

УДК 532.53

Ковальов В.А. д.т.н., проф.; Корольов С.О.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Kovalev V., Korolev S.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (Vaskov@ukr.net)

THE VENTILATION PROBLEMS OF BLAST FURNACES

Проведено аналіз існуючих методів вентиляції у виробничих цехах промислових підприємств, а також технічних рішень щодо зменшення викидів шкідливих речовин на металургійному виробництві. Показані їх позитивні та негативні сторони, проаналізовано аеродинамічні особливості роботи систем аспірації, а також запропоновано новий метод видалення шлаків доменних печей, який дозволить покращити екологічну обстановку підприємства в цілому. Розроблено лабораторний стенд на базі аеродинамічної труби, система вимірювання полів швидкості та реєстрації аеродинамічних параметрів потоків, а також модель для вивчення характеристик кожного з елементів системи вентиляції. Представлено опис конструкції системи вентиляції, методів вимірювання полів швидкості і тиску, а також намічено задачі експериментальних досліджень.

Ключові слова: доменна піч, система вентиляції, поле швидкості повітря, система вимірювання, екологічна безпека підприємства

Вступ

На сьогоднішній день промислові підприємства багатьох країн світу розвиваються як з точки зору масштабів та потужності, так і інтенсивності технологічних процесів. Сучасне технологічне обладнання виробництва, зокрема у металургійній галузі, може містити агрегати та модулі, що потребують обов'язкового урахування екологічних аспектів, наприклад, кількості та складу шкідливих викидів, які мають суттєвий вплив на навколишнє середовище та здоров'я працівників. Основними джерелами забруднення довкілля є коксохімічне, агломераційне, доменне, феросплавне та сталеплавильне галузі виробництва.

Крім того, характер виробництва пов'язаний з використанням обладнання, матеріалів та виробів, що є джерелом виділення теплоти до виробничих приміщень, а також теплових потоків різної інтенсивності. Таким чином, одним з основних засобів забезпечення екологічної безпеки виробництва упродовж багатьох років є системи вентиляції у приміщеннях, зокрема в металургійних цехах підприємств. Зазначені системи мають забезпечувати не тільки оптимальний мікроклімат, а й ефективне видалення різного роду твердих та газоподібних включень, які супроводжують технологічні процеси на виробництві.

Одним з видів природної вентиляції приміщень є аерація. Її використання є ефективним в гарячих цехах багатьох підприємств, де знаходяться джерела інтенсивного пило- та тепловиділення. На рис.1 зображена схема аерації промислової будівлі, де видно, що зовнішнє повітря проникає в цехи крізь бічні вікна в повздовжніх стінах будівлі 1, змішується з нагрітим внутрішнім повітрям і виходить вгору – до аераційних ліхтарів 2. Аерація відбувається за рахунок різниці температур зовнішнього та внутрішнього повітря.

Основними недоліками поданого методу є неможливість ефективного впливу на повітряні потоки, а також відсутність процесу очищення повітря, оскільки в ньому можуть знаходитися шкідливі пари, гази та аерозолі, викиди яких в атмосферу без очищення є неприпустимим.

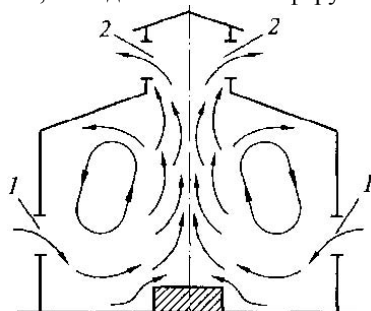


Рис. 1. Схема аерації виробничого приміщення:

1 – проточні прорізи; 2 – витяжні прорізи (аераційні ліхтарі) [2]

Постановка задачі та мета дослідження

Метою поданого дослідження є аналіз існуючих методів і засобів очищення повітря у виробничих приміщеннях металургійних підприємств та підвищення ефективності систем вентиляції на прикладі забезпечення доменних печей.

Реалізація зазначеної мети полягає у вивченні сучасних систем вентиляції з урахуванням аеродинамічних особливостей розподілу повітряних потоків, а також оптимізація енерговитрат на приводних агрегатах. Базуючись на існуючих даних про конструкції, методи та ефективність роботи систем вентиляції, необхідно розробити найбільш раціональні вентиляційні модулі з точки зору матеріальних витрат, простоти конструкції та аеродинамічних особливостей роботи. Пропоновані доробки

мають бути обґрунтовані за допомогою фізичного моделювання процесів на спеціальних експериментальних стендах, а також підтверджені створенням адекватної математичної моделі засобами чисельних розрахунків у широкому діапазоні чисел подібності.

Для проведення експериментальних досліджень найбільш доцільно використовувати аеродинамічну трубу, у робочій частині якої можна встановлювати елементи вентиляційної системи, досліджуючи в них поля швидкостей та тисків. Вимірювання параметрів повітряних потоків слід проводити за допомогою термоанемометричної апаратури з подальшим перетворенням реєстрованих сигналів від сенсорів до цифрового вигляду, а також методом візуалізації потоку.

Для розробки математичної моделі течій найбільш обґрунтованим є застосування широко відомих рівнянь руху рідини та газу у формі Нав'є-Стокса або Рейнольдса і методів імітаційного моделювання на базі існуючих пакетів прикладних програм. Співставлення результатів чисельних розрахунків з даними експериментальних досліджень має підвищити вірогідність математичної моделі та встановити критерії удосконалення систем вентиляції з точки зору енергоємності та ефективності їх роботи.

Аналіз існуючих систем вентиляції

Залежно від способу організації повітрообміну вентиляція може бути місцевою та загальнообмінною. За принципом дії існують витяжні та проточні схеми, приклади яких наведено на рис.2 [2].

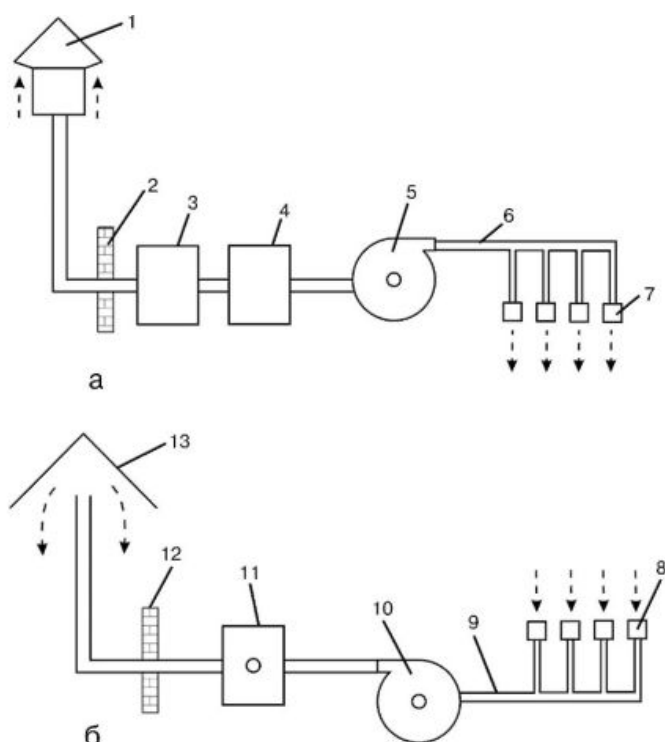


Рис. 2. Механічна вентиляція: а – проточна, б – витяжна; 1 - повітроприймач; 2 - стіна приміщення; 3 - фільтри; 4 - калорифер; 5 - вентилятор; 6 - повітроводи; 7 - повітророзподільвачі; 8 – повітроприймач; 9 - повітроводи; 10 - вентилятор; 11 – пристрій для очищення повітря; 12 - стіна; 13 - витяжна шахта

Насадка має встановлені на вихідній ділянці труби пластини, поздовжньо встановлені по її периметру з примиканням одна до одної бокових ділянок суміжних пластин і закріплені нижніми кінцями на осях опорного кільця з можливістю зміни за допомогою приводу положення від вертикального до нахилоного. Для очищення повітря в металургійних цехах слід враховувати можливість виникнення дрібних часток шлаків твердих сплавів, на які запропонована насадка димової труби Терехова-Кочеткова не розрахована. Як наслідок великі фракції шлаків не уловлюються і падають на робочу поверхню ливарного двору, де знаходиться персонал.

При обладнанні корпусів промислових підприємств у роботі [4] пропонується використовувати нову технологію вентиляції (рис.4), яка полягає у тому, що забруднене повітря з робочої зони цеху 7 забирається зонти 6 у збірний повітровід системи витяжної вентиляції 5, далі за допомогою вентилятора 2 крізь всмоктувальний патрубок 3 і напірний повітровід 4 подається до котла 1 для підтримки процесу горіння.

При проектуванні загальної схеми вентиляції витяжну та проточну системи часто поєднують, створюючи вентиляційну систему проточно-витяжного типу. У порівнянні з природною механічною вентиляцією має ряд переваг: великий радіус дії внаслідок значного напору, який створюється за допомогою вентилятора, а також можливість змінювати чи зберігати необхідний повітрообмін незалежно від температури повітря зовнішнього середовища і швидкості вітру. Крім того, така система може підводити попередньо очищене повітря, яке піддається також осушуванню або зволоженню, підігріву або охолодженню.

Серед недоліків можна зазначити те, що такі системи не завжди обладнуються фільтрами та пристроями для зміни вологості повітря. Інколи проточні і витяжні установки можуть не мати мережі повітроводу. Крім того, чисте повітря, яке потрапляє у виробничі приміщення крізь нещільності в огорожуючих конструкціях (неорганізований притік повітря), може призводити до протягів і відповідних захворювань персоналу. До недоліків механічної вентиляції слід також віднести значну вартість споруди, її експлуатації та необхідність проведення заходів по боротьбі з шумом.

Одним з технічних рішень щодо підвищення ефективності роботи вентиляції є насадка димової труби Терехова-Кочеткова [3], розроблена для видалення димових газів при змінних навантаженнях (рис.3).

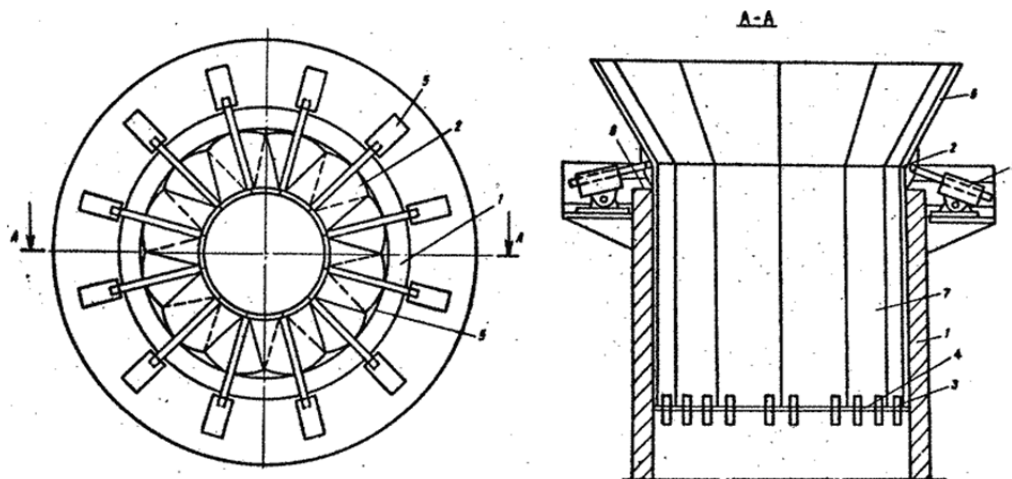


Рис. 3. Насадка димової труби Терехова-Кочеткова [3]:

1 – вихідна ділянка труби, 2 – пластини, 3 – горизонтальні осі, 4 – опорне кільце, 5 – привод, 6 – верхні ділянки пластин, 7 – нижні ділянки пластин

Забруднення, які містяться у повітрі робочої зони, незаражуються у котлі і видаляються з нього крізь димову трубу. Це дозволяє поліпшити екологічну ситуацію у виробничому цеху, який розташований на незначній відстані від котельної установки підприємства, а також виключити можливість виділення шкідливих речовин з системи вентиляції в атмосферу.

Запропоновані технології можуть бути застосовані на теплових електричних станціях і котельних установках систем теплозабезпечення або промислових підприємствах. Крім того, для впровадження подібної системи на підприємствах потрібен монтаж повітроводу від промислових цехів, які знаходяться на незначній відстані від котельні цих промислових підприємств, до вентиляторів котлів, що спричинює додаткові капітальні витрати.

З метою оптимальної утилізації теплоти вентиляційних викидів у роботі [5] наведено результати дослідження системи вентиляції з використанням рекуператора та теплового насосу. Проведено аналіз різних випадків роботи теплових насосів за певних заданих умов навколишнього середовища та інших параметрів, які впливають на коефіцієнт використання зовнішньої енергії, і отримано значення коефіцієнта використання зовнішньої енергії для таких систем.

На рис.5 зображена схема вентиляції, з якої видно, що вона містить місцевий відсмоктувач, повітровід витяжної вентиляції, до якого включений вентилятор з електродвигуном, регулятор витрати повітря, з'єднаний з датчиком концентрації шкідливих речовин. Забруднене шкідливими речовинами повітря з робочої зони приміщення відбирають за допомогою місцевих відсмоктувачів у витяжний повітровід 1, потім вентилятором 2, відводять в атмосферу.

Кількість видаленого повітря регулюють виходячи з необхідності досягнення заданої концентрації шкідливих речовин у робочій зоні приміщення. Для цього блоком автоматичного регулювання витрати повітря 4 за імпульсом від датчика концентрації шкідливих речовин 8 регулюють кількість повітря, що забирається, шляхом зміни частоти обертання вентилятора 2 за сигналом від мікроконтролера 6 через регулятор напруги 7 на електродвигун 3. Збудник руху повітря 9, створюючи рівномірний потік, забезпечує постійну швидкість повітря в зоні роботи датчика концентрації 8.

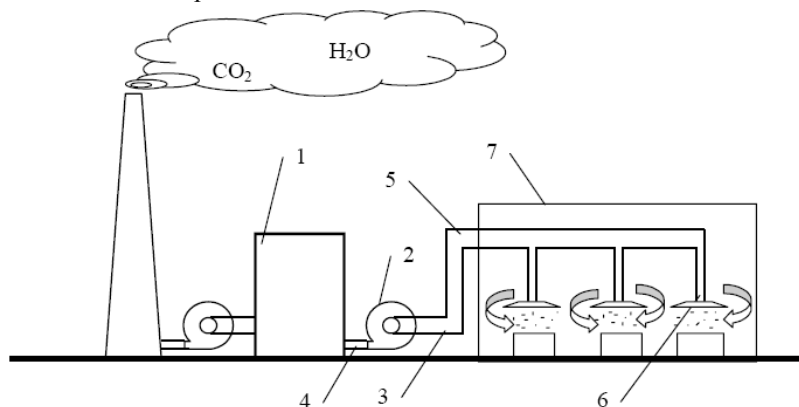


Рис. 4. Схема видалення і знешкодження забрудненого повітря виробничого цеху:

1- котел, 2 – вентилятор, 3 – всмоктувальний патрубок вентилятора, 4 – напірний повітровід, 5 – збірний повітровід, 6 – місцеві відсоси, 7 – виробничий цех

Подана система дозволяє скоротити тривалість знаходження персоналу в шкідливих умовах праці та знизити напруженість трудового процесу при обслуговуванні системи вентиляції за рахунок додаткової установки блока автоматичного регулювання витрати повітря, більш об'єктивно оцінити умови праці за рахунок встановлення збудника потоку повітря, з'єднаного з датчиком концентрації шкідливих речовин.

Основним недоліком представленої системи є необ'єктивна оцінка умов праці та погіршення якості регулювання у випадку забруднення датчика концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони, який знаходиться безпосередньо в центрі зони всмоктування витяжного повітроводу забрудненого повітря, що може знизити точність замірів концентрації пилу та збільшити енергоспоживання. Вищерозглянуті технічні рішення, в основному, направлені на очищення повітря від пилу та газових включень. Подібна конструкція не здатна здійснювати видалення твердих частинок у вигляді шлаків, тому поставлене нами завдання залишається актуальним.

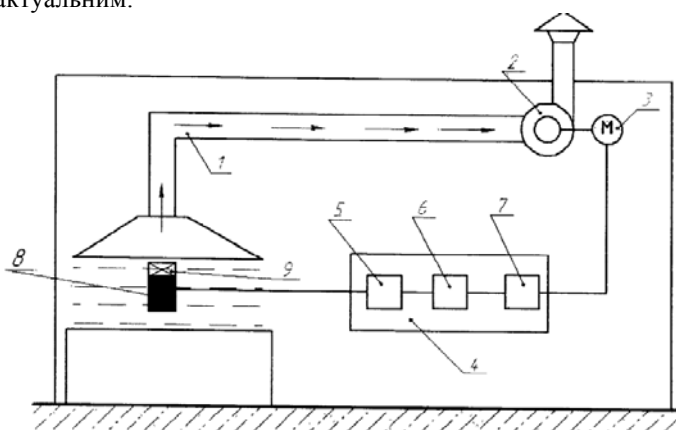


Рис. 5. Система вентиляції промислового підприємства

довжиною повітроводу і можливість застосування такого типу витяжного пристрою для газовиділення в електродугових сталеплавильних печах.

Подана система представлена двома контурами: високо- та низькотемпературним. Низькотемпературний контур призначений для всмоктування газу та пилу, що потрапляють в цех крізь електродні зазори у зводі печі. Високотемпературний контур, який використовують для видалення пилогазової суміші з робочого середовища печі крізь отвір у зводі. Він включає в себе газовидільний патрубок 3, з приведеним діаметром d , камеру допалювання з накатною муфтою 4, камеру осадження пилу 5 і з'єднувальний газохід 7. Основний елемент високотемпературного контуру – газовидільний патрубок – представляє собою трубу прямокутного перерізу, один кінець який вмонтований у звід печі, а на другому створюється необхідне розрядження. Завдяки цьому розрядженню, під дією тиску в робочому середовищі печі, пило газова суміш відсмоктується з печі.

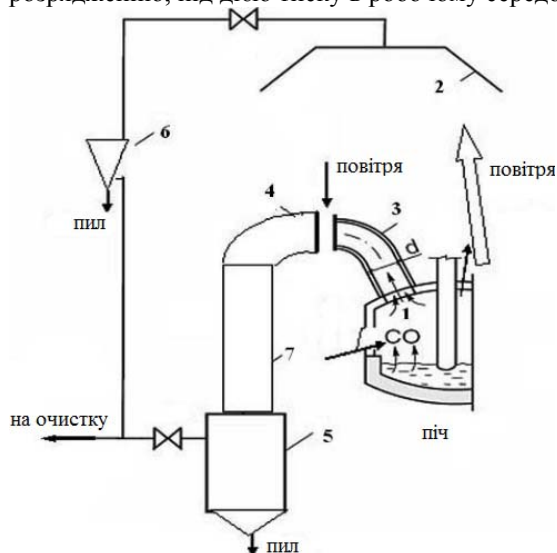


Рис. 6. Система газовиділення електродугової сталеплавильної печі: 1-поток газу, утворений в печі, 2-витяжний зонт низькотемпературного контуру, 3-газовидільний патрубок, 4-накатна муфта, 5-камера осадження пилу, 6-циклон, 7-з'єднувальний газохід

Методи очищення повітря з відцентровими ефектами

При використанні традиційної системи вентиляції у металургійних цехах доменний газ, який завжди насичений колошниковим пилом з вмістом малих частинок руди, коксу та інших елементів, що завантажуються в доменну піч, буде поширюватись приміщенням цеху. Згідно з результатами роботи [6] кількість металу, що видалається, суттєво залежить від режиму роботи системи газовиділення, а кількість металу, що видалається, у пічних газах помітно зростає при збільшенні швидкості виведення газів. Авторами досліджено витяжний повітровід з рівномірним відсмоктуванням газу за

у рівняннях Нав'є-Стокса, що описують обертальні потоки повітря у подібних пристроях, виражених у сферичних координатах r , θ і ϕ можна знехтувати нелінійними конвективними членами. У припущенні про осесиметричність течії, коли усі компоненти швидкості не залежать від азимутального кута ϕ , вираз для окружної складової V_ϕ вектора швидкості має вигляд

$$\frac{\partial V_\phi}{\partial t} = \nu \left(\Delta V_\phi - \frac{V_\phi}{r^2} \right),$$

де ν — кінематичний коефіцієнт в'язкості; Δ — оператор Лапласа.

Зазначене рівняння виражає круговий рух рідини в екваторіальній площині без урахування впливу відцентрових сил інерції, які діють на частки рідини у період їх розгону або гальмування, а також не враховують вплив конвективних прискорень. Розв'язуючи рівняння для зображення поперечної швидкості V_ϕ^* та переходячи до оригіналу, Сльозкін знаходить корені функцій Бесселя від уявного аргументу. За допомогою метода прямого та зворотного перетворення Лапласа отримано вираз для швидкості у вигляді експоненціального ряду за регресними степенями експоненти

$$V_{\phi} = \omega \cdot R \cdot \sin \theta \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{R} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{\lambda_k \cdot t}{a^2}} \times \frac{J_{\frac{3}{2}} \left(\frac{R}{a} \lambda_k \right)}{\lambda_k \cdot J_{\frac{3}{2}} (\lambda_k)} \right]$$

де λ_k — корені трансцендентного рівняння; $J_{3/2} \left(\frac{R}{a} \lambda_k \right)$ - функції Бесселя 3/2 порядку; ω – кутова швидкість потоку; t — термін розгону або гальмування повітря.

Згідно до тверджень Н.А.Сльозкіна, задачу про швидкість обертового потоку у циліндрі з кутовою швидкістю ω можна також представити у вигляді експоненціального ряду, причому величина швидкості буде прямувати до швидкості стінки

$$V_{\phi} = -2\omega \cdot R \cdot \sin \theta \left(\frac{a}{R} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{\lambda_k \cdot t}{a^2}} \times \frac{J \left(\frac{R}{a} \lambda_k \right)}{\lambda_k \cdot J_{\frac{3}{2}} (\lambda_k)} \quad (1)$$

З виразу (1) можна отримати величину моменту сил в'язкого тертя на стінках

$$M_z = \frac{16}{3} \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot a^3 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{\lambda_k \cdot t}{a^2}} \quad (2)$$

Результати розрахунку швидкості V_{ϕ} і кругового моменту M_z за виразами (1) і (2) дозволяють скласти картину розподілу швидкостей та силових впливів за радіусом сфери та їх залежність від терміну течії. Однак, відсутність конвективних членів у рівнянні (1) не дозволяє встановити нелінійні особливості розвитку течії та вплив на розподіл окружної компоненти швидкості вторинних циркуляційних течій у меридіональних площинах області розрахунку.

Для збільшення швидкості всмоктувального потоку і видалення газоподібних сумішей разом зі шлаками, які утворюються в процесі розплаву металів, пропонується по контуру вихідного отвору доменної печі встановити пневматичні пушки 1. За рахунок цього буде створюватись циклон (вихор) 2, який буде вловлювати частинки шлаків і сприяти їх переміщенню вгору до вентиляційної труби 3. Потім силою тяги вентилятора вони будуть вноситися в шлакозбірник. На рис. 7 представлено схематичне зображення технічного рішення.

Пропоноване технічне рішення відноситься до техніки кондиціонування повітря і вентиляції і може бути використане для створення комфортних умов і мікроклімату у виробничих приміщеннях з надлишковим виділенням тепла. Це зменшить не тільки концентрацію шкідливих речовин, але й вирішить проблему очищення цеху від шлакового пилу. Для тестування даного пристрою і дослідження зазначених течій та процесів у лабораторії аеродинаміки НТУУ «КПІ» створено експериментальний стенд на базі аеродинамічної труби. В результаті планується отримати характеристики потоків та встановити основні закономірності течій, що дозволить нам вдосконалити традиційні системи вентиляції.

Стенд складається з наступних елементів: аеродинамічна труба квадратного поперечного перерізу з розмірами (Д×Ш×Т), прилади вимірювання (трубка Піто, мікроманометр), експериментальна модель. Також проводиться відео фіксація досліджуваних процесів.

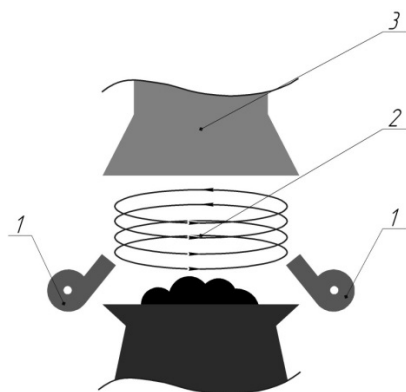


Рис. 7. Запропоноване рішення проблеми фільтрації доменної печі:
1 - пневмогармати, 2 – циклон (вихор), 3 – вентиляційна труба

У процесі проведення експерименту, в межах моделі, що розглядається вимірювались наступні параметри: швидкість потоку, тиск, витрата повітря. Потік повітря всмоктується в аеродинамічну трубу з незамкнутим потоком (рис.8) за рахунок вентилятора 1, який приводиться в обертання електродвигуном постійного струму 2 потужність 9 кВт. Повітря поступає в передню частину труби 3 (конфузор). В конфузіві повітряний потік розганяється до необхідної швидкості і поступає в робочу частину труби 4. Після чого потік потрапляє в плавно розширену частину труби 5 (дифузор). Для створення в робочій частині рівномірного потоку повітря в колекторі встановлюється спрямляючі решітка 6. Модель 7 встановлюється в робочій зоні для зняття її аеродинамічних властивостей [7].

Реєстрація, збір і обробка результатів досліджень здійснюється з використанням ПК, а саме сигнал від датчиків в процесі проведення експерименту в аеродинамічній трубі подається на аналого-цифровий перетворювач з'єднаний з ПК. Отримані результати можна виводити у вигляді графіків або таблиць.

Висновки

У поданому матеріалі розглянуто різні види систем вентиляції. Проведено аналіз існуючих методів вентиляції у виробничих цехах промислових підприємств, а також технічних рішень щодо зменшення викидів шкідливих речовин на металургійному виробництві. Висвітлено їх переваги і недоліки, а на їх основі запропоновано новий метод видалення шлаків доменних печей, який може бути використаний для створення комфортних умов і мікроклімату у виробничих приміщеннях з надлишковим виділенням тепла.

Це зменшить не тільки концентрацію шкідливих речовин і покращить екологічну обстановку підприємства, але й вирішить проблему очистки цеху від шлакового пилу. Розроблений лабораторний стенд на базі аеродинамічної труби і модель для вивчення характеристик потоку можна використовувати для моделювання подібних повітряних потоків у різних технологічних пристроях, що у свою чергу надасть змоги розробляти коректні математичні моделі процесів за допомогою сучасних чисельних методів з досить високою вірогідністю отриманих результатів.

Аннотация. Проведен анализ существующих методов вентиляции в производственных цехах промышленных предприятий, а также технических решений по уменьшению выбросов вредных веществ на металлургическом производстве. Показаны их положительные и отрицательные стороны, проанализированы аэродинамические особенности работы систем аспирации, а также предложен новый метод удаления шлаков доменных печей, который позволит улучшить экологическую обстановку предприятия в целом. Разработан лабораторный стенд на базе аэродинамической трубы, система измерения полей скорости и регистрации аэродинамических параметров потоков, а также модель для изучения характеристик каждого из элементов системы вентиляции. Представлено описание конструкции системы вентиляции, методов измерения полей скорости и давления, а также намечены задачи экспериментальных исследований.

Ключевые слова: доменная печь, система вентиляции, поле скорости воздуха, система измерения, экологическая безопасность предприятия

Summary. The analysis of existing methods of ventilation in industrial manufacturing plants, as well as technical solutions to reduce harmful emissions in the steel industry. Showing their positive and negative aspects, analyzes the aerodynamic features of aspiration systems, and the new method of removing toxins blast furnaces, which will improve the environmental situation of the whole enterprise. The laboratory stand at the wind tunnel, the system measuring and recording velocity fields aerodynamic flow parameters and model to study the characteristics of each of the elements of the ventilation system. Description of the design of ventilation systems, methods for measuring velocity fields and pressure and scheduled tasks of experimental studies.

Keywords: blast furnace, ventilation, air velocity field, the measuring system, environmental safety enterprises

Бібліографічний список використаної літератури

1. Алексеев С.В. Гигиена труда / С.В. Алексеев, В.Р. Усенко. - М.: Медицина, 1988. - 576 с. (<http://www.uzmzcgce.by/files/news/infogigtrd/04062011.pdf>)
2. Гигиена труда: учебник /Под ред. Н.Ф. Измерова, В.Ф. Кириллова.-М.: GEOTAR-Медиа, 2010.-592с.
3. Патент F23L 17/02 Насадка димовой трубы Терехова-Кочеткова
4. Шамрило В.И. Вентиляция промышленных и городских объектов с помощью тягодутьевых механизмов котлоагрегатов / В.И. Шарапов, А.В. Дзябченко, М.И. Сагиров // Материалы Четвертой Российской научно-технической конференции “Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике промышленности”, 24-25 апреля 2003.-Ульяновск 2003.-С.146 -151.
5. Безродний М.К. Енергетична ефективність системи вентиляції з використанням рекуператора та теплового насосу / М.К. Безродний, М.А. Галан // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Випуск 3.- 2011.-С.5-13.
6. Тимошенко Н.С. Моделирование вытяжного воздуховода для дуговых сталеплавильных печей / Н.С. Тимошенко, А.Н. Семко // Сборник научных статей “Современная наука”.- №2(10).-2012.-С.10-15.
7. Соляник П.Н. Экспериментальная аэродинамика / П.Н. Соляник, М.Л. Сургайло, В. В. Чмовж. – Учеб. Пособие по лабораторному практикуму. – Харьков: Нац. Аэрокосм. ун-т “Харьк. Авиаци. ин-т”, 2007. – 96с.

References

1. Alexeyev S.V. Gigiyena truda. S.V. Alexeyev, V.R. Usenko. Moscow: Medicina, 1988. 576 p. (<http://www.uzmzcgce.by/files/news/infogigtrd/04062011.pdf>)
2. Gigiyena truda: uchebnik. Pod red. N.F.Izmerova. Moscow: GEOTAR-MeDIA, 2010. 592 P.
3. Patent F23L 17/02 Nasadka dimovoi trubi Terekhova-Kochetkova
4. Shamrilo V.I. Ventilyatsiya promishlennih I gorodskih obyektov s pomoshchyu tyagodutyevih mekhanizmov kotloagregatov. V.I.Sharapov, A.V.Dzyabchenko, M.I.sagirov. Materiali 4-Rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsiyi “Energoberezeniye v gorodskom khozyaystve, energetike I promishlennosti”, 24-25 april 2003. Ulyanovsk 2003. p. 146-151.
5. Bezrodniy M.K. Energetichna efectivnist systemi ventilyatsiyi z vikoristannyam recurperatora ta teplovogo nasosu. M.K. Bezrodniy, M.A. Galan. Tehnichna teplofizika ta promislova teploenergetika. Vip 3. 2011. P. 5-13.
6. Timoshenko N.S. Modeirovaniye vityazhnogo vozduhovoda dlya dugovih staleplavilnih pechey. N.S.Timoshenko, A.H. Semko. Sbornik nauchnih statey “Sovremennaya nauka”. No 2(10). 2012. C.10-15.
7. Solyanik P.N. Experimentalnaya aerodinamika. P.N.Solyanik, M.L. Surgaylo, V.V.Chmovzh. Ucheb. Posobiye po laboratornomu praktikumu. Kharkov: Nact. Aerokosm. un-t “Kharkov. Avia. In-t”, 2007. 96c.

Подана до редакції 10.11.2015