta P_{ij}$  і співвідношення між ними. Знайдемо спочатку лінійні коефіцієнти падіння тиску, які входять у рівняння системи (VI). Для цього необхідно знайти коефіцієнти опору тертя  $\lambda_i$ , обчислюючи відповідне значення критерію Рейнольдса  $Re_i$  руху води на кожній ділянці вертикального трубопроводу. Швидкість руху води на ділянках вертикального трубопроводу буде дорівнювати:

$$v_i = \frac{Q_i}{S_1}.$$

Тут  $Q_i$  – витрати води на  $i$ -й ділянці вертикального трубопроводу, м<sup>3</sup>/с;  $S_1 = 0,785 \cdot D_1^2$  – площа січення вертикального трубопроводу, м<sup>2</sup>.

При цьому  $Q_1 = 4 \cdot Q = Q_2$ ;  $Q_2 = 3 \cdot Q$ ;  $Q_3 = 2 \cdot Q$ ;  $Q_4 = Q$ , температура води  $t_e = +20^\circ\text{C}$ , кінематична в'язкість води  $\nu_e = 1,002 \cdot 10^{-6}$ . Підставляючи числові значення відповідних величин у формули швидкості і критерію Рейнольдса, одержимо:

$$v_1 = 2,213 \text{ м/с}; v_2 = 1,648 \text{ м/с}; v_3 = 1,099 \text{ м/с}; v_4 = 0,549 \text{ м/с};$$

$$Re_1 = 883433; Re_2 = 657884; Re_3 = 438722; Re_4 = 219162.$$

Оскільки  $Re_{max} > 2300$ , то рух є турбулентним і значення коефіцієнтів  $\lambda_i$  визначаємо згідно універсальної формули Альтшуля [12]:

$$\lambda_i = 0,11 \cdot \left( \frac{K_{ЕКВ}}{D_1} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0,25}.$$

Тут  $K_{ЕКВ}$  – еквівалентний коефіцієнт шорсткості. Для старих сталевих труб [12]  $K_{ЕКВ} = 0,2$ .

Згідно цієї формули  $\lambda_i$  для відповідних  $Re_i$  будуть дорівнювати:

$$\lambda_1 = 0,0170; \lambda_2 = 0,0172; \lambda_3 = 0,0176; \lambda_4 = 0,0186.$$

Підставляючи одержані значення  $\lambda_i$ , знайдемо згідно (11) відповідні лінійні коефіцієнти падіння тиску води  $K_{Лi}$ :

$$K_{Л1} = 20204 \text{ кг/м}^7; K_{Л2} = 4041 \text{ кг/м}^7; K_{Л3} = 4184 \text{ кг/м}^7; K_{Л4} = 4421 \text{ кг/м}^7.$$

Маючи всі дані, знаходимо із рівнянь системи (VI) відповідні перепади тиску на горизонтальних трубопроводах по ярусам.

Перший ярус:

$$\Delta P_{AB} = P_{ноч} - P - K_{Л1} \cdot Q_1^2 - \rho \cdot g \cdot h_1 = 6 \cdot 98066,5 - 3 \cdot 98066,5 - 20204 \cdot 0,278^2 - 1000 \cdot 9,8 \cdot 15 = 145638 \text{ Па} = 1,485 \text{ кг/см}^2.$$

Аналогічно другий ярус:

$$\Delta P_{CD} = 1,183 \text{ кг/см}^2.$$

Третій ярус:

$$\Delta P_{EF} = 0,883 \text{ кг/см}^2.$$

Четвертий ярус:

$$\Delta P_{ON} = 0,583 \text{ кг/см}^2.$$

При цьому відношення падіння тиску на попередньому горизонтальному трубопроводі до падіння тиску на наступному поступово зростає по ярусам знизу вверх.

$$\frac{\Delta P_{AB}}{\Delta P_{CD}} = \frac{1,485}{1,183} = 1,255; \frac{\Delta P_{CD}}{\Delta P_{EF}} = \frac{1,183}{0,883} = 1,34; \frac{\Delta P_{EF}}{\Delta P_{ON}} = \frac{0,883}{0,583} = 1,51.$$

Як бачимо із одержаних даних, для забезпечення постійного тиску води перед форсунками скрубєра необхідно підтримувати перепади тисків на горизонтальних трубопроводах в залежності від перепаду  $\Delta P_{AB}$ , при цьому поступово знижуючи ці перепади від нижнього до верхнього ярусів.

Система рівнянь (VI) може бути основою для розробки системи автоматичного керування розподіленням води, яка підтримує тиск і витрати води по ярусам на заданому рівні при коливаннях тиску і витрат доменного газу.

**Висновки**

1. Для ефективного мокрого очищення колошникового газу в скрубєрі необхідно автоматично підтримувати заданий тиск і витрати води по ярусам.
2. Забезпечення заданих значень тиску і витрат води по ярусам потребує розрахунків параметрів води в процесі її руху по трубопроводу, тобто необхідні гідродинамічні розрахунки трубопроводу скрубєра.
3. З точки зору гідродинамічних розрахунків, трубопровід з вертикальним стояком і розгалуженням по ярусам, який має скрубєр, відноситься до складного типу трубопроводів.
4. В результаті розрахунків трубопроводу була одержана система рівнянь. Вона дозволяє знаходити величини, підтримання яких на заданому рівні забезпечує рівномірне розподілення води по ярусам скрубєру.
5. Величинами, стабілізація яких забезпечує потрібне розподілення води по ярусам, є падіння тиску води на горизонтальному трубопроводі кожного ярусу.
6. Згідно одержаній системі рівнянь, падіння тиску води на горизонтальному трубопроводі другого, третього і четвертого ярусів залежать від падіння тиску на трубопроводі першого ярусу.
7. Відношення падіння тиску води на попередньому горизонтальному трубопроводі до падіння тиску на наступному зростає по ярусам знизу вгору.
8. Одержана в результаті розрахунків система рівнянь може бути основою для розробки системи автоматичного керування розподіленням води, яка підтримує тиск і витрати води по ярусам на заданому рівні при коливаннях тиску і витрат доменного газу.

**Перелік використаних джерел:**

1. ОНТПУ-347-26-94. Нормы технологического проектирования газового хозяйства предприятий черной металлургии. – Днепропетровск, 1994. – 120 с.
2. Ладыженский Р.М. Кондиционирование воздуха / Р.М. Ладыженский. – М : Госторгиздат, 1962. – 350 с.
3. 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.
4. Ефименко Г.Г. Металлургия чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. – 2-е изд. – К. : Вища школа, 1974. – 394 с.
5. Мовчан В.П. Основы металлургии / Мовчан В.П., Бережний М.М. – Днепропетровськ : Пороги, 2001. – 336 с.
6. Одельский Э.Х. Гидравлический расчет трубопроводов разного назначения / Э.Х. Одельский. – Минск : Высшая школа, 1967. – 103 с.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
8. Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости ): учебник / Р.Р. Чугаев. – М. : Баста, 2008. – 672 с.
9. 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 екрану.
10. 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 екрану.
11. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: [www.Polka-knig.com.ua/book.php?book=322/Гідравліка,гідро-тапневмоприводи-В.Ф.Герман/](http://www.Polka-knig.com.ua/book.php?book=322/Гідравліка,гідро-тапневмоприводи-В.Ф.Герман/). – Назва з екрану.
12. Копко В.М. Теплоснабжение / В.М. Копко. – Изд. 2-е испр. и доп. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2014. – 336 с.

**References:**

1. *ONTPU-347-26-94. Normy tehnologicheskogo proektyrovaniya gazovogo hozjajstva predpriyatyj chernoj metallurgyy* [ONTPU-347-26-94. Norms of technological design of the gas industry of ferrous metallurgy enterprises]. Dnipropetrovsk, 1994. 120 p. (Rus.)
2. *Ladyzhenskyj R.M. Kondytsyonyrovanye vozduha* [Air conditioning]. Moscow, Gostorgizdat Publ., 1962. 350 p. (Rus.)

3. *Koloshnykovaja pyl* [Butter dust] Available at: [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) (accessed 15 August 2018) (Rus.)
4. Efymenko G.G., Gymmel'farb A.A., Lechenko V.E. *Metallurgija chuguna* [Metallurgy of cast iron]. Kyiv, Vyshha shkola Publ., 1974. 394 p. (Rus.)
5. Movchan V.P., Berezhnyj M.M. *Osnovy metalurgii'* [Fundamentals of Metallurgy]. Dnipropetrovs'k, Porogy Publ., 2001. 336 p. (Rus.)
6. Odel'skyj E.H. *Gydravlycheskyj raschet truboprovodov raznogo naznachenija* [Hydraulic calculation of pipelines for different purposes]. Mynsk, Vyshejsja shkola Publ., 1967. 103 p. (Rus.)
7. Ydel'chik Y.E. *Spravochnyk po gydravlycheskym soprotivlenijam* [Handbook of Hydraulic Resistance]. Moscow, Mashynostroenye Publ., 1992. 672 p. (Rus.)
8. Chugaev R.R. *Gydravlika (Tehnycheskaja mehanyka zhydkosti): uchebnyk* [Hydraulics (Technical Mechanics of Liquids): Textbook]. Moscow, Basta Publ., 2008. 672 p. (Rus.)
9. *Rozrahunky\_dovgyh\_truboprovodiv* [Reading\_long\_connections] Available at: [www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки\\_довгих\\_трубопроводів](http://www.wiki.tntu.edu.ua/Розрахунки_довгих_трубопроводів) (accessed 08 September 2018) (Rus.)
10. *Gidravlichnyj rozrahunok truboprovodiv* [Hydraulic pipeline calculation] Available at: [www.studfiles.net/preview/5064502/page:13](http://www.studfiles.net/preview/5064502/page:13) (accessed 13 May 2018) (Rus.)
11. *Gidravlika, gidro- ta pnevmoprivodi* [Hydraulics, hydraulic and pneumatic actuators] Available at: [www.Polka-knig.com.ua/book.php?book=322/Гідравліка,гідро-тапневмоприводи-В.Ф.Герман/](http://www.Polka-knig.com.ua/book.php?book=322/Гідравліка,гідро-тапневмоприводи-В.Ф.Герман/) (accessed 15 June 2018) (Ukr.)
12. Kopko V.M. *Teplosnabzhenye* [Heat supply]. Moscow, Assocyacija stroytel'nyh vuzov Publ., 2014. 336 p. (Rus.)

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

Стаття надійшла 15.10.2018