

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОДИСПЕРСНОЇ ВОДЯНОЇ ЗАВИСИ В ГІРНИЧІЙ ВИРОБЦІ

(Статтю опубліковано українською мовою в збірнику
наукових праць «Системні технології» № 1 за 2011 рік)

Соловйов Д. І.

Запропонована математична модель високодисперсної водяної зависи, яка непроникна для запиленого повітря в гірничій виробці. Рівняння руху і тепломасообміну краплин з повітрям розв'язували чисельно. Визначенні термодинамічні параметри повітря, зона зрошення і осадження на підшву виробки краплин.

Ключові слова: уловлювання пилу, високодисперсне зрошення, тепломасообмін краплин, водяна завіса, очистка рудничне повітря.

Вугільний та породний пил до 10 мкм в вентиляційному повітрі гірничої виробки небезпечний для здоров'я людини, а пил який осів на стінки є вибухонебезпечним [1]. Тому знепилення вентиляційного повітря залишається актуальним для вугільних шахт.

Відповідно [2] з метою знепилення повітряних потоків повинні застосовуватися водяні та водоповітряні зависи з витратою води 0,1 та 0,05 л/м³ з тиском 0,5 і 0,3 ÷ 0,4 МПа відповідно. Водоповітряні (туманоутворюючі) зависи знепилюють повітря з 200 мг/м³ і більше до ГДК на відстані 150 ÷ 200 м від джерела пилоутворення [3]. Туманоутворювач ОП – 1 з витратою води 10 л/хв і стисненого повітря 0,4 м³/хв рекомендуються по одному на 100 м³/хв повітря при загальній витраті не більше 300 м³/хв, а ТЗ – 1 з витратою води 5 л/хв і стисненого повітря 1,6 ÷ 1,8 м³/хв на кожні 500 м³/хв.

Недоліком водоповітряних завис є необхідність використання для їх створення стисненого повітря. Тому, не зважаючи на те що вони забезпечують знепилення до ГДК в шахтах вони застосовуються мало.

1. Розпилювачі водяних і водоповітряних завис.

Для утворення водяних завис в [1], [4] рекомендовані зонтичні форсунки ЗФ 1.0 - 75 і ЗФ 3.3 - 75 та плоскоструменеві ПФ 2.2 - 125 з тиском води не менше 1 МПа. Медіанний діаметр краплини зонтичних форсунок 210 і 260 мкм при куту факелу 80 і 85°, а плоскоструменевих (кут 125°) 215 мкм. Відповідно [1] пил уловлюється краплинами води що рухаються зі швидкістю 30 ÷ 40 м/с на виході з форсунки.

Водоповітряні завіси утворюються пневмомеханічними форсунками 2ВВК 2/15 [5] з витратою води $2 \div 3$ л/хв при тиску не менше 0,2 МПа з розрахунку одна форсунка на 2 м^2 площі перерізу виробки. При тиску 0,3 МПа середній діаметр крапель 81 мкм, середній об'ємний діаметр 123 мкм, при тиску 0,5 МПа відповідно 36 і 54 мкм. Покращення дисперсності забезпечило знепилення повітря до ГДК.

Відцентровий розпилювач Ф 0.3.1.0 з витратою 1 л/хв при тиску 0,3 МПа випробуваний з позитивними результатами при змочуванні вугілля і пилоподавленні в пунктах перевантаження стрічкового конвеєра [6] і створенні водяної завіси в гірничій виробці [7].

На рис.1 показаний розподіл кількості краплин за розмірами. Середній діаметр краплин 81,6 мкм, а середній об'ємний діаметр – 105,7 мкм. Дисперсність розпилення порівнювана з пневмомеханічною форсункою, досягнута за рахунок гідродинамічної оптимізації форми і розмірів камери закручування [8].

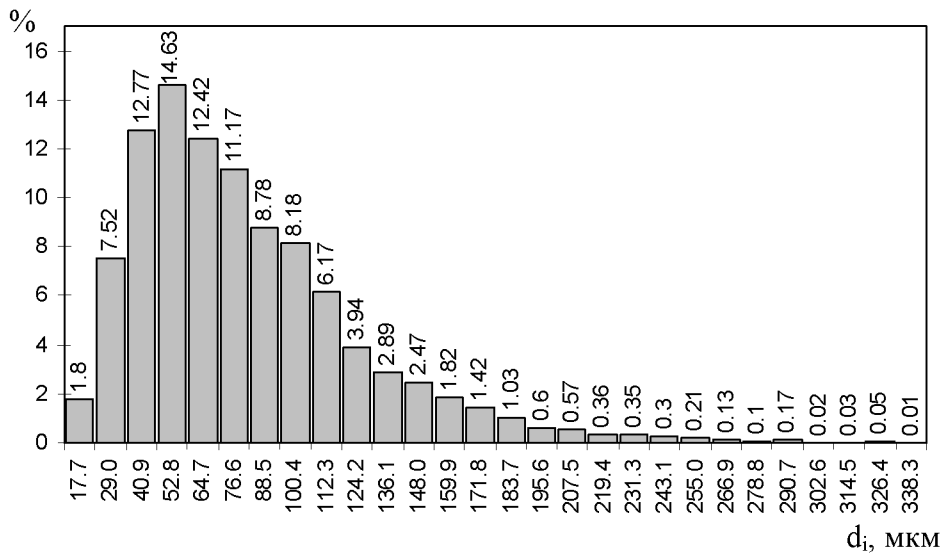


Рис. 1. Розподіл кількості краплин за розмірами

2. Фізичне уявлення про високодисперсну водяну завісу

Запилене повітря рухається (див. рис. 2) в каналі 1 і проникає в завісу краплин води 2, утворену розпилювачами 3, які встановлені по перерізу каналу. Краплини уловлюють пил і сідають на підлошву 4.

Механізм взаємодії краплин і пилу при супутньому русі в потоці повітря не з'ясований, в той час доказана ефективність знепилювання повітря водоповітряною завісою в гірничій виробці. В [7] запропонована схема уловлювання пилюнок краплинами, зумовленого поперечним рухом пилюнок у вихорах в потоці повітря. При швидкості повіт-

ря 2 м/с, число $Re = 5,46 \cdot 10^5$, а швидкість у вихорах (пульсації) на рівні 60 мм/с при розмірах вихорів 1,2 мм.

Метою математичного моделювання є визначення кількості форсунок і їх розміщення, при яких завіса заповнює поперечний переріз виробки і досягається непроникна для пилюнок щільність краплин, а також вологість і температура повітря за завісою.

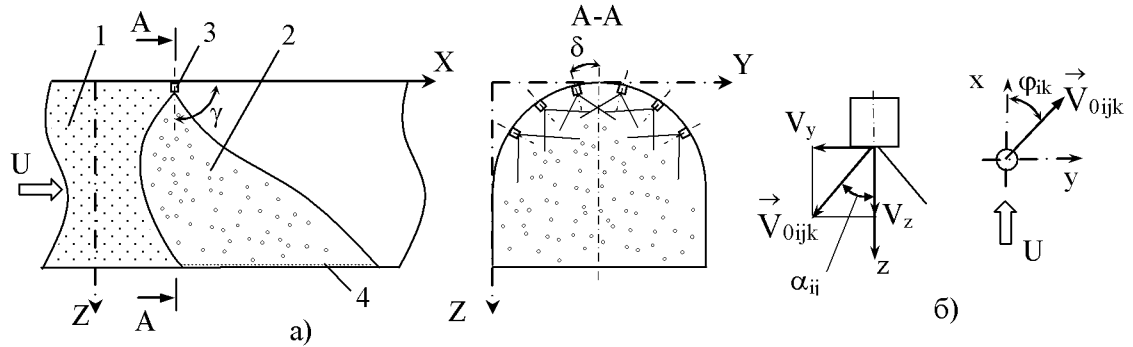


Рис. 2. Водяна завіса в каналі

3. Рівняння руху і тепломасообміну краплин в завісі.

В проекціях на осі координат X, Y, Z система рівнянь руху і тепломасообміну краплин в завісі записана так:

$$\frac{d}{d\tau} V_{xijk} = -\frac{3}{4} \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \frac{\rho_i}{\rho} (V_{xijk} - U_x) \left| \vec{V}_{ijk} - \vec{U} \right|, \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\tau} V_{yijk} = -\frac{3}{4} \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \frac{\rho_i}{\rho} (V_{yijk} - U_y) \left| \vec{V}_{ijk} - \vec{U} \right|, \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\tau} V_{zijk} = -\frac{3}{4} \frac{C_{ijk} \Psi_{ijk}}{d_{ijk}} \frac{\rho_i}{\rho} (V_{zijk} - U_z) \left| \vec{V}_{ijk} - \vec{U} \right| + g, \quad (3)$$

$$\frac{dx_{ijk}}{d\tau} = V_{xijk}, \quad (4)$$

$$\frac{dy_{ijk}}{d\tau} = V_{yijk}, \quad (5)$$

$$\frac{dz_{ijk}}{d\tau} = V_{zijk}, \quad (6)$$

$$\frac{d}{d\tau} \theta_{ijk} = -\frac{6}{\rho \cdot c_p \cdot d_{ijk}} \left[\alpha_{ijk} (\theta_{ijk} - T) + \beta_{ijk} (\rho_i^\theta - \rho_{\hat{a}i}) L \right], \quad (7)$$

$$\frac{d}{d\tau} d_{ijk} = -2 \frac{\beta_{ijk}}{\rho} (\rho_i^\theta - \rho_{\hat{a}i}); \quad (8)$$

вологість та температура повітря в водяній завісі змінюється в напрямку руху повітря внаслідок випаровування краплин і тепломасообміну:

$$\frac{d}{dx} \rho = \sum_{ijk} \frac{f_{i\dot{\theta}0}^{ijk}}{U_x} \beta_{ijk} (\rho_i^\theta - \rho_{\dot{a}i}^{ijk}); \quad (9)$$

$$\frac{d}{dx} T = \sum_{ijk} \frac{f_{i\dot{\theta}0}^{ijk}}{U_x \rho_{ci} \tilde{n}_{\dot{\theta}i}} \alpha_{ijk} (\theta_{\tilde{n}\dot{\theta}ijk} - \dot{\theta}), \quad (10)$$

де $\tilde{N}_{ijk} = \frac{24}{Re_{ijk}} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_{ijk}}}$ - коефіцієнт аеродинамічного опору ку-

лі; $Re_{ijk} = \frac{\rho_i d_{ijk} |\vec{V}_{ijk} - \vec{U}|}{\mu_i}$ - число Рейнольда;

$\psi_{ijk} = \exp(0,03 \cdot We_{ijk}^{1,5})$ - динамічний коефіцієнт форми краплини, який враховує її деформацію під дією аеродинамічних сил;

$We_{ijk} = \frac{\rho_i d_{ijk} |\vec{V}_{ijk} - \vec{U}|^2}{\sigma}$ - число Вебера; $\alpha_{ijk} = \frac{Nu_{ijk}}{d_{ijk}} \lambda_i$ - коефіці-

єнт тепловіддачі, $Nu_{ijk} = 2 + 0,55 \cdot Re_{ijk}^{0,5} Pr^{0,33}$ - число Нусельта,

$Pr = \frac{\mu_i \tilde{n}_{\dot{\theta}i}}{\lambda_i}$ - число Прандтля; $\beta_{ijk} = \frac{Sh_{ijk} D_i}{d_{ijk}}$ - коефіцієнт масовіддачі

краплини, $Sh_{ijk} = 2 + 0,55 \cdot Re_{ijk}^{0,5} Sc^{0,33}$ - число Шервуда, $Sc = \frac{\mu_i}{D_i \rho_i}$ -

число Шмідта; $\vec{V} \{V_x, V_y, V_z\}$ - швидкість краплин; $\vec{U} \{U_x, U_y, U_z\}$ - швидкість повітря; θ, T - середньомасова температура краплини і повітря; d - діаметр краплини; $\rho, \rho_w, \rho_i^\theta, \rho_{wi}$ - густина води, водяної пари у вологому повітрі і насиченої водяної пари коло краплі; c_p, c_{pw} - питома теплоємність води і повітря; L - теплота пароутворення; μ_w, λ_w - динамічна в'язкість і теплопровідність повітря; σ - поверхневий натяг води; D_w - дифузія водяної пари в повітрі; x, y, z координати краплі;

$f_{i\dot{\theta}0}^{ijk} = \frac{G_{0ijk} \tau_{ijk}^6}{d_{0i}^3 V_{i\dot{a}}}$ $d_{\tilde{n}\dot{\theta}ijk}^2$; - питома поверхня краплини в об'ємі, G_0 -

початкова витрата води, що припадає на об'єм, τ - час, який краплина із діаметром $d_{\tilde{n}\dot{\theta}}$ перебувала в об'ємі V_{ob} , d_{0i} - початковий і - тий ді-

метр краплини; індекси: i – відповідає середньому діаметру краплини на кожному інтервалі (див. рис. 1), j – куту факелу α під яким починає рухатися краплина, k – меридіональному куту вильоту краплин φ .

Початковими умови для інтегрування є параметри повітря: швидкість U , температура $T = T_0$, вологість $\rho = \rho_0$, та параметри краплин: швидкість краплин на виході з розпилювачів V_{0ijk} з проекціями на осі $V_{xijk} = V_{0ijk} \sin \alpha_{ij} \cdot \cos \varphi_{ik} \cdot \cos \delta$, $V_{yijk} = V_{0ijk} \sin \alpha_{ij} \cdot \sin \varphi_{ik} \cdot \cos \delta$, $V_{zijk} = V_{0ijk} \cos \alpha_{ij} \cdot \sin \delta$, діаметр краплин $d=d_0$, температура $\theta = \theta_0$ та кількість $G = G_0$ води, координати розташування розпилювачів. Теплофізичні властивості розраховували інтерполяцією даних для води [10] і повітря [11].

Для розрахунку розбиваємо простір виробки сіткою на об'єми $V_{об}$ з кроком Δx , Δy , Δz . На першому етапі за рівняннями 1 ÷ 8 методом Рунге – Кута розраховуються траєкторії та параметри краплин в кожному об'ємі, а на другому за рівняннями 9 ÷ 10 параметри повітря в об'ємах по напрямку його руху, якщо збіжність ітерацій не досягнута розрахунок повторюють.

4. Кінематика і тепломасообмін високодисперсної водяної завіси.

Розрахунки руху і випаровування краплин виконані для завіси з відцентровими розпилювачами Ф 0.3.1.0, які розміщені під склепінням з кутами $\delta = 15, 30$ і 45° . Площа поперечного перерізу виробки $10,94 \text{ м}^2$. Витрати повітря $1312,8 \text{ м}^3/\text{хв}$, води $6 \text{ л}/\text{хв}$ під тиском $0,3 \text{ МПа}$. Температура повітря перед завісою 30°C , відносна вологість 75% , температура води 25°C . Розподіл кількості краплин по розмірам відповідав рис. 1. Початкова швидкість краплин $12 \text{ м}/\text{с}$, повний кут факелу розпилювання 85° .

На рис. 3 показаний розподіл краплин по перерізу виробки на відстані 2 м від форсунок в напрямку руху повітря і сліди краплини 300 мкм , які осідають на підшви виробки. Конічні факели форсунок деформуються потоком повітря, при цьому краплини рухаються шарами: під склепінням краплини до 137 мкм , в середині $180 \div 265 \text{ мкм}$ і біля підшви $307 \div 250 \text{ мкм}$. Проскакування запиленого повітря можливо лише під склепінням, через "вікна" незаповнені краплинами. За рахунок розміщення форсунок в другій і третій завісах "вікна" також заповнюються краплинами.

На рис. 4 показана температура і втрата маси краплин зумовлені випаровуванням. Краплини нагріваються до $\sim 25^\circ\text{C}$, краплини менше

40,9 мкм випаровуються повністю, а втрата маси для краплин менше 195,6 мкм від 100 до 10 %.

Відсоток кількості розпиленої води що знаходиться в повітрі і яка осіла на підшву показана на рис. 5. На відстані 40 м на підшву

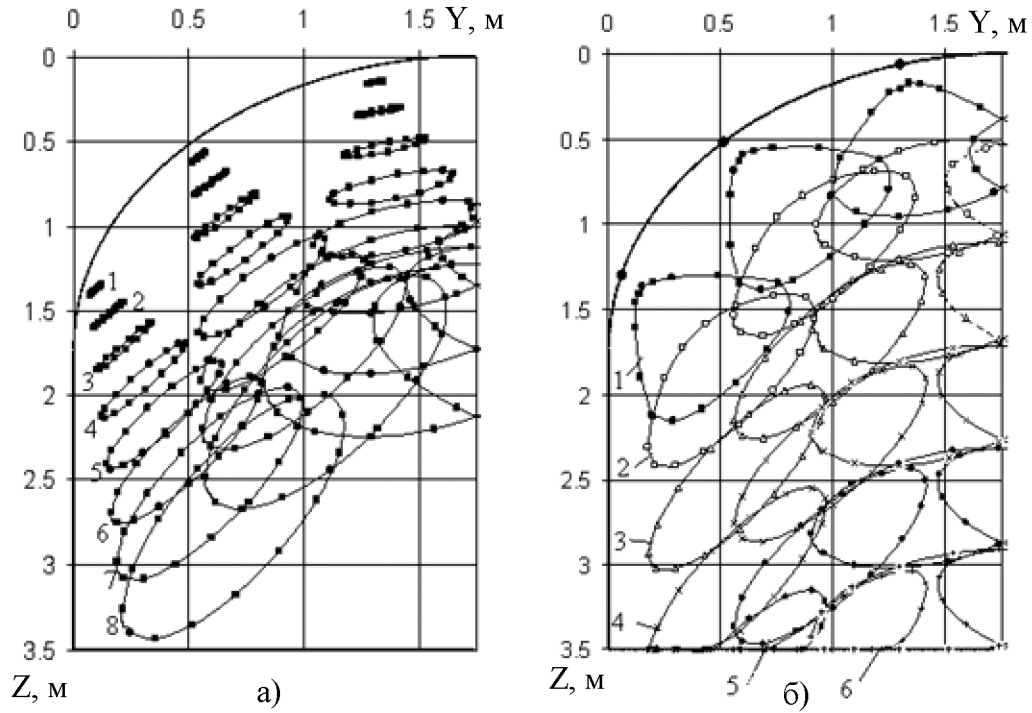


Рис. 3. Розподіл краплин по перерізу виробки:

- а) відстань від дуги, діаметр крапель, мкм: 1-52, 2-95, 3-137, 4-180, 5-222, 6-265, 7-306, 8-350;
 б) діаметр краплин 300 мкм, відстань від дуги 1-0,6 м, 2-1 м, 3-2 м, 4-3 м, 5-4 м, 6-5 м

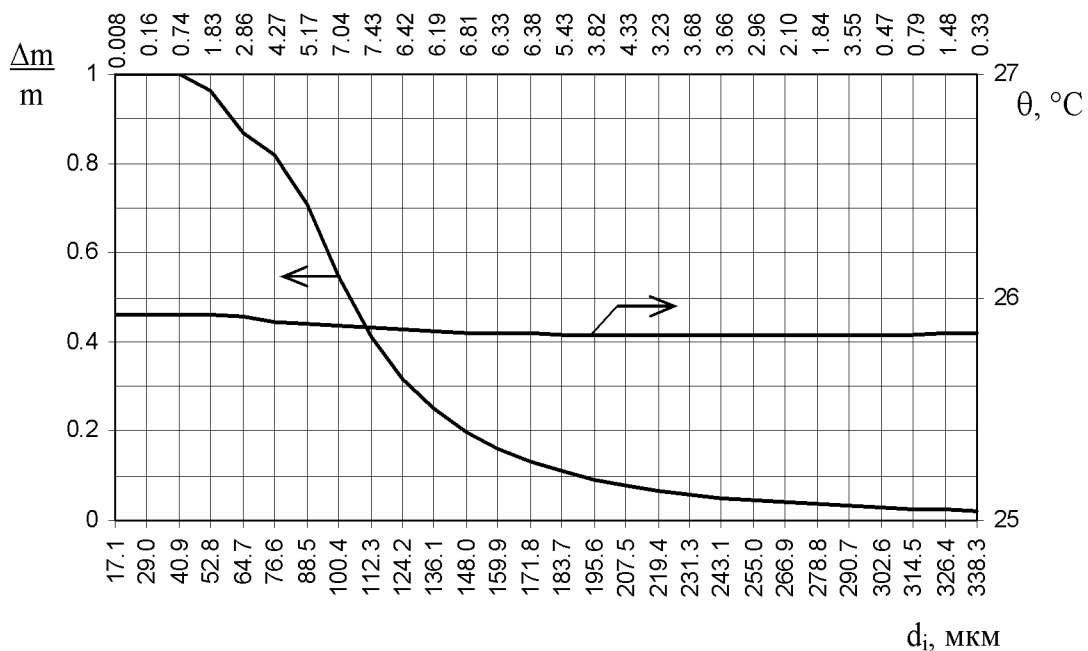


Рис. 4. Втрата маси і температура краплин

осідає 69 %, втрати на випаровування складають 28,4 %. В повітрі залишаються 1,97 % води, яка буде осаджена та випариться на відстані понад 40 м.

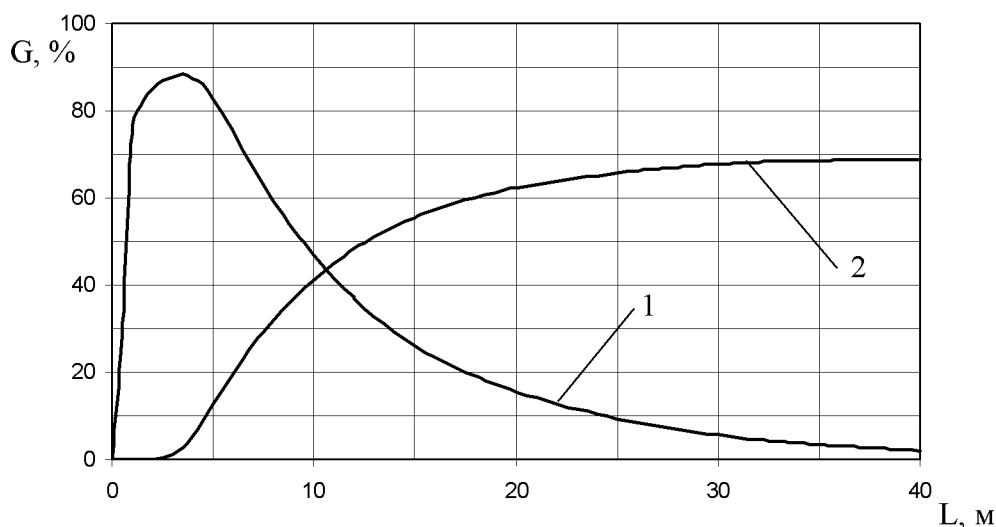


Рис. 5. Маса розпиленої води в повітрі (1) та на підшві виробки (2)

Температура повітря за завісою зменшується до 28 °C, а вологість зростає до 86,5 %. Такі умови відповідають термоіндексу > 17 балів і допустимі для виробок шахт [9].

Висновки

Математична модель дозволяє розрахувати високодисперсну водяну завісу, яка відповідно з експериментальними даними створену в гірничій виробці відцентровими розпилювачами Ф 0.3.1.0 і є непроникнуою для пилу. Витрата води в завісі на рівні 0,012 л/м³ повітря менша 0,05 л/м³ відповідно норм [2]. Підвищення вологості внаслідок випаровування краплин допустиме для робіт в шахтних виробках [9].

Список літератури

1. Борьба с угольной и породной пылью в угольных шахтах/ П. М. Петрухин, Г. С. Гродель, Н. И. Жилияев и др. 2-е изд., перераб. и доп., М., Недра, 1981. - 271 с.
2. Інструкція з комплексного знепилювання повітря: НПАОП 10.0-5.23-04.-К., 2004. - 14 с.
3. Руководство по борьбе с пылью в угольных шахтах, изд. 2-ое, М., Недра, 1979. - 319 с.
4. Параметрический ряд унифицированных форсунок для орошения в угольных шахтах. – Макеевка: МакНИИ, 1971.
5. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах// Ф. М. Гельфанд, В. П. Журавлев, А. П. Голубев, Л. И. Рыжих. – М.: Недра, 1975. - 288 с.
6. Коваль В. П., Соловйов Д. І. Змочування вугілля високодисперсним факелом води// Уголь Украины. – 2007. – № 11. – С. 35 – 37.
7. Коваль В. П., Соловйов Д. І. Знепилювання повітря у гірничій виробці високодисперсною водяною завісою// Уголь Украины. – 2008. – № 10. – С. 38 - 40.
8. Коваль В. П., Мележик О. І. Відцентровий розпилювач// Карантин і захист рослин. – 2005. – № 3. – С. 28-29.
9. Пашковский П. С., Положий В. О., Онасенко А. А. Применение средств индивидуальной противотепловой защиты горнорабочих// Уголь Украины. -2008. – № 10. – С. 34 - 37.
10. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во стандартов, 1969, -408 с.
11. Варгафтик Н.Б., Филипов Л.П., Теплопроводность газов и жидкостей (справочные данные). М.: Изд-во стандартов, 1970. - 352 с.