

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯРОШЕНКО ГАННА МИКОЛАЇВНА

УДК 614.8: 622.765

ДИСЕРТАЦІЯ

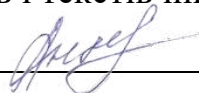
УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ УМОВ ПРАЦІ В
ПРИМІЩЕННЯХ ЗБАГАЧЕННЯ ТИТАНО-ЦИРКОНІЄВИХ РУД

Галузь знань – 26 «Цивільна безпека»

Спеціальність – 263 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Г.М. Ярошенко

Науковий керівник – Лапшин Олександр Єгорович, доктор технічних наук,
професор

АНОТАЦІЯ

Ярошенко Г.М. Управління мікрокліматичними параметрами умов праці в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 «Цивільна безпека». – Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, 2026.

Сучасний етап розвитку гірничо-збагачувальної промисловості характеризується інтенсифікацією процесів та підвищенням вимог до умов праці. Особливо це стосується підприємств збагачення титано-цирконієвих руд, де робота в замкнених приміщеннях супроводжується значними тепловиділеннями, високою вологістю та інтенсивним рухом повітря.

Мікроклімат у таких приміщеннях критично впливає на безпеку та здоров'я персоналу. Підвищена температура спричиняє швидку втому, зниження концентрації та порушення координації, що збільшує ризик помилок під час обслуговування механізмів. Знижена температура та температурна нерівномірність погіршують сенсомоторні функції (чутливість, точність рухів), підвищуючи ймовірність травмування.

Висока відносна вологість призводить до утворення слизьких поверхонь на робочих майданчиках і сходах, що суттєво підвищує ризик падінь. Водночас нераціональна швидкість і організація повітряних потоків викликають тепловий дискомфорт та утворюють застійні зони. Це перешкоджає ефективному видаленню тепла, вологи й пилу з робочої зони, призводячи до перевитрат енергії вентиляційними системами без досягнення нормативних мікрокліматичних показників.

Актуальність проблеми управління мікрокліматичними параметрами посилюється специфікою збагачення титано-цирконієвих руд, що полягає у застосуванні гідротранспорту, мокрих технологічних процесів та операцій

зневоднення продуктів збагачення. Такі процеси формують складні тепловологісні режими, що ускладнює забезпечення стабільних і безпечних умов праці традиційними системами вентиляції та кондиціювання повітря.

Незважаючи на наявність чинної нормативної бази у сфері охорони праці та промислової вентиляції, практичний досвід експлуатації збагачувальних фабрик свідчить про недостатню ефективність існуючих підходів до регулювання мікроклімату. Більшість систем функціонує за статичними або слабоадаптивними схемами, які не враховують динамічні зміни технологічних навантажень, метеорологічних умов та просторову неоднорідність повітряного середовища в приміщеннях.

У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба у розробленні науково обґрунтованих методів управління мікрокліматичними параметрами умов праці, що базуються на комплексному врахуванні технологічних, теплотехнічних, аеродинамічних та санітарно-гігієнічних чинників.

Метою роботи є теоретичне й експериментальне обґрунтування та вдосконалення системи вентиляції в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд, що забезпечує нормативні параметри мікроклімату і підвищує безпеку праці.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1) *вперше* розроблено аналітичну модель динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок, яка, на відміну від існуючих підходів, інтегрує коефіцієнти внутрішньозмінної нерівномірності та сумісної дії обладнання, що кількісно доводить зростання пилового навантаження на 16–34 % при паралельній роботі агрегатів, та дозволяє прогнозувати періоди максимального пилового навантаження та оптимізувати режими місцевої аспірації;

2) *вперше* розроблено математичну модель теплообміну для сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу коаксіального типу в умовах сушильного виробництва, яка, базуючись на розв'язанні систем лінійних

диференціальних рівнянь методом Бернуллі, дозволяє аналітично визначати динаміку температур гарячого і холодного потоків у перехідних режимах із встановленим часом теплової стабілізації системи на рівні 30 хвилин;

3) *удосконалено* методику оцінювання ефективності систем забезпечення мікроклімату у приміщеннях збагачення мінеральної сировини, яка, на відміну від традиційного відокремленого контролю, комплексно поєднує інструментальний моніторинг температури та вологості, гравіметричне визначення дисперсних домішок та аеродинамічний балансовий розрахунок для реальної конфігурації витяжної мережі (з урахуванням втрат тиску до 70 Па);

4) *удосконалено* математичну модель формування теплового режиму виробничого приміщення (на базі ідеального перемішування), адаптовану до умов цеху збагачення, що враховує змінність тепловиділень від технологічного обладнання (надлишкове тепло понад 24 кВт) та кратність повітрообміну;

5) *набули подальший розвиток* науково-прикладні засади створення енергоефективних систем мікроклімату для умов збагачувального виробництва, що полягають у розробці комплексної схеми вентиляції на базі коаксіального повітропроводу з механізмом сезонної адаптації за допомогою комбінованого теплоізоляційного мату, яка, на відміну від існуючих рішень, забезпечує одночасну локалізацію пилогазових виділень, керовану рекуперацію теплової енергії взимку та гарантований захист від перегріву припливного повітря влітку;

6) *набули подальшого розвитку* науково-методичні засади параметричного моніторингу та адаптивного обслуговування вентиляційно-аспіраційних систем, які, на відміну від традиційних планово-попереджувальних підходів, базуються на інтеграції алгоритмів безперервного контролю теплових, аеродинамічних та газоаналітичних параметрів, що дозволяє превентивно виявляти аеродинамічний дисбаланс та мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні:

- розробці та інженерному обґрунтуванні комплексної системи вентиляції та очищення повітря для сушильного відділення збагачувального виробництва (зокрема, для умов філії «Вільногірський ГМК»);

- визначенні необхідних обсягів повітрообміну на основі теплових і пилогазових балансів: 16 500 м³/год витяжного та 15 000 м³/год припливного повітря із підтриманням 10 % розрідження та кратності 7,2 год⁻¹;

- обґрунтуванні параметрів використання коаксіального повітропроводу для рекуперації тепла та доведенні доцільності застосування скрубєрів СК для ефективного газоочищення;

- обґрунтуванні технічних рішень (захищених патентами України на корисну модель №156625, №157215), які дозволяють гарантовано підтримувати температуру в робочій зоні на рівні 20–26 °С влітку та 18–23 °С взимку при відносній вологості 60–70 %, що нормалізує умови праці та підвищує енергоефективність на підприємствах гірничо-металургійної галузі.

- впровадженні науково-обґрунтованих результатів (аналітичних та математичних моделей, комплексної схеми вентиляції) у виробничу практику ТОВ «Імекс Мінералс» для проведення технічних аудитів та модернізації систем мікроклімату на підрядних підприємствах гірничо-збагачувальної галузі, а також в освітній процес Криворізького національного університету при підготовці фахівців за спеціальністю «Охорона праці».

У першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз параметрів мікроклімату й методів їх контролю у приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд, а також узагальнено нормативно-правові та гігієнічні вимоги до якості повітря робочої зони. На основі критичного аналізу вітчизняних і світових наукових праць оцінено ефективність традиційних систем загальнообмінної та змішаної вентиляції, кондиціонування й типів повітропроводів, що експлуатуються у великогабаритних збагачувальних цехах з інтенсивними тепло- та пиловиділеннями. Визначено основні технічні й експлуатаційні обмеження існуючих рішень, зокрема високі енерговитрати, суттєві аеродинамічні втрати,

зниження ефективності очищення повітря та складність їх адаптації до змінних технологічних умов. Це дозволило обґрунтувати доцільність розроблення більш ефективних, адаптивних систем повітрообміну для стабілізації умов праці та визначити завдання дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати умови формування мікроклімату та оцінити комплексний вплив технологічного обладнання (пило-, газо- та тепловиділень) на повітряне середовище цехів збагачення титано-цирконієвих руд.

2. Провести натурні дослідження фактичних параметрів мікроклімату та встановити аналітичні закономірності динаміки запиленості повітря робочої зони залежно від режимів експлуатації сушильного обладнання.

3. Розробити математичну модель процесів теплообміну в сумісному відсмоктувально-припливному повітропроводі для визначення його теплофізичних характеристик.

4. Виконати математичне моделювання формування теплового режиму у виробничому приміщенні з урахуванням повітрообміну.

5. Обґрунтувати необхідні обсяги повітрообміну за тепловим і газопиловим факторами та вибрати раціональні технічні рішення для очищення аспіраційного повітря.

6. Розробити комплексну схему вентиляції та аспірації сушильного цеху на базі коаксіального повітропроводу та визначити регламент її технічного обслуговування.

У другому розділі роботи виконано дослідження процесів формування мікроклімату та поширення шкідливих домішок у приміщеннях сушильного цеху гірничо-збагачувального виробництва. Проаналізовано вплив технологічного обладнання на повітряне середовище. Удосконалено методичний підхід до визначення концентрації шкідливих речовин та оцінки ефективності вентиляції. Розроблено аналітичну модель динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок. Встановлено, що сумісна робота агрегатів підвищує

запиленість на 16–34 %, що вимагає оптимізації режимів аспірації. Сформовано перше наукове положення.

У третьому розділі наведено результати математичного моделювання процесів теплообміну в робочих приміщеннях. Розроблено математичну модель сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу коаксіального типу, що функціонує як протитечійний теплообмінний апарат. Розв'язання системи диференціальних рівнянь методом Бернуллі дозволило аналітично встановити динаміку температур потоків та визначити час теплової стабілізації системи на рівні 30 хвилин. Удосконалено математичну модель формування теплового режиму виробничого приміщення на базі ідеального перемішування з урахуванням змінного теплового навантаження. Сформовано друге наукове положення.

У четвертому розділі обґрунтовано заходи щодо поліпшення умов праці в сушильному цеху. Виконано розрахунок необхідного повітрообміну за тепловим та газопиловим факторами. Доведено доцільність застосування конічних скрубєрів з абсорбційними касетами для високоефективного очищення повітря. Розроблено інноваційну комплексну схему аспірації та очищення з використанням коаксіального повітропроводу для рекуперації тепла відпрацьованих газів. Обґрунтовано адаптивне управління температурним режимом сумісного повітропроводу з використанням комбінованого теплоізоляційного мату у теплий період року. Сформовано регламент технічного обслуговування системи.

У підсумку наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуального науково-прикладного завдання щодо забезпечення безпечних і енергоефективних умов праці у приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд. Підтверджено результативність розробленої комплексної інженерної схеми вентиляції та аспірації з функцією адаптивного керування та коаксіальною рекуперацією теплоти.

Ключові слова: мікроклімат, повітрообмін, умови праці, вологість, вентиляція, пил, температура повітря, збагачення руд, титано-цирконієві руди, вентиляційні установки, теплове навантаження, повітропровід, безпека праці, енергоефективність, рекуперація тепла.

ABSTRACT

Yaroshenko H.M. Management of microclimatic parameters of working conditions in titanium–zirconium ore beneficiation facilities – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 263 Civil safety – Kryvyi Rih National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2026.

The current stage in the development of the mining and processing industry is characterised by the intensification of processes and increased requirements for working conditions. This particularly concerns titanium-zirconium ore enrichment facilities, where work in enclosed spaces is accompanied by significant heat emissions, high humidity, and intensive air movement.

The microclimate in such premises critically affects the safety and health of the personnel. Elevated temperatures lead to rapid fatigue, decreased concentration, and impaired coordination, which increases the risk of errors during machinery maintenance. Low temperatures and temperature unevenness impair sensorimotor functions (sensitivity, precision of movements), thereby increasing the likelihood of injury.

High relative humidity results in the formation of slippery surfaces on working platforms and stairs, significantly increasing the risk of falls. At the same time, irrational velocity and the organisation of airflows cause thermal discomfort and create stagnant zones. This hinders the effective extraction of heat, moisture, and dust from the working zone, leading to energy overconsumption by ventilation systems without achieving normative microclimatic parameters.

The urgency of the problem of managing microclimatic parameters is amplified by the specific nature of titanium-zirconium ore enrichment, which involves the use of hydrotransport, wet technological processes, and dewatering operations for enrichment products. Such processes form complex thermal and humidity regimes,

complicating the provision of stable and safe working conditions via traditional ventilation and air conditioning systems.

Despite the existence of a current regulatory framework in the field of occupational safety and industrial ventilation, the practical experience of operating enrichment plants indicates the insufficient effectiveness of existing approaches to microclimate regulation. Most systems operate according to static or poorly adaptive schemes that fail to account for dynamic changes in technological loads, meteorological conditions, and the spatial heterogeneity of the air environment within the premises.

In this regard, there is an objective need to develop scientifically grounded methods for managing the microclimatic parameters of working conditions, based on a comprehensive consideration of technological, thermotechnical, aerodynamic, and sanitary-hygienic factors.

The aim of the work is the theoretical and experimental substantiation and improvement of the ventilation system in titanium-zirconium ore enrichment premises, ensuring normative microclimate parameters and enhancing occupational safety.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. for the first time, an analytical model of the dynamics of working zone air dustiness near rotary dryers has been developed, which, unlike existing approaches, integrates the coefficients of intra-shift unevenness and the combined action of equipment, thereby quantitatively proving a 16–34% increase in the dust load during the parallel operation of units, and allowing for the prediction of periods of maximum dust load and the optimisation of local aspiration modes;
2. for the first time, a mathematical model of heat exchange for a combined exhaust-supply air duct of the coaxial type under the conditions of drying production has been developed, which, based on solving systems of linear differential equations using Bernoulli's method, allows for the analytical determination of the temperature

dynamics of hot and cold flows in transient modes with an established system thermal stabilisation time of 30 minutes;

3. the methodology for evaluating the effectiveness of microclimate provision systems in mineral raw material enrichment premises has been improved, which, unlike traditional separate control, comprehensively combines instrumental monitoring of temperature and humidity, gravimetric determination of dispersed impurities, and aerodynamic balance calculation for the actual configuration of the exhaust network (accounting for pressure losses up to 70 Pa);

4. the mathematical model for the formation of the production facility's thermal regime (based on perfect mixing), adapted to the conditions of the enrichment shop, has been improved, taking into account the variability of heat emissions from technological equipment (excess heat of over 24 kW) and the air exchange rate;

5. the scientific and applied principles for creating energy-efficient microclimate systems for enrichment production conditions have been further developed, consisting in the development of a comprehensive ventilation scheme based on a coaxial air duct with a seasonal adaptation mechanism using a combined thermal insulation mat, which, unlike existing solutions, ensures the simultaneous localisation of dust and gas emissions, controlled heat energy recovery in winter, and guaranteed protection against the overheating of supply air in summer;

6. the scientific and methodological principles of parametric monitoring and adaptive maintenance of ventilation and aspiration systems have been further developed, which, unlike traditional preventive maintenance approaches, are based on the integration of algorithms for the continuous control of thermal, aerodynamic, and gas-analytical parameters, enabling the preventive detection of aerodynamic imbalance and the minimisation of the risks of emergency situations.

The practical significance of the obtained results lies in:

- the development and engineering substantiation of a comprehensive ventilation and air purification system for the drying department of the enrichment

production (in particular, for the conditions of the Vilnohirs'k Mining and Metallurgical Plant branch);

- the determination of the required air exchange volumes based on thermal and dust-gas balances: 16,500 m³/h of exhaust and 15,000 m³/h of supply air while maintaining a 10% underpressure and an air exchange rate of 7.2 h⁻¹;

- the substantiation of the parameters for using a coaxial air duct for heat recovery and proving the feasibility of applying SC scrubbers for effective gas purification;

- the substantiation of technical solutions (protected by Ukrainian utility model patents No. 156625, No. 157215) that ensure the guaranteed maintenance of temperatures in the working zone at a level of 20–26 °C in the summer and 18–23 °C in the winter at a relative humidity of 60–70%, thereby normalising working conditions and improving energy efficiency at mining and metallurgical enterprises;

- the implementation of scientifically grounded results (analytical and mathematical models, comprehensive ventilation scheme) into the production practice of LLC "Imex Minerals" for technical audits and modernisation of microclimate systems at contracting enterprises of the mining and processing industry, as well as into the educational process of Kryvyi Rih National University for the training of occupational safety specialists.

In the first chapter of the dissertation, an analysis of the microclimate parameters and methods for their control in titanium-zirconium ore enrichment premises is performed, and the regulatory-legal and hygienic requirements for the working zone air quality are summarised. Based on a critical analysis of domestic and global scientific works, the effectiveness of traditional general exchange and mixed ventilation systems, air conditioning, and types of air ducts used in large-scale enrichment shops with intensive heat and dust emissions is evaluated. The main technical and operational limitations of existing solutions are identified, namely high energy consumption, significant aerodynamic losses, reduced air purification efficiency, and the difficulty of their adaptation to variable technological conditions.

This has made it possible to substantiate the feasibility of developing more effective, adaptive air exchange systems to stabilise working conditions and to define the research tasks.

To achieve the set aim, it is necessary to solve the following tasks:

1. To analyse the conditions of microclimate formation and evaluate the comprehensive impact of technological equipment (dust, gas, and heat emissions) on the air environment of titanium-zirconium ore enrichment shops.
2. To conduct field studies of actual microclimate parameters and establish analytical regularities of the working zone air dustiness dynamics depending on the operating modes of the drying equipment.
3. To develop a mathematical model of heat exchange processes in a combined exhaust-supply air duct to determine its thermophysical characteristics.
4. To perform mathematical modelling of the thermal regime formation in the production facility, taking air exchange into account.
5. To substantiate the necessary air exchange volumes based on thermal and dust-gas factors and select rational technical solutions for the purification of aspiration air.
6. To develop a comprehensive ventilation and aspiration scheme for the drying shop based on a coaxial air duct and determine the regulations for its technical maintenance.

In the second chapter of the work, a study of the microclimate formation processes and the propagation of harmful impurities in the premises of the mining and enrichment production drying shop is carried out. The impact of technological equipment on the air environment is analysed. The methodological approach to determining the concentration of harmful substances and evaluating ventilation effectiveness has been improved. An analytical model of the working zone air dustiness dynamics near the rotary dryers has been developed. It was established that the joint operation of the units increases dustiness by 16–34%, which requires the optimisation of aspiration modes.

In the third chapter, the results of mathematical modelling of heat exchange processes in the working premises are presented. A mathematical model of a combined exhaust-supply air duct of the coaxial type, functioning as a counterflow heat exchange apparatus, has been developed. Solving the system of differential equations using Bernoulli's method allowed for analytically establishing the flow temperature dynamics and determining the system's thermal stabilisation time at a level of 30 minutes. The mathematical model for the formation of the production facility's thermal regime based on perfect mixing, taking into account variable heat loads, has been improved. The second scientific proposition has been formulated.

In the fourth chapter, measures for improving working conditions in the drying shop are substantiated. The calculation of the required air exchange based on thermal and gas-dust factors has been performed. The feasibility of applying conical scrubbers with absorption cassettes for highly efficient air purification is proven. An innovative comprehensive aspiration and purification scheme using a coaxial air duct for the heat recovery of exhaust gases has been developed. Adaptive management of the combined air duct's temperature regime using a combined thermal insulation mat during the warm period of the year has been substantiated. A regulation for the technical maintenance of the system has been established.

In conclusion, a theoretical generalisation and a new solution to a relevant scientific and practical task regarding the provision of safe and energy-efficient working conditions in titanium-zirconium ore enrichment facilities are provided. The effectiveness of the developed comprehensive engineering scheme of ventilation and aspiration with an adaptive control function and coaxial heat recovery is confirmed.

Keywords: microclimate, air exchange, working conditions, humidity, ventilation, dust, air temperature, ore enrichment, titanium-zirconium ores, ventilation units, heat load, air duct, occupational safety, energy efficiency, heat recovery.

Список публікацій здобувача:

- **в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Обґрунтування вибору системи очищення та кондиціонування аспіраційного повітря барабанних сушарок при збагаченні титано-цирконієвих руд. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2026. 42(1). С. 71–78. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.42-1.2026.71-78> (Фахове видання категорії Б)

2. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інтегрована система адаптивного керування тепловологісним режимом промислових приміщень на базі коаксіальної рекуперації та багатошарової ізоляції. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2026. Вип. 57. С. 40–58. (Фахове видання категорії Б)

3. Lapshyn O. Ye., Yaroshenko H. M. Optimisation of air exchange and heat transfer using coaxial air ducts. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2025. Vol. 23, No. 1. P. 10–20. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2025-1-23-10-20>. (Фахове видання категорії Б)

- **які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

4. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інноваційний підхід до вентиляції промислових приміщень шляхом інтенсифікації повітрообміну сумісним повітроводом в робочих зонах. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 2024)*. Кривий Ріг, 2024. С. 34. URI: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6960>;

5. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інженерні підходи до керування мікрокліматом у виробничих приміщеннях: моделі, розрахунки, результати. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 2025)*. Кривий Ріг, 2025. С. 82. URI: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/7265>.

6. Ярошенко Г. М. Моделювання теплових процесів як засіб підвищення безпеки та енергоефективності виробничих приміщень. *Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.*

(Черкаси, 12–13 берез. 2026 р.). Черкаси, 2026. С. 246–247.
<https://bk.chdtu.edu.ua/konferencziyi/>.

7. Ярошенко Г. М. Заходи щодо поліпшення умов праці при термічній обробці мінеральної сировини. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки*: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Дніпро, 28–29 квіт. 2026 р.). Дніпро, 2026. С. 68–69.

8. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Дослідження повітрообміну як чинника формування мікроклімату у приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд. *Наука, промисловість, суспільство*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 27–29 трав. 2026 р.). Кривий Ріг, 2026. С. 25.
<https://www.knu.edu.ua/storage/files/.pdf>.

9. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Удосконалення теплоізоляційного мату для зниження теплонадходжень від нагрітих поверхонь промислового обладнання. *Наука, промисловість, суспільство*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 27–29 трав. 2026 р.). Кривий Ріг, 2026. С. 83.
<https://www.knu.edu.ua/storage/files/.pdf>.

- **які додатково відображають наукові результати дисертації:**

10. Патент 156625, Україна, МПК E21F 1/00 (2024.07). Спосіб повітрообміну в промислових приміщеннях. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Гацький А. К., Ярошенко Г. М.; винахідники та володільці: Криворізький національний університет; № u202400825; заявл. 19.02.2024; опубл. 17.07.2024, Бюл. № 29.

11. Патент 157215, Україна, МПК E21F 1/00 (2024.09). Система для вентиляції промислових приміщень. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Гацький А. К., Ярошенко Г. М.; винахідники та володільці: Криворізький національний університет; № u202400849; заявл. 19.02.2024; опубл. 18.09.2024, Бюл. № 38.

ЗМІСТ

ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З НОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ.....	26
1.1. Загальні вимоги до мікроклімату робочої зони промислових підприємств ..	26
1.1.1. Нормативно-правові та гігієнічні вимоги до мікроклімату і якості повітря робочої зони	26
1.1.2. Методи контролю та оцінки параметрів мікроклімату і повітряного середовища	28
1.1.3. Існуючі системи вентиляції та типи повітропроводів у приміщеннях збагачувальних фабрик	31
1.2. Аналіз результатів світових наукових досліджень з мікроклімату промислових приміщень	35
1.3. Аналіз результатів вітчизняних наукових досліджень з мікроклімату промислових приміщень	39
1.4. Постановка проблеми, мета та завдання дослідження.....	42
Висновки до розділу	45
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК І ТЕПЛООБМІНУ В ПРИМІЩЕННЯХ СУШИЛЬНОГО ЦЕХУ ГІРНИЧО- ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	47
2.1. Аналіз технологічного обладнання що впливає на мікроклімат робочої зони	47
2.2. Процес виділення шкідливих домішок при перевантажуванні та транспортуванні сировини.....	51
2.3 Процес виділення шкідливих домішок при основних процесах переробки сировини	58
2.4. Методика визначення концентрації шкідливих речовин та ефективності вентиляційних систем у виробничому приміщенні.	64
2.5. Аналітичне моделювання динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок	72

Висновки до розділу	78
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В РОБОЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ	80
3.1. Математичне моделювання сумісного повітропроводу.....	80
3.2. Математичне моделювання теплообміну в робочому приміщенні	105
Висновки до розділу	114
РОЗДІЛ 4 ЗАХОДИ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В СУШАРНОМУ ЦЕХУ ГІРНИЧО ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА	116
4.1. Обґрунтування вибору способу видалення шкідливих речовин і надлишкового тепла від барабанної сушарки.....	116
4.2. Вибір методу очищення та кондиціонування повітря, яке відводиться від барабанної сушарки.....	122
4.3. Розрахунок кількості повітря, що подається для відведення газоподібних шкідливих викидів і теплового навантаження.....	132
4.4. Розробка схеми аспірації та очищення повітря у приміщенні сушарного цеху	141
4.5. Адаптивне управління тепловим режимом сумісного повітропроводу з використанням комбінованого теплоізоляційного мату.....	145
4.6. Технічне обслуговування аспіраційної системи.....	148
Висновки до розділу	156
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	158
ЛІТЕРАТУРА	162
ДОДАТОК А.....	176
ДОДАТОК Б	178
ДОДАТОК В.....	180

ВСТУП

Актуальність роботи. Моніторинг мікрокліматичних параметрів у цехах збагачення титано-цирконієвих руд свідчить про систематичні відхилення від нормативів. Зокрема, перевищення концентрацій пилу у робочій зоні та нерегламентовані температурні і швидкісні режими повітря призводять до погіршення умов праці. У результаті роботи обладнання в теплий період температура повітря часто значно перевищує допустимі значення, а в холодний період – знижується нижче оптимальних значень температури. Несприятливі мікрокліматичні умови порушують теплообмін організму, знижують працездатність і підвищують ризик професійних хвороб. Відтак вдосконалення методів контролю та регулювання параметрів мікроклімату є актуальним завданням безпеки праці. Практична значущість теми підсилюється тим, що титанові руди мають велике економічне значення, а забезпечення їх безпечної переробки відповідає інтересам екологічної безпеки та стратегії сталого розвитку. Оптимізація вентиляції та зниження пилу в цехах сприяють підвищенню ефективності виробництва, покращенню стану здоров'я працівників і подовженню ресурсу обладнання.

Мета й завдання дослідження. Мета роботи полягає у теоретичному й експериментальному обґрунтуванні та вдосконаленні системи вентиляції в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд, що забезпечує нормативні параметри мікроклімату і підвищує безпеку праці.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати умови формування мікроклімату та оцінити комплексний вплив технологічного обладнання (пило-, газо- та тепловиділень) на повітряне середовище цехів збагачення титано-цирконієвих руд.
2. Провести натурні дослідження фактичних параметрів мікроклімату та встановити аналітичні закономірності динаміки запиленості повітря робочої зони залежно від режимів експлуатації сушильного обладнання.

3. Розробити математичну модель процесів теплообміну в сумісному відсмоктувально-припливному повітропроводі для визначення його теплофізичних характеристик.

4. Виконати математичне моделювання формування теплового режиму у виробничому приміщенні з урахуванням повітрообміну.

5. Обґрунтувати необхідні обсяги повітрообміну за тепловим і газопиловим факторами та вибрати раціональні технічні рішення для очищення аспіраційного повітря.

6. Розробити комплексну схему вентиляції та аспірації сушильного цеху на базі коаксіального повітропроводу та визначити регламент її технічного обслуговування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження виконано в межах наукової тематики Криворізького національного університету, а саме ініціативної НДР «Дослідження, розробка, впровадження заходів та засобів з підвищення стресостійкості та безпеки праці працівників промислових підприємств» (РК № 0122U201284). Тематика НДР передбачає розроблення організаційно-технічних і інженерних заходів, спрямованих на зниження виробничих ризиків у гірничо-металургійному комплексі, що безпосередньо корелює з метою дисертаційної роботи. Робота узгоджується з державними програмами підвищення безпеки праці на гірничих підприємствах та відповідає пріоритетам науково-технічного розвитку у регіоні.

Ідея роботи полягає у забезпеченні безпечних і енергоефективних умов праці в збагачувальних приміщеннях шляхом комплексного управління мікрокліматом, що інтегрує локальне відведення шкідливих викидів, рекуперацію теплоти в коаксіальних повітропроводах та раціональний повітрообмін.

Об'єктом дослідження є процес формування параметрів мікроклімату та стану повітряного середовища у виробничих приміщеннях збагачення мінеральної сировини.

Предметом дослідження є закономірності тепломасообміну, поширення пилогазових домішок та аеродинамічні параметри комбінованих систем вентиляції і місцевої аспірації сушильних цехів.

Методологія та методи дослідження. Методологічною основою дисертаційної роботи є системний підхід до вивчення процесів формування мікроклімату у виробничих приміщеннях, що поєднує теоретичні дослідження процесів тепло- і масопереносу з експериментальними вимірюваннями в реальних виробничих умовах гірничо-збагачувального комбінату.

Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплекс сучасних методів наукового пізнання, а саме:

1. Методи системного аналізу та наукового узагальнення – для вивчення технологічних особливостей обладнання, аналізу умов праці, джерел виділення шкідливих домішок та теплоти, а також критичної оцінки існуючих схем вентиляції та очищення повітря;

2. Експериментальні методи в натурних умовах – для визначення фактичних показників мікроклімату та стану повітряного середовища. Використано гравіметричний метод (за МУ 4436-87) із застосуванням аспіратора АЕР-4 та аналітичних ваг для оцінки масової концентрації пилу, а також методи термоанемометрії та гігрометрії (із використанням приладів testo 440 та testo 625) для вимірювання швидкості, температури й вологості повітряних потоків у робочій зоні та повітропроводах;

3. Методи емпіричного моделювання та апроксимації – для встановлення аналітичних залежностей динаміки запиленості повітря робочої зони у часі та залежно від кількості працюючого сушильного обладнання;

4. Математичне моделювання та методи розв'язання диференціальних рівнянь – для теоретичного опису теплообмінних процесів. Зокрема,

використано метод Бернуллі для інтегрування систем лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь першого порядку під час моделювання коаксіального рекуперативного теплообмінника у наближенні зосереджених параметрів, а також модель ідеального перемішування для прогнозування температурного режиму виробничого приміщення;

5. Методи прикладної термодинаміки, аерогазодинаміки та інженерного розрахунку – для складання теплового, масового і вологового балансів приміщення сушильного цеху, розрахунку необхідної кратності повітрообміну, обґрунтування геометричних та аеродинамічних параметрів розробленої системи аспірації, а також для вибору пилогазоочисного обладнання.

Наукова новизна дисертації полягає в наступному:

1) *вперше* розроблено аналітичну модель динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок, яка, на відміну від існуючих підходів, інтегрує коефіцієнти внутрішньозмінної нерівномірності та сумісної дії обладнання, кількісно доводячи зростання пилового навантаження на 16–34 % при паралельній роботі агрегатів, що дозволяє прогнозувати періоди максимального пилового навантаження та оптимізувати режими місцевої аспірації;

2) *вперше* розроблено математичну модель теплообміну для сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу коаксіального типу в умовах сушильного виробництва, яка, базуючись на розв'язанні систем лінійних диференціальних рівнянь методом Бернуллі, дозволяє аналітично визначати динаміку температур гарячого і холодного потоків у перехідних режимах із встановленим часом теплової стабілізації системи на рівні 30 хвилин;

3) *удосконалено* методику оцінювання ефективності систем забезпечення мікроклімату у приміщеннях збагачення мінеральної сировини, яка, на відміну від традиційного відокремленого контролю, комплексно поєднує інструментальний моніторинг температури та вологості, гравіметричне

визначення дисперсних домішок та аеродинамічний балансовий розрахунок для реальної конфігурації витяжної мережі (з урахуванням втрат тиску до 70 Па);

4) *удосконалено* математичну модель формування теплового режиму виробничого приміщення (на базі ідеального перемішування), адаптовану до умов цеху збагачення, що враховує змінність тепловиділень від технологічного обладнання (надлишкове тепло понад 24 кВт) та кратність повітрообміну;

5) *набули подальший розвиток* науково-прикладні засади створення енергоефективних систем мікроклімату для умов збагачувального виробництва, що полягають у розробці комплексної схеми вентиляції на базі коаксіального повітропроводу з механізмом сезонної адаптації за допомогою комбінованого теплоізоляційного мату, яка, на відміну від існуючих рішень, забезпечує одночасну локалізацію пилогазових виділень, керовану рекуперацію теплової енергії взимку та гарантований захист від перегріву припливного повітря влітку;

6) *набули подальшого розвитку* науково-методичні засади параметричного моніторингу та адаптивного обслуговування вентиляційно-аспіраційних систем, які, на відміну від традиційних планово-попереджувальних підходів, базуються на інтеграції алгоритмів безперервного контролю теплових, аеродинамічних та газоаналітичних параметрів, що дозволяє превентивно виявляти аеродинамічний дисбаланс та мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій.

Наукове значення. полягає у поглибленні теоретичних уявлень про закономірності тепло- і масопереносу в складному виробничому середовищі сушильних цехів. Розроблені математичні моделі та встановлені аналітичні залежності створюють наукове підґрунтя для точного прогнозування параметрів мікроклімату та оптимізації аеродинамічних характеристик вентиляційно-аспіраційних систем при змінних теплових і пилогазових навантаженнях.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та інженерному обґрунтуванні комплексної системи вентиляції та очищення повітря для сушильного відділення збагачувального виробництва (зокрема, для умов філії «Вільногірський ГМК»). На основі виконаних розрахунків теплового та пилогазового балансів визначено необхідні обсяги повітрообміну, обґрунтовано параметри використання коаксіального повітропроводу для рекуперації тепла та доведено доцільність застосування скрубєрів СК. Запропоновані технічні рішення захищені патентами України на корисну модель (Додаток А). Практичну цінність роботи підтверджено впровадженням її результатів у виробничу діяльність ТОВ «Імекс Мінералс» під час проведення технічного аудиту умов праці та розробки технічних завдань на модернізацію виробничих потужностей збагачення титано-цирконієвих руд (Додаток В). Крім того, розроблені математичні моделі та інженерні заходи інтегровано в освітній процес Криворізького національного університету при викладанні дисциплін «Аерологія гірничих підприємств» та «Проектування вентиляції промислових підприємств» для підготовки фахівців зі спеціальності І4 «Охорона праці» (Додаток В).

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на: щорічній міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2024 – 2025 рр.), міжнародній науково-практичній конференції «Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи» (Черкаси, 2026 р.), міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки» (Дніпро, 2026 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Наука, промисловість, суспільство» (Кривий Ріг, 2026 р.).

Особистий внесок автора полягає у визначенні мети та завдань дисертаційного дослідження, формулюванні наукових положень і висновків, проведенні аналізу наукових і технічних джерел за тематикою роботи, розробленні методичних підходів до дослідження процесів повітрообміну та

тепломасообміну у виробничих приміщеннях, виконанні теоретичних досліджень, розрахунків і моделювання, обробленні, аналізі та узагальненні отриманих результатів, а також формулюванні практичних рекомендацій за результатами проведених досліджень.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, результати досліджень та висновки, що виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Усі натурні експерименти, математичне моделювання, інженерні розрахунки теплових і пилогазових балансів, а також підготовка тексту дисертаційної роботи виконані автором самостійно.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у такому:

- у статті [1] здобувачу належить постановка загальної задачі дослідження, особисто виконано порівняльний аналіз класів газоочисного обладнання, обґрунтовано вибір скрубєрів та циклонів для умов збагачення титано-цирконієвих руд, а також проведено розрахунки необхідного ступеня уловлювання пилу та підготовлено текст рукопису;

- у праці [2] здобувачем запропоновано концептуальну ідею адаптивного керування мікрокліматом, розроблено математичну модель теплообміну в коаксіальному повітропроводі, виконано розрахунки ефективності рекуперації тепла та розроблено схему розміщення сенсорної мережі;

- у роботі [3] здобувачем самостійно обґрунтовано параметри застосування коаксіальних повітроводів для оптимізації теплопередачі та повітрообміну в промислових приміщеннях;

- у патентах України на корисну модель [10, 11] здобувачем особисто розроблено конструктивні елементи, виконано обґрунтування їхніх геометричних та аеродинамічних параметрів, а також підготовлено графічні матеріали для заявки.

Основні результати дисертації опубліковано в 11 роботах, зокрема: 3 – статті у наукових фахових виданнях України, 6 – тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, 2 – патенти на корисну модель України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 113 найменувань на 14 сторінках, 3 додатків на 7 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 182 сторінки, включаючи 25 рисунків та 13 таблиць.

Ключові слова: мікроклімат, повітрообмін, умови праці, вологість, вентиляція, пил, температура повітря, збагачення руд, титано-цирконієві руди, вентиляційні установки, теплове навантаження, повітропровід, безпека праці, енергоефективність, рекуперація тепла.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З НОРМУВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ

1.1. Загальні вимоги до мікроклімату робочої зони промислових підприємств

1.1.1. Нормативно-правові та гігієнічні вимоги до мікроклімату і якості повітря робочої зони

Мікроклімат виробничих приміщень є одним з визначальних чинників безпеки та працездатності персоналу гірничо-збагачувальних підприємств. В Україні гігієнічні вимоги до параметрів мікроклімату та якості повітря робочої зони регламентуються санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99, відповідно до яких нормуються температура, відносна вологість і швидкість руху повітря з урахуванням категорії важкості виконуваних робіт та пори року. Окремо встановлюються гранично допустимі концентрації пилу та шкідливих газових домішок, перевищення яких призводить до професійних захворювань та зниження працездатності. Умовно за межу між теплим і холодним періодами року прийнята температура зовнішнього повітря, що дорівнює 10 °С [1].

Мікроклімат у приміщеннях характеризується температурою повітря t_n , відносною вологістю повітря φ_n , швидкістю його руху v_n та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення. Сполучення цих параметрів, які забезпечують найкраще почуття людини в процесі праці, називають комфортними умовами. Нормативна база розрізняє оптимальні метеорологічні умови, які мають забезпечуватися автоматично регулюючими системами, і допустимі умови, які підтримуються системами вентиляції без автоматичного регулювання.

Вентиляція у виробничих приміщеннях промислових підприємств, зокрема збагачувальних фабрик, є ключовим елементом системи забезпечення

санітарно-гігієнічної безпеки. Специфікою збагачувальних приміщень є поєднання інтенсивних тепловиділень від технологічного обладнання, значних вологовиділень, пов'язаних із використанням води у процесах, а також підвищеної запиленості повітря. Допустимі та оптимальні параметри в обслуговуваній зоні (до 1,5–2,0 м від підлоги) встановлюються з урахуванням важкості праці [2].

Людина у цехах також виступає додатковим джерелом тепловологісних і газових виділень. За умов помірної температури організм людини виділяє від 40 до 75 г/год водяної пари [3]. Одночасно процеси дихання змінюють газовий склад повітря, що потребує організованого повітрообміну. Основними шкідливими чинниками, нейтралізація яких покладена на вентиляцію, є надлишкове тепло, волога, мінеральний пил та шкідливі газоподібні виділення. Для комплексної оцінки тепловологісного стану застосовують показники вологовмісту та ентальпії, що дозволяє коректно обґрунтовувати режими вентиляції [1, 4, 5, 6].

Міжнародна практика охорони праці ґрунтується на жорсткому нормуванні параметрів повітряного середовища. Наприклад, іспанський королівський указ (BOE-A-1997-8669) визначає для легких виробничих умов температуру 14–25 °C та відносну вологість 30–70% [7]. У США Національний інститут безпеки праці (NIOSH) акцентує увагу на загальнообмінній вентиляції (від 10 до 35 циклів на годину), що дозволяє знизити запиленість на 40–74 % [8]. У Китаї використовують комплексні моделі оцінки довкілля на фабриках збагачення, враховуючи шум, пил та мікроклімат [9]. У Південній Кореї «Закон про безпеку гірничих робіт» законодавчо забороняє працівникам втручатися в роботу вентиляційних установок, перетворюючи їх на критичний елемент безпеки [10].

Отже, міжнародна практика доводить необхідність синтезу нормативних вимог та ефективних інженерних рішень, що обумовлює необхідність аналізу фактичного стану забезпечення мікроклімату на гірничо-збагачувальних

підприємствах.

1.1.2. Методи контролю та оцінки параметрів мікроклімату і повітряного середовища

Підприємства збагачення руд характеризуються комплексним негативним впливом на працівників. Дослідження показують, що до основних факторів ризику належать запиленість, шум та шкідливі гази [11]. Відхилення мікрокліматичних умов супроводжується зниженням працездатності та підвищенням ризику травматизму [1, 12], тоді як їх нормалізація сприяє зниженню енерговитрат підприємства [13]. Проведення процесів термічної обробки мінеральної сировини потребує особливого контролю за концентрацією токсичних домішок у робочій зоні [14].

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 [2], у приміщеннях із можливим виділенням токсичних чи горючих речовин припливно-витяжна вентиляція функціонує безперервно. Оцінка мікроклімату здійснюється інструментальними засобами (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Прилади для моніторингу мікрокліматичних параметрів у виробничих приміщеннях

Параметр	Прилад для вимірювання
Температура повітря та поверхонь	Термометри (ртутні, електронні), термопари, термометри опору, пірометри (інфрачервоні)
Відносна вологість	Психрометри (Ассмана), гігрометри електронні, конденсаційні)
Швидкість руху повітря	Анемометри (крильчасті, чашкові, термоанемометри), кататермометри
Інтенсивність теплового випромінювання	Актинометри, радіометри, глобус-термометри (чорний кульовий термометр)
Комплексна оцінка мікроклімату	Мікрокліматичні станції (МКС-300, Testo, Trotec), автоматизовані системи моніторингу

Локалізація джерел забруднення є базовим заходом оптимізації. На

вузлах дроблення руди встановлюють місцеві витяжки та кожухи [15, 16, 17]. Це знижує навантаження на загальну вентиляцію. Для оцінки стану застосовуються автоматизовані системи моніторингу, які дозволяють керувати параметрами середовища [18].

Важливим проєктним критерієм є кратність повітрообміну n (1/год). У моделі добре перемішаного середовища її визначають як:

$$n = \frac{L}{V}, \quad (1.1)$$

де L — витрата повітря за припливом або витяжкою (беруть більшу), ($\text{м}^3/\text{год}$); V — ефективний об'єм зони, (м^3).

У перехідному процесі за відсутності внутрішніх джерел зміна концентрації шкідливих домішок та температури описується експоненційним законом [19, 20]:

$$C(t) = C_0 e^{-nt}, \quad T(t) - T_{\text{ст}} = (T_0 - T_{\text{ст}}) e^{-nt} \quad (1.2)$$

де $C(t)$ — концентрація домішки у повітрі в момент часу t , $\text{мг}/\text{м}^3$; C_0 — початкова концентрація домішки при $t=0$, $\text{мг}/\text{м}^3$; $T(t)$ — температура повітря в момент часу t , $^{\circ}\text{C}$; T_0 — початкова температура повітря при $t=0$, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{ст}}$ — усталене значення температури повітря, $^{\circ}\text{C}$; t — час, год; e — основа натурального логарифма; n — кратність повітрообміну, год^{-1} .

У практиці кратність повітрообміну зручно визначати методом «спаду» трасерного газу (CO_2) [19]:

$$n = -\frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{C_2 - C_{\text{пр.}}}{C_1 - C_{\text{пр.}}} \right), \quad (1.3)$$

де C_1 і C_2 — концентрації трасерного газу в моменти часу t_1 і t_2

відповідно, мг/м^3 ; $C_{\text{пр.}}$ — фонове, або зовнішнє, значення концентрації трасерного газу, мг/м^3 ; $\Delta t = t_2 - t_1$ — інтервал часу між двома вимірюваннями, год; $t_2 - t_1$ — моменти часу першого та другого вимірювань.

Для відведення надлишкового явного тепла $Q_{\text{над}}$ (Вт) об'ємна витрата припливу становить [21]:

$$L_t = \frac{Q_{\text{над}} \cdot 3600}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta t}, \quad \text{м}^3/\text{Год} \quad (1.4)$$

де $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$, $c_p \approx 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

А для забруднювачів масовий баланс має вигляд:

$$L(C_i - C_{\text{пр.}}) = S \Rightarrow \Delta C = C_i - C_{\text{пр.}} = \frac{S}{L} = \frac{S}{nV}, \quad (1.5)$$

де S — сумарна швидкість надходження домішки, мг/год . Звідси мінімально потрібна кратність для дотримання ГДК — $n \geq \frac{S}{V\Delta C_{\text{доп}}}$.

Для круглих припливних випусків на відстані близько 15 d(де d — діаметр сопла) сумарна витрата струменя зростає, а швидкість зменшується [22]. Зворотний процес — всмоктування — описується моделями точкового стоку:

$$v(r) = \frac{Q}{4\pi r^2} \Rightarrow v \sim r^{-2}, \quad (1.6.)$$

та лінійного стоку:

$$v(r) = \frac{q}{2\pi r} \Rightarrow v \sim r^{-1} \quad (1.7.)$$

Формули (1.6) та (1.7) є складовими частинами класичної теорії спектрів всмоктування, розробленої вченими у галузі промислової вентиляції [3]. Ці залежності математично описують закономірності формування та згасання полів швидкостей повітряного потоку перед витяжними отворами різної геометричної конфігурації.

Так, відповідно: $v(r)$ — швидкість руху повітряного потоку в розрахунковій точці на відстані r від витяжного отвору, м/с; Q — загальна об'ємна витрата повітря, що видаляється через круглий отвір, м³/с; q — питома витрата повітря, що припадає на 1 погонний метр довжини витяжної щілини, м³/(с·м); r — найкоротша відстань від центра або осі стоку до розрахункової точки повітряного простору, м; π — математична константа, що дорівнює 3,14. Спільний аналіз залежностей доводить аеродинамічну обмеженість загальнообмінної вентиляції та диктує необхідність максимального наближення аспіраційних укриттів до джерел виділення пилу і газів [21].

1.1.3. Існуючі системи вентиляції та типи повітропроводів у приміщеннях збагачувальних фабрик

На збагачувальних фабриках інтенсивні процеси подрібнення та сушіння спричиняють теплові навантаження, що вимагає організованого повітрообміну. Природна вентиляція (інфільтрація та аерація) не дозволяє гарантовано дотримуватися санітарних норм у виробничих цехах, тому застосовується переважно механічна вентиляція.

Загальнообмінна вентиляція подає свіже повітря у весь об'єм приміщення (до 10–35 обмінів на годину), що вирівнює температурне поле [23, 24].

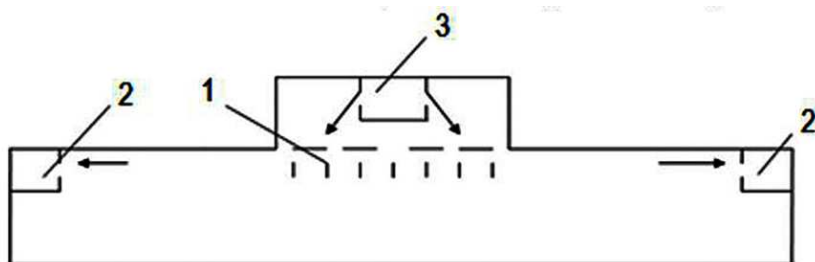


Рисунок 1.1. Схема загальнообмінної вентиляції:

1 – перфорований стельовий повітророзподільник припливного повітря; 2 – система видалення відпрацьованого повітря; 3 – припливний вентиляційний канал

Місцева вентиляція (витяжні зонти, аспірація) уловлює забруднення до їх поширення.

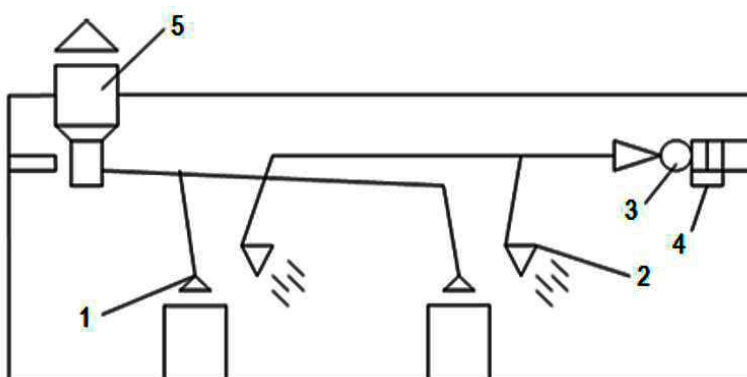


Рисунок 1.2 Схема місцевої вентиляції:

1-витяжні зонти над місцями виділення шкідливих компонентів; 2 – приточні повітряні душки до робочої зони; 3 – вентилятор; 4 – рекуператор (калорифер); 5 – витяжний агрегат вентиляції

Будь-яка витяжна система з часом забруднюється, зростають аеродинамічні втрати тиску. Сучасні дослідження вказують на критичну важливість профілактичного обслуговування аспіраційних мереж для

підтримання їхньої енергоефективності [25]. Для захисту приміщень від надходження зовнішнього повітря через транспортні прорізи використовують повітряні завіси. Їхня ефективність безпосередньо залежить від балансу витрати повітря, кута нахилу струменя та геометрії щілини випуску [26].

Змішані системи (рис. 1.3) є найбільш ефективними, поєднуючи загальнообмінний приплив та локальні витяжки.

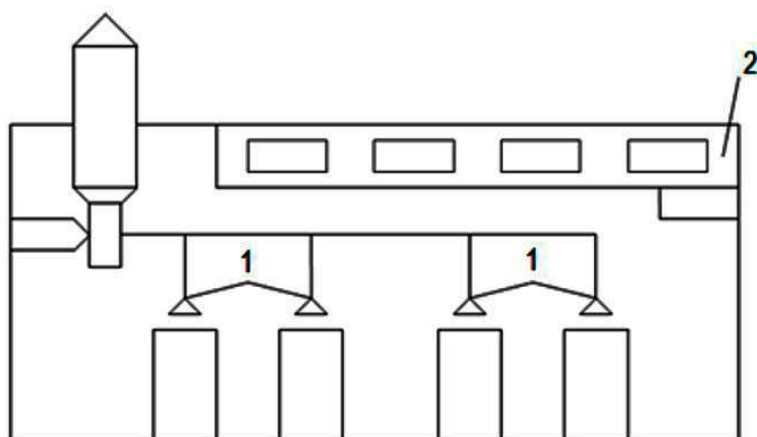


Рисунок 1.3 Схема змішаної вентиляції: 1 – місцева система витяжного повітря;
2 – загальнообмінна система припливу повітря

Системи кондиціонування дозволяють автоматично підтримувати задані параметри мікроклімату [27, 28]. Однак традиційні системи HVAC (опалення, вентиляції та кондиціонування) у гірничій промисловості характеризуються високим енергоспоживанням та значними втратами тиску [29].

Для локального захисту працівників від перегріву використовують повітряні душі [30]. На рис. 1.4 наведено їх схему.

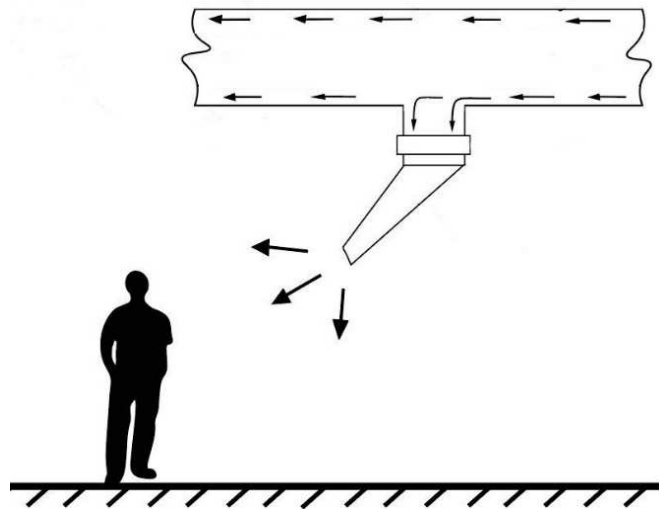


Рисунок 1.4 Схема подачі свіжого повітря через душувальний патрубок

У процесі експлуатації ефективність вентиляції падає через налипання пилу [31]. Значну роль відіграє конфігурація повітропроводів (рис.1.5).

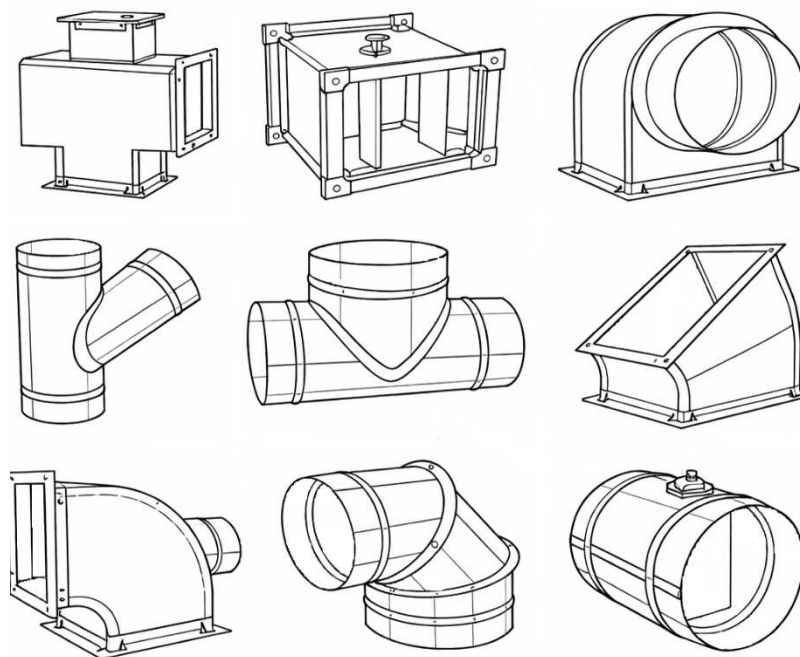


Рисунок 1.5 Варіанти з'єднань та перерезів повітропроводів

Аеродинамічно найвигіднішим є круглий переріз. Прямокутні канали

призводять до підвищених втрат тиску і турбулентності [32]. У гірничій галузі активно застосовуються корозійностійкі полімерні та склопластикові канали [33].

Аналіз схем організації повітрообміну [34, 35] та традиційних припливно-витяжних установок [36, 37] свідчить про наявність суттєвих обмежень, що полягають у значній матеріаломісткості, роздільному використанні повітроводів та високих енергозатратах на підігрів припливного повітря взимку.

1.2. Аналіз результатів світових наукових досліджень з мікроклімату промислових приміщень

Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях великого об'єму, зокрема в цехах гірничо-збагачувальних фабрик (ГЗФ), металургійних та гірничих комбінатах, є складною інженерною та науковою задачею. Специфіка таких об'єктів полягає у наявності потужних джерел тепловиділень, значних обсягів пилогазових викидів від технологічного обладнання (дробарок, млинів, флотаційних машин тощо) та складній геометрії внутрішнього простору. Світова наукова спільнота приділяє значну увагу питанням оптимізації вентиляції та кондиціонування у таких умовах, проте багато аспектів залишаються дискусійними.

Для приміщень великої висоти, типових для головних корпусів збагачувальних фабрик, традиційні схеми змішувальної вентиляції часто є енергозатратними та неефективними. Значний інтерес становлять дослідження систем на основі високошвидкісних струменів. Так, у роботі Zhang J. та ін. [38] досліджено систему опалення на значні відстані за допомогою високошвидкісних струменів. Незважаючи на доведену ефективність подачі повітря, автори не враховують наявність великогабаритного обладнання, що створює аеродинамічні опори у реальних цехах. Схожа проблема притаманна і

дослідженню Ye X. та ін. [39], які порівнюють енергоспоживання настилаючих струменів та змішувальної вентиляції. Хоча настилаючі струмені показують кращу енергоефективність, їх застосування на ГЗФ може призвести до вторинного пилоутворення з підлоги цеху.

Фундаментальні аеродинамічні властивості повітряних струменів у вентилятованих просторах глибоко вивчені у працях Kabanshi A. та співавторів [40–44]. Дослідниками детально описано процеси ежекції (захоплення) навколишнього повітря круглими вільними струменями [40, 41], а також вплив цих процесів на розповсюдження забруднювачів [42]. Критично оцінюючи ці роботи, слід зазначити, що використання низькошвидкісних струменів, вивчених ще у базовому дослідженні Todde V. та ін. [43], або систем злипаючих струменів, досліджених Svensson K. [44], є перспективним для створення локальних чистих зон для персоналу комбінатів. Проте, взаємодія таких струменів із потужними конвективними потоками від нагрітих агрегатів потребує додаткового вивчення. Моделі проникнення струменів крізь теплові плюми (стовпи), запропоновані Wang X. [45], та дослідження теплової стратифікації при високих імпульсах припливного повітря [46] частково заповнюють цю прогалину, але потребують адаптації для умов багаторушного розташування обладнання. Крім того, Tian X. та Lin Z. [47] пропонують моделі для прогнозування персоналізованого комфорту у стратифікованих середовищах, що є перспективним для автоматизації робочих місць операторів ГЗФ. Але обчислювальна складність таких моделей, заснованих на алгоритмах машинного навчання стримує їх практичне впровадження.

Розташування джерел тепла критично впливає на формування мікроклімату, що підтверджено регресійним аналізом Cho Y. та Awbi H. B. [48]. Для об'єктів з природною вентиляцією і високотемпературними джерелами тепла (наприклад, сушильні відділення комбінатів) актуальним є підхід Wang Y. та ін. [49], які розробили методику оцінки теплового середовища.

Проблема локалізації забруднювачів детально розглядається у світовій

літературі. Zhao X. та Yin Y. [50] наводять комплексний огляд стратегій вентиляційного контролю в промислових цехах, наголошуючи на важливості комбінування загальнообмінної та місцевої вентиляції. Експериментальне обґрунтування ефективності місцевих витяжних зонтів зменшеного масштабу наведено у праці Huang Y. та ін. [51]. Разом з тим, у специфічних умовах гірничих підприємств, де використовується мокре збагачення або знепилювання рідиною, виникає потреба у вивченні поведінки крапель. У цьому контексті нетиповим, але вкрай важливим є математичне моделювання кристалізації та замерзання крапель у потоці повітря, здійснене Dong P. та ін. [52]. Хоча робота орієнтована на штучне снігоутворення, запропонований фізико-математичний апарат є цінним для проєктування систем водяного пилоподавлення в неопалюваних перевантажувальних вузлах та галереях комбінатів у зимовий період.

Умови праці на ГЗФ та у підземних виробках часто характеризуються поєднанням високої температури та вологості. Фундаментальним критерієм оцінки такого дискомфорту залишається індекс Humidex, запропонований Masterton J. M. та Richardson F. A. [53], який досі є базою для багатьох сучасних нормативів. Вплив високої температури та вологості на організм людини в екстремальних умовах (наприкладі шахтних камер схову) доведено Li J. та ін. [54], що підтверджує необхідність жорсткого контролю вологості.

Процеси конденсації вологи з потоків повітря активно досліджуються у напрямку створення систем генерації питної води [55, 56]. Хоча автори Ahamed M. [55] та Teke K. [56] фокусуються на отриманні води, досліджені ними термодинамічні цикли є абсолютно релевантними для розробки високоефективних промислових осушувачів повітря для цехів флотації чи фільтрації, де надлишкова волога руйнує будівельні конструкції. Глибше фізику крапельної конденсації з конвективного потоку вологого повітря моделюють Zheng S. та співавтори [57], результати яких можуть бути використані для розрахунку рекуператорів тепла у витяжних системах

збагачувальних фабрик.

Оскільки мікроклімат підземних рудників є ще більш екстремальним, ніж поверхневих комбінатів, досвід шахтної аерології є безцінним. Комплексна оцінка мікроклімату та функціонування систем охолодження в польських вугільних шахтах представлена у фундаментальних працях Szlāzak N. та Obraca J. D. [58, 59]. Азійський досвід оцінки кліматичних ризиків та впровадження рішень для покращення умов праці у глибоких шахтах розкрито у дослідженнях Truong Tien Q. [60] (В'єтнам) та Nguyen Q. [61]. Перехід до високоавтоматизованих та цифровізованих гірничих підприємств глибокого закладення у Китаї, описаний Han Q. [62], демонструє зміщення фокусу на ергономіку та людський фактор в управлінні тепловим середовищем.

Сучасним світовим трендом, який поки що недостатньо реалізований на вітчизняних збагачувальних підприємствах, є впровадження алгоритмів штучного інтелекту. Показовою у цьому напрямку є остання робота Saleem H. A. (2025) [63], де запропоновано інтегрований підхід з використанням математичних моделей та машинного навчання для суттєвого зниження енергоспоживання вентиляційних систем з дотриманням принципів сталого розвитку гірничої справи.

Критичний аналіз світових наукових досліджень свідчить про наявність потужного теоретичного базису в галузі аеродинаміки вентиляційних струменів, тепломасообміну та оцінки термічного дискомфорту. Проте, переважна більшість сучасних моделей побудована для ідеалізованих умов, приміщень комерційного призначення або глибоких шахт. Застосування цих теорій для умов великих цехів гірничо-збагачувальних фабрик та комбінатів — де наявне складне багатоярусне обладнання, одночасне виділення тепла, пилу та вологи, а також висока динамічність технологічних процесів — потребує розробки нових комбінованих математичних моделей та експериментального підтвердження. Саме подолання розриву між фундаментальними законами струминної вентиляції та практикою енергоефективного забезпечення

мікроклімату на об'єктах збагачення корисних копалин становить невирішену частину проблеми, якій присвячено дане дисертаційне дослідження.

1.3. Аналіз результатів вітчизняних наукових досліджень з мікроклімату промислових приміщень

Як свідчить аналіз, наведений у попередньому підрозділі, зарубіжна наука досягла вагомих результатів у розробці високоефективних систем нормалізації мікроклімату та впровадженні сучасних технологій його контролю. Водночас пряме запозичення іноземного досвіду для підприємств вітчизняного гірничо-металургійного комплексу часто ускладнюється відмінностями у кліматичних умовах, архітектурно-будівельних особливостях наявних виробничих будівель та специфікою вітчизняних технологічних процесів. Тому забезпечення нормативних мікрокліматичних умов на таких об'єктах, зокрема на збагачувальних фабриках, у великогабаритних виробничих цехах та комбінатах, є складною багатофакторною проблемою, що потребує окремої уваги до національного наукового доробку. Специфіка цих об'єктів полягає у значних об'ємах приміщень, наявності інтенсивних джерел тепло- та вологовиділень і високій запиленості середовища. Вітчизняними вченими накопичено значний досвід у вирішенні питань нормалізації мікроклімату з урахуванням місцевих умов, проте більшість фундаментальних праць історично орієнтована переважно на підземні гірничі виробки.

Безпосередньо оцінці мікрокліматичних умов праці на робочих місцях гірничо-збагачувальних фабрик присвячені дослідження Н. Ю. Швагер та М. В. Худика [64]. Авторами проведено детальний моніторинг стану робочої зони, однак робота носить переважно констатуючий характер. Критично оцінюючи ці результати, слід зазначити, що у дослідженні бракує розробки комплексних інженерних рішень для стабілізації мікроклімату в умовах динамічних змін технологічного процесу збагачення.

Важливим аспектом якості повітряного середовища на промислових об'єктах є його іонний склад. У роботі О. Тихенка та співавторів [65] ґрунтовно досліджено фактори деіонізації повітря. Хоча результати є цінними для покращення санітарно-гігієнічних умов в цехах, автори не розглядають питання термодинамічної взаємодії іонізованого повітря із системами загальнообмінної вентиляції збагачувальних фабрик.

Значний масив вітчизняних досліджень присвячений екстремальним умовам глибоких шахт, результати яких можуть бути частково адаптовані для наземних промислових комплексів. Фундаментальні підходи до удосконалення провітрювання та мікроклімату у вибоях глибоких шахт запропоновані колективом авторів В. К. Костенка та ін. [66, 67]. Дослідниками доведено ефективність нових схем вентиляції. Проте, запропоновані параметри розраховані на специфічну аеродинаміку підземних виробок і важко піддаються масштабуванню на великогабаритні виробничі приміщення збагачувальних фабрик. Певною мірою дотичними до питань управління повітряними потоками є також дослідження В. К. Костенка та співавторів. [68] щодо параметрів швидкозведених вибухостійких перемичок, які дозволяють ефективно перерозподіляти вентиляційні струмені в аварійних режимах. Однак для систем повсякденного кондиціонування цехів ці рішення є надлишковими.

Окремий науковий напрям, який активно розвивався школою О. О. Лапшина, стосується використання шахтних вод та спеціальних технологій для нормалізації мікроклімату [69, 70]. Запропоновані системи кондиціонування повітря на глибоких горизонтах [71] та застосування водоповітряного форсункового охолодження [70] демонструють високу енергоефективність. Водночас використання неочищених шахтних вод в системах вентиляції наземних цехів та збагачувальних фабрик обмежене через ризики корозії обладнання та специфічні санітарні вимоги. Крім того, підходи щодо нормалізації мікроклімату шляхом заповнення виробленого простору

твердіючою закладкою [73], маючи високу ефективність для підземних умов, є абсолютно непридатними для наземних промислових приміщень.

Важливу роль у проектуванні систем мікроклімату відіграє математичне моделювання. Н. М. Беляєвим та Т. І. Русаковою [74] розроблено математичну модель процесу вентиляції тупикової виробки, а О. О. Лапшиним і Е. В. Серебренниковим [75] – модель температурних режимів повітря, насиченого водяними парами, при охолодженні. Критичний аналіз цих праць показує, що побудовані моделі базуються на одновимірних або двовимірних наближеннях. Для моделювання мікроклімату в багатоярусних цехах збагачувальних фабрик, де присутні складні конвективні потоки від теплового обладнання, ці моделі потребують суттєвого ускладнення та переходу до 3D CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics – гідрогазодинаміки).

Щодо локальних рішень, на особливу увагу заслуговують дослідження В. П. Корбута та С. Г. Рибачова [76], якими експериментально обґрунтовано використання дворівневого повітряно-струминного огородження для відкритих промислових ванн. Це рішення є вкрай ефективним для конкретних ділянок флотації чи мокрого збагачення на комбінатах. Однак такі локальні укриття повинні розглядатися не ізольовано, а в комплексі із загальнообмінною вентиляцією. У цьому контексті корисними є результати досліджень О. Возняка та співавторів [77], які вивчили фізичні моделі фасонних частин систем вентиляції в особливих умовах. Тим не менш, акцент у роботі зроблено на аеродинамічному опорі, а не на тепломасообмінних процесах.

Враховуючи сучасні тенденції діджиталізації виробництва, найбільш перспективним напрямом є перехід до автоматизованого управління мікрокліматом. В. Євсєєв та І. Голод [78] здійснили змістовний огляд еволюції підходів до інтелектуального контролю мікроклімату в промислових середовищах на базі кіберфізичних систем. Попри високу наукову цінність запропонованих концепцій, у роботі не враховано специфіку агресивних середовищ гірничо-збагачувальних комбінатів (висока запиленість, вібрації),

що суттєво обмежує надійність роботи сенсорних мереж кіберфізичних систем на практиці.

Критичний аналіз вітчизняних наукових публікацій свідчить про наявність ґрунтовної теоретичної та практичної бази у сфері нормалізації мікроклімату. Однак переважна більшість досліджень (зокрема [66–72, 74]) сфокусована на специфіці глибоких шахт і підземних виробок. Питання ж забезпечення стабільного мікроклімату у великогабаритних цехах наземних гірничо-збагачувальних фабрик і комбінатів висвітлено фрагментарно ([64, 75]). Існує гостра наукова та практична потреба у розробці комплексних моделей та інтелектуальних систем управління мікрокліматом, які б враховували сумісний вплив потужних джерел тепловиділень, значних об'ємів приміщень збагачувальних фабрик та специфіки їхнього технологічного процесу.

1.4. Постановка проблеми, мета та завдання дослідження

Проведений аналіз сучасного стану проблеми забезпечення нормативних параметрів мікроклімату на промислових підприємствах свідчить про те, що незважаючи на значний світовий та вітчизняний науковий доробок, низка концептуальних та прикладних інженерних питань залишається невирішеною.

Більшість фундаментальних досліджень історично орієнтована на оптимізацію провітрювання глибоких шахт, підземних виробок або на підтримку мікроклімату в ідеалізованих умовах комерційних чи цивільних приміщень. Натомість наземні великогабаритні цехи гірничо-збагачувальних підприємств характеризуються складною просторовою геометрією, наявністю багаторушного технологічного обладнання, а також інтенсивними і часто одночасними виділеннями тепла, вологи та пилу. Застосування класичних теоретичних моделей для таких умов не дає достовірних результатів щодо розподілу температурних і швидкісних полів.

Існуючі традиційні змішані та загальнообмінні системи вентиляції в умовах збагачувальних фабрик виявляються надмірно енергозатратними та не завжди здатні забезпечити ефективну локалізацію шкідливостей і створення стабільно комфортних умов безпосередньо в робочій зоні персоналу. Відсутність комплексних математичних моделей тепломасообміну, які б враховували спільну дію технологічних джерел тепла, локальних витяжок (аспірації) та припливних струменів, суттєво стримує проєктування ефективних вентиляційних систем нового покоління.

Особливої актуальності та гостроти зазначена проблема набуває для підприємств зі збагачення титано-цирконієвих руд. Специфіка їхнього технологічного циклу, зокрема наявність потужних сушильних установок, процесів сепарації та транспортування матеріалу, формує жорсткі та високодинамічні теплові й пилові навантаження на повітряне середовище приміщень. Отже, існує об'єктивна науково-практична необхідність у подоланні розриву між існуючими фундаментальними законами струминної вентиляції та реальною практикою забезпечення енергоефективного мікроклімату на специфічних об'єктах збагачення рідкіснометалевих руд.

Наведені обставини визначають актуальність дисертаційної роботи, формують її спрямованість, мету та завдання.

Мета роботи полягає у теоретичному й експериментальному обґрунтуванні та вдосконаленні системи вентиляції в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд, що забезпечує нормативні параметри мікроклімату і підвищує безпеку праці.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати умови формування мікроклімату та оцінити комплексний вплив технологічного обладнання (пило-, газо- та тепловиділень) на повітряне середовище цехів збагачення титано-цирконієвих руд.

2. Провести натурні дослідження фактичних параметрів мікроклімату та встановити аналітичні закономірності динаміки запиленості повітря робочої зони залежно від режимів експлуатації сушильного обладнання.
3. Розробити математичну модель процесів теплообміну в сумісному відсмоктувально-припливному повітропроводі для визначення його теплофізичних характеристик.
4. Виконати математичне моделювання формування теплового режиму у виробничому приміщенні з урахуванням повітрообміну.
5. Обґрунтувати необхідні обсяги повітрообміну за тепловим і газопиловим факторами та вибрати раціональні технічні рішення для очищення аспіраційного повітря.
6. Розробити комплексну схему вентиляції та аспірації сушильного цеху на базі коаксіального повітропроводу та визначити регламент її технічного обслуговування.

Висновки до розділу

На основі виконаного аналітичного огляду нормативно-правової бази, а також результатів вітчизняних і світових наукових досліджень щодо стану нормалізації мікроклімату в промислових приміщеннях можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та якості повітряного середовища у великогабаритних цехах гірничо-збагачувальних підприємств є складною багатофакторною проблемою. Існуючі традиційні системи загальнообмінної та змішаної вентиляції в умовах інтенсивних і динамічних виділень тепла, вологи та мінерального пилу від технологічного обладнання виявляються надмірно енергозатратними та недостатньо ефективними для створення стабільно комфортних умов у робочій зоні персоналу.

2. Аналіз світового та вітчизняного наукового досвіду показав, що фундаментальні дослідження з аеродинаміки та тепломасообміну переважно зосереджені на ідеалізованих умовах приміщень цивільного призначення або на специфіці провітрювання глибоких підземних виробок. Питання ж забезпечення енергоефективного мікроклімату у багатоярусних наземних будівлях збагачувальних фабрик, які характеризуються складною геометрією простору та потужними технологічними тепловими плюмами, залишається висвітленим фрагментарно.

3. Доведено, що проєктування високоефективних вентиляційних систем нового покоління для гірничо-збагачувальної галузі суттєво стримується відсутністю комплексних математичних моделей (зокрема з використанням сучасного 3D CFD-моделювання), які б адекватно описували спільну дію технологічних джерел тепла, локальних систем аспірації та загальнообмінних припливних струменів.

4. Виявлено гостру науково-практичну потребу у розробці спеціалізованих рішень для підприємств зі збагачення титано-цирконієвих руд.

Специфіка їхнього технологічного циклу, що включає роботу потужних сушильних установок, формує інтенсивні теплові та пилові навантаження. Це вимагає пошуку нестандартних підходів до організації повітрообміну, зокрема дослідження теплофізичних характеристик і можливості застосування сумісних відсмоктувально-припливних (коаксіальних) повітропроводів.

5. На підставі виявлених нерозв'язаних проблем та прогалин у сучасних наукових дослідженнях обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано її мету – теоретичне й експериментальне обґрунтування та вдосконалення системи вентиляції в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд, – а також визначено конкретний комплекс завдань, спрямованих на її досягнення.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК І ТЕПЛООБМІНУ В ПРИМІЩЕННЯХ СУШИЛЬНОГО ЦЕХУ ГІРНИЧО- ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1. Аналіз технологічного обладнання що впливає на мікроклімат робочої зони

Збагачувальне виробництво титано-цирконієвих руд характеризується складним поєднанням механічних, теплотехнічних та аеродинамічних процесів. У зв'язку з цим, технологічне обладнання сушильного цеху доцільно розглядати не лише за їхнім прямим виробничим призначенням, а як єдиний комплекс, сумісна робота якого визначає фактичний температурно-вологісний режим, інтенсивність пилоутворення та напрямки переміщення конвективних потоків у робочій зоні.

Початковою стадією підготовки матеріалу до термічної обробки є механічне зневоднення — розділення твердої і рідкої фаз пульпи, яке здійснюється за допомогою стрічкових вакуум-фільтрів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики стрічкових вакуум-фільтрів

Параметри	Од. виміру	Л 1,6-0,5 / 3,2	Л 3,2-0,5 / 6,4
Площа фільтрування	м ²	1,6	3,2
Робоча довжина вакуум-камери	мм	3200	6400
Діаметр барабанів	мм	800	800
Хід натяжної барабана	мм	400	400
Розміри стрічки: ширина робоча ширина повна	мм	500 700	500 700
Швидкість руху стрічки	м / хв.	1,5-2,2	4,5-5.5
величина вакууму	кПа	30-40	30-40

Хоча ці агрегати не є прямим джерелом тепловиділень, вони відіграють ключову роль у стабілізації вологості продукту перед подачею до сушарок. Зменшення вмісту вологи на стадії фільтрування пропорційно знижує теплове навантаження на сушильні агрегати, скорочує питомі витрати теплоносія та обмежує інтенсивність пароутворення у робочому просторі.

Вирішальну роль у формуванні мікроклімату дільниці відіграють барабанні сушарки (табл. 2.2), у яких здійснюється інтенсивний тепло- і масообмін. У процесі термічної обробки формувальних пісків волога випаровується з поверхні та порового простору зерен, унаслідок чого у виробничий об'єм надходять значні кількості теплоти й водяної пари. Водночас механічне перемішування та пересипання висушеного матеріалу супроводжується активною емісією дрібнодисперсного пилу.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики барабанних сушарок

Параметри	Од. вимір.	Типорозмір		
		2,2x16	1,6x8	1,6x9,2
Діаметр	мм	2200	1600	1800
довжина	мм	16000	8000	9200
Продуктивність пальників по газу	мм ³	340x2	340	350
Кут нахилу барабана	град	3	3	3
Частота обертання барабана	мин.-1	4,5-5,5	2,5-3	3-4

Нерівномірність тепловиділення від корпусів сушарок, газоходів і зон вивантаження зумовлює утворення локальних конвективних струменів та температурних градієнтів, які ускладнюють стабілізацію мікроклімату [78]. За таких умов барабанні агрегати виступають головним генератором теплових навантажень і пилогазових викидів, а будь-які порушення герметичності технологічного тракту або недостатня ефективність місцевої аспірації призводять до неконтрольованого поширення пилу та перегрітого повітря по всьому приміщенню.

Поряд із сушильними агрегатами суттєвий вплив на стан повітряного

середовища мають транспортні засоби, за допомогою яких здійснюється подача, вертикальне переміщення та відведення матеріалу. До них належать стрічкові й скребкові конвеєри, ковшові елеватори, а також вузли завантаження і розвантаження сушильних установок. Технічні характеристики ковшових елеваторів наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічна характеристика стрічкових ковшевих елеваторів

№ п / п	Найменування параметрів	ЕЛГ-160	ЕЛГ-250	ЕЛГ-350	ЕЛГ-400
1.	Продуктивність, кг / сек: З глибоким ковшем З дрібним ковшем	4 2,4	14 9,8	22,8 15,5	39 26
2.	Ємність, л З глибоким ковшем З дрібним ковшем	0,6 0,35	1,4 0,8	4,0 2,7	6,3 4,2
3.	Швидкість руху, м / сек	1,1	1,4	1,4	1,73
4.	Ширина стрічки, мм	200	300	400	500
5.	Кількість прокладок стрічки	4	5-6	5-6	6-7
6.	Діаметр прив. барабана, мм	400	500	500	630
7.	Діаметр натяжної барабана, мм	320	400	400	630

Стрічкові ковшові елеватори призначені для вертикального транспортування насипних дрібнокускових і порошкоподібних матеріалів, хімічно неагресивних за температури до 60 °С; за вищих температур застосовуються термостійкі стрічки. З точки зору формування мікроклімату їх робота є важливою насамперед через вторинне пиловиділення у місцях пересипання, ударної взаємодії матеріалу з робочими органами та його розвантаження [79], [80].

За наявності висхідних теплих потоків, що формуються сушильними агрегатами, пилові виділення від транспортного обладнання активно переносяться в об'ємі приміщення, утворюючи локальні зони підвищених концентрацій завислих частинок. Отже, транспортні системи визначають просторову неоднорідність запиленості, а їх вплив на мікроклімат має розглядатися у взаємозв'язку з режимом роботи сушарок.

Окрему групу обладнання становлять системи тепlopостачання сушильних агрегатів, зокрема газові або твердопаливні пальники, теплообмінники та повітропроводи гарячого дуття. Саме вони формують енергетичну основу процесу сушіння та значною мірою визначають температурний режим дільниці. У разі нерівномірного розподілу теплових потоків у виробничому об'ємі виникають стійкі конвективні струмені, які задають напрямок переносу теплоти, водяної пари та пилових домішок.

Для локалізації шкідливих виділень та стабілізації параметрів повітряного середовища на дільниці застосовуються місцеві відсмоктувачі, аспіраційні укриття сушильних агрегатів і вузлів пересипання, а також системи загальнообмінної вентиляції. Місцева аспірація забезпечує вилучення пилу безпосередньо в місцях його утворення, тоді як загальнообмінна вентиляція виконує функцію видалення надлишкового тепла, часткового розбавлення домішок і вирівнювання температурно-вологісного режиму в робочій зоні.

З позицій сучасних наукових уявлень сушильне обладнання гірничо-збагачувальних виробництв доцільно розглядати як джерело поєднаного тепло-та масообміну, що формує нестационарні поля температури, швидкості руху повітря і концентрацій домішок у виробничому об'ємі. Наявність нагрітих поверхонь, локальних зон інтенсивного тепловиділення та турбулентних повітряних потоків ускладнює забезпечення рівномірного мікроклімату та знижує ефективність традиційних схем повітрообміну [64, 81]. У цих умовах теплообмін між поверхнями обладнання, повітрям приміщення та огорожувальними конструкціями набуває визначального значення для теплового стану робочої зони, що узгоджується з положеннями ISO 7730 щодо впливу теплового балансу на комфорт і допустимість умов праці [82, 83].

Таким чином, технологічне обладнання дільниці отримання формувальних пісків утворює єдиний функціональний комплекс, у межах якого вакуум-фільтри визначають початковий вологісний стан матеріалу, барабанні сушарки формують основне теплове навантаження та інтенсивність тепло-

масообміну, транспортні системи обумовлюють просторовий розподіл пилових виділень, а вентиляційно-аспіраційне обладнання регулює умови їх поширення та видалення. Саме тому подальше дослідження мікроклімату робочої зони має ґрунтуватися на комплексному аналізі взаємодії зазначених груп обладнання, а не на ізольованому розгляді окремих апаратів.

2.2. Процес виділення шкідливих домішок при перевантажуванні та транспортуванні сировини

У технологічній схемі збагачувального виробництва операції перевантажування та транспортування сировини належать до тих етапів, на яких безпосередньо формується якість повітряного середовища робочої зони. Переміщення сухих і зволжених мінеральних продуктів супроводжується руйнуванням агрегатів матеріалу, відривом дрібнодисперсних частинок від поверхні зерен, їх повторним підхопленням повітряними потоками, а в окремих випадках — надходженням газоподібних домішок із суміжного технологічного обладнання. У зв'язку з цим під час аналізу даного етапу доцільно зосереджувати увагу не лише на конструктивних особливостях транспортних засобів, а насамперед на механізмах утворення і поширення шкідливих домішок у місцях завантаження, пересипання, підйому та розвантаження матеріалу.

Для умов збагачувального виробництва Вільногірського гірничо-металургійного комбінату найбільше значення мають стрічкові транспортери, ковшові елеватори та трубопровідний транспорт, яким пульпа подається з кар'єру до відділення дезінтеграції через систему діаметром 630 мм [84–86]. Кожний із зазначених способів характеризується власним механізмом впливу на мікроклімат і склад повітря робочої зони. За сухого механічного переміщення основними забруднювачами є пил мінерального походження, тоді як при роботі допоміжного та енергетичного обладнання додатково можуть

надходити оксид вуглецю, діоксид азоту, а також аерозолі мінеральних масел [87, 88].

Найінтенсивніше виділення пилу спостерігається на вузлах пересипання матеріалу між конвеєрами, у місцях завантаження ковшових елеваторів, а також під час розвантаження транспортованого продукту в бункери, жолоби та приймальні ємності. Саме в цих точках поєднуються ударне руйнування частинок, абразивне зношування поверхонь, вільне падіння матеріалу і турбулентне збурення повітря, унаслідок чого формується локальне пилове хмароутворення. За наявності відкритих транспортних трас це пилове навантаження поширюється вздовж усього шляху руху сировини та створює протяжні зони вторинного пиловиділення.

Стрічкові конвеєри в умовах безперервного транспортування значних об'ємів сипкого матеріалу є технологічно доцільними, проте саме для них характерне інтенсивне пилоутворення в місцях пересипання, при просипах і відхиленнях стрічки від нормального режиму роботи. Ковшові елеватори, які забезпечують вертикальне переміщення продукту, зменшують займану площу транспортної системи, однак джерелами забруднення для них залишаються точки завантаження і вивантаження, а також негерметичність кожуха. У порівняльному аспекті пневматичний транспорт здатний зменшувати вторинне пиловиділення за рахунок замкненості траси, проте при розгерметизації системи він стає джерелом тонкодисперсного аерозолі, що тривалий час зберігається у зваженому стані, і, крім того, характеризується підвищеними енергетичними витратами [89]. Ланцюгові транспортери, які можуть застосовуватися в складних умовах експлуатації, як правило, меншою мірою сприяють руйнуванню матеріалу, однак потребують використання мастильних матеріалів, що зумовлює додатковий ризик потрапляння аерозолів мінеральних масел у повітря робочої зони [90, 91].

Трубопровідний транспорт і гідропереміщення пульпи суттєво знижують інтенсивність пиловиділення вздовж траси, оскільки матеріал переміщується в

замкненому рідинному потоці. Водночас при розвантаженні пульпи, її подальшому зневодненні, а також у місцях можливих витоків або розбризкування виникає інший комплекс виробничих чинників — підвищена вологість повітря, аерозольне зволоження навколишнього простору та зміна температурно-вологісного режиму. Отже, зміна способу транспортування не усуває проблему повністю, а трансформує механізм формування шкідливих домішок і умови їх поширення в робочому середовищі.

Інтенсивність виділення шкідливих домішок визначається не лише видом транспортного обладнання, а й гранулометричним складом сировини, її вологістю, температурою, висотою вільного падіння та швидкістю руху матеріалу. Зі зростанням частки дрібних фракцій і збільшенням висоти пересипання підвищується ймовірність переходу мінеральних частинок у завислий стан. Підвищена температура продукту та елементів обладнання активізує конвективний перенос домішок, тоді як низька вологість сприяє пилоутворенню, а надлишкова вологість ускладнює санітарний стан робочої зони через налипання матеріалу на конструкції та подальше вторинне забруднення під час очищення. Для концентратів і проміжних продуктів, що містять циркон, рутил, ільменіт, дистен-силіманіт і ставроліт, гігієнічне значення має не лише мінералогічний склад, а й дисперсність пилу та можливість надходження до повітря кварцовмісних фракцій.

Виробничі матеріали підприємства підтверджують, що формування несприятливих умов праці під час транспортування сировини пов'язане не тільки з власне пиловиділенням, а й із супутніми чинниками, що виникають при експлуатації транспортного та допоміжного обладнання. Так, за даними карти умов праці (рис. 2.1) для робочого місця слюсаря-ремонтника механослужби та енергослужби дільниці гравітації зафіксовано перевищення концентрації мінеральних нафтових масел до $5,5 \text{ мг/м}^3$ при нормативному значенні 5 мг/м^3 , причому тривалість дії цього фактора становила 75 % робочої зміни. Це свідчить про те, що джерелом хімічного навантаження в межах транспортних

ділянок можуть бути не лише продукти переробки, а й мастильні матеріали, які використовуються для обслуговування приводів, підшипникових вузлів та інших елементів транспортних механізмів.

КАРТА УМОВ ПРАЦІ № 79

Підприємство (організація, установа) ФІЛІЯ «ВІЛЬНОГІРСЬКИЙ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ» ПУБЛІЧНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «ОБ'ЄДНАНА ГІРНИЧО-ХІМІЧНА КОМПАНІЯ», 51700, Україна, Дніпропетровська обл., м. Вільногірськ, вул. Степова, буд. 1.

Виробництво

Цех (дільниця, відділ) Збагачувальне виробництво. Механослужба, енергослужба дільниці гравітації (на правах цеху).

Номер робочого місця 874

Професія (посада) Слюсар-ремонтник (черговий).

Код 7233

код по ЄТКД, КД, повне найменування

Номери аналогічних робочих місць 875 - 876

Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Дата дослідження	Нормативне значення (ГДР, ГДК)	Фактичне значення	ІІІ клас - шкідливі та небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора, % за зміну	Примітка
					1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³	19.10.22							
	1 клас небезпеки:								
	2 клас небезпеки:								
	3 клас небезпеки:								
	Масла мінеральні нафтові:		5	5,5	0,5			75	
	4 клас небезпеки:								

Рисунок 2.1. Картка умов праці для робочого місця слюсаря-ремонтника механослужби та енергослужби дільниці гравітації

Показовими є також результати оцінки факторів виробничого середовища на інших робочих місцях збагачувального виробництва. За даними карти умов праці старшого майстра дільниці гравітації (рис. 2.2 – а)) встановлено перевищення еквівалентного рівня шуму до 84 дБА при допустимому рівні 80 дБА, а також зниження температури повітря в робочій зоні до 10,2 °С при нормативному інтервалі 17–23 °С. На робочому місці концентраторника дільниці отримання формувальних пісків додатково зафіксовано перевищення концентрації діоксиду азоту до 3,5 мг/м³ при нормативі 2 мг/м³, вмісту пилу з кристалічним діоксидом кремнію до 4,3 мг/м³ при нормативному значенні 4 мг/м³, а також підвищення інтенсивності інфрачервоного випромінювання до 154–197 Вт/м² при нормативі 140 Вт/м². Наведені дані свідчать, що в реальних виробничих умовах процес транспортування і перевантажування сировини

супроводжується комбінованою дією пилових, газових, акустичних і теплових факторів, які взаємно підсилюють несприятливий вплив на працюючих.

Суттєвим є й те, що параметри мікроклімату впливають на подальше поширення домішок у робочому об'ємі. Зниження температури повітря та локальні повітряні потоки змінюють умови диспергування і перенесення частинок, тоді як теплові виділення від суміжного обладнання сприяють формуванню висхідних конвективних струменів. Тому оцінювати шкідливість транспортних операцій необхідно не ізольовано, а в загальному контексті функціонування виробничої ділянки, де механічне переміщення матеріалу поєднується з дією шуму, тепла, вологи і продуктів згоряння.

КАРТА УМОВ ПРАЦІ № 129

Підприємство (організація, установа) ФІЛІЯ «ВІЛЬНОГІРСЬКИЙ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ» ПУБЛІЧНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «ОБ'ЄДНАНА ГІРНИЧО-ХІМІЧНА КОМПАНІЯ», 51700, Україна, Дніпропетровська обл., м. Вільногірськ, вул. Степова, буд.1,
 Виробництво _____
 Цех (ділянка, відділ) Збагачувальне виробництво. Ділянка гравітації (на правах цеху).
 Номер робочого місця 992
 Професія (посада) Майстер старший.
 Код 1222.2

код по ЄТКД КД, повне найменування

Номери аналогічних робочих місць _____

Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Дата дослідження	Нормативне значення (ГДР, ГДК)	Фактичне значення	III клас - шкідливі та небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора, % за зміну	Примітка
					1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ 1 клас небезпеки: 2 клас небезпеки: 3 клас небезпеки: 4 клас небезпеки:	19.10.22							
2.	Пил переважно фіброгенної дії								
3.	Вібрація (загальна і локальна)								
4.	Шум (екв.)	19.10.22	80	84	на 4 дБА екв				16 2д
5.	Інфразвук								
6.	Ультразвук								
7.	Неіонізуючі випромінювання: - радіочастотний діапазон - діапазон промислової частоти - оптичний діапазон - електрична складова, кВ/м - магнітна складова, А/м								
8.	Мікроклімат у приміщенні: - температура повітря, °C - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	19.10.22							
			17-23	10,2	на 6,8°C			84	0,86 1д
			Не більше 0,3	0,2					
			75	72,0					

a)

Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу									
№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Дата дослідження	Нормативне значення (ГДР, ГДК)	Фактичне значення	III клас - шкідливі та небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора, % за зміну	Примітка
					1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ 1 клас небезпеки: 2 клас небезпеки: Марганець у зварювальних аерозолях при його вмісті до 20% 3 клас небезпеки: Азоту діоксид 4 клас небезпеки: Заліза оксид Вуглецю оксид	19.10.22							
			0,2	0,13					
			2	3,5	в 1,5 рази			85	0,85 1д
			6	5,7					
			20	17,0					
2.	Пил переважно фіброгенної дії Кремнію діоксид кристалічний при вмісті в пилі від 10 до 70%								
			4*	4,3	0,3				
3.	Вібрація (загальна і локальна)								
4.	Шум (екв.)	19.10.22	80	84	на 4 дБА екв				16 2д
5.	Інфразвук								
6.	Ультразвук								
7.	Неіонізуючі випромінювання: - радіочастотний діапазон - діапазон промислової частоти - оптичний діапазон - електрична складова, кВ/м - магнітна складова, А/м								
8.	Мікроклімат у приміщенні: - температура повітря, °С - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, % - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	19.10.22							
			15-21	13-17	2				
			Не більше 0,4	0,26					
			75	67,0					
			140	154-197 Вт/м ²	у межах 154- 197 Вт/м ²			85	0,85 1д

б)

Рисунок 2.2. Картки умов праці на робочих місцях: а) старшого майстра дільниці гравітації; б) концентраторника дільниці отримання формувальних пісків

Окремим аспектом санітарно-гігієнічної оцінки транспортування важких мінералів є необхідність радіаційного контролю продукції, що відвантажується. Для цирконового та рутилового концентратів така вимога обумовлена

наявністю природних радіонуклідів у мінеральній сировині, тому під час зберігання і транспортування необхідно підтверджувати відповідність продукції встановленим нормативам радіаційної безпеки. Наданий сертифікат радіаційної якості засвідчує, що для партії рутилового концентрату питома активність природних радіонуклідів становила 0,4 кБк/кг при допустимому рівні не більше 1,35 кБк/кг, а потужність еквівалентної дози гамма-випромінювання — 0,35 мкЗв/год при нормативному значенні не більше 1,0 мкЗв/год. Отже, у наведеному випадку транспортування продукції не супроводжувалося перевищенням показників радіаційної безпеки, однак саме наявність такого контролю є обов'язковою складовою безпечного обігу мінеральних концентратів.

Виробник/відправник/Експортер Manufacturer/Shipper/Exporter Філія "Вільногірський гірничо-металургійний комбінат" АТ "Об'єднана гірничо-хімічна компанія" вул. Степова 1, м. Вільногірськ, Дніпропетровська обл., Україна, 51700 Branch "Vilnohirs'k Mining and Metallurgical Plant" of Joint Stock Company "United Mining and Chemical Company" Stepova 1, Vilnohirs'k, Dnipropetrovska oblast, 51700, Ukraine		1 Сертифікат радіаційної якості Radiation Safety Certificate № 516 P від dated 17.01.2024	
2 Одержувач Consignee ESAB CZ s.r.o., clen koncernu			
3 Опис товару, марка, ТУ Description of the goods, Grade, концентрат рутиловий ТУ У -14-10-016-98 марка КРЖ Standard Reference			
4 Дані радіаційного контролю Data of Radiation Control			
Партія	Питома активність природних радіонуклідів А _{ef} , кБк/кг Specific activity of natural radionuclides A _{ef} , kBq/kg не більше 1.35	Потужність дози ПД, мкЗв/год Power of equivalent dose, mKzV/h не більше 1.0	
131-6	0.4	0.35	
Питома активність природних радіонуклідів А _{ef} визначається згідно з розділом 8 НРБУ, вимірюється гама-спектрометром "Прогрес", зав. №0377-Г, свідоцтво про повірку № П ІР 11003423, чинне до 03.10.2024р. Потужність дози (радіаційний фон на поверхні упаковок без урахування природного радіаційного фону в місці вимірювання, зумовлений вмістом природних радіонуклідів) вимірюється пристроєм дозиметром-радіометром "СТОРА-ТУ", зав. №1100453, свідоцтво про повірку №13-2/6731.1, чинне до 26.06.2024р. Свідоцтво визнання компетентності № К-30-ВЛ, чинне до 03.11.2026р.			
5 Вид пакування Kind of Packages	м'який контейнер разовий "біг-бер",	5B Вага нетто, т 5B Gross weight, t	22.000
6 Вид транспортних засобів та їх номери Kind of transport means and they numbers Автомобіль з причіпом			
АЕ6037КТ	АЕ3843ХФ		
Підпис уповноваженої особи ВТК, печатка Signature of Authorized Person, Stamp		Наталя ГОРБОВИЧ Особа, відповідальна за радіаційний контроль Environment Protection Service Tel/fel +380-5653-54277	

Рисунок 2.3. Сертифікат радіаційної якості на партію рутилового концентрату

Таким чином, процес виділення шкідливих домішок при перевантажуванні та транспортуванні сировини має багатofакторний характер і

визначається сукупною дією конструктивних особливостей транспортного обладнання, фізико-механічних властивостей матеріалу та параметрів виробничого середовища. Найбільш критичними з погляду забруднення повітря є вузли пересипання, зони завантаження і розвантаження конвеєрів та елеваторів, ділянки обслуговування транспортних механізмів, а також місця переходу від гідротранспорту до сухих операцій зневоднення і сушіння.

Зменшення негативного впливу транспортних операцій на умови праці повинно ґрунтуватися на комплексі взаємопов'язаних рішень, до яких належать герметизація транспортних трас і вузлів пересипання, укріття відкритих ділянок конвеєрів, мінімізація висоти вільного падіння матеріалу, застосування локальної аспірації та систем пилоуловлення, раціональне регулювання вологості сировини, використання мастильних матеріалів зі зниженим аерозольним впливом, а також виробничий контроль концентрацій пилу, діоксиду азоту, оксиду вуглецю, шуму, параметрів мікроклімату і радіаційного фону. Лише за умови такого комплексного підходу можна забезпечити зниження техногенного навантаження на повітря робочої зони та підвищити безпеку праці під час переміщення і перевантажування мінеральної сировини.

2.3 Процес виділення шкідливих домішок при основних процесах переробки сировини

Аналіз процесу виділення шкідливих домішок під час основних операцій переробки мінеральної сировини є необхідною складовою оцінювання умов праці у збагачувальному виробництві, оскільки саме на цій стадії формується сукупний вплив пилових, газоподібних і теплових факторів на повітря робочої зони. Для збагачувального виробництва Вільногірського ГМК характерним є поєднання дезінтеграції і знешламлювання, гравітаційного збагачення, сушіння, а також розділення колективного концентрату з використанням електричних і магнітних методів. На кожному з указаних етапів у повітряне середовище

можуть надходити шкідливі домішки у концентраціях, що змінюються залежно від типу обладнання, гранулометричного складу та вологості матеріалу, температурного режиму і ефективності вентиляції [92].

Найбільш інтенсивне первинне утворення мінерального пилу спостерігається під час дезінтеграції, класифікації та грохочення, коли механічний вплив на сировину супроводжується руйнуванням агрегатів матеріалу, відокремленням дрібних фракцій і переходом частинок у завислий стан. У таких умовах джерелом забруднення стають не лише безпосередньо робочі органи машин, а й ділянки розвантаження, пересипання та накопичення продукту. За наявності вібрації обладнання, нещільностей укриттів або недостатньої аспірації пил легко поширюється в межах робочого простору, а частина осілого пилу знову залучається до повітряного потоку внаслідок вторинного піднімання. Таким чином, механічне руйнування матеріалу, конвективне та турбулентне перенесення частинок, а також повторне пиловиділення з поверхонь формують стійкий осередок аерозольного забруднення робочої зони [93–95].

Під час грохочення та видалення глинистої складової зростає вміст дрібнодисперсних твердих частинок у повітрі, що погіршує санітарно-гігієнічні умови праці. Особливу небезпеку становлять тонкодисперсні фракції, здатні тривалий час перебувати у зваженому стані та проникати у верхні й нижні відділи дихальних шляхів. У цьому разі вирішальне значення мають ступінь висушеності матеріалу, інтенсивність механічного впливу та організація локального відсмоктування у вузлах обробки і сортування. Отже, саме процеси первинного руйнування та класифікації сировини слід розглядати як базове джерело пилового навантаження в технологічному циклі.

На етапі одержання колективного концентрату, а також під час його подальшого розділення електричними та магнітними методами, характер забруднення повітряного середовища визначається поєднанням механічного переміщення тонкодисперсного матеріалу, локального нагрівання окремих

вузлів обладнання та надходження у робочу зону мінерального пилу. Для даної стадії технологічного процесу найбільш типовими є домішки аерозольної природи, зокрема пил важких мінералів і частинки, що містять кристалічний діоксид кремнію, діоксид титану та інші компоненти мінеральної сировини. За умов недостатньої герметизації технологічних вузлів або порушення режимів аспірації зазначені домішки можуть накопичуватися у виробничому приміщенні та зумовлювати зростання інгаляційного ризику для працівників [93].

Окреме місце у формуванні шкідливих домішок посідають операції зневоднення і сушіння колективних концентратів у барабанних сушарках, де одночасно реалізуються процеси випаровування вологи, тепломасообміну та переміщення сухого матеріалу. На цій стадії до повітря робочої зони можуть надходити як мінеральний пил, так і газоподібні продукти згоряння природного газу. Найбільш імовірними компонентами газового забруднення є оксиди азоту, оксид вуглецю у разі неповного згоряння палива, а також оксиди сірки за наявності сірковмісних домішок у паливі. Одночасно сушильні агрегати виступають потужним джерелом надлишкових тепловиділень, які формують висхідні конвективні потоки, змінюють температурне поле приміщення та сприяють переносу домішок у суміжні робочі зони.

Результати оцінювання умов праці на робочому місці майстра зміни дільниці отримання формувальних пісків (рис. 2.4) підтверджують наявність несприятливих виробничих факторів, пов'язаних із функціонуванням сушильного та допоміжного обладнання. Як видно з рис. 2.4, фактичний рівень шуму досягає 82 дБА при допустимому значенні 80 дБА, а температура повітря в робочій зоні змінюється в межах 21,2-29,0 °C при нормативному діапазоні 19-25 °C. Це свідчить про поєднаний вплив шумового навантаження і надлишкового тепловиділення, який ускладнює забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та підвищує вимоги до ефективності вентиляційно-аспіраційних систем.

У доводочному відділенні, де здійснюється остаточне розділення та доведення концентратів до товарних монофракцій, виділення шкідливих домішок зумовлене насамперед переміщенням сухих концентратів, пересипанням матеріалу, роботою сепараційного обладнання та локальним перегріванням окремих технологічних вузлів. За таких умов у повітряне середовище надходять дрібнодисперсні частинки продукту, а за недостатньої кратності повітрообміну можливе їх накопичення у зоні дихання працівників. Отже, завершальні стадії переробки не усувають проблему забруднення повітря, а змінюють її характер – від переважно грубодисперсного пилу на початкових операціях до тонкодисперсних аерозольних домішок у сухих процесах доведення концентратів.

Таким чином, процес виділення шкідливих домішок при основних процесах переробки сировини має комплексний характер і формується під впливом як технологічних, так і аеродинамічних чинників. Для досліджуваного виробництва характерним є послідовне накладання пилових, газоподібних і теплових навантажень, коли кожна наступна стадія не лише генерує власні види забруднень, а й змінює умови поширення домішок, утворених на попередніх етапах.

Отже, на формування складу повітря робочої зони та параметрів мікроклімату під час основних процесів переробки сировини впливають такі основні чинники:

- 1) гранулометричний склад, вологість і сипкість сировини, які визначають її схильність до пиловиділення під час руйнування, класифікації та пересипання;

КАРТА УМОВ ПРАЦІ № 144

Підприємство (організація, установа) ФІЛІЯ «ВІЛЬНОГІРСЬКИЙ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ» ПУБЛІЧНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «ОБ'ЄДНАНА ГІРНИЧО-ХІМІЧНА КОМПАНІЯ». 51700, Україна, Дніпропетровська обл., м. Вільногірськ, вул. Стенова, буд.1.

Виробництво _____

Цех (дільниця, відділ) Збагачувальне виробництво. Дільниця отримання формувальних пісків.

Номер робочого місця 1011

Професія (посада) Майстер зміни.

Код 1222.2

код по ЄТКД, КД, повне найменування

Номери аналогічних робочих місць _____

Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Дата дослідже ння	Нормати вне значення (ГДР, ГДК)	Фактич не значення	III клас - шкідливі та небезпечні умови і характер праці			Триваліс ть дії фактора, % за зміну	Примі тка
					1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ 1 клас небезпеки: 2 клас небезпеки: 3 клас небезпеки: 4 клас небезпеки:	27.04.22							
2.	Пил переважно фіброгенної дії								
3.	Вібрація (загальна і локальна)								
4.	Шум (екв.)	27.04.22	80	82	на 2 дБА екв				16 дБ
5.	Інфразвук								
6.	Ультразвук								
7.	Неіонізуючі випромінювання: - радіочастотний діапазон - діапазон промислової частоти - оптичний діапазон - електрична складова, кВ/м - магнітна складова, А/м								
8.	Мікроклімат у приміщенні: - температура повітря, °C - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, % - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	27.04.22	19-25 Не більше 0,3 75	21,2-29,0 0,3-0,07 43,0-73,0	на 2,5-4,0 °C	відповідає до додатка 8 гігієнічної класифікації праці, але не нижче ступеня 3.1.			75 0,76 1д

Рисунок 2.4 - Картка умов праці на робочому місці майстра зміни дільниці отримання формувальних пісків

2) інтенсивність механічного впливу обладнання на матеріал, зокрема дезінтеграції, грохочення, сепарації та внутрішньоцехового переміщення

продуктів;

3) температурний режим сушильних агрегатів, повнота згоряння палива та величина надлишкових тепловиділень, що зумовлюють надходження газоподібних продуктів і формування конвективних потоків;

4) герметичність технологічного обладнання, стан укриттів, аспіраційних систем і загальнообмінної вентиляції, від яких залежить локалізація та видалення шкідливих домішок;

5) вторинне пиловиділення з поверхонь, а також аеродинамічна організація повітряного середовища у приміщенні, яка визначає перенесення, рециркуляцію та накопичення домішок у зоні дихання працівників.

На фабриці використовуються припливно-витяжні та загальнообмінні вентиляційні системи, а також аспіраційні установки для видалення пилу від технологічного обладнання. Передбачено аераційні ліхтарі та системи опалення з примусовою циркуляцією повітря. Однак навіть за умови періодичної перевірки ефективності вентиляції зберігається потреба у модернізації повітрообмінних і пилоуловлювальних систем, оскільки чинна схема не забезпечує повного усунення локальних зон підвищеної запиленості та теплового дискомфорту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію вентиляційних потоків в межах робочих зон, удосконалення локальної аспірації найбільш інтенсивних джерел пиловиділення, впровадження енергоефективних технологій регулювання мікроклімату, а також на розроблення адаптивних моделей прогнозування параметрів повітряного середовища на різних стадіях переробки. Реалізація таких заходів сприятиме зниженню шкідливого впливу виробничих факторів на працівників, підвищенню ефективності функціонування технологічного обладнання та поліпшенню санітарно-гігієнічних умов праці.

2.4. Методика визначення концентрації шкідливих речовин та ефективності вентиляційних систем у виробничому приміщенні.

У цьому підрозділі викладено методичний підхід до визначення концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони та до оцінювання ефективності вентиляційних систем у виробничому приміщенні дільниці отримання формувальних пісків. Структуру підрозділу побудовано відповідно до його назви. Спочатку наведено методику відбирання й аналізу проб повітря, далі — прилади для контролю параметрів мікроклімату та аеродинамічних характеристик повітряних потоків, після чого подано уточнений інженерний розрахунок місцевої відсмоктувальної вентиляції для барабанних сушарок з урахуванням фактичної конфігурації обладнання. Такий виклад дає змогу уникнути фрагментарності та безпосередньо пов'язує методику дослідження з предметом дисертаційної роботи — керуванням мікрокліматичними параметрами у виробничих приміщеннях.

Методичною основою гравіметричного визначення запиленості повітря прийнято МУ 4436-87, оскільки саме цей документ регламентує вимоги до відбирання проб, умов ізокінетичності, масового визначення пилу та отримання порівнюваних результатів для оцінювання стану повітря робочої зони. Відбирання проб виконували в межах робочої зони на висоті 1,5 м від рівня підлоги й на відстані не більше 1,0–1,5 м від місця перебування працівника. Для непостійних робочих місць контрольні точки вибирали в зонах, де працівник перебуває понад 50 % тривалості зміни. У кожній контрольній точці відбирали не менше п'яти проб; якщо розбіжність між результатами перевищувала 30 %, вимірювання повторювали.

Для масового методу відбирання пилу використовували серійні засоби контролю, а саме ежекційний аспіратор АЕР-4, алонжі (фільтроутримувачі) та аналітичні аерозольні фільтри АФА-ВП-10, призначені для визначення масової концентрації аерозолів. Перед початком відбору проб фільтри кондиціонували

та зважували на аналітичних вагах RADWAG AS 220.R2 PLUS з дискретністю 0,1 мг, після чого встановлювали їх у патрон-пилоприймач. Після пропускання через фільтр заданого об'єму повітря фільтр повторно зважували, а масову концентрацію пилу обчислювали за приростом маси. У місцях, де швидкість повітряного потоку перевищувала 1,5 м/с, забезпечували ізокінетичний режим відбирання проб шляхом добору насадки та витрати повітря через алонж.

$$C = (m_2 - m_1) / V_n, \quad (2.1)$$

де C — масова концентрація пилу, мг/м³; m_2 і m_1 — маса фільтра після та до відбору проби відповідно, мг; V_n — об'єм відібраного повітря, приведений до нормальних умов, м³.

Контроль параметрів мікроклімату та фактичної роботи вентиляції здійснювали за допомогою сучасних переносних приладів вентиляційного та санітарно-гігієнічного контролю. Для вимірювання швидкості руху повітря і визначення витрати у повітроводах доцільно застосовувати багатофункціональний прилад testo 440 з термоанемометричним зондом, який дає змогу визначати швидкість потоку, витрату повітря, температуру та відносну вологість у повітроводах. Для вимірювання температури й відносної вологості безпосередньо в робочій зоні можна використовувати зонд до приладу testo 440 або компактний термогігрометр testo 625 як дублюючий засіб контролю.

Ефективність вентиляційної системи оцінювали за відповідністю фактичних параметрів повітрообміну та мікроклімату реальній конфігурації сушильного відділення. Для цього порівнювали проєктну і фактичну витрати повітря, швидкість руху повітря в повітроводах, температуру, відносну вологість та вміст пилу в робочій зоні. За такого підходу вентиляція розглядається як елемент системи забезпечення мікроклімату, а не лише як

окрема аеродинамічна мережа. Перелік відповідних приладів та засобів вимірювання наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Прилади та засоби вимірювання, використані в методиці дослідження

Параметр / операція	Прилад або засіб	Призначення	Основні характеристики, суттєві для дослідження
Масовий відбір пилу	Аспіратор АЕР-4	Відбирання проб повітря через фільтр у заданому режимі витрати	Польовий відбір проб аерозолі у робочій зоні
Уловлювання пилу	Фільтри АФА-ВП-10	Осадження аерозольних частинок для подальшого гравіметричного визначення	Фільтри для вагового методу контролю аерозолів
Зважування фільтрів	Аналітичні ваги RADWAG AS 220.R2 PLUS	Визначення початкової та кінцевої маси фільтра	Найменша поділка 0,1 мг; максимальне навантаження 220 г
Швидкість і витрата повітря в повітроводах	testo 440 + термоанемометричний зонд 0635 1572	Вимірювання швидкості, витрати, температури й вологості в повітроводах	Діапазон швидкості 0...30 м/с; телескопічний зонд для роботи у вентиляційних каналах
Температура та відносна вологість у робочій зоні	testo 440 + зонд 0636 9732 / testo 625	Контроль температури та відносної вологості повітря у зоні перебування працівників	Температура та вологість вимірюються безпосередньо в робочій зоні

Фактичну швидкість повітря у вимірювальному перерізі розраховували за формулою:

$$v_{\text{сер}} = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_{\text{ф}}}} = 14,48 \text{ м/с} \quad (2.2)$$

де P_d – динамічний тиск, Па; ρ_ϕ – фактична густина нагрітого повітря у повітроводі, кг/м³.

Оскільки аспіраційне повітря, що видаляється від барабанних сушарок, є нагрітою газопиловою сумішшю, а середня температура прийнята на рівні 100 °С, його густина суттєво відрізняється від стандартної 1,2 кг/м³ для нормальних умов (20 °С). З урахуванням теплового розширення фактична густина розраховувалась за формулою $\rho_\phi = 353 / (273 + t)$ і становила 0,95 кг/м³. Після застосування температурної поправки середня фактична швидкість потоку в повітроводі склала $v_{\text{сер}} = 14,48$ м/с.

Тоді фактичний об'єм гарячого повітря, що видаляється від барабанної сушарки, розраховуємо за формулою:

$$Q_\phi = 3600 \cdot A \cdot v_{\text{сер}} = 3600 \cdot 0,22 \cdot 14,48 = 11468 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.3)$$

де Q_ϕ — фактична витрата повітря, м³/с; v — середня швидкість повітря у контрольному перерізі, м/с; A — площа поперечного перерізу повітроводу, м² (при діаметрі 0,53 м площа $A = 0,22$ м²).

Для порівняння параметрів аспірації із санітарно-гігієнічними нормативами та визначення її фактичної масової ефективності, знайдений об'єм гарячого повітря необхідно привести до нормальних умов ($t = 20$ °С, $\rho_n = 1,2$ кг/м³):

$$Q_n = Q_\phi \cdot \frac{\rho_\phi}{\rho_n} = 11468 \cdot \frac{0,95}{1,2} = 9078 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.4)$$

Виконані розрахунки доводять, що внаслідок теплового розширення повітря вентиляційна установка фізично переміщує 11468 м³/год об'єму, але її масова здатність видаляти пил еквівалентна лише 9078 м³/год повітря за

нормальних умов. Це призводить до прихованого зниження ефективності аспірації на 11 %.

Уточнений розрахунок вентиляції виконано для реальної схеми сушильного відділення, в якому встановлено три барабанні сушарки, з яких одночасно працюють дві, а третя перебуває в резерві. Для кожної працюючої сушарки прийнято окрему відсмоктувальну гілку довжиною 10 м і діаметром 0,4 м. Розрахункову швидкість повітря у відгалуженнях прийнято 4 м/с, що забезпечує транспортування запиленого повітря без надмірного зростання аеродинамічного опору та шуму.

$$A = \pi \cdot d^2 / 4 = 0,1257 \text{ м}^2 \quad (2.5)$$

$$Q_I = A \cdot v = 0,503 \text{ м}^3/\text{с} = 1810 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.6)$$

$$Q\Sigma = 2 \cdot Q_I = 1,006 \text{ м}^3/\text{с} = 3620 \text{ м}^3/\text{год} \quad (2.7)$$

Отже, за двох одночасно працюючих сушарок сумарна витрата становить 1,006 м³/с. Якщо на сумарній ділянці зберегти діаметр 0,4 м, швидкість зростатиме приблизно до 8 м/с, що для даної системи є небажаним через збільшення втрат тиску та шуму. Тому для колекторної ділянки доцільно прийняти діаметр 0,5 м, за якого середня швидкість становитиме близько 5,12 м/с, тобто залишатиметься в прийнятному діапазоні для витяжних систем виробничих приміщень [11].

Розрахунок втрат тиску виконано за формулою Дарсі–Вейсбаха з урахуванням втрат на тертя та місцевих опорів. Оскільки транспортується нагріта газопилова суміш температурою 100 °С, приймали фактичну густину $\rho_f = 0,95 \text{ кг/м}^3$ та кінематичну в'язкість $\nu = 23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для відгалуження діаметром 0,4 м і швидкості 4 м/с число Рейнольдса становить приблизно $6,9 \cdot 10^4$, що відповідає турбулентному режиму течії, а коефіцієнт тертя λ за формулою Блазіуса становить близько 0,0195. Динамічний тиск для

відгалуження дорівнює 7,6 Па. За довжини 10 м втрати тиску на тертя в одній гілці складають близько 3,7 Па. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів для укриття сушарки, регулювального клапана, двох відводів і приєднання до колектора прийнято $\Sigma \xi = 2,7$, що дає додаткові втрати близько 20,5 Па.

Для колекторної ділянки діаметром 0,5 м за сумарної витрати 1,006 м³/с середня швидкість становить 5,12 м/с, динамічний тиск — 12,5 Па, а втрати на тертя на довжині 10 м — близько 4,3 Па. З урахуванням місцевих опорів на колекторі, поворотах та вході у вентилятор додаткові втрати становлять близько 21,2 Па. Таким чином, повні розрахункові втрати тиску на найдовшому шляху «укриття сушарки – відгалуження – колектор – вентилятор» складають приблизно 49,7 Па. Після введення 15 % запасу на нещільності мережі та регулювання необхідний тиск вентилятора слід приймати не менше 60 Па (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Уточнений розрахунок місцевої відсмоктувальної вентиляції для двох працюючих барабанних сушарок

Показник	Позначення	Розрахункове значення	Примітка
Кількість встановлених сушарок	n	3	2 працюють, 1 перебуває у резерві
Діаметр відгалуження від однієї сушарки	d	0,4 м	Для кожної з двох працюючих сушарок
Довжина відгалуження	l	10 м	Прийнято за фактичною конфігурацією
Швидкість повітря у відгалуженні	v	4,0 м/с	Розрахункове значення
Площа перерізу відгалуження	A	0,1257 м ²	$A = \pi d^2/4$
Витрата повітря на одну сушарку	Q ₁	0,503 м ³ /с (1810 м ³ /год)	$Q_1 = A \cdot v$
Сумарна витрата для двох сушарок	Q Σ	1,006 м ³ /с (3620 м ³ /год)	Одночасна робота двох сушарок
Рекомендований діаметр колектора	D _k	0,5 м	За D = 0,4 м швидкість зростає до ≈ 8 м/с

Втрати тиску на тертя у відгалуженні	$\Delta P_{\text{тр},1}$	3,7 Па	$\lambda \approx 0,0195$; $\rho = 0,95$ кг/м ³
Місцеві втрати у відгалуженні	$\Delta P_{\text{м},1}$	20,5 Па	$\Sigma \xi = 2,7$
Втрати тиску на колекторі	$\Delta P_{\text{к}}$	25,5 Па	Тертя та місцеві опори
Повні втрати тиску в системі	ΔP_{Σ}	49,7 Па	Найбільш навантажений шлях
Потрібний тиск вентилятора	$P_{\text{в}}$	≈ 60 Па	З урахуванням 15 % запасу
Потрібна продуктивність вентилятора	$Q_{\text{в}}$	≈ 4160 м ³ /год	З урахуванням 15 % запасу
Орієнтовна потужність на валу вентилятора	N	$\approx 0,11$ кВт	За $\eta \approx 0,65$; практично доцільно приймати двигун 0,18–0,25 кВт

Наведений розрахунок відображає саме аеродинамічні потреби повітропровідної мережі (табл. 2.5). У разі включення до системи пиловловлювача, калорифера, шумоглушника або додаткових регулювальних пристроїв розрахунковий напір вентилятора необхідно коригувати на величину їхнього аеродинамічного опору. Проте навіть у такому випадку отриманий результат є коректною базою для подальшого підбору вентиляційного обладнання та для оцінювання, чи відповідає фактична робота системи режиму експлуатації двох барабанних сушарок.

Узагальнені результати виробничого контролю повітряного середовища доцільно інтерпретувати без надмірних узагальнень. Наявні дані свідчать насамперед про пилове навантаження та локальну неоднорідність температурно-вологісного режиму, а не про повсюдне перевищення всіх можливих газових домішок. Саме тому у висновках цього підрозділу акцент зроблено на тих показниках, які дійсно підтверджені лабораторними та інструментальними вимірюваннями (табл. 2.6.).

Таблиця 2.6 – Узагальнені показники повітряного середовища та мікроклімату

Показник	Діапазон фактичних значень	Нормативне значення	Примітки
Пил нетоксичний фіброгенної дії (з вмістом SiO ₂ від 2 % до 10 %)	7,0–11,5 мг/м ³	4 мг/м ³	Зафіксовано стійке перевищення допустимого рівня у 1,75 – 2,87 разів
Вапняковий пил	3,5–7,2 мг/м ³	6 мг/м ³	Підтверджує наявність локальних перевищень у запилених зонах
NO ₂	до 2 – 3,5 мг/м ³	2 мг/м ³	Фіксуються періодичні перевищення до 1,75 ГДК (зокрема при розпалі сушарок)
Температура повітря у теплий період	19–29 °C	17–25 °C	Фіксується локальне перегрівання робочої зони
Швидкість руху повітря	0,07–0,33 м/с	не більше 0,3 м/с	У окремих точках наближається до верхньої межі або дещо перевищує її
Відносна вологість	46–77 %	до 75 %	Переважно в межах норми, але має місце коливання за режимами роботи обладнання

Аналіз даних таблиці 2.6 показує, що умови праці у досліджуваних приміщеннях характеризуються комплексним негативним впливом шкідливих виробничих факторів. Найбільш критичним є пиловий фактор, концентрація пилу фіброгенної дії стабільно перевищує норму майже втричі. Ситуація ускладнюється наявністю токсичного діоксиду азоту та тепловим випромінюванням, що формує нагріваючий мікроклімат.

Такі результати інструментальних вимірювань підтверджують недостатню ефективність існуючих систем місцевої аспірації та загальнообмінної вентиляції, що вимагає розробки та впровадження нових інженерно-технічних рішень для нормалізації санітарно-гігієнічних умов.

Отже, удосконалена методика дослідження поєднує три взаємопов'язані блоки:

- 1) гравіметричне визначення пилу відповідно до МУ 4436-87;
- 2) інструментальний контроль параметрів мікроклімату сучасними переносними приладами;
- 3) аеродинамічний розрахунок вентиляційної мережі для реальної схеми експлуатації обладнання в цеху.

Такий підхід дозволяє обґрунтовано пов'язати санітарно-гігієнічний стан повітряного середовища з фактичною роботою вентиляції. На підставі наведених результатів можна стверджувати, що першочергового вдосконалення потребують місцеві відсмоктувачі сушильних агрегатів, узгодження витрати повітря з реальною кількістю працюючого обладнання та стабілізація температурного режиму в робочій зоні в теплий період року.

2.5. Аналітичне моделювання динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок

Для поглиблення оцінки санітарно-гігієнічного стану повітряного середовища у сушильному відділенні доцільно перейти від фіксації окремих вимірних значень концентрації пилу до аналізу закономірностей її зміни в часі залежно від виробничого режиму.

Слід зазначити, що основне збагачувальне обладнання, зокрема барабанні сушарки, функціонує у безперервному технологічному режимі (матеріал подається та вивантажується постійно). Проте запиленість повітря у робочій зоні має виражений нестационарний характер. Це зумовлено внутрішньозмінною нерівномірністю супутніх факторів, таких як вихід обладнання на номінальний тепловий режим, накопичення просипів, інтенсивність роботи суміжних транспортних систем та ефект вторинного пилопідіймання з поверхонь.

З урахуванням зазначеного запропоновано аналітичну залежність для визначення середньої концентрації пилу в повітрі робочої зони поблизу

аспіраційних укриттів барабанних сушарок:

$$C(\tau, n) = C_{\phi} + \frac{G_{\pi} n k_{\tau} k_p}{Q_{\text{асп}} \cdot \eta_{\text{л}}}, \quad (2.8)$$

де $C(\tau, n)$ — розрахункова концентрація пилу в момент часу τ , мг/м³;

C_{ϕ} — фонові концентрація пилу в зоні дослідження, мг/м³;

G_{π} — інтенсивність пиловиділення від однієї сушарки та прилеглого вузла пересипання, мг/с;

n — кількість одночасно працюючих сушарок, шт;

k_{τ} — коефіцієнт внутрішньозмінної нерівномірності;

k_p — коефіцієнт вторинного пилопідіймання та рециркуляції;

$Q_{\text{асп}}$ — фактична витрата аспіраційного повітря, м³/с;

$\eta_{\text{л}}$ — коефіцієнт локалізації пилу аспіраційним укриттям.

Наведена залежність відображає фізичну сутність процесу, де концентрація пилу зростає зі збільшенням інтенсивності джерела та кількості працюючих сушарок і знижується за умови достатньої витрати повітря через місцеві відсмоктувачі. Для досліджуваної ділянки розрахункова витрата становить 1810 м³/год на одну сушарку та 3620 м³/год при одночасній роботі двох сушарок, а рекомендована продуктивність вентилятора з 15 % запасом — близько 4160 м³/год. Це дає підстави використовувати кількість працюючих сушарок як один із базових параметрів запропонованої моделі.

Оскільки упродовж зміни запиленість повітря, як правило, не залишається сталою, а зростає після виходу обладнання на робочий режим, досягає максимуму в середині зміни і зменшується наприкінці через стабілізацію технологічного процесу та часткове осадження пилу, для опису часової нерівномірності введено безрозмірну функцію:

$$\varphi(\tau) = \frac{4\tau(T - \tau)}{T^2}, \quad 0 \leq \tau \leq T, \quad (2.9)$$

де T — тривалість зміни, год;

τ — поточний час від початку зміни, год.

За такого запису $\varphi(\tau) = 0$ на початку та наприкінці зміни і $\varphi(\tau) = 1$ у середині зміни, що відповідає реальному режиму функціонування сушильного обладнання.

Оскільки пряме аналітичне визначення аеродинамічних коефіцієнтів k_τ та k_p у виробничих умовах ускладнене, для практичних розрахунків здійснено перехід до емпіричних залежностей. Їх отримано шляхом апроксимації результатів інструментальних вимірювань наведених у підрозділі 2.4. При цьому враховано, що запуск другої сушарки супроводжується увімкненням паралельної лінії транспортного обладнання, що підвищує початковий рівень запиленості ще до виходу агрегатів на номінальний тепловий режим. Відповідно, для умов досліджуваного сушильного відділення отримано наступні розрахункові моделі.

Для однієї працюючої сушарки:

$$C_1(\tau) = 7,0 + 1,6 \cdot \varphi(\tau), \quad (2.10)$$

для сумісної роботи двох сушарок:

$$C_2(\tau) = 8,1 + 3,4 \cdot \varphi(\tau) \quad (2.11)$$

де $C_1(\tau)$ і $C_2(\tau)$ — концентрації пилу в повітрі робочої зони, мг/м³, відповідно при роботі однієї та двох сушарок.

У наведених залежностях нижні значення відповідають початковим і кінцевим інтервалам зміни, коли пилове навантаження є мінімальним, а максимальні значення — середині зміни. За такої апроксимації концентрація пилу при роботі однієї сушарки змінюється в межах 7,0–8,6 мг/м³, тобто

залишається нижчою за допустимий рівень 10 мг/м^3 , тоді як при сумісній роботі двох сушарок змінюється в межах $8,1\text{--}11,5 \text{ мг/м}^3$ і в найбільш навантажений період перевищує допустиме значення. Така картина добре узгоджується з установленим у попередньому підрозділі загальним діапазоном запиленості повітря.

Для кількісної оцінки впливу сумісної роботи сушарок введено коефіцієнт сумісної дії:

$$K_{\Sigma(\tau)} = \frac{C_2(\tau)}{C_1(\tau)} \quad (2.12)$$

Розрахунок за формулою (2.12) показує, що впродовж зміни значення K_{Σ} змінюється від 1,16 до 1,34. Це означає, що одночасна робота двох барабанних сушарок підвищує запиленість повітря в зоні дихання працівників у середньому на 16–34 % порівняно з режимом роботи однієї сушарки. Найбільший приріст спостерігається у середині зміни, коли поєднуються максимальна теплова напруженість, інтенсивне переміщення висушеного матеріалу і найбільш виражене вторинне пилопідіймання.

Розрахункові значення за залежностями (2.10) та (2.11) для 12-годинної зміни наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахункові значення концентрації пилу поблизу барабанних сушарок протягом зміни

Час (τ), год	$C_1(\tau)$, мг/м^3	$I_1(\tau)$	$C_2(\tau)$, мг/м^3	$I_2(\tau)$	$K_{\Sigma}(\tau)$
0	7,00	1,75	8,10	2,03	1,16
1	7,49	1,87	9,14	2,29	1,22
2	7,89	1,97	9,99	2,50	1,27
3	8,20	2,05	10,65	2,66	1,30
4	8,42	2,11	11,12	2,78	1,32
5	8,56	2,14	11,41	2,85	1,33
6	8,60	2,15	11,50	2,88	1,34
7	8,56	2,14	11,41	2,85	1,33

8	8,42	2,11	11,12	2,78	1,32
9	8,20	2,05	10,65	2,66	1,30
10	7,89	1,97	9,99	2,50	1,27
11	7,49	1,87	9,14	2,29	1,22
12	7,00	1,75	8,10	2,03	1,16

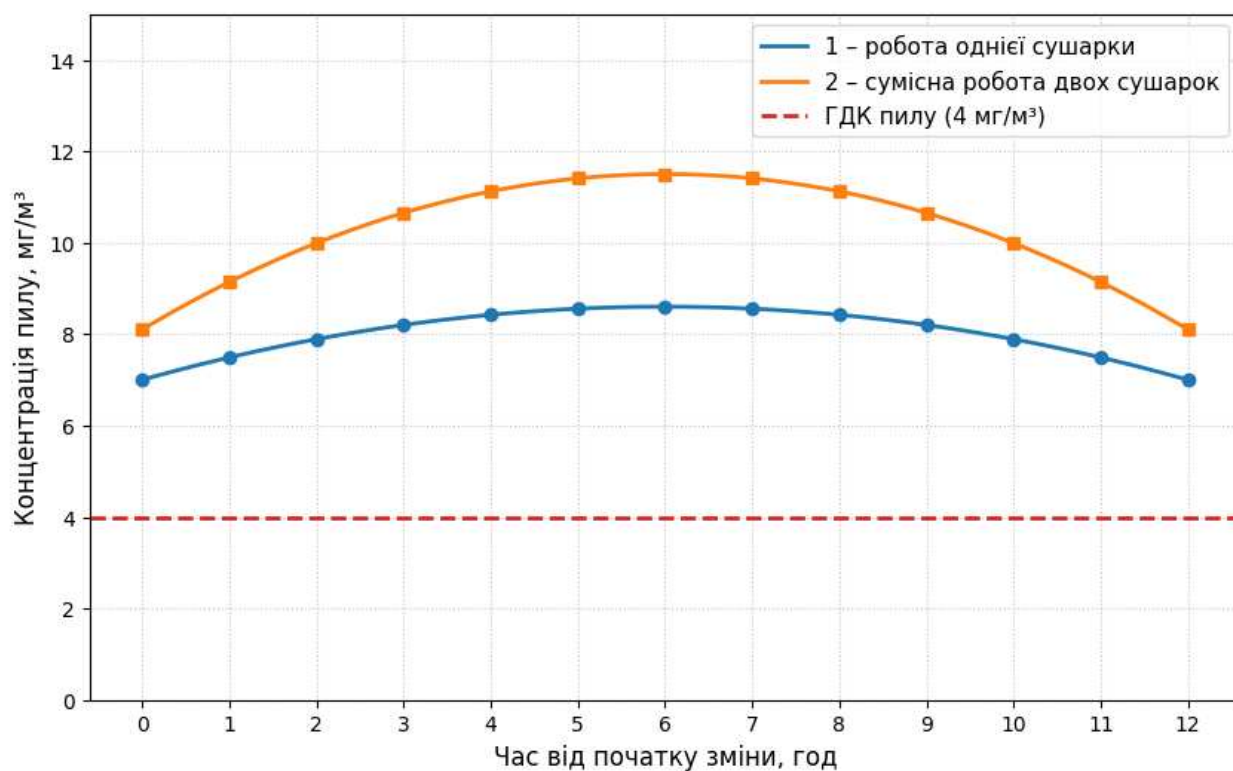


Рисунок 2.5 – Залежності зміни концентрації пилу в повітрі робочої зони поблизу барабанних сушарок протягом зміни: 1 – при роботі однієї сушарки; 2 – при сумісній роботі двох сушарок

Для додаткової санітарно-гігієнічної інтерпретації результатів доцільно використовувати безрозмірний показник відносного пилового навантаження:

$$I(\tau) = \frac{c(\tau)}{c_{\text{доп}}}, \quad (2.13)$$

де $c_{\text{доп}} = 4 \text{ мг/м}^3$ — допустимий рівень пилу для прийнятого виду аерозолію.

Аналіз отриманих даних показує, що вже при роботі однієї сушарки відносне пилове навантаження $I_1(\tau)$ протягом усієї зміни коливається в межах 1,75–2,15, що свідчить про постійне перевищення санітарних норм. При сумісній роботі двох агрегатів ситуація критично погіршується. Показник $I_2(\tau)$ зростає до 2,03–2,88, досягаючи пікових значень у середині зміни.

Отже, незалежно від кількості працюючих агрегатів, 12-годинний робочий цикл формує стійкий і безперервний період небезпечної запиленості. Такі результати інструментальних вимірювань та аналітичного моделювання беззаперечно підтверджують недостатню ефективність існуючих систем місцевої аспірації та загальнообмінної вентиляції. Це, у свою чергу, обґрунтовує гостру необхідність розробки та впровадження нових інженерно-технічних рішень для нормалізації санітарно-гігієнічних умов на робочих місцях.

Висновки до розділу

У розділі виконано комплексне дослідження процесів формування мікроклімату та поширення шкідливих домішків у приміщеннях сушильного цеху гірничо-збагачувального виробництва. Встановлено, що повітряне середовище робочої зони формується внаслідок поєднаної дії тепловиділення, масообміну, пиловиділення та аеродинамічних процесів, які реалізуються.

Показано, що визначальну роль у формуванні мікроклімату розвивають барабанні сушарки як основні джерела теплових потоків, водяної пари та пилогазових викидів, тоді як транспортні системи обумовлюють просторову неоднорідність запиленості за рахунок вторинного пілопідіймання і пересипання матеріалу. Встановлено, що взаємодія технологічного обладнання формує нестационарні поля температури, вологості та концентрації домішок, що ускладнює забезпечення нормативних умов праці.

Дослідження процесів перевантаження та транспортування сировини показало, що найбільш інтенсивне утворення пилу відбувається у вузлах пересипання, завантаження та розвантаження матеріалу, де поєднуються механічне руйнування частинок і турбулентне збурення повітря. Доведено, що поряд із пиловим фактором суттєве значення мають супутні забруднення, зокрема аерозолі мінеральних масел, оксиди азоту та інші домішки, що формують комбіновані навантаження на систему вентиляції.

Встановлено, що на стадіях основної переробки сировини формується сукупний вплив пилових, газоподібних і теплових факторів, причому кожна технологічна операція не тільки генерує власне видиме забруднення, а й змінює умови їх збільшення. Показано, що сушильні процеси супроводжуються інтенсивним тепломасообміном і утворенням конвективних потоків, які сприяють переносу шкідливих домішок у робочому місці.

Удосконалено методику оцінювання стану повітряного середовища, що забезпечує гравіметричне визначення пилу, інструментальний контроль

параметрів мікроклімату та аеродинамічний розрахунок вентиляційної системи для реальної схеми використання обладнання. Встановлено, що фактичні значення запиленості повітря ($7,0\text{--}11,5\text{ мг/м}^3$) у ряді випадків досягають або перевищують допустимий рівень, а температурний режим характеризується локальними перегріваннями, що впливає на недостатню ефективність наявних вентиляційних установок.

Розрахунками доведено, що для забезпечення ефективного видалення пилогазових сумішей від двох одночасно працюючих сушарок необхідна витрата повітря становить близько $3620\text{ м}^3/\text{год}$, а з використанням експлуатаційного запасу — приблизно $4160\text{ м}^3/\text{год}$ при тиску вентилятора не менше 60 Па.

Запропоновано аналітичну модель динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок, що дозволило оцінити зміну відносного пилового навантаження протягом 12-годинної робочої зміни з урахуванням внутрішньозмінної нерівномірності. Зважаючи на мінералогічний склад аерозолію (ГДК 4 мг/м^3), встановлено, що фактична концентрація пилу коливається в межах $7,0\text{--}11,5\text{ мг/м}^3$, формуючи стійке і безперервне перевищення допустимих норм у $1,75\text{--}2,88$ разів. Кількісно доведено, що паралельна робота двох агрегатів призводить до зростання пилового навантаження на $16\text{--}34\%$ порівняно з режимом роботи однієї сушарки. Отримані результати беззаперечно підтверджують недостатню ефективність існуючих систем місцевої аспірації та загальнообмінної вентиляції, що обґрунтовує гостру необхідність розробки нових інженерно-технічних рішень для нормалізації санітарно-гігієнічних умов на робочих місцях.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В РОБОЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

3.1. Математичне моделювання сумісного повітропроводу

Створення комфортного мікроклімату на робочих місцях є однією із найважливіших задач на виробництві. Такий підхід повинен забезпечити безпечні умови як для праці робітників, так і для ефективного функціонування обладнання. Як було підкреслено вище, найбільш важливими умовами на виробництві є підтримка оптимальних величин температури повітря, швидкості повітря і вологості.

Для реалізації таких умов потрібно вміти прогнозувати згадані вище параметри, причому досить швидко, а саме, у реальному масштабі часу. Зрозуміло, що це зумовлює потребу у швидких і точних розрахунках для прогнозування стану виробничого процесу. Як один із можливих способів вирішення розглянутої проблеми є синтез математичної моделі виробничого процесу з подальшою її реалізацією на комп'ютері з метою управління.

В подальшому, розглядається побудова математичної моделі пристрою, який дозволить забезпечити необхідний температурний режим на робочому місці у виробничому приміщенні.

Задача полягає у розробці математичної моделі сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу, здатного забезпечити ефективний повітрообмін навіть в обмежених просторах промислових приміщень і при цьому знизити енерговитрати на підігрів повітря.

Аналіз сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу який зображений на рис.3.1, показує, що він представляє собою поверхневий теплообмінний апарат рекуперативного типу [96]. Враховуючи, що в повітропроводі, що розглядається, гарячий і холодний теплоносії протікають

паралельно і в протилежних напрямках, то така схема руху називається протитечією [97, 98].

Запропонований сумісний повітропровід складається з коаксіально розташованих відсмоктувальної та припливної труб [99-100]. Схема повітропроводу зображена на рис. 3.1 і містить в собі: відсмоктувальний повітропровід (внутрішній) – 1 та припливний повітропровід (зовнішній) – 2, випускні отвори – 3, вихідні патрубки – 4, джерело забрудненого повітря – 6 та витяжний зонт – 5.

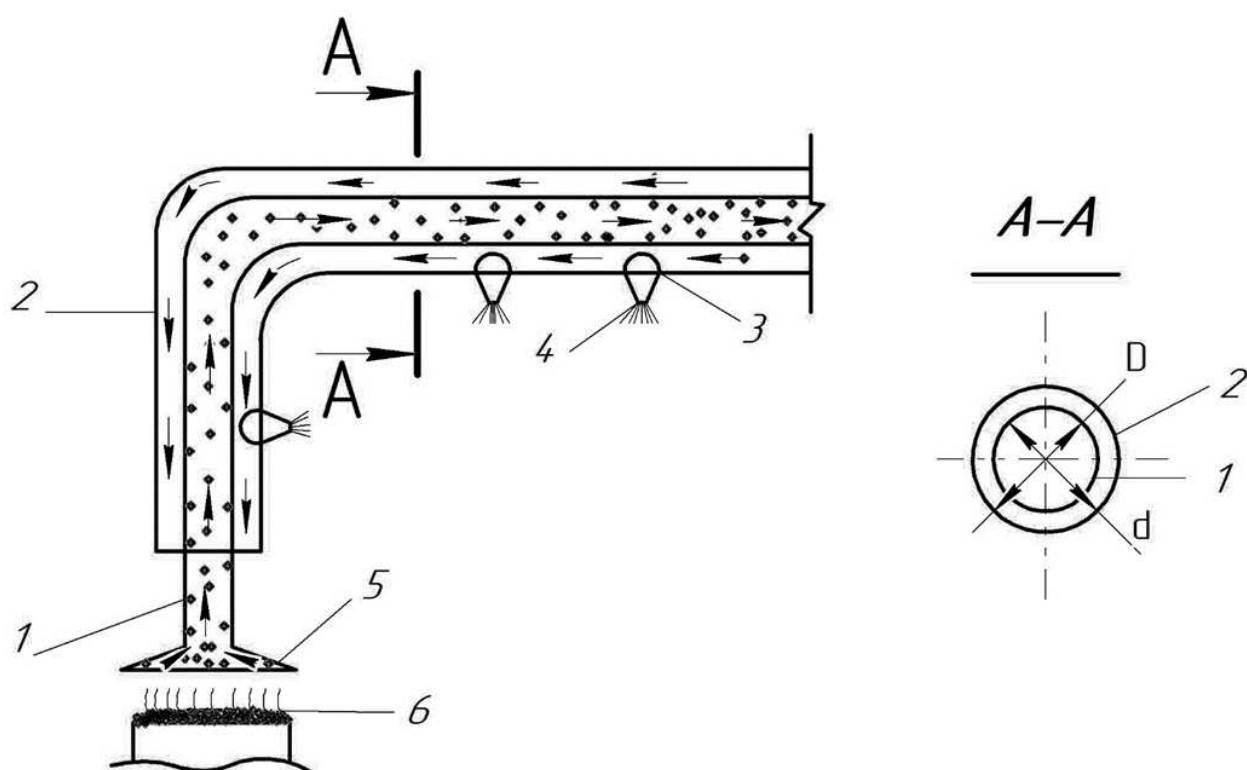


Рис. 3.1 - Сумісний повітропровід для вентиляції промислових підприємств

Принцип дії сумісного повітропроводу, зображеного на рис. 3.1, полягає у наступному. Забруднене повітря з джерела 6 потрапляє за допомогою витяжного зонта 5 у відсмоктувальний повітровід 1, який розміщений коаксіально в припливному повітропроводі 2, а далі цим повітропроводом 1 повітря надходить до системи його очищення. Разом із цим, в приміщення

надходить припливним повітропроводом 2 чисте повітря із зовні. По довжині припливного повітропроводу 2 утворені випускні отвори 3, які обладнані вихідними патрубками 4, що формують струмені чистого повітря спрямованими в робочі зони промислового приміщення.

Для подальших розрахунків з метою математичного моделювання введемо такі позначення:

G_1, G_2 – витрата гарячого та холодного теплоносіїв, кг/с ;

$T_{1н}, T_{1к}$ – температура гарячого теплоносія на вході та виході в теплообмінник, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{2н}, T_{2к}$ – температура холодного теплоносія на вході та виході в теплообмінник, $^{\circ}\text{C}$;

F – величина поверхні теплообміну, м^2 ;

V – об'ємна витрата теплоносія, $\text{м}^3/\text{с}$;

v – лінійна швидкість теплоносія, м/с ;

c – теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

W – водяний еквівалент, $\text{Вт}/^{\circ}\text{C}$;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

l – довжина стінки, м ;

γ – щільність матеріалу стінки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

L – периметр поперечного перерізу, м ;

f – площа поперечного перерізу, м^2 .

Аналіз нестационарних режимів у досліджуваному протитечійному теплообмінному апараті показує, що зміна температури відбувається як у часі, так і в просторі. Такі процеси називають процесами з розподіленими параметрами. Якщо процес характеризується істотною розподіленістю, то такий процес описується диференціальними рівняннями в частинних похідних.

При складанні математичної моделі процесу з розподіленими параметрами приймаються припущення:

- один із газів тече всередині прямої труби, що омивається іншим газом;
- перебіг газу розглядається як односпрямований;
- перемішування в напрямку, перпендикулярному до осі руху потоку, є повним;
- змішування теплоносіїв та передача тепла до стінки труби у напрямку руху середовищ не враховуються;
- коефіцієнти теплопередачі вважаються постійними по всій поверхні теплообмінника;
- втратами тепла в навколишній простір нехтують;
- переріз і форма потоку приймаються незмінними.

Враховуючи ці припущення математична модель режиму роботи протиточного теплообмінника з повним витісненням обох теплоносіїв та врахуванням теплової ємності стінки, що розділяє, представиться у вигляді системи трьох диференціальних рівнянь у частинних похідних [92].

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} + W_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \frac{\alpha_1 L_1}{f_1 c_1 \gamma_1} (T_{cm} - T_1) \\ \frac{\partial T_{cm}}{\partial t} = \frac{\alpha_1 L_1}{f_{cm} c_{cm} \gamma_{cm}} (T_1 - T_{cm}) + \frac{\alpha_2 L_2}{f_{cm} c_{cm} \gamma_{cm}} (T_2 - T_{cm}) \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} - W_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \frac{\alpha_2 L_2}{f_2 c_2 \gamma_2} (T_{cm} - T_2) \end{cases} \quad (3.1)$$

Точні рішення таких рівнянь або дуже громіздкі, або взагалі не можуть бути виражені аналітично. Тому в багатьох випадках математична модель із розподіленими параметрами замінюється моделлю із зосередженими параметрами, якщо це не призводить до великих спотворень. Зокрема, таку заміну можна зробити для протиточних теплообмінників за умови дотримання умови

$$\frac{\Delta T_{\delta}}{\Delta T_{\mathcal{M}}} < 2, \quad (3.2)$$

де ΔT_{δ} і $\Delta T_{\mathcal{M}}$ – відповідно більша і менша різниці температур теплоносіїв на вході та виході.

У протиточному теплообміннику (наприклад, у сумісному відсмоктувально-припливного повітропроводу) при виконанні умови (3.2) можна з достатньою для практичних розрахунків точністю проводити лінеаризацію кривих змін температури робочих середовищ. При цьому зміна температури за довжиною теплообмінника є лінійним законом, а середня температура первинного та вторинного теплоносіїв визначається як середня арифметична величина

$$T_{1cp} = 0,5(T_{1n} + T_{1\kappa}), \quad (3.3)$$

$$T_{2cp} = 0,5(T_{2n} + T_{2\kappa}). \quad (3.4)$$

Середня різниця температур (рушійна сила теплообміну) виражається рівністю

$$\Delta T = T_{1cp} - T_{2cp}. \quad (3.5)$$

В даному випадку внаслідок лінеаризації кривої зміни температур по довжині апарата параметри T_1 , T_2 , T_{cm} , ΔT будуть змінюватися тільки в часі (координати довжини виключаються), і математична модель може бути записана у вигляді звичайних систем диференціальних рівнянь.

Схема потоків теплообмінника, що розглядається, зображена на рис. 3.2.

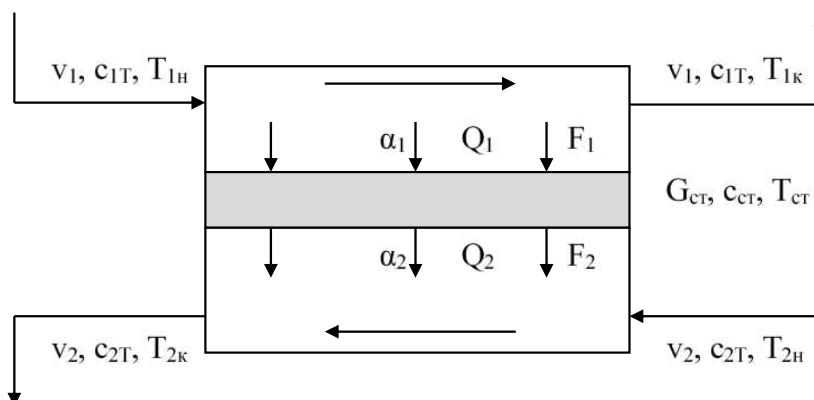


Рис. 3.2 - Схема потоків у протилежному теплообміннику

На схемі додатково введені такі позначення:

Q_1 і Q_2 – кількості тепла, що передаються через поверхні теплообміну, які мають величини F_1 і F_2 , відповідно;

a_1 і a_2 – коефіцієнти тепловіддачі з боку первісного та вторинного теплоносіїв, відповідно;

G_{cm} , c_{cm} , T_{cm} – вага, теплоємність, і температура стінки (приймається, що T_{1cm} і T_{2cm} близькі внаслідок малої товщини стінки, і при складанні рівнянь використовується T_{cm} замість T_{1cm} і T_{2cm}).

Математична модель досліджуваного теплообмінника має включати: рівняння теплового балансу:

$$dQ_1 = v_1 c_{1m} (T_{1н} - T_{1к}) dt, \quad (3.6)$$

$$dQ_2 = v_2 c_{2m} (T_{2к} - T_{2н}) dt, \quad (3.7)$$

рівняння тепловіддачі:

$$dQ_1 = \alpha_1 F_1 (T_{1cp} - T_{cm}) dt, \quad (3.8)$$

$$dQ_2 = \alpha_2 F_2 (T_{cm} - T_{2cp}) dt, \quad (3.9)$$

рівняння перехідного режиму:

$$dQ_1 - dQ_2 = G_{cm} c_{cm} dT_{cm}. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.10) показує, що при теплообміні в невстановленому потоці, коли $dQ_1 \neq dQ_2$, частина тепла акумулюється стінкою в будь-який момент часу перехідного режиму.

Якщо використовувати рівність (3.3) і (3.4), то рівняння (3.6), (3.10) утворять систему звичайних диференціальних рівнянь [93].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQ_1}{dt} = \alpha_1 F_1 [0,5(T_{1n} + T_{1\kappa}) - T_{cm}] \\ \frac{dQ_2}{dt} = \alpha_2 F_2 [T_{cm} - 0,5(T_{2n} + T_{2\kappa})] \\ \frac{dQ_1}{dt} = v_1 c_{1m} (T_{1n} - T_{1\kappa}) \\ \frac{dQ_2}{dt} = v_2 c_{2m} (T_{2\kappa} - T_{2n}) \\ \frac{dQ_1}{dt} - \frac{dQ_2}{dt} = G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Система рівнянь (3.11) є математичним описом процесу теплообміну через стінку в протиточному теплообмінному апараті, для якого прийнято припущення про лінійну зміну температури теплоносіїв по довжині апарату.

В системі диференціальних рівнянь невідомими виступають $T_{1\kappa}$ і $T_{2\kappa}$. Тому для розв'язання (3.11) з початку виділимо ці змінні.

Враховуючи перше і третє рівняння системи (3.11) отримуємо

$$\alpha_1 F_1 [0,5(T_{1н} + T_{1к}) - T_{cm}] = v_1 c_{1m} (T_{1н} - T_{1к}) \quad (3.12)$$

Розв'язуємо рівняння (3.12) відносно $T_{1к}$

$$T_{1н} + T_{1к} - 2T_{cm} = 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} T_{1н} - T_{1к},$$

$$T_{1к} \left(1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} \right) = 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} T_{1н} - T_{1н} + 2T_{cm},$$

$$T_{1к} \left(1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} \right) = T_{1н} \left(2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right) + 2T_{cm},$$

$$T_{1к} = \frac{T_{1н} \left(2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} \quad (3.13)$$

Аналогічно знаходимо $T_{2к}$ Враховуючи друге і четверте рівняння системи (3.11) отримуємо

$$\alpha_2 F_2 [2T_{cm} - (T_{2н} + T_{2к})] = 2v_2 c_{2m} (T_{2к} - T_{2н}). \quad (3.14)$$

Розв'язуємо рівняння (3.12) відносно $T_{2к}$

$$2T_{cm} - T_{2н} - T_{2к} = 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} (T_{2к} - T_{2н}),$$

$$T_{2к} \left(1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} \right) = 2T_{cm} - T_{2н} + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} T_{2н},$$

$$T_{2\kappa} \left(1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} \right) = 2T_{cm} + \left(2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1 \right) T_{2n},$$

$$T_{2\kappa} = \frac{T_{2n} \left(2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1 \right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} \quad (3.15)$$

Підставимо перше і друге рівняння в п'яте рівняння системи (3.11)

$$\alpha_1 F_1 [0,5(T_{1n} + T_{1\kappa}) - T_{cm}] - \alpha_2 F_2 [T_{cm} - 0,5(T_{2n} + T_{2\kappa})] = G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt}. \quad (3.16)$$

Перетворюємо рівняння (3.16) відносно T_{cm} , враховуючи (3.13) і (3.15),

$$2G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_1 F_1 [T_{1n} + T_{1\kappa} - 2T_{cm}] - \alpha_2 F_2 [2T_{cm} - T_{2n} + T_{2\kappa}],$$

$$2G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_1 F_1 \left[T_{1n} + \frac{T_{1n} \left(2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} - 2T_{cm} \right] - \alpha_2 F_2 \left[2T_{cm} - T_{2n} + \frac{T_{2n} \left(2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1 \right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} \right],$$

$$2G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_1 F_1 \left(T_{1n} + \frac{T_{1n} \left(2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right)}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} + \frac{2}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} T_{cm} - 2T_{cm} \right) - \alpha_2 F_2 \left(2T_{cm} - T_{2n} + \frac{T_{2n} \left(2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1 \right)}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} + \frac{2}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} T_{cm} \right),$$

$$2G_{cm} c_{cm} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_1 F_1 \left(T_{1n} \left(1 + \frac{2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} \right) + 2\alpha_1 F_1 \left(\frac{1}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} - 1 \right) T_{cm} - \alpha_2 F_2 \left(T_{2n} \left(-1 + \frac{2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} \right) - 2\alpha_2 F_2 \left(\frac{1}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} + 1 \right) T_{cm} \right) \right),$$

$$\begin{aligned}
2G_{cm}c_{cm}\frac{dT_{cm}}{dt} - 2\alpha_1F_1\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} - 1\right)T_{cm} + 2\alpha_2F_2\left(\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} + 1\right)T_{cm} &= \alpha_1F_1(T_{1n}\left(1 + \frac{2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1} - 1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}}\right) - \alpha_2F_2(T_{2n}\left(-1 + \frac{2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2} - 1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}}\right)), \\
2G_{cm}c_{cm}\frac{dT_{cm}}{dt} - 2\left(\alpha_1F_1\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} - 1\right) - \alpha_2F_2\left(\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} + 1\right)\right)T_{cm} &= \alpha_1F_1(T_{1n}\left(1 + \frac{2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1} - 1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}}\right) + \alpha_2F_2(T_{2n}\left(1 - \frac{2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2} - 1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}}\right)), \\
2G_{cm}c_{cm}\frac{dT_{cm}}{dt} - 2\left[\alpha_1F_1\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} - 1\right) - \alpha_2F_2\left(\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} + 1\right)\right]T_{cm} &= \alpha_1F_1(T_{1n}\left(2 + \frac{2}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}}\right) + \alpha_2F_2T_{2n}\frac{2}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}}, \\
G_{cm}c_{cm}\frac{dT_{cm}}{dt} - \left[\alpha_1F_1\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} - 1\right) - \alpha_2F_2\left(\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} + 1\right)\right]T_{cm} &= \\
= \alpha_1F_1T_{1n}\left(1 + \frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}}\right) + \alpha_2F_2T_{2n}\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} &
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Диференційне рівняння (3.17) є лінійним неоднорідним диференційним рівнянням першого порядку з постійними коефіцієнтами відносно температури стінки. Для зручності подальших розрахунків доцільно ввести позначення

$$A = \alpha_1F_1\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} - 1\right) - \alpha_2F_2\left(\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}} + 1\right), \tag{3.18}$$

$$B = \alpha_1F_1T_{1n}\left(\frac{1}{1+2\frac{v_1c_{1m}}{\alpha_1F_1}} + 1\right) + \alpha_2F_2T_{2n}\frac{1}{1+2\frac{v_2c_{2m}}{\alpha_2F_2}}. \tag{3.19}$$

Тоді рівняння (3.17) прийме вигляд

$$\frac{dT_{cm}}{dt} - \frac{A}{G_{cm}c_{cm}} \cdot T_{cm} = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} \quad (3.20)$$

Для розв'язання рівняння (3.20) скористаємось методом Бернуллі. Для цього рішення будемо шукати у вигляді двох невідомих функцій u і w

$$T_{cm} = u \cdot w \quad (3.21)$$

Підставляємо (3.21) в рівняння (3.20)

$$u' \cdot w + u \cdot w' - \frac{A}{G_{cm}c_{cm}} u \cdot w = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} \quad (3.22)$$

Далі виносимо функцію u за дужки

$$u' \cdot w + u \left(w' - \frac{A}{G_{cm}c_{cm}} w \right) = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} \quad (3.23)$$

Вираз в дужках прирівнюємо нулю

$$w' - \frac{A}{G_{cm}c_{cm}} w = 0. \quad (3.24)$$

В результаті отримуємо систему двох диференціальних рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} u' \cdot w = \frac{B}{G_{cm} c_{cm}} \\ w' - \frac{A}{G_{cm} c_{cm}} w = 0 \end{cases} . \quad (3.25)$$

Рівняння (3.24) є однорідним диференціальним рівнянням першого порядку з роздільними змінними. Розв'язуємо рівняння (3.24) шляхом розділення змінних

$$\frac{dw}{dt} - \frac{A}{G_{cm} c_{cm}} w = 0 ,$$

$$\frac{dw}{w} = \frac{A}{G_{cm} c_{cm}} dt ,$$

$$\int \frac{dw}{w} = \frac{A}{G_{cm} c_{cm}} \int dt ,$$

$$\ln w = \frac{A}{G_{cm} c_{cm}} t ,$$

$$w = e^{\frac{A}{G_{cm} c_{cm}} t} . \quad (3.26)$$

Рівність (3.26) є частинним розв'язком рівняння (3.24).

Далі підставляємо (3.26) в перше рівняння системи (3.25)

$$u' \cdot e^{\frac{A}{G_{cm} c_{cm}} t} = \frac{B}{G_{cm} c_{cm}} . \quad (3.27)$$

Рівняння (3.27) є диференціальним рівнянням першого порядку з

розподіленими змінними. Розв'язуємо це рівняння шляхом розподілення змінних

$$u' = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t},$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t},$$

$$du = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} dt,$$

$$\int du = \frac{B}{G_{cm}c_{cm}} \int e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} dt,$$

$$u = -\frac{B}{G_{cm}c_{cm}} \frac{G_{cm}c_{cm}}{A} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} + C,$$

$$u = -\frac{B}{A} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} + C, \quad (3.28)$$

де C — довільна стала.

Згідно (3.21) і враховуючи (3.26) і (3.28) знаходимо загальний розв'язок рівняння (3.20)

$$T_{cm} = \left(C - \frac{B}{A} e^{-\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} \right) \cdot e^{\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t},$$

$$T_{cm} = C e^{\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} - \frac{B}{A}. \quad (3.29)$$

Якщо вважати, що в початковий момент часу температура стінки дорівнювала T_0 , тобто

$$T_{cm}(t=0) = T_0, \quad (3.30)$$

то, згідно (3.29), має місце

$$T_0 = C - \frac{B}{A},$$

$$C = T_0 + \frac{B}{A}. \quad (3.31)$$

Враховуючи (3.31) маємо частинний розв'язок, або розв'язок задачі Коші

$$T_{cm} = \left(T_0 + \frac{B}{A} \right) e^{\frac{A}{G_{cm}c_{cm}}t} - \frac{B}{A} \quad (3.32)$$

Для знаходження кінцевої температури першого теплоносія зробимо перетворення формули (3.13) і підставимо у неї (3.32)

$$T_{1\kappa} = \frac{T_{1н} \left(2 \frac{\nu_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{\nu_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}},$$

$$T_{1\kappa} = \frac{T_{1н} \left(2 \frac{\nu_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 1 \right)}{1 + 2 \frac{\nu_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} + \frac{2T_{cm}}{1 + 2 \frac{\nu_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}},$$

$$T_{1\kappa} = \frac{T_{1н} \left(1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1} - 2\right)}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} + \frac{2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}},$$

$$T_{1\kappa} = T_{1н} \left(1 - \frac{2}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}}\right) + \frac{2}{1 + 2 \frac{v_1 c_{1m}}{\alpha_1 F_1}} \left[\left(T_{0cm} + \frac{B}{A}\right) e^{\frac{A}{G_{cm} c_{cm}} t} - \frac{B}{A} \right]. \quad (3.33)$$

Для знаходження кінцевої температури другого теплоносія зробимо перетворення формули (3.15) і підставимо у неї (3.32)

$$T_{2\kappa} = \frac{T_{2н} \left(2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 1\right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}},$$

$$T_{2\kappa} = \frac{T_{2н} \left(1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 2\right) + 2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}},$$

$$T_{2\kappa} = \frac{T_{2н} \left(1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2} - 2\right)}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} + \frac{2T_{cm}}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}},$$

$$T_{2\kappa} = T_{2н} \left(1 - \frac{2}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}}\right) + \frac{2}{1 + 2 \frac{v_2 c_{2m}}{\alpha_2 F_2}} \left[\left(T_0 + \frac{B}{A}\right) e^{\frac{A}{G_{cm} c_{cm}} t} - \frac{B}{A} \right]. \quad (3.34)$$

Як відомо із загальних положень для забезпечення ефективної вентиляції в промислових приміщеннях важливо дотримуватися балансу між обсягами

відсмоктуваного та поданого повітря:

$$G_1 = G_2, \quad (3.35)$$

де G_1 – кількість повітря, що відсмоктується, $кг/с$;

G_2 – кількість повітря, що подається, $кг/с$.

Згідно рис.3.1 можна записати

$$G_1 = S_1 \gamma_1 v_1, \quad (3.36)$$

де S_1 – площа поперечного перерізу відсмоктувальної труби, $м^2$;

γ_1 – щільність відсмоктувального повітря, $кг/м^3$;

v_1 – лінійна швидкість відсмоктувального повітря, $м/с$.

Аналогічно, для повітря, що подається

$$G_2 = S_2 \gamma_2 v_2, \quad (3.37)$$

де S_2 – площа поперечного перерізу простору, через який подається повітря, $м^2$;

γ_2 – щільність повітря, яке подається, $кг/м^3$;

v_2 – лінійна швидкість повітря, що подається, $м/с$.

Площа поперечного перерізу відсмоктувальної труби знаходиться по формулі

$$S_1 = \pi \frac{d^2}{4}. \quad (3.38)$$

В свою чергу, площа поперечного перерізу простору, через який подається повітря, знаходиться як площа кільця

$$S_2 = \pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d^2}{4}. \quad (3.39)$$

Враховуючи (3.36), (3.39), формула (3.35) запишеться у вигляді

$$\left(\pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d^2}{4} \right) \gamma_2 v_2 = \pi \frac{d^2}{4} \gamma_1 v_1. \quad (3.40)$$

Згідно задачі, яка досліджується, можна записати

$$\gamma_1 v_1 \approx \gamma_2 v_2. \quad (3.41)$$

Враховуючи (3.41), в (3.40) можна провести скорочення, що дасть

$$\pi \frac{D^2}{4} - \pi \frac{d^2}{4} \approx \pi \frac{d^2}{4},$$

або

$$D^2 - d^2 \approx d^2. \quad (3.42)$$

Перетворюючи (3.42), знаходимо

$$D \approx \sqrt{2}d. \quad (3.43)$$

Таким чином, діаметр припливного повітроводу D пов'язаний з діаметром відсмоктувального d співвідношенням (3.43) реалізує умову (3.35).

Наступне питання пов'язане з визначенням коефіцієнта тепловіддачі, що входить у формули (3.33) і (3.34). По-перше, треба визначити характер руху теплоносіїв в пристрої, який зображений на рис.3.1, тобто рух є ламінарним чи

турбулентним.

Для цього обчислюється число Рейнольдса [101]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (3.44)$$

де v – лінійна швидкість повітря, $м/с$;

d – діаметр труби, $м$;

ν – кінематична в'язкість, $м^2/с$.

Якщо число Рейнольдса задовольняє нерівності: $Re < 2000$, (3.45)

то рух теплоносія є ламінарний.

Якщо число Рейнольдса задовольняє нерівності $2000 \leq Re < 10000$, (3.46)

то має місце перехідний режим.

Якщо число Рейнольдса задовольняє нерівності $Re \geq 10000$, (3.47)

то настає турбулентний режим.

В залежності від величини числа Рейнольдса обчислюється по різним формулам число Нусельта, а значить буде різною величина коефіцієнта тепловіддачі.

Розглянемо завдання математичного моделювання теплообміну спільного відсмоктувально-припливного повітроводу як протитечійного теплообмінника із зосередженими параметрами (типу «труба в трубі») (рис.3.1).

Нагрівання повітряного потоку, що спрямовується до контактного апарату, відбувається в кожухотрубному протитечійному теплообміннику. Теплоносієм виступає суміш димових газів (азоту, водяної пари, діоксиду та оксиду вуглецю), які утворюються при спалюванні метану в сушильній печі та проходять через внутрішній контур теплообмінника.

Вихідні дані. Об'ємна швидкість робочих середовищ (повітря та димових газів) $v_1 = v_2 = v = 0,503 \text{ м}^3/с$,

Лінійна швидкість робочих середовищ $v_{1l} = v_{2l} = 4 \text{ м/с}$,

Довжина трубопроводу $l = 6.0 \text{ м}$,
 Діаметр внутрішньої труби $d = 0,4 \text{ м}$,
 Діаметр зовнішньої труби $D = \sqrt{2} \cdot d = 0,566 \text{ м}$,
 Питома теплоємність димових газів та повітря $c_1 = 2600 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$,
 $c_2 = 1005 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$,
 Питома теплоємність стінки (залізо) $c_{cm} = 641 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$,
 Щільність стінки (залізо) $\gamma_{cm} = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$,
 Товщина стінки $\delta = 0,02 \text{ м}$,
 Кінематична в'язкість робочих середовищ $\nu_1 = 11.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 $\nu_2 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$,
 Теплопровідність робочих середовищ $\lambda_1 = 0,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$,
 $\lambda_2 = 0,029 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$,
 Температура первинного теплоносія (димових газів) на вході $T_{1n} = 100^\circ\text{C}$,
 Температура вторинного теплоносія (повітря) на вході $T_{2n} = 10^\circ\text{C}$,
 Обчислюємо величину поверхні теплообмінника

$$F_1 = F_2 = F = \pi \cdot d \cdot l = 7.54 \text{ м}^2. \quad (3.48)$$

Далі знаходимо коефіцієнти тепловіддачі від стінки теплообмінника.

Обчислюємо α_1 . Для встановлення режиму течії димових газів обчислимо число Рейнольдса по формулі

$$\text{Re}_1 = \frac{\nu_{1l} \cdot d_1}{\nu_1} = 1.429 \cdot 10^5. \quad (3.49)$$

Оскільки , згідно (3.47) і (3.49) виконується нерівність $\text{Re}_1 > 10^4$, то має місце турбулентний режим руху димових газів.

Враховуючи (3.49), знаходимо число Нусельта по формулі

$$Nu_1 = 0.018 \cdot Re_1^{0.8} = 239.44. \quad (3.50)$$

Коефіцієнт тепловіддачі з урахуванням (3.50), знаходимо по формулі

$$\alpha_1 = Nu_1 \frac{\lambda_1}{d_1} = 20.95 \text{ Дж} / (\text{м}^2 \text{сек} \cdot ^\circ \text{C}). \quad (3.51)$$

Обчислюємо a_2 Для встановлення режиму течії повітря обчислимо число Рейнольдса по формулі

$$Re_2 = \frac{v_{2l} \cdot d_2}{\nu_2} = 8 \cdot 10^4. \quad (3.52)$$

Оскільки , згідно (3.47) і (3.52) виконується нерівність $Re_2 > 10^4$, то має місце турбулентний режим руху повітря.

Враховуючи (3.52), знаходимо число Нусельта по формулі

$$Nu_2 = 0.018 \cdot Re_2^{0.8} = 150.6. \quad (3.53)$$

Коефіцієнт тепловіддачі з урахуванням (3.53), знаходимо по формулі

$$\alpha_2 = Nu_2 \frac{\lambda_2}{d_2} = 10.9 \text{ Дж} / (\text{м}^2 \text{сек} \cdot ^\circ \text{C}). \quad (3.54)$$

Обчислюємо масу стінки теплообмінника по формулі

$$G_{cm} = \gamma_{cm} \cdot \frac{\pi}{4} ((d + \delta)^2 - d^2) \cdot l = 117.6 \text{ кг}. \quad (3.55)$$

Користуючись формулами (3.18) і (3.19), знаходимо допоміжні параметри

$$A = -79.78, \quad (3.56)$$

$$B = 5.38 \cdot 10^3. \quad (3.57)$$

Розв'язання задачі дослідження теплообміну проводилося за формулами (3.33) та (3.34) на комп'ютері за допомогою програми Microsoft Excel.

В таблиці 3.1 представлені результати розрахунків температури димових газів і повітря по формулам (3.33) і (3.34), відповідно.

Табл. 3.1 – Результати розрахунків температури димових газів і повітря

t, хв	T _{1к} , °C	T _{2к} , °C
0,0	100,00	10,00
5,0	98,12	14,39
10,0	97,23	16,47
15,0	96,81	17,45
20,0	96,61	17,91
25,0	96,52	18,13
30,0	96,48	18,22

На рис. 3.3 представлені результати обчислення температури димових газів в залежності від часу згідно формули (3.33).

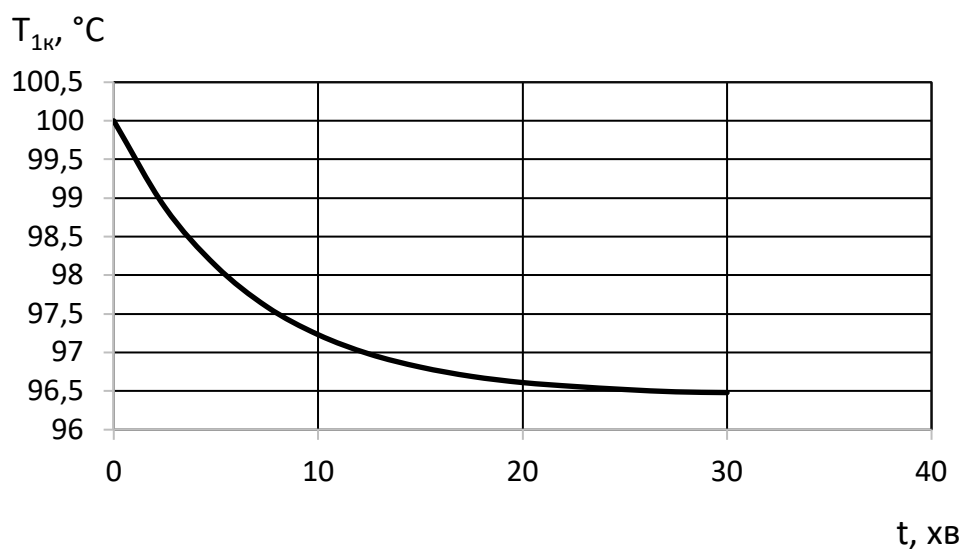


Рис.3.3. Графік залежності кінцевої температури димових газів в залежності від часу,
обчислений по формулі (3.33)

Аналіз графіка на рис.3.3 показує, що з часом температура димових газів зменшується, досягає граничного значення приблизно через півгодини.

На рис. 3.4 представлені результати обчислення температури повітря в залежності від часу згідно формули (3.34).

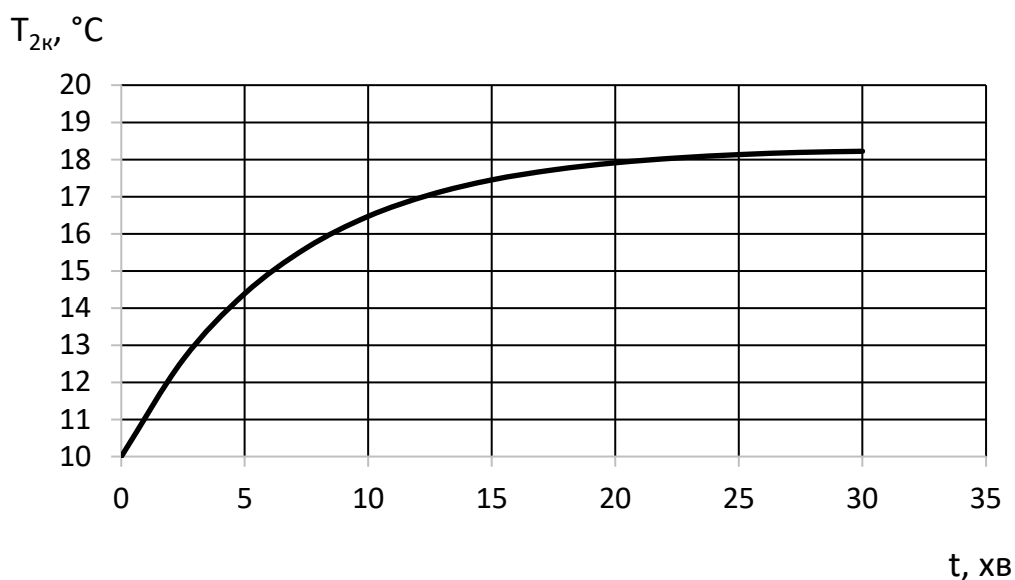


Рис. 3.4. Графік залежності кінцевої температури повітря в залежності від часу,
обчислений по формулі (3.34)

Аналіз графіка на рис.3.4 показує, що з часом температура повітря асимптотично збільшується, досягаючи граничного значення приблизно через півгодини.

Треба підкреслити, що умова (3.2) виконується

$$\frac{\Delta T_{\theta}}{\Delta T_m} = \frac{100 - 18,22}{96,48 - 10} = \frac{81,78}{86,48} < 2,$$

що дозволяє скористатися описаним методом математичного моделювання.

Важливим практичним результатом проведеного математичного моделювання є підтвердження того, що при початковій температурі відпрацьованих газів $T_{lk} = 100$ °С досягається нагрівання припливного повітря до розрахованих 18,22 °С. Такий температурний показник повністю задовольняє санітарно-гігієнічні вимоги (ДСН 3.3.6.042-99) до мікроклімату робочої зони в холодний період року (18–23 °С), що дозволяє усунути ризик переохолодження персоналу. Окрім цього, у разі експлуатації сушильного обладнання при інтенсивних режимах, коли температура газів на виході з барабана сягає 150 °С, система володіє значним термодинамічним резервом. Це гарантує стабільність теплового режиму та високу надійність запропонованого конструктивного рішення, а також забезпечує суттєве зниження енерговитрат на традиційний підігрів припливного повітря за рахунок ефективної утилізації вторинних енергоресурсів.

Для розрахунку теплопередачі у теплий період року необхідно прийняти вхідну температуру вторинного теплоносія (припливного повітря) рівною 28 °С, що відповідає середньодобовим показникам для Дніпропетровської області влітку. Це дозволить оцінити функціонування розробленої математичної моделі в теплий період року.

Оскільки математична модель сумісного повітропроводу описана системою лінійних диференціальних рівнянь, зміна кінцевих температур прямо пропорційна початковій різниці температур теплоносіїв $\Delta T = T_{lk} - T_{2k}$.

У попередньому розрахунку $\Delta T = 100 - 90 = 10$ °С, у розрахунку для літнього періоду $\Delta T_{lim} = 100 - 28 = 72$ °С, тоді коефіцієнт пропорційності зміни температур становитиме $k = 72/90 = 0,8$.

Застосувавши цей коефіцієнт до динаміки теплообміну, отримуємо наступні значення для таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків температури димових газів і

повітря у літній період року

$t, \text{хв}$	$T_{1к}, ^\circ\text{C}$	$T_{2к}, ^\circ\text{C}$
0,0	100,00	28,00
5,0	98,50	31,51
10,0	97,78	33,18
15,0	97,45	33,96
20,0	97,29	34,33
25,0	97,22	34,50
30,0	97,18	34,58

На рис. 3.5 представлені результати обчислення температури димових газів в залежності від часу згідно формули (3.33) для теплого періоду року.

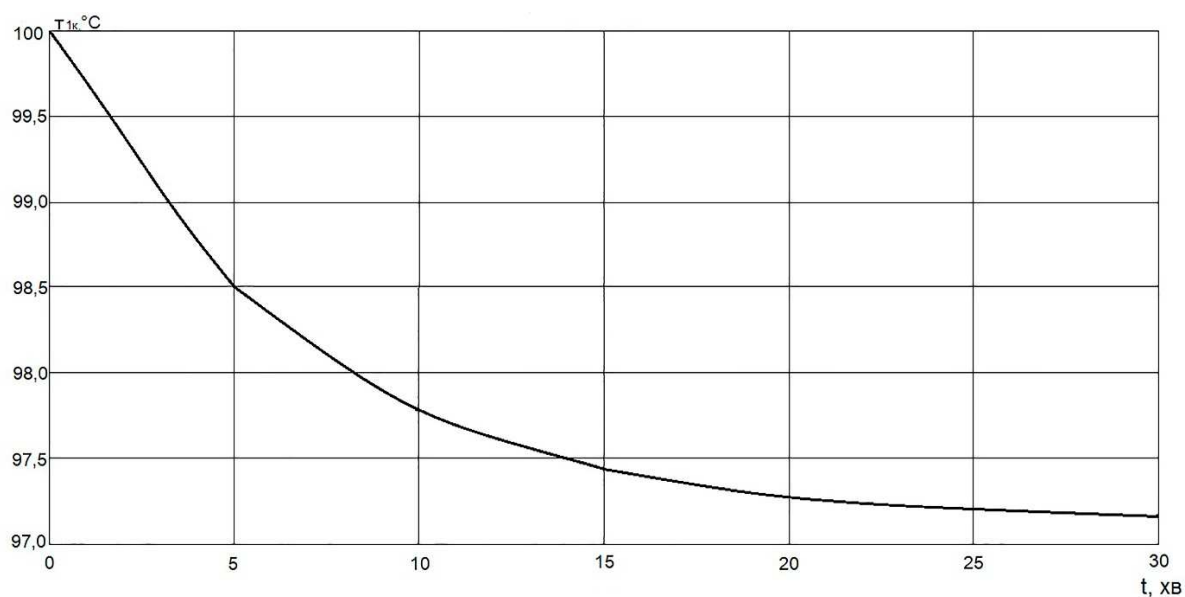


Рис.3.5. Графік залежності кінцевої температури димових газів в залежності від часу,
обчислений по формулі (3.33) для теплого періоду року

Аналіз графіка на рис. 3.5 показує, що температура димових газів із часом знижується та досягає граничного значення приблизно через 30 хвилин, як і в холодному періоді року.

На рис. 3.6 представлені результати обчислення температури повітря в

залежності від часу згідно формули (3.34), для теплого періоду року.

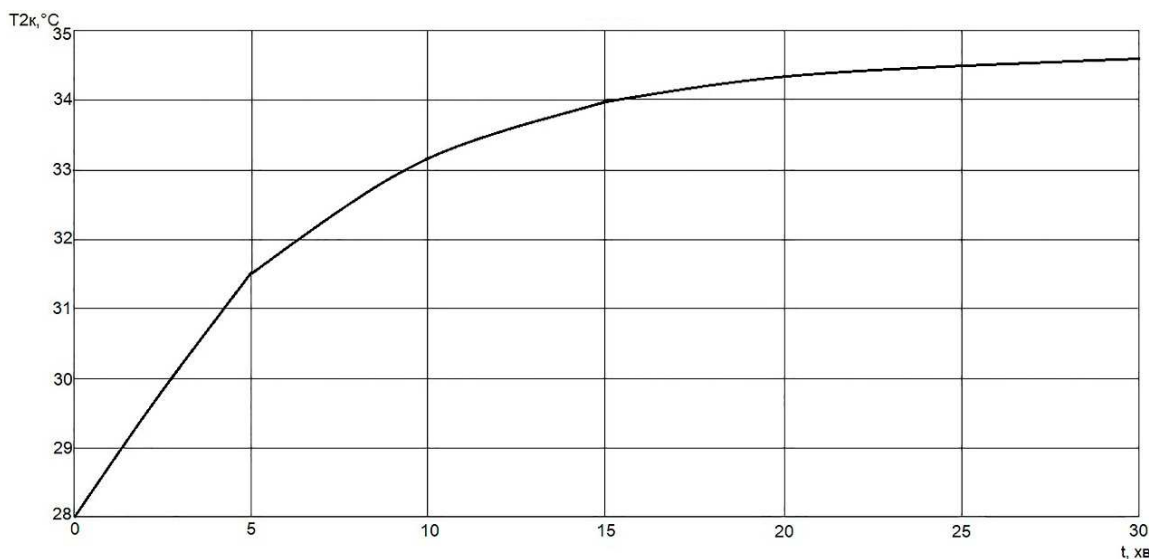


Рис. 3.6. Графік залежності кінцевої температури повітря в залежності від часу, обчислений по формулі (3.34) для теплого періоду року

Аналіз графіка, наведеного на рис. 3.6, демонструє характер зміни температури повітря в часі. Процес характеризується нелінійним зростанням: на початковому етапі від 0 до 10 хвилин спостерігається інтенсивне підвищення температури, яке згодом сповільнюється, наближаючись до стабільного значення близько 34,58 °C.

Отже, математичне моделювання беззаперечно доводить, що у літній період рекуперативне нагрівання припливного повітря в коаксіальному повітропроводі призведе до перевищення санітарних норм мікроклімату в робочій зоні, створюючи ризик теплового стресу для персоналу. Це зумовлює об'єктивну необхідність розробки інженерного механізму сезонної адаптації системи. Найбільш раціональним технічним рішенням, що дозволяє уникнути складного байпасування всієї системи, є застосування спеціалізованого знімного теплоізоляційного мату для блокування теплообміну в теплий період року. Конструктивне обґрунтування та параметри цього технічного рішення детально розглядаються у розділі 4.

3.2. Математичне моделювання теплообміну в робочому приміщенні

Побудова математичної моделі сумісного повітропроводу як теплообмінника дозволяє перейти до моделювання теплообміну в робочому приміщенні. При складанні математичної моделі технологічного процесу особливого значення набуває опис руху потоків речовин. Однак аеродинаміка реальних потоків настільки складна, що в даний час є можливість скласти в загальному вигляді лише рівняння однофазних потоків (рівняння Нав'є-Стокса), але рішення цих рівнянь можна знайти тільки в окремих випадках. Це зумовлює необхідність під час складання математичних описів застосовувати спрощений, наближений підхід до внутрішньої структури потоків, тобто досліджувати процес за допомогою моделей структури потоку. Структура технологічного середовища, що рухається, характеризується ступенем перемішування частинок потоку, яке визначає поле концентрацій і температур. Ця обставина спричинила встановлення за ознакою перемішування типових моделей потоків. До типових потоків відносяться модель ідеального перемішування та модель ідеального витіснення. Математично моделі структури потоку описуються у вигляді диференціальних рівнянь, що виражають зв'язок між основними параметрами процесу. Для технологічних об'єктів переважно цей зв'язок має сенс знаходити, виходячи з аналізу явищ переміщення та розподілу речовини або енергії в даному потоці. Тому універсальним видом аеродинамічної математичної моделі є рівняння, що характеризує зміну концентрації речовини або енергії, які обумовлюються лише рухом [102].

Таким чином, при побудові моделі структури потоку слід враховувати, що модель повинна:

- відображати фізичну сутність реального потоку і водночас мати досить простий математичний опис,

- давати можливість визначити її параметри експериментальним чи розрахунковим способом
- бути зручною для використання під час розрахунків конкретних процесів.

При дослідженні реального апарату можна приймати як модель одну з ідеальних структур. Зокрема, при охолодженні або нагріванні робочого приміщення доцільно вибрати модель ідеального перемішування. Відповідно до цієї моделі приймається, що повітря, що надходить в робоче приміщення, миттєво розподіляється по всьому об'єму внаслідок повного перемішування. При цьому температура повітря у всіх точках робочого приміщення однакова. Для отримання математичної залежності, що описує розподіл температури повітря в часі, приймаються такі позначення:

$T_{вх}$, T – температура повітря відповідно на вході та в будь-якій точці робочого приміщення, °C,

c_m – теплоємність повітря,

V – об'єм зони ідеального перемішування, m^3 ,

v – об'ємна швидкість потоку повітря, що надходить у зону ідеального перемішування, m^3/c ,

c – час, c ,

$Q_{вх}$, Q – кількість теплоти повітря відповідно на вході та в будь-якому місці робочого приміщення, Дж.

Потік теплоти повітря можна представити як добуток витрати повітря на кількість теплоти:

$$I = v \cdot Q. \quad (3.58)$$

Для об'єкта, що розглядається, буде

$$I_{вх} = v \cdot Q_{вх}. \quad (3.59)$$

Нехай температура на вході в якийсь час збільшилася. При цьому режим, що встановився, порушується і рівність температур не дотримується. В результаті в приміщенні акумулюватиметься деяка кількість теплоти, яку можна уявити в інтегральній формі рівністю:

$$\Delta Q = \int_0^t [I_{\text{ex}}(t) - I(t)] dt. \quad (3.60)$$

Для перетворення рівняння (3.60) поділимо обидві його частини на об'єм V і підставимо замість потоків I_{ex} і I їх значення (3.58) та (3.69).

$$\frac{\Delta Q}{V} = \frac{v \cdot c_m}{V} \int_0^t [T_{\text{ex}}(t) - T(t)] dt. \quad (3.61)$$

Ліва частина рівності (3.61) – це зміна кількості теплоти, віднесена до одиниці об'єму, яку можна записати так:

$$\frac{\Delta Q}{V} = c_m [T(t) - T(0)], \quad (3.62)$$

де $T(t)$ – температура у будь-який момент часу,

$T(0)$ – температура до початку збурення.

Тоді:

$$T(t) - T(0) = \frac{v}{V} \int_0^t [T_{\text{ex}}(t) - T(t)] dt. \quad (3.63)$$

В результаті диференціювання рівняння (3.63) отримуємо зміну температури в часі в потоці, що розглядається, тобто математичний опис моделі

ідеального перемішування в диференціальному вигляді:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{v}{V}(T_{\text{ex}} - T) \quad (3.64)$$

Відношення $\frac{V}{v}$ характеризує середній час підтримання температури у зоні ідеального перемішування та позначається τ .

Якщо в зоні ідеального перемішування знаходиться джерело тепла, наприклад, людина або технологічне обладнання, то рівняння (3.64) набуде вигляду:

$$c_m \frac{dT}{dt} = \frac{c_m}{\tau}(T_{\text{ex}} - T) + q \quad (3.65)$$

де q —потужність джерела тепла.

Рівняння (3.65) є звичайним лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Для розв'язання рівняння (3.65) скористаємось методом Бернуллі [96]. Для цього розв'язок (3.65) будемо шукати у вигляді двох невідомих функцій.

$$T = u \cdot w \quad (3.66)$$

Підставимо (3.66) в рівняння (3.65), попередньо перетворивши його,

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau}T = \frac{1}{\tau}T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m},$$

$$u' \cdot w + u \cdot w' + \frac{1}{\tau}u \cdot w = \frac{1}{\tau}T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \quad (3.67)$$

Виносимо функцію u за дужки

$$u' \cdot w + u(w' + \frac{1}{\tau} w) = \frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m}$$

і прирівнюємо нулю вираз в дужках, що дасть систему двох диференціальних рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} w' + \frac{1}{\tau} w = 0 \\ u' \cdot w = \frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \end{cases} \quad (3.68)$$

Знаходимо частинний розв'язок першого рівняння шляхом розділення змінних

$$\begin{aligned} w' + \frac{1}{\tau} w &= 0, \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{\tau} w, \\ \frac{dw}{w} &= -\frac{1}{\tau} dt, \\ \int \frac{dw}{w} &= -\frac{1}{\tau} \int dt, \\ \ln w &= -\frac{1}{\tau} t, \\ w &= e^{-\frac{1}{\tau} t}. \end{aligned} \quad (3.69)$$

Підставляємо (3.69) в друге рівняння системи (3.68)

$$u' \cdot e^{-\frac{1}{\tau} t} = \frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m}. \quad (3.70)$$

Рівняння (3.70) є диференціальним рівнянням з роздільними змінними.

Знаходимо загальний розв'язок цього рівняння

$$\begin{aligned}
 u' &= \left(\frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \right) \cdot e^{\frac{1}{\tau} t}, \\
 du &= \left(\frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \right) \cdot e^{\frac{1}{\tau} t} dt, \\
 \int du &= \left(\frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \right) \cdot \int e^{\frac{1}{\tau} t} dt, \\
 u &= \tau \cdot \left(\frac{1}{\tau} T_{\text{ex}} + \frac{q}{c_m} \right) e^{\frac{1}{\tau} t} + C \\
 u &= \left(T_{\text{ex}} + \frac{q \cdot \tau}{c_m} \right) e^{\frac{1}{\tau} t} + C,
 \end{aligned} \tag{3.71}$$

де C – довільна стала.

Користуючись (3.66) і (3.71), знаходимо згідно (3.69) загальний розв'язок диференціального рівняння (3.65)

$$\begin{aligned}
 T &= \left[\left(T_{\text{ex}} + \frac{q \cdot \tau}{c_m} \right) e^{\frac{1}{\tau} t} + C \right] \cdot e^{-\frac{1}{\tau} t}, \text{ або} \\
 T &= T_{\text{ex}} + \frac{q \cdot \tau}{c_m} + C \cdot e^{-\frac{1}{\tau} t}.
 \end{aligned} \tag{3.72}$$

Для знаходження постійної C скористаємось початковою умовою

$$T(t=0) = T_0. \tag{3.73}$$

Підставляємо (3.73) в рівняння (3.72), що дасть

$$T_0 = T_{\text{ex}} + \frac{q \cdot \tau}{c_m} + C,$$

$$C = T_0 - T_{\text{ex}} - \frac{q \cdot \tau}{c_m}. \quad (3.74)$$

Підставляючи (3.74) в формулу (3.72) знаходимо температуру повітря в потоці теплоносія зі структурою ідеального перемішування за наявності джерел тепловиділення.

$$T = T_{\text{ex}} + \frac{q \cdot \tau}{c_m} + \left(T_0 - T_{\text{ex}} - \frac{q \cdot \tau}{c_m} \right) \cdot e^{-\frac{1}{\tau} t}. \quad (3.75)$$

Розглянемо на конкретному прикладі провітрювання приміщення заданих розмірів.

Кратність повітрообміну:

$$n = \frac{v}{V} \quad (3.79)$$

де v — об'єм повітря, що подається або видаляється за годину, $\text{м}^3/\text{год}$;

V — об'єм приміщення, м^3 .

Кратність повітрообміну — це показник, що означає, скільки разів за одну годину об'єм повітря в приміщенні повністю замінюється свіжим або очищеним повітрям через вентиляцію.

Приміщення має такі розміри:

$H = 3.8 \text{ м}$ — висота приміщення,

$W = 20 \text{ м}$ — ширина приміщення,

$L = 30 \text{ м}$ — довжина приміщення.

Відповідно до санітарно-гігієнічних вимог [2], мінімальна санітарна норма подачі свіжого повітря становить $30 \text{ м}^3/\text{год}$ на одного працівника. Однак, для виробничих приміщень із значними надлишками тепла та вологи, до яких належить сушильне відділення збагачувальної фабрики, визначальним

фактором є не санітарна норма на людину, а необхідність асиміляції тепловиділень від технологічного обладнання.

Згідно з практикою проєктування промислової вентиляції для «гарячих» цехів (термічна обробка, сушіння), рекомендована кратність повітрообміну становить від 5 до 15 разів на годину ($n = 5\text{--}15 \text{ год}^{-1}$). Нижня межа ($n=5$) характерна для холодного періоду року з метою уникнення переохолодження приміщення, а верхня ($n=15$) – для інтенсивного провітрювання в теплий період при пікових теплових навантаженнях.

Розрахунок:

1. Об'єм приміщення:

$$V = H \cdot W \cdot L = 3,8 \cdot 20 \cdot 30 = 2280 \text{ м}^3. \quad (3.80)$$

2. Об'єм повітря для персоналу:

$$v_{\text{люди}} = 3 \cdot 30 = 90 \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (3.81)$$

Вважається, що в приміщенні знаходяться 3 людини.

3. Необхідний об'єм повітря, що провітрює, для кратності (від 5 до 15 разів):

Мінімальна кратність ($n=5$)

$$v_{\text{min}} = 5 \cdot 2280 = 11400 \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (3.82)$$

Максимальна кратність ($n=15$)

$$v_{\text{max}} = 15 \cdot 2280 = 34200 \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (3.83)$$

Мінімальна потреба

$$v_{\text{сум, min}} = v_{\text{люди}} + v_{\text{min}} = 90 + 11400 = 11490 \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (3.84)$$

Максимальна потреба:

$$v_{\text{сум, max}} = v_{\text{люди}} + v_{\text{max}} = 90 + 34200 = 34290 \text{ м}^3 / \text{год}. \quad (3.85)$$

Вважається, що теплові джерела враховані шляхом обчислення кратності повітрообміну.

$T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура повітря в приміщенні,

$T_{ex} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура повітря, яке подається в приміщення.

Для мінімальної і максимальної кратності повітрообміну по формулі (3.78) знаходимо залежність температури від часу. В табл. 3.3 представлені результати розрахунків.

Табл. 3.3 – Результати розрахунків залежності температури від часу при максимальній та мінімальній кратності повітрообміну

t,min	T(n=5)	T(n=15)
0	10	10
10	21.37	28.37
20	26.27	29.87
30	28.39	29.99
40	29.31	30
50	29.7	30
60	29.87	30

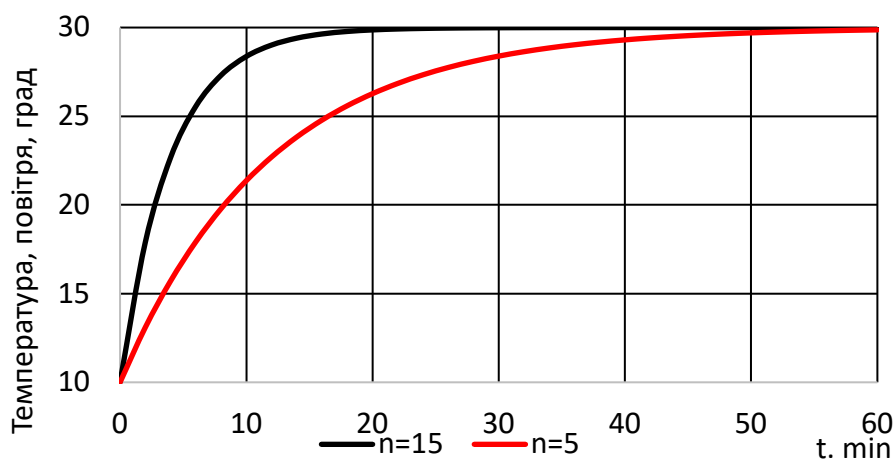


Рис. 3.7. Графіки залежності температури повітря від часу повітрообміну для різних величин кратності повітрообміну

На рис. 3.7 представлені графіки залежності температури в приміщенні в залежності від часу для різних величин кратності повітрообміну [90], [91]. Аналіз приведених графіків показує, що температура повітря в приміщенні зростає з часом. Понад те, зі збільшенням кратності повітрообміну провітрюваність приміщення прискорюється. Справді, графік чорного кольору (n=15) розташовується вище за графік червоного кольору (n=5).

Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу та математичного моделювання теплообмінних процесів у робочих приміщеннях можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено математичну модель сумісного відсмоктувально-припливного повітропроводу, здатного забезпечити ефективний повітрообмін та знизити енерговитрати на підігрів повітря. Доведено доцільність розгляду даного пристрою як поверхневого протитечійного теплообмінного апарату рекуперативного типу («труба в трубі»), де гарячий і холодний теплоносії протікають паралельно у протилежних напрямках.

2. Складність точного аналітичного розв'язання рівнянь у частинних похідних для процесів із розподіленими параметрами зумовила необхідність спрощення моделі. Доведено, що за умови дотримання специфічного температурного співвідношення можлива лінеаризація кривих зміни температури робочих середовищ, що дозволило описати систему за допомогою звичайних диференціальних рівнянь.

3. Застосування методу Бернуллі для інтегрування отриманої системи рівнянь дозволило знайти розв'язок задачі Коші. На основі цього виведено аналітичні залежності, які описують динамічні характеристики теплообмінника — зміну кінцевих температур димових газів та припливного повітря в часі.

4. За допомогою розрахунку критеріїв Рейнольдса та Нусельта визначено коефіцієнти тепловіддачі для обох робочих середовищ. Встановлено, що рух як димових газів, так і повітря всередині досліджуваного апарату відбувається в умовах турбулентного режиму.

5. Розрахунки, проведені на базі синтезованої моделі, та аналіз побудованих графіків показали, що зміна температур носить експоненційний характер. Встановлено, що перехідний процес завершується, і система

асимптотично виходить на стаціонарний температурний режим орієнтовно через 30 хвилин роботи.

6. Синтезована структура математичної моделі є базою для подальшого глибокого дослідження режимів роботи повітропроводу. Наявність аналітичних залежностей дозволяє проводити розрахунки оптимальних умов роботи, а також здійснювати неадаптивну ідентифікацію параметрів моделі шляхом мінімізації обраного критерію для потреб розробки автоматизованих систем керування мікрокліматом.

7. Аналіз повітрообміну при провітрюванні приміщення дозволив дійти до висновку, що математична модель структури потоку повітря може бути представлена у вигляді моделі ідеального перемішування. Це дозволило представити залежність температури у приміщенні у вигляді звичайного лінійного неоднорідного диференціального рівняння першого порядку. Розв'язання задачі Коші, тобто диференційного рівняння з урахуванням початкової умови, дозволило визначити залежність температури в приміщенні від часу провітрювання зовнішнім повітрям. Разом про те, необхідно пам'ятати, що вибір структури моделі ідеального перемішування є наближенням, тому у розрахунках реальних процесів необхідно проводити відповідні уточнення.

РОЗДІЛ 4

ЗАХОДИ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В СУШАРНОМУ ЦЕХУ ГІРНИЧО ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1. Обґрунтування вибору способу видалення шкідливих речовин і надлишкового тепла від барабанної сушарки

У технологічному циклі доведення титано-цирконієвих концентратів на збагачувальних підприємствах важливе місце посідає процес термічної обробки у барабанних сушарках. Саме на цьому етапі відбувається інтенсивне видалення вологи з мінеральної сировини, що досягається шляхом нагрівання матеріалу високотемпературними газами [103, 104]. Однак така термічна обробка супроводжується утворенням газоповітряних сумішей, насичених агресивними компонентами — пилом, аерозолями, залишками продуктів згоряння, водяною парою та іншими потенційно небезпечними домішками [105–106].

З огляду на специфіку умов експлуатації барабанної сушарки, що функціонує в межах гірничо-збагачувального виробництва, ключовим завданням є ефективне видалення утворених шкідливих компонентів, та особливо надлишкового тепла, яке накопичується у робочій зоні агрегату [107]. Це не лише забезпечує безперебійну роботу обладнання, а й дозволяє дотриматися вимог цивільної безпеки, уникаючи перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Зниження температурного навантаження на навколишнє середовище та покращення умов праці персоналу є пріоритетними завданнями для розробки вентиляційних і аспіраційних систем на підприємстві.

Концентрат із початковою вологістю 6–10 % надходить на барабанні сушильні установки, де забезпечується отримання кінцевого продукту з вологістю 0,5–1,0 %. Досягнення необхідних кондицій здійснюється шляхом

використання природного газу (метану), теплотворна здатність якого становить близько 34 МДж/м³. За умови повного згоряння метану при достатньому доступі кисню (у стехіометричній суміші) адіабатична температура полум'я може сягати 1900–1950 °С [105]. Наявність таких високотемпературних процесів формує значне теплове навантаження на робочу зону, що є одним із ключових факторів, які визначають важкість умов праці на подібних підприємствах [107]. Водночас у процесах роботи сушильних агрегатів, що застосовуються для збагачення ільменіт-рутил-цирконового концентрату, а також для випуску попутних ставролітового та дистен-силіманітового концентратів, експлуатаційний температурний режим підтримується на значно нижчому рівні, ніж теоретично можливий, що відображено у табл. 4.1 [108].

Таблиця 4.1. Температурний режим барабанних сушарних установок

Типорозмір барабанної сушарки, м	Пальник (вит-та), м ³ /год	Теплова потужність, МВт	Температура газів на вході $T_{вх}$, °С	Температура газів на виході $T_{вих}$, °С	Температура матеріалу на виході, °С
2.2×16	2 × 340	6.4 (сумарно)	500–650 межа 700-750	100–150	80–100
1.6×8	1 × 340	3.2	450–600	80–120	75–90
1.6×9.2	1 × 350	3.3	450–600	80–120	75–90

За наведеного режиму роботи (табл.4.1) існують певні критерії та обмеження:

1) Температуру на вході ($T_{вх}$) допускається підвищувати до верхньої межі у разі великої подачі матеріалу або підвищеної вологості, а також під час пуску. Водночас постійне утримання температури на рівні 700–750 °С є недоцільним, оскільки це зумовлює зростання теплових втрат, утворення оксидів азоту (NO_x) та підвищене навантаження на футерівку.

2) Температура на виході ($T_{вих}$) не повинна знижуватися нижче 70 °С і має

підтримуватися на рівні 15–25 °С вище за точку роси, щоб уникнути конденсації вологи та подальшого налипання й цементування пилу у газоочисному тракті та фільтрувальному обладнанні [109, 110].

3) Температура матеріалу на виході повинна залишатися в межах 80–100 °С, що унеможливило б повторне зволоження під час транспортування.

4) Контроль температурних параметрів здійснюється шляхом встановлення датчиків на вході й виході газів та у зоні розвантаження; додатково застосовуються пірометри й занурювані щупи.

Попри дотримання наведених умов, під час експлуатації сушарних агрегатів формуються високоенергетичні газові потоки, які містять не лише значну теплову енергію, але й потенційно небезпечні домішки [111]. У ході дослідження, під час відбирання проб у робочій зоні сушарного цеху, було визначено кількісний та якісний склад утворюваних газів, наведений у табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Кількісний і якісний склад утворюваних газів при роботі барабанних сушарок

№ з/п	Компонент газової суміші	Хімічна формула	Середній об'єм у викидах, %	Середньодобова концентрація, мг/м ³	Джерело утворення
1	Вуглекислий газ	CO ₂	0,10–0,14	1800–2500	Продукт повного згоряння метану
2	Водяна пара	H ₂ O	6–10	–	Продукт згоряння метану, волога сировина
3	Оксид вуглецю (чадний газ)	CO	0,0013–0,0022	15–25	Неповне згоряння палива
4	Оксиди азоту	NO _x	0,00021–0,00032	4–6	Реакції за підвищених температур
5	Двоокис сірки (за наявності)	SO ₂	≤ 0,000076	до 2	Сірковмісні домішки в сировині
6	Пилова фракція	–	–	10–30	Винос частинок із сировини
7	Леткі органічні сполуки	–	0,000001–0,00002	0,3–0,5	Органічні залишки у концентраті

З метою забезпечення надійного видалення шкідливих газів і теплових

потоків, що утворюються у процесі сушіння, на підприємстві передбачається система аспірації, побудована на принципі локалізованого відсмоктування. Така система передбачає встановлення відсмоктувального трубопроводу, який підключається безпосередньо до зводу розвантажувального коробу сушарки. Таким чином, створюється ефективний канал для транспортування забрудненого повітря до установок очищення або виведення в атмосферу через фільтраційні пристрої.

Попри те, що наявна система відведення газів вважається ефективною, з метою зниження навантаження на пилогазоочисну установку та забезпечення нормативних температурних значень у робочому середовищі в межах 18–26 °С, і на виході в атмосферу не більше 30 °С з урахуванням холодного й теплого періодів року пропонується удосконалена система, представлена на кресленні (рис. 4.1.).

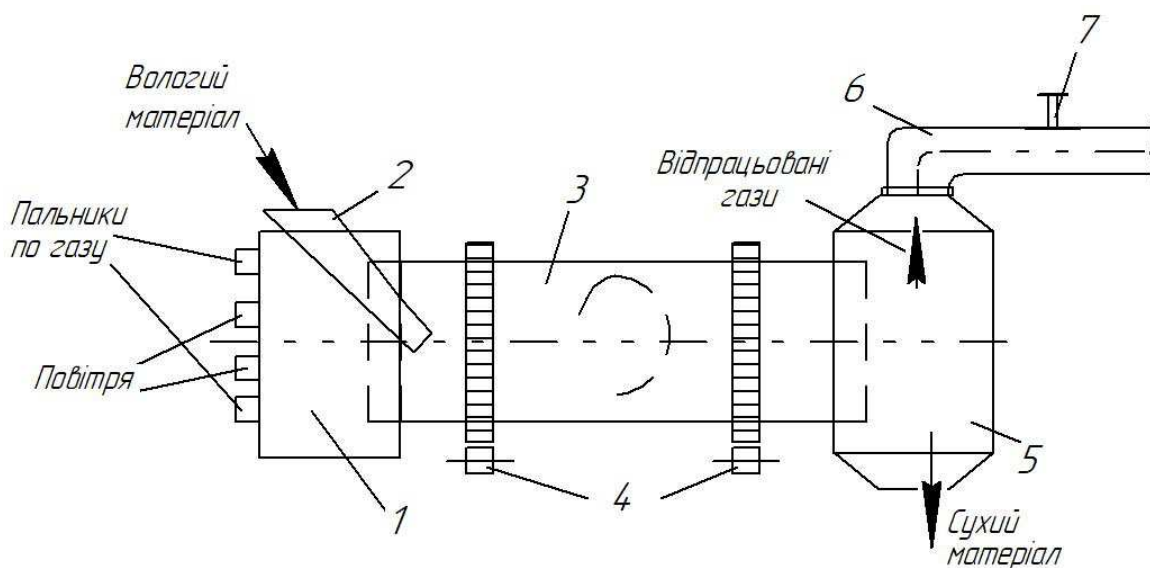


Рисунок 4.1. Видалення шкідливих газів і теплових потоків через витяжний повітропровід із вмонтованою засівкою: 1 – топка; 2 – живильний лоток; 3 – барабан; 4 – роликові опори (котки); 5 – розвантажувальна камера; 6 – витяжний канал; 7 – регульовальна засівка

Особливістю запропонованої схеми є наявність регулювальної засувки, змонтованої на витяжному повітропроводі. На відміну від жорстко зафіксованого повітропроводу без додаткових елементів, така засувка забезпечує адаптивне регулювання інтенсивності витяжки повітря в режимі реального часу. Конструкція дозволяє створювати зазор на початку витяжного каналу, що безпосередньо впливає на ступінь розрідження, яке формується у верхній частині розвантажувального коробу, завдяки підсмоктуванню додаткового, прохолоднішого повітря із повітряного середовища цеху.

Зміна розміру цього зазору впливає на швидкість повітряного потоку, що проходить крізь зону підсмоктування, та дає можливість точно дозувати об'єм відпрацьованих газів і тепла, яке виводиться з барабана. Подібна гнучкість є особливо важливою під час необхідності адаптації режиму аспірації до змін температури, вологості чи складу оброблюваного матеріалу, а також при переході між різними типорозмірами сушарок.

Крім того, регулювальна засувка виконує функцію пневмодинамічного буфера, зменшуючи ризики зворотного викиду газів або різких коливань тиску в системі. Її застосування дозволяє оптимізувати енерговитрати при роботі витяжних вентиляторів, оскільки інтенсивність відсмоктування можна узгодити з фактичним навантаженням без необхідності зупинки обладнання чи зміни конфігурації всієї вентиляційної магістралі.

Таким чином, інтеграція регулювальної засувки у витяжну систему забезпечує гнучке, надійне та енергоефективне керування аерогазодинамічними параметрами, сприяючи зниженню викидів, стабілізації температурного режиму та підвищенню загальної безпеки експлуатації сушильного комплексу.

У сушарках типорозмірів $2,2 \times 16$ м, $1,6 \times 8$ м та $1,6 \times 9,2$ м температура газового потоку на виході після проходження барабана зазвичай становить $80\text{--}150$ °С. У реальних умовах експлуатації ця температура може бути додатково зниженою завдяки контрольованому підсмоктуванню повітря з навколишнього середовища цеху.

Зазначений ефект досягається через часткову розгерметизацію розвантажувального коробу або спеціально передбачені вентиляційні отвори у його верхній частині. При цьому формується зона розрідження, що забезпечує втягування холоднішого повітря (з температурою не вище 23–26 °С) у внутрішній об'єм розвантажувального коробу. Унаслідок цього відбувається перемішування відпрацьованих газів високої температури з повітрям нижчої температури.

Такий процес має низку важливих позитивних наслідків:

1) Додаткове охолодження газового потоку, що надходить до фільтраційних або вентиляційних установок. Це запобігає перегріву обладнання, подовжує строк його експлуатації та зменшує ймовірність займання пилу чи парів у фільтрувальних елементах.

2) Зменшення температурного навантаження на повітропроводи, які транспортують газову суміш. Металеві труби, вентилятори та ущільнення менше піддаються температурній деформації, що підвищує герметичність і надійність системи.

3) Покращення умов праці персоналу, який обслуговує сушильний вузол. Зниження температури навколишнього повітря поблизу розвантажувальної частини барабанної сушарки мінімізує ризик термічних опіків, теплового стресу та перегрівання працівників.

4) Оптимізація процесу розрідження в зоні аспірації. Регульовальна засувка дозволяє регулювати швидкість і об'єм повітря, що відсмоктується, а також компенсувати зміни робочого навантаження сушарки. Це забезпечує стабільну роботу системи незалежно від типорозміру обладнання та інтенсивності технологічного процесу.

5) Підвищення енергоефективності системи очищення. Зниження температури газової суміші перед надходженням у фільтраційні установки дає можливість використовувати менш термостійкі, але ефективні й економічні фільтрувальні матеріали, зменшити об'єм охолоджувального повітря та

скоротити витрати електроенергії на транспортування газів.

Отже, запропонована конструктивна схема витяжного повітропроводу з регулювальною засувкою та керованим підсмоктуванням повітря не лише забезпечує ефективне видалення залишкового тепла й шкідливих газів, а й створює умови для динамічного регулювання параметрів повітряного потоку, підвищує енергетичну та техногенну безпеку, продовжує ресурс експлуатації системи та сприяє поліпшенню мікроклімату цеху.

4.2. Вибір методу очищення та кондиціонування повітря, яке відводиться від барабанної сушарки

Повітря, яке видаляється з барабанної сушарки після завершення процесу теплової обробки концентрату, містить значну кількість забруднюючих компонентів. До основних домішок належать водяна пара, а також пилоподібні частинки залізорудного концентрату. Вміст таких забруднювачів становить потенційну загрозу як для здоров'я обслуговуючого персоналу, так і для безпеки технологічного процесу та навколишнього природного середовища. Зокрема, основні ризики можна охарактеризувати наступним чином:

1) Вплив на дихальну систему персоналу. При неефективному локалізованому відведенні та очищенні повітря можливо вторинне потрапляння пилу у робочу зону, що здатне спричинити професійні захворювання дихальних шляхів (силікоз, бронхіти тощо).

2) Потенціал утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. За певних концентрацій пилу у повітрі та наявності джерела займання можливе виникнення локальних вибухів, що створює серйозну загрозу вибухопожежної безпеки у приміщеннях сушильного цеху.

3) Забруднення довкілля. При неефективному очищенні аспіраційного повітря перед його викидом в атмосферу можуть бути перевищені граничнодопустимі концентрації (ГДК) твердих частинок, що порушує

екологічні стандарти та природоохоронне законодавство.

У зв'язку з цим вибір ефективної системи очищення повітря є пріоритетним завданням, що безпосередньо впливає на реалізацію принципів техногенної та екологічної безпеки у збагачувальному виробництві.

Системи очищення повітря у промисловості мають відповідати ряду вимог, зокрема:

- 1) високий ступінь уловлювання пилу (не нижче 95%);
- 2) термостійкість і хімічна інертність до компонентів повітряного потоку;
- 3) здатність працювати у режимі змінного навантаження;
- 4) ремонтпридатність та простота обслуговування;
- 5) відповідність санітарним і екологічним нормам.

У процесі дослідження було розглянуто три основні типи обладнання для очищення аспіраційного повітря, яке застосовується у збагачувальних цехах Вільногірського ГМК, до таких належать:

- 1) Циклони мокрого типу ЦН-15М конструкції «НІОГАЗ».
- 2) Системи інерційного очищення СІОТ.
- 3) Сучасні фільтраційні установки типу Donaldson PowerCore серії CPC.

Циклони НІОГАЗ мають класичну геометрію — циліндричний корпус із конічним днищем, що забезпечує формування стабільного закрученого потоку всередині камери. Така конструкція створює умови для ефективного розділення фаз за рахунок відцентрової сили, важчі пилові частинки відкидаються до стінок циклону, осідають і надалі відводяться у приймальний бункер, тоді як очищене повітря виходить через центральну трубку [112]. Конусоподібна частина відіграє ключову роль у гальмуванні вертикального потоку і стабілізації траєкторій руху частинок, що сприяє покращенню ефективності очищення без необхідності застосування складних фільтраційних механізмів.

Завдяки простоті конструкції, високій ремонтпридатності та здатності працювати у жорстких умовах, циклони ЦН різних типорозмірів широко використовуються у металургійній та хімічній промисловості, на підприємствах

із виробництва будівельних матеріалів, у деревообробній галузі, а також у процесах збагачення корисних копалин, зокрема на етапах сушіння, агломерації та термообробки матеріалів. Їх застосування є доцільним за умови високого пилового навантаження та відсутності надвисокої вологості або липких аерозолів у газовому потоці.

Продуктивність циклонів ЦН – 15 залежить від конкретної моделі, що дозволяє адаптувати циклони до різних виробничих умов. Так, в цеху збагачення встановлено спарені моделі мокрого типу на 4 та 6 циклонів, які виготовляються з вуглецевої сталі з подальшою обробкою для забезпечення стійкості до корозії (рис 4.2).



a)



б)

Рисунок 4.2. Циклони ЦН – 15М мокрого типу: а) – спарена модель на 4 циклони; б) – спарена модель на 6 циклонів

При використанні таких конструкцій досягається досить висока ефективність видалення пилових часток різних фракцій. Моделі з 4 циклонів забезпечують високу ефективність очищення при середніх обсягах повітряного потоку (рис.4.2 - а)). Підходять для різних промислових застосувань. Моделі з 6 циклонів забезпечують вищу продуктивність і підходять для застосувань, де необхідно обробити більші обсяги повітря а також при високих температурах, чим зумовлюється їх встановлення в операції сушіння в барабанних сушарках (рис.4.2 - б)).

Системи інерційного очищення типу СІОТ використовуються у збагачувальному виробництві як ефективний засіб для більш грубого очищення забруднень повітряного потоку. Основний принцип їх роботи базується на інерційному розділенні частинок, згідно з яким пилові включення, що мають

вищу масу, не здатні оперативно змінити траєкторію руху при раптовому повороті або гальмуванні потоку, що сприяє їх осіданню на стінках апарата або в зоні осадження.

Типова система СІОТ складається з корпусу, розсікача потоку, пиловловлювальної камери, а також трубопровідної обв'язки для виведення очищеного повітря. Повітря, забруднене пилом, надходить в камеру зі змінним напрямком руху. При проходженні через поворотні або розсікаючі елементи частинки пилу під дією інерційних сил відокремлюються від основного потоку та осідають у нижній частині системи. Очищене повітря виводиться через верхню частину апарата або додатково подається на фільтрацію.

Переваги таких систем у високій механічній надійності завдяки відсутності складних рухомих частин, та низьких експлуатаційних витратах, оскільки не потребують енерговитратних фільтруючих елементів.

Системи СІОТ мають суттєві обмеження застосування, таких як:

1) втрата ефективності при наявності дрібнодисперсного пилу з частинками 5 – 10 мкм, що може потребувати встановлення додаткових аспіраційних систем;

2) при нерівномірному розподілі повітряного потоку можлива втрата стабільності очищення.

Таким чином, системи СІОТ доцільно застосовуються в цехах збагачення корисних копалин, на подрібнювальних або транспортних вузлах, особливо у випадках, коли пил має переважно середню або велику фракцію, або перед основними фільтраційними установками.

В межах модернізації аспіраційної системи збагачувального цеху, зокрема на дільниці гравітації, у 2020 році було реалізовано експериментальне впровадження високоефективної картриджної системи Donaldson PowerCore серії CPC (рис. 4.3). Це рішення стало важливим кроком у напрямку підвищення промислової безпеки, замінивши традиційні пиловловлювачі

циклонного типу інноваційними фільтраційними установками нового покоління.



Рисунок 4.3. Очисна система повітря Donaldson PowerCore CPC:

1 – корпус; 2 – опорна рама; 3 – камера кондиціонування; 4 – люк для встановлення картриджів; 5 – пилозбірник; 6 – манометр; 7 – вхідний патрубок; 8 – вихідний патрубок

Результати дослідної експлуатації засвідчили високу ефективність роботи даних фільтраційних модулів (картриджів) в умовах запиленого середовища, характерного для гравітаційної переробки мінеральної сировини (рис.4.4).

Стабільні експлуатаційні показники, низький рівень втрат тиску та мінімальні витрати на технічне обслуговування підтвердили доцільність застосування фільтрів PowerCore у складі аспіраційної системи збагачувального виробництва.

Фільтри Donaldson PowerCore серії CPC є компактними картриджними пристроями, в яких реалізована інноваційна технологія імпульсного очищення фільтрувального елементу зі зворотним продуванням. Висока площа фільтрації

в поєднанні з мікроструктурованим фільтрувальним матеріалом забезпечує утримання частинок розміром до 0,5 мкм з ефективністю, що досягає 99%.



Рисунок 4.4. Змінні картриджі PowerCore CPC з матеріалів Ultra-Web®

Моделі фільтрів серії Donaldson PowerCore CPC характеризуються високою ефективністю завдяки наявності фільтрувальної поверхні площею від 18,6 м² до 74,4 м², що забезпечує обробку значних об'ємів запиленого повітря у виробничих умовах. Конструкція фільтрів вирізняється компактністю та модульністю, що значно спрощує їх інтеграцію у виробничу інфраструктуру, зокрема у випадках обмеженого простору або модернізації існуючих вентиляційних систем. До ключових технічних переваг фільтрів PowerCore CPC належать зручність у технічному обслуговуванні, зниження споживання стисненого повітря для імпульсного очищення фільтрувальних картриджів, а також відсутність необхідності у використанні води. Завдяки цим властивостям

фільтри PowerCore CPC успішно застосовуються у широкому спектрі галузей промисловості — зокрема у виробництві цементу, гірничодобувній та збагачувальній промисловості, де виникає потреба у високоефективному очищенні повітря від пилу.

Слід зазначити й недоліки даної очисної установки. Відповідно до офіційної технічної документації виробника, базові моделі картриджних фільтрів Donaldson PowerCore серії CPC призначені для роботи при температурі повітря від -10 до 60°C . Такий температурний діапазон є безпечним для фільтрувальних елементів стандартного типу (зокрема з матеріалів Ultra-Web®), які використовуються в конструкції даної серії. У зв'язку з цим, застосування фільтрів PowerCore CPC у технологічних процесах, пов'язаних із сушінням концентратів, де температура газового потоку на виході з барабана може становити від 80 до 150°C (табл.4.1), вимагає впровадження додаткових заходів з попереднього охолодження до вказаних рівнів. До таких заходів належить або попереднє охолодження аспіраційного повітря до допустимого рівня шляхом змішування з повітрям із приміщення, або використання термостійких фільтрувальних елементів, спеціально адаптованих до високотемпературного середовища. До недоліків слід віднести необхідність постійної заміни фільтруючих елементів.

Наступним суттєвим недоліком є неможливість очистки повітря від газів, що зумовлює недоцільність встановлення фільтрів Donaldson PowerCore серії CPC у сушарному цеху збагачувального виробництва титано-цирконієвих руд.

Для ефективного очищення аспіраційного повітря пропонується застосування конічних скрубєрів СК, які призначені для очищення запиленого повітря шляхом відділення твердих частинок під дією відцентрової сили та технологічних газів через їх контакт з абсорційними касетами. На зображенні (рис. 4.5) наведено конструктивну схему конічного скрубєра СК.

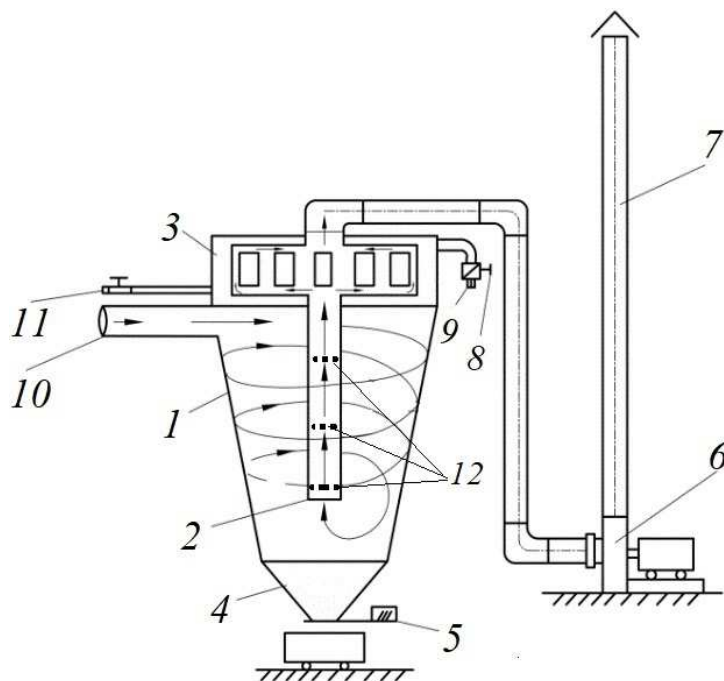


Рисунок 4.5. Схема конічного скрубера СК

1 – корпус; 2 – центральна труба; 3 – камера кондиціонування; 4 – розвантажувальний люк; 5 – сигнальна лампа; 6 – димосос; 7 – димовий трубопровід; 8 – вентиль; 9 – зливний патрубок; 10 – вхідний патрубок; 11 – магістраль реагенту; 12 – абсорційні касети

Принцип роботи циклону полягає в наступному. Забруднене повітря або газовий потік потрапляє до циклону через вхідний патрубок (10), де завдяки тангенціальному вводу формується закручений потік, який рухається по спіралі вздовж внутрішніх стінок корпусу (1). Під впливом відцентрової сили тверді частинки (пил, аерозолі) відкидаються до стінок циклону, втрачають кінетичну енергію та осідають у нижній частині корпусу, після чого виводяться через розвантажувальний люк (4). Очищене повітря поступає до центральної труби (2), проходить вгору, через абсорційні касети (12) у кондиціонуючу камеру (3). У камері кондиціонування (3) можливе додаткове осадження залишкових частинок та охолодження повітря завдяки радіаторній установці, до якої вводиться реагент (наприклад вода) через магістраль (11). Виведення реагенту здійснюється через зливний патрубок (9), що регулюється вентилем (8).

Остаточне транспортування очищеного повітря здійснюється через димосос (6) і димопровід (7) за межі приміщення.

Установка має простоту конструкцію та надійність експлуатації, що зумовлює її застосування в умовах сучасного виробництва. Проте, ефективність уловлювання дрібнодисперсного пилу залишається відносно низькою, циклони здатні ефективно осаджувати частинки розміром понад 5–10 мкм, однак при наявності пилу меншої фракції очищення стає менш результативним. Конструкція досить проста в обслуговуванні, осаджений пил накопичується в нижній частині циклону, що видається шляхом ручного втручання через спеціальні люки.

Додатково слід зазначити, що у модифікаціях СК передбачено використання води або водних реагентів, які подаються через спеціальну магістраль (3), такий підхід додатково охолоджує повітря перед викидом в атмосферу. Таким чином, СК з абсорційними касетами є ефективним у ряді технологічних сценаріїв.

Отже, аналіз технічних рішень для очищення та кондиціонування повітря, що відводиться від барабанної сушарки, дозволив визначити оптимальний варіант для впровадження у виробничу практику. Серед розглянутих систем — інерційних очисників, картриджних фільтраційних установок та циклонів різних модифікацій — найбільш ефективними в умовах сушильного цеху виявилися конічні скрубери СК з абсорційними касетами. Їх конструкція забезпечує стабільне вилучення пилових частинок, у тому числі дрібнодисперсних фракцій, а також створює додаткові можливості для зниження температури та часткової нейтралізації газового потоку. Поєднання високої ефективності очищення, надійності експлуатації та відповідності санітарно-екологічним нормам зумовлює прийняття саме цього типу апаратів до загальної схеми аспірації сушильного виробництва як найбільш доцільного рішення.

4.3. Розрахунок кількості повітря, що подається для відведення газоподібних шкідливих викидів і теплового навантаження

У виробничих умовах сушильного цеху, де експлуатуються барабанні сушарки (дві передбачені як резерв), формується значна кількість теплової енергії, водяної пари та пилогазових забруднень. Це вимагає впровадження ефективної вентиляційно-аспіраційної системи, здатної забезпечити стабільне вилучення як шкідливих газоподібних домішок, так і надлишкового тепла, що накопичується в приміщенні. Відповідно до нормативних положень (ДБН В.2.5-67:2013 та гігієнічних регламентів щодо хімічних речовин), розрахунок повітрообміну має здійснюватися за трьома основними критеріями – вміст шкідливих речовин, надлишкове тепловиділення та вологовиділення – з урахуванням максимального з отриманих об'ємів [2]. Додатково перевіряється необхідна кратність повітрообміну за нормативами. Нижче наведено покрокові розрахунки за кожним критерієм, визначено потрібний повітряний обмін і виконано баланс подачі та видалення повітря, а також вибір вентиляційного обладнання.

1) Розрахунок за тепловиділенням.

У сушарному цеху працює одна барабанна сушарка типорозміру 2,2×16 м, дві в запасі мають менші розміри 1,6×8 м та 1,6×9,2 м. Сумарна теплова потужність сягає приблизно $Q_{об} = 7,7$ кВт. Розрахуємо загальну потужність явного надлишкового тепла:

$$Q_{над.} = Q_{л} + Q_{ос} + Q_{об} + Q_{пов} \quad (4.1)$$

де $Q_{л}$ – тепло від людей $3 \cdot 250 = 750$ Вт; $Q_{ос}$ – тепло від штучних джерел освітлення $100 \cdot 6 = 600$ Вт; $Q_{об}$ – тепло від обладнання 7700 Вт; $Q_{пов}$ – тепло від гарячих поверхонь матеріалів тощо 15000 Вт.

Зробимо підстановку:

$$Q_{\text{над.}} = 750 + 600 + 7700 + 15000 = 24050 \text{ Вт}$$

Ця теплота, виділена в приміщенні повинна відводитися вентиляцією, щоб запобігти перегріву робочої зони. Вентиляційне повітря, що проходить через цех, нагрівається від обладнання. Фактична різниця між температурою повітря що подається і температурою повітря, що виводиться приймалася $\Delta t = 5$ °С (з міркувань комфортного мікроклімату при наявності значного теплового навантаження). Для видалення надлишкового тепла Q необхідна витрата повітря L , що визначається з теплового балансу на нагрів повітря:

$$L_t = \frac{Q_{\text{над.}} * 3600}{\rho * c_p * \Delta t} \quad \text{м}^3/\text{год} \quad (4.2)$$

де: $Q_{\text{над.}}$ — теплова потужність, Вт; ρ — густина повітря, 1,2 кг/м³; c_p — теплоємність повітря = 1005 Дж/(кг·°С); Δt — допустиме підвищення температури, 5°С; 3600 – перерахування секунд у години (щоб отримати L в м³/год). Підставляючи значення, отримаємо:

$$L_t = \frac{24050 * 3600}{6030} = 14360 \quad \text{м}^3/\text{год}$$

Отже, за тепловиділеннями орієнтовно потрібний повітрообмін 14360 м³/год при допустимому підвищенні $\Delta t = 5$ °С. Цей об'єм пояснюється тепловою потужністю сушарок. Очевидно, що відведення всього обсягу надлишкового тепла виключно за допомогою загальнообмінної вентиляції важко реалізувати на практиці. З огляду на це, на підприємстві застосовано локалізоване відсмоктування значної частини гарячих газів безпосередньо від сушарок в аспіраційні канали, що запобігає потраплянню основного теплового потоку в робочу зону. Приймаємо об'єм за надлишком тепла попередньо. Далі

необхідно перевірити достатність повітрообміну за критерієм концентрації шкідливих домішок. Для цього застосовують стаціонарний масовий баланс забруднювача в робочій зоні. Все, що надходить у приміщення, повинно бути винесено витяжкою так, щоб розрахункова концентрація не перевищувала допустиму, таким чином будемо керуватися даними з таблиці (табл. 4.2).

2) Розрахунок за концентрацією шкідливих викидів.

За повного згоряння природного газу (метану) утворюється значна кількість вуглекислого газу (CO_2), основна маса якого ефективно видаляється локальною системою аспірації безпосередньо від сушарки. Однак частина продуктів згоряння може проникати у повітря робочої зони. Відповідно до результатів натурних вимірювань (табл. 4.2), максимальна фіксована концентрація CO_2 у робочій зоні становить 2500 мг/м^3 .

Оскільки це значення є значно нижчим за гранично допустиму середньодобову концентрацію $C_{ГДК} = 9000 \text{ мг/м}^3$, об'єм повітря для розбавлення вуглекислого газу не є визначальним фактором для розрахунку продуктивності загальнообмінної вентиляції. Розрахунок критичного повітрообміну за шкідливими викидами доцільно вести за тими компонентами, які наближаються до ГДК або перевищують її, застосовуючи формулу матеріального балансу з урахуванням фонового забруднення:

$$L_{\text{ш.д.}} = \frac{G}{C_{ГДК} - C_{\text{пр}}} \quad \text{м}^3/\text{год} \quad (4.3)$$

G — масова частка домішки, мг/год ; $C_{ГДК}$ — допустима концентрація, мг/м^3 ; $C_{\text{пр}}$ — концентрація у припливі, мг/м^3 .

Враховуючи розташування сушильного цеху на території промислового майданчика, атмосферне повітря має певне фонове забруднення. Згідно з нормами проектування вентиляційних систем, за відсутності фактичних інструментальних замірів концентрацію шкідливих речовин у припливному повітрі приймаємо на рівні 30 % від гранично допустимої концентрації робочої

зони, тобто $C_{\text{пр}} = 0,3 \cdot C_{\text{ГДК}}$. Нижче визначаємо G та L для кожного компоненту газового потоку і порівнюємо отримані значення.

Для коректного визначення необхідного повітрообміну за газовими домішками розрахунок ведеться на основі маси неорганізованих викидів G , що потрапляють у повітря робочої зони.

Теоретичний об'єм нерозбавлених газових викидів для сушарки $2,2 \times 16$ м становить орієнтовно $V_{\text{tex}} = 8000$ м³/год. Локальна система аспірації ефективно перехоплює основну масу цих газів безпосередньо з розвантажувальної камери. В інженерній практиці приймається, що в приміщення у вигляді неорганізованих викидів (через нещільності) проривається не більше 10 % від загальної маси утворених газів.

У нормально працюючих газових пальниках утворення монооксиду вуглецю (СО) мінімальне. З дослідних даних (табл. 4.2) максимальна концентрація СО у викидах становить 25 мг/м³.

Загальна маса СО, що генерується в процесі $8000 \cdot 25 = 200000$ мг/год.

Маса неорганізованих викидів в цех $G_{\text{CO}} = 200000 \cdot 0,10 = 20000$ мг/год.

Враховуючи ГДК для СО 20 мг/м³ та фонове забруднення припливного повітря, необхідна витрата повітря становитиме:

$$L_{\text{CO}} = \frac{20000}{20 - 0,3 \cdot 20} = \frac{20000}{14} = 1429 \text{ м}^3/\text{год}$$

Таким чином, для розбавлення монооксиду вуглецю до безпечної концентрації потрібно 1429 м³/год повітря, що трохи більше, ніж для СО₂, проте все одно достатньо мале в порівнянні із кількістю необхідною для надлишкового тепла.

За дослідними даними, концентрація оксидів азоту (в перерахунку на NO₂) у викидах сягає 6 мг/м³. Загальна маса утвореного NO₂ складатиме $8000 \cdot 6 = 48000$ мг/год, тоді як маса викидів в цех $G_{\text{NO}_2} = 48000 \cdot 0,10 = 4800$ мг/год. При ГДК оксидів азоту 2 мг/м³, необхідний повітрообмін складе:

$$L_{\text{NO}_2} = \frac{4800}{2-0,3 \cdot 2} = \frac{4800}{1,4} = 3429 \quad \text{м}^3/\text{год}$$

Отже, для дотримання санітарних норм за найнебезпечнішим газовим фактором (NO_2) потрібна витрата повітря близько 3429 $\text{м}^3/\text{год}$. Оскільки це значення більш ніж у 4 рази менше за об'єм повітря, необхідний для асиміляції надлишкового тепла, тепловий фактор беззаперечно залишається визначальним при проектуванні загальнообмінної вентиляції сушильного цеху. Природний газ також містить домішки сірки (фактичний вміст SO_2 до 2 $\text{мг}/\text{м}^3$ при ГДК 10 $\text{мг}/\text{м}^3$), проте цей показник не потребує додаткового розрахунку повітрообміну.

Внаслідок механічного перемішування та теплового впливу в барабані відбувається утворення пилоповітряної суміші, мінеральний склад якої представлений переважно дрібнодисперсними фракціями кварцового піску та силікатів. Максимальна концентрація пилу в необроблених газах, що відсмоктуються системою місцевої аспірації, може сягати 30 $\text{мг}/\text{м}^3$.

Загальна маса пилу, що виноситься з сушарки при розрахунковому технологічному об'ємі газів, становить $8000 \cdot 30 = 240000$ $\text{мг}/\text{год}$. Оскільки система місцевої аспірації працює під розрідженням, приймаємо консервативний випадок, що через нещільності укриттів (на вузлах завантаження та розвантаження) у повітря цеху у вигляді неорганізованих викидів може прориватися до 1 % від цієї маси:

$$G_{\text{пил}} = 240000 \cdot 0,01 = 2400 \text{ мг/год}$$

ГДК для промислового пилу залежить від хімічного складу та дисперсності. Враховуючи, що концентрат містить кварц (ільменіт-рутил-цирконові руди супроводжуються піском), приймаємо ГДК промислового пилу фіброгенної дії $C_{\text{ГДК}} = 2 \text{ мг}/\text{м}^3$ як гранично допустиму середню концентрацію. З

урахуванням фонові концентрації в припливному повітрі, необхідна витрата повітря складе:

$$L_{\text{пил}} = \frac{2400}{2 - 0,3 \cdot 2} = \frac{2400}{1,4} = 1714 \text{ м}^3/\text{год}$$

Тобто орієнтовно 1714 м³/год повітря потрібно для розбавлення пилу до безпечного рівня. Якщо ж ефективно працює місцева аспірація та пиловловлення (циклони уловлюють ≥ 95 % пилу), фактичні концентрації пилу в робочій зоні будуть ще нижчими за прийняті в цьому розрахунку.

Отже, найбільший розрахунковий об'єм повітря серед газопилових домішок припадає на оксиди азоту 3429 м³/год. Відзначимо, що на практиці основну масу шкідливих газів і пилу відсмоктують безпосередньо від сушильних установок локальними витяжками, не допускаючи їх розповсюдження по цеху. Проте, навіть за консервативного розрахунку проривів у приміщення, необхідні об'єми повітря для розбавлення домішок у понад 4 рази менші за повітрообмін, необхідний для відведення надлишкового тепла 14360 м³/год.

В процесі сушіння концентрату випаровується значна маса води. При продуктивності сушарки 1 т/год та зниженні вологості з 10% до 1%, сумарна інтенсивність випаровування води становить близько $W_{\text{заг}} = 100$ кг/год (10^8 мг/год). Основний об'єм утвореної пари видаляється системою локальної аспірації. Враховуючи герметичність обладнання, обсяг неорганізованих виділень пари в приміщення цеху через нещільності приймаємо на рівні 5% від загальної кількості, тобто $W_{\text{цех}} = 5$ кг/год ($5 \cdot 10^6$ мг/год).

Розрахуємо необхідний об'єм повітря $L_{\text{H}_2\text{O}}$ для відведення цієї води, щоб підтримувати відносну вологість у цеху на рівні 65% при температурі 26 °С що відповідає вологовмісту $d_{\text{вн}} = 15,5$ г/м³. Вологовміст зовнішнього припливного повітря для розрахункових умов приймемо на рівні $d_{\text{зовн}} = 9,0$ г/м³ (середні умови для Дніпропетровської обл.).

$$L_{H_2O} = \frac{W_{\text{цех}}}{d_{\text{вн}} - d_{\text{зовн}}} = \frac{5000}{15,5 - 9,0} = 769 \text{ м}^3/\text{год} \quad (4.4)$$

Отримане значення свідчить про те, що вологовиділення не є критичним фактором для загальнообмінної вентиляції цього типу виробництва.

4) Розрахунок за кратністю повітрообміну.

Додатково перевіримо повітрообмін за нормативною кратністю для подібних виробничих приміщень. Об'єм цеху $V = 2280 \text{ м}^3$. Згідно з рекомендаціями для гарячих цехів з виділенням шкідливих речовин, мінімальна кратність загальнообмінної вентиляції – близько 3 разів на годину, а за інтенсивного тепловологовиділення може досягати 5–8 год⁻¹ [44]. Для оцінки візьмемо мінімальне значення 3 год⁻¹ і максимум 5 год⁻¹ (холодний період року, коли надмірна вентиляція обмежується тепловтратами; в теплий період за потреби кратність можуть підвищувати). Тоді необхідна кількість повітря становитиме – $L_{\min} = 3 \cdot 2280 = 6840 \text{ м}^3/\text{год}$, та $L_{\max} = 5 \cdot 2280 = 11400 \text{ м}^3/\text{год}$. Проектний повітрообмін, прийнятий за тепловим критерієм, $L_{\text{заг}} = 16500 \text{ м}^3/\text{год}$ перекриває обидві ці величини, а фактична кратність становить:

$$n_{\text{факт}} = \frac{L_{\text{заг}}}{V} = \frac{16500}{2280} \approx 7,2 \text{ год}^{-1} \quad (4.5)$$

Отже, отриманий результат 7 год⁻¹ потрапляє у характерний діапазон для «гарячих» ділень із виділенням шкідливостей (близько 5–8 год⁻¹). Отже, за критерієм кратності повітрообміну вентиляційна система має резерв продуктивності.

5) Баланс повітрообмінів.

На основі вибраного розрахункового об'єму повітря складемо баланс між припливними та витяжними потоками. Для ефективного видалення шкідливих виділень доцільно підтримувати в сушарному цеху невелике розрідження

(від'ємний тиск) – це запобігає виходу забрудненого повітря в суміжні приміщення і покращує захоплення газів укрітнями. Тому приймаємо, що витяжний повітрообмін перевищує припливний приблизно на 10%. Іншими словами, здійснюється частково нерівноважна вентиляція. Приблизно 16500 м³/год видаляється через витяжні системи, а подається механічно близько 15000 м³/год свіжого повітря. Недостатні 1500 м³/год надходять як підсмоктування – через регульовальну засувку.

Для реалізації балансу передбачено аспірацію від сушарок – безпосередньо від розвантажувальних камер барабанних сушарок відсмоктується основний потік нагрітого газу (через герметично приєднані витяжні канали (див. рис.4.1). Цей потік далі проходить через систему очищення (рис. 4.5) і викидається в атмосферу через димову трубу. Об'єм повітря, вилучений локально, становить близько 90% від загального – тобто порядку 14850 м³/год за максимальної продуктивності. Така аспірація оснащена власним димососом великої продуктивності. Таким чином підтримується потрібний баланс. Надлишкове тепло зі шкідливостями видаляються, а в робочу зону надходить достатня кількість свіжого повітря.

Зведений повітряний баланс виглядає таким чином:

Приплив складає 15000 м³/год, 100% зовнішнього повітря, підігрітого взимку до +18...+23 °С, за рахунок запатентованої системи для промислових приміщень [89]. Подача через повітророзподільники до робочої зони цеху біля обладнання.

Витяжка складає 16500 м³/год, з них 1500 м³/год – підсмоктується, через регульовальну засувку вмонтовану у витяжному повітропроводі. Розрахункова температура витяжного повітря на виході з цеху – не більше 30 °С в теплий період і 20–26 °С у робочій зоні, що відповідає санітарним нормам. При цьому температура газів після сушарок до фільтрів підтримується ≤ 70 °С, для зменшення навантаження на газоочисну установку і досягнення оптимальної температури викиду повітря в атмосферу в межах 28 – 30 °С.

б) Вибір типу вентиляційного обладнання.

Задані витрати повітря надзвичайно великі, тому передбачено застосування високопродуктивних вентиляторних агрегатів. Для локальної аспірації використовується відцентровий димосос підвищеної продуктивності, він розрахований на високу температуру (до 150 °С), вологонасиченість і наявність абразивного пилу. Як приклад, можуть бути застосовані димососи типу Д (димові вентилятори) або промислові центробіжні вентилятори високої продуктивності серії ВЦД, здатні переміщувати 15000-16500 м³/год кожен. Для забезпечення необхідного тиску установки димососів обладнуємо частотним перетворювачем і регулювальною засувкою на аспіраційному повітропроводі для точного утримання –10 % – це підвищує надійність і гнучкість системи. Орієнтовні тиски для підбору – припливний агрегат 800–1200 Па, витяжний 2000 –2500 Па з урахуванням циклона, перехідників і трас повітроводів.

Вибираючи вентилятори, обов'язково звертаємо увагу на стійкість до високої температури та корозійної агресивності повітря. Матеріал крильчаток та корпусів – нержавіюча або вуглецева сталь з антикорозійним покриттям, щоб витримувати нагріте вологе повітря і можливі хімічні домішки. Бажано також обрати вентилятори із запасом по продуктивності (10–15%), щоб компенсувати опір фільтрів та повітроводів, а також забезпечити гнучкість регулювання. Регулювання продуктивності здійснюватиметься частотними перетворювачами і заслінками в аспіраційних каналах. Така система дозволить підтримувати необхідні параметри повітряного середовища цеху в автоматичному режимі, забезпечуючи безпечні умови праці та дотримання екологічних норм.

Розрахунок повітрообміну сушильного цеху показав необхідність залучення великих обсягів повітря – 16500 м³/год – для ефективного відведення тепла та шкідливих газопилових виділень. Реалізація такого повітрообміну може досягатися запатентованою системою вентиляції для промислових приміщень шляхом одночасного локального відсмоктування максимальної кількості нагрітих забруднених газів безпосередньо від сушарки і подачею

свіжого повітря. Обрані вентиляційні агрегати — один припливний 15 000 м³/год (800–1 200 Па) та один витяжний 16 500 м³/год (2 000–2 500 Па) з частотним регулюванням і регулювальною засувкою для забезпечення – 10 % - відповідають вимогам по продуктивності і забезпечують необхідний резерв по тиску. Запропонований повітрообмінний баланс та обладнання дозволяють підтримувати температуру повітря в робочій зоні у теплий період на рівні 20–26 °С та у холодний період року – 18 – 23 °С, концентрації шкідливих речовин – нижче ГДК, а відносну вологість – в межах 60–70%. Це суттєво поліпшує умови праці в сушарному цеху гірничо-збагачувального комбінату та гарантує дотримання санітарно-гігієнічних норм.

4.4. Розробка схеми аспірації та очищення повітря у приміщенні сушарного цеху

З урахуванням результатів попередніх розрахунків (підрозділ 4.3) та вибору методів очищення повітря (підрозділ 4.2), було розроблено комплексну схему аспірації забрудненого повітря від сушильної установки барабанного типу та надання свіжого повітря до робочої зони цеху, яка відповідає вимогам щодо вилучення пилогазових забруднень, надлишкового тепла й вологи. Загальна принципова схема (рис. 4.6) включає послідовність функціональних вузлів, кожен з яких виконує визначену роль у системі вентиляції, аспірації та фільтрації. Основою є барабанна сушарка з палинковим пристроєм, що генерує високотемпературний потік, насичений водяною парою, пилом та газоподібними продуктами згоряння. У конструкції сушарки передбачено розвантажувальну камеру 5 з підключеним аспіраційним патрубком 6, обладнаним регулювальною засувкою 7. Цей вузол забезпечує ручне регулювання ступеня розрідження (вакууму) в зоні виходу газів із сушарки, компенсуючи коливання температури та складу газової суміші при різних режимах роботи (рис. 4.6, поз. 5–7).

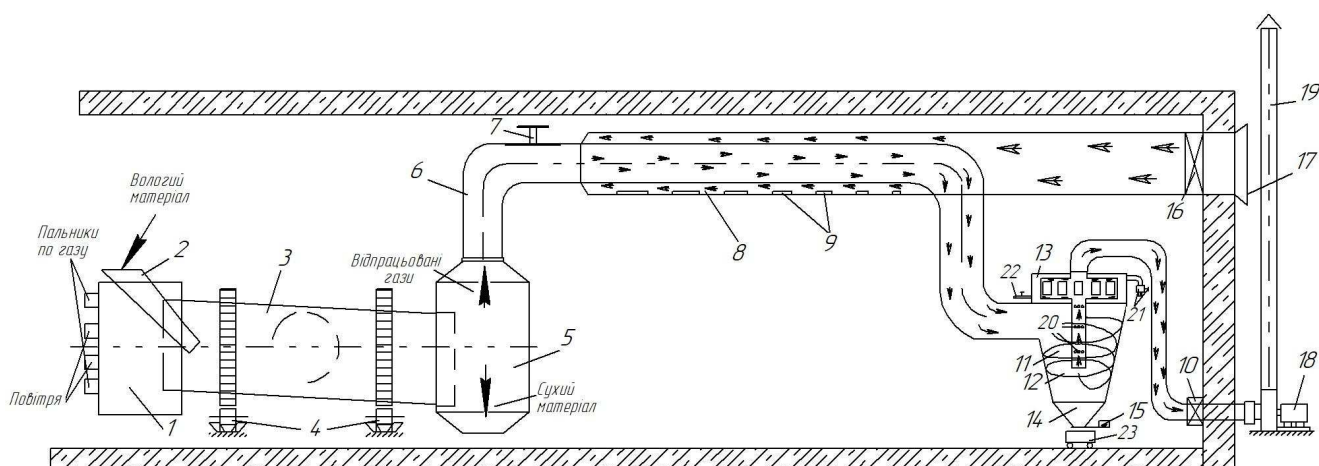


Рисунок 4.6 – Принципова схема відведення шкідливих викидів та теплового навантаження від барабанної сушарки: 1 – топка; 2 – живильний лоток; 3 – барабан; 4 – роликові опори (котки); 5 – розвантажувальна камера; 6 – аспіраційний повітропровід; 7 –регулююча засувка; 8 – повітропровід нагнітаючого повітря; 9 – випускні отвори для свіжого повітря; 10 – агрегат відводу аспіраційного повітря; 11 – корпус очисної установки; 12 – центральна труба; 13 – кондиційна камера; 14 – конічний пилоосаджувач; 15 – сигнальна лампа; 16 – агрегат нагнітаючого повітря; 17 – вхідний отвір для свіжого повітря; 18 – димосос; 19 – димовий трубопровід; 20 – абсорційні касети; 21 – вентиль із зливним патрубком; 22 – патрубок для охолоджуючого реагенту; 23 – пиловий збірник

Потік газопилової суміші, відсмоктуваний через аспіраційний патрубок, проходячи до теплообмінного вузла, де здійснюється його попереднє охолодження шляхом часткового змішування з більш прохолодним припливним повітрям із цеху за допомогою регулювальної засувки 7. Охолоджений газовий потік далі спрямовується у зварену конструкцію здвоєного повітропроводу типу «труба в трубі», що складається з внутрішнього каналу (аспіраційного) та зовнішнього каналу для припливного повітря (рис. 4.6, поз. 12 і 8). У цьому коаксіальному повітропроводі гарячі

відпрацьовані гази всередині передають частину тепла потоку свіжого повітря, який рухається у міжтрубному просторі в режимі протитечії. Таким чином реалізується рекуперація теплоти. Таким чином перед очищенням забруднене повітря ще додатково охолоджується, тоді як припливне повітря нагрівається від нього. Нагріте таким чином чисте повітря випускається в приміщення через спеціальні отвори у зовнішньому повітропроводі (рис. 4.6, поз. 9), забезпечуючи обігрів та вентиляцію робочої зони. Одночасно охолоджений газовий потік спрямовується далі внутрішнім каналом до пилогазоочисної установки.

Центральним елементом системи очищення є високоефективний фільтраційний модуль на основі конічного скрубера СК з додатковими абсорбційними касетами (рис. 4.6, поз. 11, 14, 20). В цьому блоці із газового потоку вилучаються тверді частинки пилу і шкідливі газові домішки. Після проходження пилогазової суміші через фільтрувальні касети конічного скрубера СК, очищений від пилу й шкідливих газів потік видаляється з системи через вентиляційний агрегат – димосос (рис. 4.6, поз. 18) – та викидається назовні через димову трубу (поз. 19). Таким чином, запропонована схема забезпечує повний цикл поводження з відпрацьованим повітрям – від локалізованого забору безпосередньо від сушарки – до рекуперації тепла, фільтрації і організованого викиду в атмосферу.

Конфігурація здвоєного повітропроводу «труба в трубі» відіграє ключову функціональну роль в аспіраційній системі. По-перше, коаксіальне розташування каналів забезпечує теплоізоляцію внутрішнього гарячого потоку – зовнішній повітряний канал створює оболонку, що зменшує тепловіддачу в навколишнє середовище. Це дозволяє мінімізувати втрати тепла і підтримувати температуру газів вище точки роси по всій довжині аспіраційного трубопроводу, запобігаючи конденсації вологи на стінках. По-друге, за рахунок рекуперації відбувається енергозбереження – утилізація теплової енергії відпрацьованих газів для підігріву припливного повітря, що підвищує загальний ККД вентиляційної системи та знижує витрати на опалення

приміщення взимку. По-третє, теплова взаємодія потоків сприяє поступовому охолодженню газів всередині ізолюваного каналу та унеможливорює різке випадіння конденсату, який зазвичай спостерігається в неутеплених димових трубах, а утворені дрібні краплини вологи перехоплюються конічним пилоосаджувачем циклону. Нарешті, коаксіальна схема конструктивно компактніша, що дозволяє економити займаний простір. Всі магістралі виконані з герметичних зварних труб, оснащених температурними компенсаторами та ущільнювачами, що запобігає вторинному викиду забруднювачів в цех. В цілому, застосування принципу «труба в трубі» дає змогу підвищити надійність і безпечність системи аспірації. Так, охолоджені перед фільтром газу не перегрівають обладнання і повітроводи, а відібране тепло повертається у цех у вигляді підігрітого припливного повітря.

Запропонована схема є модульною й легко адаптується до різних виробничих умов. Вона може бути реалізована як на сушарках типорозміру $2,2 \times 16$ м, так і на агрегатах меншої продуктивності без зміни принципових рішень. Передбачено можливість автоматичного регулювання інтенсивності повітрообміну залежно від фактичних параметрів – температури, вологості та концентрації забруднювальних речовин у робочій зоні. Для цього застосовуються датчики контролю параметрів і виконавчі механізми (регулюючі засувки, частотні перетворювачі на вентиляторах тощо), що дозволяє гнучко змінювати витрату повітря. Завдяки використанню високоефективної аспіраційної установки – СК з фільтраційними касетами досягається відповідність очищеного повітря гранично допустимим концентраціям шкідливих домішок, визначеним санітарними нормами. Одночасно рекуперація теплоти та раціональне керування витратами зменшують сумарне енергоспоживання системи за рахнок використання вторинних ресурсів. Конструкцією передбачено можливість підмішування свіжого повітря через відвідний патрубок із регулювальною засувкою (рис. 4.6, поз. 6 і 7), що забезпечує попереднє охолодження газів і стабілізацію

температури перед фільтрацією, що є доцільним у теплий та перехідні періоди року.

Реалізація загальної схеми повітрообміну потребує застосування потужних вентиляційних агрегатів як на боці припливу, так і на боці витяжки. На аспіраційному (витяжному) боці використовується промисловий димосос – відцентровий вентилятор високої продуктивності (рис. 4.6, поз. 18), встановлений після фільтраційної установки. Він створює необхідне розрідження у системі та протягує через себе очищене повітря, викидаючи його в атмосферу.

Отже, розроблена схема аспірації та надання свіжого повітря у сушильному цеху забезпечує комплексне вирішення проблеми видалення шкідливих викидів і надлишкового тепла. Поєднання локалізованого відсмоктування гарячих забруднених газів від сушарок із рекуперацією тепла дозволяє підтримувати у робочій зоні безпечний мікроклімат. Розрахунковий повітряний баланс та підібране обладнання гарантують необхідний температурний режим в холодний період року, концентрації небезпечних газів і пилу – нижче ГДК, а відносну вологість – близько 60–70%. Це суттєво поліпшує умови праці персоналу сушильного цеху та забезпечує дотримання санітарно-гігієнічних норм щодо повітря робочої зони.

4.5. Адаптивне управління тепловим режимом сумісного повітропроводу з використанням комбінованого теплоізоляційного мату

Як було доведено результатами математичного моделювання (див. підрозділ 3.1), ефективність та доцільність функціонування коаксіального повітропроводу суттєво залежить від сезонних кліматичних умов. У літній період (при початковій температурі припливного повітря 28 °С) інтенсивний теплообмін призводить до його нагрівання до 34,58 °С, що неприпустимо з точки зору санітарно-гігієнічних вимог до мікроклімату робочої зони.

Для забезпечення комфортних умов праці протягом усього року запропоновано комплекс технічних рішень щодо адаптивного управління теплообміном. З метою локалізації теплового випромінювання від внутрішньої (витяжної) труби у теплий період року розроблено вдосконалену конструкцію теплоізоляційного мату (рис. 4.7) (на який подано заявку на корисну модель).

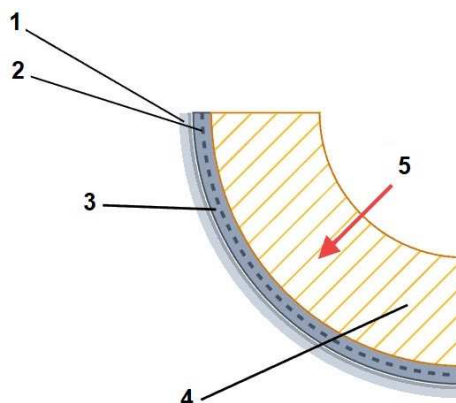


Рисунок 4.7 – Принципова схема теплоізоляційного мату:

1 – алюмінієва фольга; 2 – армувальна сітка; 3 – мінеральна вата; 4 – стінка внутрішнього повітропроводу; 5 – тепловий потік

Запропонований теплоізоляційний мат має комбіновану структуру, що складається з двох функціональних шарів:

1. Теплопоглинальний шар, який безпосередньо контактує з нагрітою поверхнею внутрішнього повітропроводу. Він містить рівномірно розподілену набивку мінеральної вати (товщиною 50 мм), складену з волокон товщиною 3–6 мкм. Для забезпечення структурної цілісності та запобігання розпорошуванню в умовах вібрації, мінеральна вата обгорнута оцинкованою сіткою і прошита скляною ниткою поздовжніми та поперечними швами. Ефективність теплопоглинання цього шару становить 75–80 %.

2. Теплоізоляційний (відбиваючий) шар, що виконаний у вигляді прогумованої тканини, до якої жорстко закріплено лист алюмінієвої фольги. Залишкова величина теплового потоку, що проходить крізь мінеральну вату,

відбивається алюмінієвою фольгою зворотно у поглинальний шар, де гаситься остаточно.

Оперативний перехід вентиляційної системи між режимами «зима» (з рекуперацією тепла) та «літо» (з теплоізоляцією) забезпечується завдяки конструктивній адаптації зовнішнього припливного кожуха. Використання уніфікованих регульованих кронштейнів, вузли кріплення яких оснащені подовженими пазами із запасом ходу 100–120 мм, дозволяє компенсувати приріст діаметра конструкції при встановленні ізоляційного мату без заміни основної опорної рами. Крім того, конструкцією передбачено швидкороз'ємні фланцеві з'єднання. Зокрема, зовнішній припливний повітропровід монтується окремими секціями за допомогою відкидних болтів та високотемпературних гумових ущільнювачів. Таке технічне рішення забезпечує оперативний монтаж і демонтаж зовнішнього кожуха з теплоізоляційним матом (упродовж 20–30 хвилин) без порушення цілісності внутрішньої витяжної магістралі. Для забезпечення геометричної сумісності в літній період застосовуються секції припливного повітропроводу більшого діаметра, розраховані на товщину змонтованого теплоізоляційного мату.

Додатковим елементом адаптивного регулювання в системі виступає регульовальна засувка на витяжному повітропроводі (розглянута у підрозділі 4.1). У літній період її використання як пневмодинамічного буфера дозволяє збільшити підсмоктування цехового повітря, що сприяє ще більшому зниженню температури відпрацьованих газів перед їх надходженням до коаксіальної ділянки.

Впровадження розробленого комбінованого теплоізоляційного мату дозволяє:

- заблокувати конвективну та променисту складові теплообміну, знизивши температуру поверхні внутрішньої труби з 80–150 °С до безпечних 35–45 °С;

- унеможливити вторинне нагрівання припливного повітря в літній період, гарантуючи подачу свіжого повітря з температурою, що не перевищує нормативні показники;
- виключити ймовірність отримання термічних опіків обслуговуючим персоналом.

Таким чином, застосування теплоізоляційного мату є енергоефективним та технологічно обґрунтованим рішенням, яке дозволяє гармонійно адаптувати коаксіальну систему повітрообміну до сезонних змін без необхідності проектування окремих паралельних вентиляційних магістралей.

4.6. Технічне обслуговування аспіраційної системи

Функціонування барабанних сушарок у гірничо-збагачувальному виробництві супроводжується тривалим впливом агресивного середовища – високих температур, абразивного пилю, хімічно активних газів і підвищеної вологості повітряного потоку. У таких умовах виникає об'єктивна потреба в регулярному технічному обслуговуванні як самих сушильних агрегатів, так і пов'язаних з ними аспіраційно-вентиляційних систем. Без своєчасної профілактики неможливо гарантувати стабільну ефективність вилучення шкідливих речовин та тепла, а також безпеку праці персоналу. Для контролю параметрів роботи системи та підтримання заданого режиму повітрообміну в схему включені вимірювальні прилади і допоміжні засоби. Встановлено манометри для відстеження тиску та розрідження, передбачені вентиляційні отвори для підмішування холодного повітря при перегріві, а також датчики температури і вологості повітря в характерних точках. Ці засоби дозволяють оперативно виявляти відхилення в роботі системи та здійснювати необхідне регулювання або ремонт.

Технічне обслуговування аспіраційної системи охоплює ряд заходів і регламентних робіт, спрямованих на підтримання її працездатності. Основні

аспекти обслуговування та контролю включають такі пункти:

1. Доступ до вузлів і ревізія повітропроводів. Конструкція системи передбачає зручний доступ до ключових елементів повітропроводів та обладнання для їх огляду і ремонту. Зокрема, рухомий аспіраційний патрубков на виході сушарки змонтований таким чином, що його можна відсунути убік, забезпечуючи вільний доступ до розвантажувального вузла сушарки при зупинці для ремонту. Це дозволяє персоналу безперешкодно проводити чистку та огляд внутрішніх поверхонь розвантажувальної камери і початкової ділянки трубопроводу. По всій трасі аспіраційних повітропроводів через певні проміжки встановлені оглядові люки, що дають можливість інспектувати стан внутрішніх стінок, швів і компенсаторів, а також видаляти відкладення пилу. Для кожного вентилятора, циклона та фільтра передбачено майданчики або люки для технічного обслуговування, що забезпечує безпечний доступ обслуговуючого персоналу до агрегатів. Належний доступ до вузлів є необхідною умовою для якісного обслуговування, це скорочує час простою при ремонтах і дозволяє повністю реалізувати функціональність системи без демонтажу великих елементів.

2. Очищення повітропроводів і фільтрів. Під час експлуатації на внутрішніх стінках повітряних каналів та обладнання поступово накопичуються пилові відкладення, смолисті речовини (якщо присутні органічні домішки) та конденсат. Особливо інтенсивно налипання пилу відбувається на вигинах труб, в місцях зі зниженим потоком і на елементах фільтрів. З часом це призводить до зменшення живого перерізу повітропроводів і збільшення аеродинамічного опору, що в цілому знижує ефективність відсмоктування повітря. Якщо своєчасно не виконувати очищення, система може втратити розрахункову продуктивність – вентилятори перестають забезпечувати потрібну витрату, в робочій зоні підвищуються температура і концентрація шкідливих речовин. Тому періодична чистка є однією з головних процедур обслуговування. Вона включає механічне видалення пилу з стінок

труб, очищення циклону від накопиченого матеріалу та обслуговування фільтрувальних елементів. Сучасні касетні фільтри, як правило, обладнані системою автоматичного струшування чи продувки, але все одно потребують періодичної перевірки і, за необхідності, заміни картриджів після напрацювання певної кількості годин. Для мокрих пиловловлювачів здійснюється промивання внутрішніх поверхонь водою або спеціальними розчинами, щоб зняти наліт із солей та смол. Регламентом передбачається проводити повне очищення повітропроводів і фільтрів через визначені інтервали. Завдяки цьому відновлюється пропускну здатність тракту, попереджається застій пилу та підтримується стабільна продуктивність аспірації.

3. Перевірка герметичності та стану ущільнень. Однією з умов надійної роботи аспіраційної системи є збереження її герметичності, аби весь забруднений потік прямував у фільтрацію і не потрапляв у цех. Тому технічне обслуговування включає регулярну перевірку всіх фланцевих з'єднань, компенсаторів, ущільнювальних прокладок та швів повітропроводів. Ознаками порушення герметичності можуть бути: поява диму чи пилу біля стиків труб, характерний запах газів у приміщенні, зниження розрідження в аспіраційній лінії або різке падіння ефективності витяжки. У таких випадках негайно проводиться огляд і ремонт – виявляються місця підсосу повітря чи витoku газів, після чого виконується підтяжка болтових з'єднань, заміна пошкоджених прокладок, усунення тріщин зварюванням або встановлення бандажів. Окрім аварійних випадків, передбачена і планова заміна ущільнюючих елементів. Враховуючи високі температури і теплове розширення труб, з часом гумові та паронітові прокладки втрачають еластичність, а компенсатори можуть тріскатися. Тому згідно з графіком технічного обслуговування ТО (наприклад, раз на 6 місяців) здійснюється заміна всіх критичних ущільнень на нові, термостійкі. Це дозволяє підтримувати герметичність системи на високому

рівні і запобігає раптовим розгерметизаціям, які можуть призвести до аварійної зупинки виробництва.

4. Балансування потоку та усунення нерівномірностей. Нормальна робота сушарного обладнання вимагає рівномірного відведення тепла і газів по всьому об'єму агрегату. Якщо десь у аспіраційній системі виникає звуження або засмічення, це може порушити рівномірність потоку: з'являються зони застою, «гарячі точки» з підвищеною температурою або, навпаки, надмірний відбір повітря в якомусь одному місці. Нерівномірний повітрообмін здатен спричинити локальне перегрівання матеріалу, неякісне сушіння в окремих ділянках барабану або підвищене теплове навантаження на стінки апарату. Тому до програми обслуговування входить контроль розподілу потоків і температур. Проводяться періодичні інструментальні обстеження. Вимірювання температури поверхонь та повітря (в тому числі безконтактно – пірометрами, тепловізорами) у різних зонах сушарки та по трасі газовідвідного трубопроводу. У разі виявлення аномальних перегрівів або неоднакового потоку (наприклад, за швидкістю повітря в паралельних каналах) виконуються коригувальні дії. Це може бути очищення або заміна забитої ділянки трубопроводу, регулювання положення дросельних заслінок для вирівнювання витрат по гілках, ремонт деформованих повітропроводів тощо. Після таких заходів проводиться тестове балансування системи – перевірка, що витрати й температури повітря узгоджуються з проектними значеннями на всіх ділянках. Цей підхід усуває причини нерівномірного сушіння та продовжує строк служби обладнання, запобігаючи локальним переревантаженням.

5. Моніторинг вібрацій та стану кріплень. Сушильний барабан – обладнання з обертовими частинами, що може генерувати значні вібрації. Через несправності або недостатню жорсткість кріплень, ці вібрації можуть передаватися на повітропроводи, особливо в місці підключення аспіраційного патрубку до сушарки. Надмірні коливання небезпечні тим, що здатні викликати поступове зношення металу, розгерметизацію швів або навіть механічні

тріщини і відриви кріплень. Тому обслуговування включає регулярну перевірку стану кронштейнів, підвісів і опор повітроводів, особливо біля сушарки та на поворотах траси. Всі болтові з'єднання кріплень повинні бути надійно затягнуті; компенсатори та гнучкі вставки – без надривів; опорні рами – без деформацій. Періодично проводяться заміри вібрації на вузлах і порівнюються з допустимими нормами. У разі виявлення зростання рівня вібрацій вживаються відповідні заходи, зокрема додаткова фіксація повітропроводу, встановлення демпферів, ребер жорсткості або анкерних зв'язків. Одночасно усуваються причини вібрацій – можливо, потрібне балансування барабану сушарки чи заміна підшипників. Таким чином, підтримується структурна цілісність аспіраційної мережі та знижуються ризики механічних пошкоджень під час роботи.

6. Обслуговування вентиляторних агрегатів і рухомих механізмів. Вентилятори є ключовими елементами вентиляційно-аспіраційної системи, тому їхній технічний стан має визначальне значення. Профілактичні роботи включають регулярне змащування підшипників відповідно до встановленого графіка, контроль стану приводів, очищення крильчаток від налиплого пилю та забруднень, а також перевірку електродвигунів. Раз на рік або згідно нормативів проводиться повне технічне обстеження вентиляторів. За потреби здійснюється юстування або заміна підшипників, центрування ротора, виправлення геометрії лопаток. Окрім вентиляторів, в системі є й інші рухомі або регулюючі компоненти – наприклад, засувки, той же рухомий патрубок аспірації. Їхня справність також підтримується через ТО – очищення і змащування направляючих, перевірка датчиків положення, тестування спрацьовування усього діапазону ходу. Особливо уважно слід стежити за станом рухомого патрубку регулювання розрідження. Він повинен плавно пересуватися, щільно прилягати в робочому положенні і не заїдати. Будь-які збої сигналізують про необхідність негайного обслуговування – усунення забруднень з напрямних, підтяжка кріплень, калібрування приводу або заміна

зношених вузлів. Якщо проігнорувати проблеми з цим механізмом, може погіршитися керованість аспірації та стабільність режиму сушіння. Отже, всі вентиляторні та рухомі елементи повинні обслуговуватися згідно регламенту виробника й внутрішнього графіка підприємства.

Перелічені заходи обов'язково включаються до програми планово-попереджувального ремонту (ППР) аспіраційної системи. Інженерно-технічна служба підприємства розробляє детальний регламент і періодичність профілактичних робіт з урахуванням інтенсивності експлуатації сушарного комплексу, властивостей висушувального матеріалу та специфіки виробничого середовища. Неухильне дотримання цього графіка та своєчасне виконання обслуговування дозволяє значно знизити аварійність і простої обладнання, а також забезпечує високий рівень техногенної безпеки. У випадку, коли необхідне втручання або ремонт, проводиться зупинка відповідної ділянки системи. Рухомі з'єднання, як згадувалося, відсуваються або розбираються, надаючи інженерам доступ до внутрішніх компонентів без демонтажу всього трубопроводу. Такий підхід забезпечує поєднання високої ефективності аспірації з підтримуваною ремонтпридатністю – система сконструйована так, щоб її можна було оглянути, прочистити чи відремонтувати з мінімальними зусиллями.

Важливо підкреслити, що технічне обслуговування аспіраційної системи тісно пов'язане з моніторингом параметрів мікроклімату в сушарному цеху. Для гарантування безпечних умов праці впроваджено безперервний контроль ряду ключових показників повітряного середовища. Перш за все, здійснюється контроль ефективності вентиляції – порівнюються фактичні витрати повітря з проектними значеннями, відстежується тиск (розрідження) в магістралі, а також фіксуються спрацьовування сигналізаторів перепаду тиску на фільтрах чи перевантаження вентиляторів. Це дозволяє виявити приховані проблеми ще до того, як вони суттєво вплинуть на режим роботи.

Також у режимі реального часу контролюється температура повітря.

Термодатчики встановлені в зоні розвантаження сушарки, на вході до фільтраційного модуля і в інших критичних точках. Якщо температура перевищує допустимі межі, система автоматики подає сигнал – це може свідчити про неполадки в охолодженні газового потоку або про засмічення теплообмінника, і персонал вживає відповідних заходів.

Не менш важливим є контроль вологості повітря – гігрометри відслідковують відносну вологість у робочій зоні цеху та у витяжному каналі. Надмірне зростання вологості може сигналізувати про падіння ефективності сушіння або про конденсацію у повітропроводах. У такому разі перевіряється стан сушарки, теплообмінника, вмикаються підігрівачі повітря або збільшується витрата вентиляторів для підсушування приміщення.

Контроль швидкості руху повітря у витяжному каналі здійснюється анемометрами – це потрібно, щоб підтвердити розрахункову кратність повітрообміну і стабільність роботи вентилятора. Зменшення швидкості нижче нормативної може вказувати на забруднення повітропроводу або несправність вентилятора, тоді як надмірна швидкість – на можливе підсмоктування зайвого повітря або неправильне налаштування заслінок.

Окрім фізичних параметрів, постійно контролюється якість повітря – концентрація шкідливих домішок. У робочій зоні цеху встановлені газоаналізатори для виявлення оксиду вуглецю (CO) та діоксиду азоту (NO₂), які можуть утворюватися при згорянні газового палива. Наявність таких датчиків особливо важлива, оскільки CO не має запаху і є вкрай небезпечним газом; автоматичне сповіщення про перевищення ГДК CO або NO₂ дає змогу вчасно евакуювати людей і збільшити вентиляцію. Контроль запиленості повітря реалізується за допомогою непрямих методів, що базуються на аналізі експлуатаційних параметрів системи, а також шляхом відбору проб повітря з наступним лабораторним визначенням концентрації пилу. Періодично служба охорони праці проводить заміри концентрації пилу в повітрі робочої зони, а екологічна служба – аналіз проб газів, що викидаються через трубу, щоб

пересвідчитись у відповідності викидів нормативам. Якщо якісь показники виходять за встановлені межі, негайно перевіряється стан фільтруючих елементів, герметичність системи та ефективність вентиляції.

Засоби контролю можуть бути інтегровані в автоматизовану систему управління [113], яка у разі потреби подає сигнал тривоги або навіть активує аварійні режими.

Окрім автоматизованого моніторингу, важливу роль відіграє дотримання персоналом встановлених правил техніки безпеки при експлуатації сушильної ділянки. Обслуговуючий персонал забезпечується необхідними ЗІЗ, регулярно проходить інструктаж щодо дій у випадку аварійної ситуації. Під час технічних оглядів обов'язково виконується комплекс заходів вибухопожежобезпеки – перевіряється відсутність скупчень пилу на конструкціях, справність іскрогасників на вихлопних патрубках, наявність вибухозахисних клапанів на повітропроводах тощо. Особливо актуально це для сушарок, що спалюють природний газ – для них додатково встановлено газоаналізатори метану в повітрі та системи аварійного відключення подачі палива при досягненні небезпечних концентрацій. Сукупність таких профілактичних і захисних заходів є критичною для безпечної і стабільної роботи аспіраційної системи в умовах вибухонебезпечного пилогазового середовища.

Отже, продумане технічне обслуговування аспіраційної системи – від регулярної чистки і перевірки обладнання до безперервного моніторингу мікроклімату – не лише забезпечує довговічність та ефективність роботи вентиляційно-фільтраційного комплексу, але й є запорукою безпеки персоналу та екологічної чистоти виробництва. Реалізація описаних заходів дозволяє мінімізувати ризики аварійних ситуацій, підтримувати параметри повітряного середовища в нормативних межах і створює надійне технічне підґрунтя для дотримання вимог безпеки праці в сушарному цеху.

Висновки до розділу

У четвертому розділі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо нормалізації мікроклімату та зниження рівня шкідливих викидів у робочій зоні сушарного цеху гірничо-збагачувального виробництва. На основі проведених теоретичних та інженерних досліджень отримано такі основні результати:

1. Обґрунтовано вдосконалений спосіб локалізованого видалення шкідливих речовин та надлишкового тепла від барабанних сушарок. Доведено доцільність інтеграції в аспіраційний повітропровід регулювальної засувки, яка виконує функцію пневмодинамічного буфера. Це забезпечує кероване підсмоктування повітря з приміщення, що дозволяє адаптивно знижувати температуру відпрацьованих газів та запобігати перегріву фільтраційного обладнання без втрати ефективності тяги.

2. Здійснено порівняльний аналіз та вибір оптимального методу очищення повітря. Встановлено, що застосування сучасних картриджних фільтрів у сушарному цеху є недоцільним через температурні обмеження та неможливість нейтралізації газів. Доведено, що найбільш ефективним технічним рішенням є використання конічних скрубєрів (СК) з абсорбційними касетами, які комплексно забезпечують уловлювання дрібнодисперсного пилу, нейтралізацію технологічних газів та додаткове охолодження потоку перед викидом в атмосферу.

3. Виконано комплексний розрахунок параметрів повітрообміну за критеріями виділення тепла, вологи та шкідливих домішок. Встановлено, що визначальним фактором для сушарного цеху є теплове навантаження, для асиміляції якого потрібен повітрообмін обсягом 14360 м³/год. Сформовано раціональний повітряний баланс із частково нерівноважною вентиляцією: приплив – 15000 м³/год, витяжка – 16500 м³/год, що створює необхідне розрідження для запобігання проривам забруднень у суміжні приміщення.

4. Розроблено інноваційну комплексну схему аспірації та очищення повітря. Основною особливістю запропонованої схеми є використання зведеного коаксіального повітропроводу типу «труба в трубі», що забезпечує ефективну рекуперацію теплової енергії. Відпрацьовані гарячі гази у внутрішньому каналі підігрівають свіже припливне повітря у зовнішньому, що підвищує загальний коефіцієнт корисної дії системи, забезпечує економію енергоресурсів на опалення цеху та додатково охолоджує аспіраційний потік перед пилогазоочисною установкою.

5. Розроблено та інженерно обґрунтовано механізм сезонної адаптації коаксіального повітропроводу за допомогою конструкції комбінованого теплоізоляційного мату. Поєднання теплопоглинального та теплоізоляційного шарів дозволяє ефективно блокувати теплообмін у літній період, запобігаючи нагріванню припливного повітря та утримуючи температуру зовнішніх поверхонь у межах 35–45 °С. Застосування регульованих кронштейнів та швидкокороз'ємних фланців забезпечує високу експлуатаційну технологічність при зміні режимів «зима-літо».

6. Сформовано регламент технічного обслуговування та контролю параметрів аспіраційної системи. Визначено критичні вузли (ущільнення, рухомі патрубки, фільтрувальні елементи), що потребують регулярного огляду для запобігання розгерметизації та аеродинамічному дисбалансу. Обґрунтовано необхідність впровадження безперервного моніторингу температури, вологості, тиску та концентрації газів з інтеграцією в автоматизовану систему управління для забезпечення високого рівня вибухопожежної та екологічної безпеки.

Впровадження запропонованого комплексу заходів дозволяє гарантовано підтримувати параметри повітря робочої зони в межах санітарно-гігієнічних норм, що суттєво поліпшує умови праці персоналу, знижує екологічне навантаження на довкілля та підвищує надійність експлуатації технологічного обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуального науково-прикладного завдання, що полягає у забезпеченні безпечних і енергоефективних умов праці в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд за рахунок комплексного управління параметрами мікроклімату на основі рекуперації теплоти та раціональної організації повітрообміну.

За результатами виконаних теоретичних, експериментальних та інженерних досліджень зроблено такі основні висновки:

1. На основі критичного аналізу вітчизняного та світового наукового досвіду доведено, що забезпечення енергоефективного мікроклімату у великогабаритних наземних будівлях гірничо-збагачувальних підприємств є нерозв'язаною багатофакторною проблемою. Встановлено, що традиційні системи загальнообмінної та змішаної вентиляції в умовах інтенсивних і динамічних виділень тепла, вологи та мінерального пилу є надмірно енергозатратними та недостатньо ефективними. Водночас існуючі фундаментальні моделі тепломасообміну орієнтовані переважно на глибокі підземні виробки або цивільні об'єкти. Це зумовлює гостру науково-практичну потребу у розробці спеціалізованих математичних моделей та комплексних вентиляційних рішень для специфічних умов збагачення титано-цирконієвих руд.

2. На основі комплексного аналізу умов формування мікроклімату встановлено, що визначальний вплив на погіршення санітарно-гігієнічних умов праці на збагачувальних фабриках здійснює термічне обладнання, зокрема барабанні сушарки. Доведено, що процес сушіння формує складне комбіноване навантаження на повітряне середовище у вигляді інтенсивних тепловиділень, понад 24 кВт надлишкової теплоти від одного агрегата, значних обсягів водяної пари та небезпечних пилогазових емісій (пил фіброгенної дії, CO, NO₂). Це

унеможлиблює забезпечення нормативних параметрів робочої зони традиційними системами загальнообмінної вентиляції та вимагає впровадження комплексних інженерних рішень.

3. Вперше розроблено аналітичну модель динаміки запиленості повітря робочої зони, яка, на відміну від існуючих статичних підходів, інтегрує коефіцієнти внутрішньозмінної нерівномірності та сумісної дії технологічного обладнання. За результатами натурних вимірювань кількісно доведено, що при паралельній роботі сушильних агрегатів пилове навантаження у зоні дихання працівників зростає на 16–34 %, досягаючи критичних значень ($11,5 \text{ мг/м}^3$) у середині зміни. Розроблена модель створює математичне підґрунтя для прогнозування ризиків перевищення ГДК та обґрунтування режимів адаптивного керування місцевими відсмоктувачами.

4. Вперше розроблено математичну модель процесів теплопередачі в комбінованих вентиляційних системах шляхом теоретичного опису теплообміну в коаксіальному відсмоктувально-припливному повітропроводі («труба в трубі»). Застосування методу Бернуллі для розв'язання систем лінійних диференціальних рівнянь дозволило аналітично визначити динаміку температурних полів гарячого та холодного потоків. Встановлено, що час повної теплової стабілізації такої системи становить близько 30 хвилин, що забезпечує гарантоване зниження температури аспіраційних газів до безпечних експлуатаційних меж перед їх подачею на газоочистку.

5. Удосконалено математичну модель формування теплового режиму виробничого приміщення на базі концепції ідеального перемішування, адаптовану до великогабаритних цехів збагачення. Розв'язання відповідної задачі Коші дозволило отримати залежності, які з високою точністю прогнозують зміну температури в цеху в часі залежно від обраної кратності повітрообміну та мінливого теплового навантаження, що є необхідним інструментом для проектування динамічних систем кондиціонування промислових об'єктів.

6. Науково обґрунтовано раціональні параметри повітрообміну та вибрано оптимальні методи очищення аспіраційного повітря. На основі розрахунку багатофакторних балансів доведено, що визначальним критерієм для сушильного цеху є відведення надлишкового тепла, для чого необхідна витрата 14360 м³/год, що в 4 рази перевищує потребу для розбавлення токсичних газів. Сформовано баланс повітрообміну: 16 500 м³/год витяжного та 15 000 м³/год припливного повітря. Рознаховано кратність повітрообміну 7,2 год⁻¹ з керованим розрідженням 10 %. Доведено, що в умовах високих температур та наявності вологого пилу використання картриджних фільтрів є неефективним, натомість обґрунтовано застосування конічних скрубєрів (СК) з абсорбційними касетами, що гарантують рівень очищення понад 95 %.

7. Розроблено та інженерно обґрунтовано інноваційну комплексну схему вентиляції та аспірації сушильного цеху, новизна технічних рішень якої підтверджується патентами України на корисну модель (№ 156625, № 157215) та поданою заявкою на конструкцію теплоізоляційного мату. Система базується на застосуванні пневмодинамічного буфера (регулювальної засувки) та коаксіального рекуперативного повітропроводу з можливістю сезонної адаптації за допомогою комбінованого теплоізоляційного мату. Її впровадження дозволяє надійно стабілізувати температуру в робочій зоні на рівні 20–26 °С у теплий період року та на рівні 18–23 °С у холодний період, зменшити концентрацію шкідливих речовин до значень, нижчих за ГДК, і знизити енергоспоживання системи на 20–30 %.

8. Набули подальшого розвитку науково-методичні засади параметричного моніторингу та адаптивного обслуговування аспіраційних систем. Новий регламент інтегрує алгоритми безперервного контролю ефективності вентиляції, цілісності трас і складу газів (CO, NO₂), що дозволяє превентивно усувати аеродинамічний дисбаланс та гарантувати високий рівень безпеки праці.

9. Практичну цінність, ефективність та соціально-економічну значущість розроблених технічних рішень і математичних моделей підтверджено їхнім успішним впровадженням в інженерно-управлінську практику ТОВ «Імекс Мінералс» для об'єктивного контролю повітряного середовища та екологічної модернізації збагачувальних фабрик, а також в освітній процес Криворізького національного університету з метою підвищення якості підготовки фахівців у сфері охорони праці (Додаток В).

ЛІТЕРАТУРА

1. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.042-99): Постанова МОЗ України № 42 від 01.12.1999 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря. Київ: Мінрегіон України, 2013.
3. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Худик М. В. Вентиляція промислових приміщень: підручник. Кривий Ріг: Видавець Р. А. Козлов, 2022. 250 с.
4. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 56 с.
5. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Київ: Мінрегіон України, 2019. 109 с.
6. Goodfellow H., Tähti E. (Eds.). Industrial ventilation design guidebook. San Diego: Academic Press, 2001. 734 p.
7. Benito P. I., González-Gaya C., Sebastián M. Thermal Industrial Comfort Analysis According to Different Regulations. *DAAAM International Scientific Book*, 2019. P. 04. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2019.04.
8. Ventilation in industrial environments: general guidelines for contaminant and heat control / National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). URL: <https://www.cdc.gov/niosh>.
9. Shi X. Revision and prospect of "Standards for indoor air quality (GB/T 18883-2022)" in China. *Zhonghua yu fang yi xue za zhi*. 2023. Vol. 57. P. 1725–1728. DOI: 10.3760/cma.j.cn112150-20230330-00243.
10. Enforcement Decree of the Occupational Safety and Health Act (Presidential Decree No. 35486) / Republic of Korea. 2025. URL: <https://elaw.klri.re.kr>.
11. Liu H., Kang Q., Zhao K. et al. Establishment and application of the environment evaluation model for beneficiation plant. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, 16625. DOI: 10.1038/s41598-024-67802-3.

12. Ray M., King M., Carnahan H. A review of cold exposure and manual performance: Implications for safety, training and performance. *Safety Science*. 2019. Vol. 115. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.01.014.
13. Sabirov I. F. N. D., Oqilov A. K. Technology in microclimate control for industrial buildings: Enhancing efficiency and comfort. *Texas Journal of Engineering and Technology*. 2023. Vol. 21. P. 33–36.
14. Donoghue A. M. Occupational health hazards in mining: an overview. *Occupational Medicine*. 2004. Vol. 54, No. 5. P. 283–289. DOI: 10.1093/occmed/kqh072.
15. Шаповалов В. А. Очищення повітря всередині аспіраційного укриття перевантажувального вузла. *Вісник Криворізького національного університету*. 2018. Вип. 46. С. 118–122. DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-118-122.
16. Shapovalov V. A. The improvement of working conditions at the industrial workshops of mining enterprises. *2nd Int. Conf. "Innovative development of resource-saving technologies"*. Petroșani: Universitas Publishing, 2019. P. 125–127.
17. Худик М. В. Поліпшення ефективності роботи аспіраційних укриттів перевантажувальних вузлів. *Вісник КНУ*. 2012. Вип. 31. С. 285–289.
18. Сукач С. В. та ін. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочій зоні приміщення за показниками повітряного середовища. *Вісник Кременчуцького нац. ун-ту*. 2017. Вип. 1(102). С. 17–21.
19. Laussmann D., Helm D. Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*. InTech, 2011. DOI: 10.5772/18600.
20. Lin Y. et al. Explaining inefficiencies in commercial buildings providing power system ancillary services. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 152. P. 216–226. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.042.

21. Гурін А. О., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Управління параметрами мікроклімату в підземних камерах шахт з джерелами тепла. *Вісник Криворізького національного університету*. 2016. Вип. 41. С. 132–137.
22. Chen Ren et al. Construction of linear temperature model using non-dimensional heat exchange ratio: Towards fast prediction of indoor temperature and HVAC systems control. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 251. 111351. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111351.
23. Cecala A. B., Klinowski G. W., Thimons E. D. Reducing respirable dust concentrations at mineral processing facilities using total mill ventilation systems. Report No. 9469. U.S. Bureau of Mines, 1993.
24. Чайка Ю. І. та ін. Вентиляційні системи в цивільному та промисловому будівництві: комплексний огляд і шляхи модернізації. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2025. Вип. 211. С. 113–122. DOI: 10.18664/1994-7852.211.2025.327331.
25. Kurnia J. C. et al. Evaluating the performance of a mine ventilation system. *Applied Energy*. 2014. Vol. 132. P. 297–308.
26. Ghayoomi M. et al. Performance investigation of air curtains in industrial buildings. *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 199. P. 563–575.
27. Wang S., Ma Z. Supervisory and Optimal Control of Building HVAC Systems: A Review. *HVAC&R Research*. 2008. Vol. 14(1). P. 3–32.
28. Royapoor M., Antony A., Roskilly T. A review of building climate and plant controls, and a survey of industry perspectives. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 158. P. 453–465.
29. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine ventilation systems. *CIM Journal*. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 229–237.
30. Yang J. et al. Performance evaluation of localized air-conditioning. *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. P. 703–714.

31. Гурін А. О., Шаповалов В. А. Спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів. *Гірничий вісник*. 2020. Вип. 107. С. 138–142. DOI: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-138-142.
32. ASHRAE Handbook—Fundamentals. Duct Design. Atlanta: ASHRAE, 2017.
33. Reddy N. P., Wang Y. J. Experimental setup for a multiple-fan ventilation system. *Mining Publications*, 1992. URL: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/219574>.
34. Wala A. M. et al. Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments. *Mining Engineering*. 2007. Vol. 59, No. 10. P. 49.
35. Патент 153671, Україна, МПК E21F 1/00 (2023.08). Система вентиляції робочої зони зварювального цеху в холодний період року. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Усенко К. О.; заявник та патентовласник Криворізький національний університет; № u202300301; заявл. 30.01.2023; опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32.
36. McPherson M. J. Subsurface ventilation and environmental engineering. Springer, 1993. 405 p.
37. Патент 153670, Україна, МПК E21F 1/00 (2023.08). Спосіб вентиляції робочої зони зварювального цеху в холодний період року. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Усенко К. О.; заявник та патентовласник Криворізький національний університет; № u202300300; заявл. 30.01.2023; опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32.
38. Zhang J., Bai Y., Cao Z. et al. Numerical study on long-distance heating system based on high-velocity jet at ambient temperature for induced air supply. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 6. P. 979. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15060979>.
39. Ye X., Zhu H., Kang Y., Zhong K. Heating energy consumption of impinging jet ventilation and mixing ventilation in large-height spaces: A comparison

study. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 130. P. 697–708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.055>.

40. Kabanshi A., Sandberg M. Entrainment and its implications on microclimate ventilation systems: Scaling the velocity and temperature field of a round free jet. *Indoor Air*. 2019. Vol. 29. P. 331–346. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12524>.

41. Kabanshi A. Near-Field Flow Structure and Entrainment of a Round Jet at Low Exit Velocities: Implications on Microclimate Ventilation. *Computation*. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 100. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation8040100>.

42. Kabanshi A., Sattari A., Linden E. et al. Experimental study on contaminant entrainment in air distribution systems with free jets. *Healthy Buildings 2017 Europe* (Lublin, Poland, July 2–5, 2017). 2017. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1438684/FULLTEXT01.pdf>

43. Todde V., Linden E., Sandberg M. Indoor low speed air jet flow: fibre film probe measurements. 1998. URL: https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_12126.pdf

44. Svensson K., Ghahremanian S., Moshfegh B., Tummers M. Numerical and experimental investigation of flow behavior in a confluent jet ventilation system for industrial premises. *The 10th International Conference on Industrial Ventilation* (Paris, France, September 17–19, 2012). 2012. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-89789> (date of access: 13.05.2026).

45. Wang X., Dai Y., Ma J. Development and experimental verification of a model for an air jet penetrated by plumes. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 7, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814015571045>.

46. Dominguez Espinosa F. A., Glicksman L. R. Determining thermal stratification in rooms with high supply momentum. *Building and Environment*. 2017. Vol. 112. P. 99–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.016>.

47. Tian X., Lin Z. Predicting personalized thermal comfort in stratified micro-environments using turbulent jet theories and data-driven models. *Building and*

Environment. 2023. Vol. 230. P. 110009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110009>.

48. Cho Y., Awbi H. B. A study of the effect of heat source location in a ventilated room using multiple regression analysis. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, No. 5. P. 2072–2082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.008>.

49. Wang Y., Gao J., Xing X. et al. Measurement and evaluation of indoor thermal environment in a naturally ventilated industrial building with high temperature heat sources. *Building and Environment*. 2016. Vol. 96. P. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.014>.

50. Zhao X., Yin Y. Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend. *Building and Environment*. 2024. Vol. 251. P. 111229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111229>

51. Huang Y., Wang Y., Liu L. et al. Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant. *Building and Environment*. 2015. Vol. 85. P. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.038>.

52. Dong P., Li Y., Liu G., Yan G. Numerical analysis of crystallization and freezing of flying droplet in artificial snowmaking. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 163. P. 108740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108740>.

53. Masterton J. M., Richardson F. A. Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Downsview: Environment Canada, Atmospheric Environment, 1979. 45 p.

54. Li J., Yang L., Song T., Qi R. Research on the Effects of the High Temperature and Humidity Environment on Human Comfort in Coal Mine Emergency Refuge System. *Safety*. 2019. Vol. 5, No. 2. P. 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/safety5020028>.

55. Ahamed M., Ibraheem M., Azharudeen M., Basith M. Performance analysis of atmospheric water extraction by refrigerator cum air conditioner.

International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. P. 318–339. DOI: <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-14341>.

56. Teku K., Yadav J. S., Rao V. S. et al. Experimental analysis of potable water generation using humidified air. *Research and Applications of Thermal Engineering*. 2021. Vol. 4, No. 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4638529>.

57. Zheng S., Eimann F., Philipp C. et al. Experimental and modeling investigations of dropwise condensation out of convective humid air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 151. P. 119349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119349>.

58. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. An evaluation of the functioning of cooling systems in the Polish coal mine industry. *Energies*. 2018. Vol. 11, No. 9. P. 2267. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092267>.

59. Szlązak N., Obracaj D. Evaluation of microclimate conditions in Polish underground mines. *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-1420-9_67.

60. Truong Tien Q., Łuczak R., Życzkowski P. Climatic hazard assessment in selected underground hard coal mines in Vietnam. *Inżynieria Mineralna*. 2022. No. 2. DOI: <https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-69>.

61. Nguyen Q., Do T., Nguyen T. et al. Solutions to improve microclimate conditions for longwall in Mong Duong coal mine. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2021. Vol. 62. P. 28–35. DOI: [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5a\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).04).

62. Han Q., Lin D., Yang X. et al. Thermal environment control at deep intelligent coal mines in China based on human factors. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 4. P. 3193. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043193>.

63. Saleem H. A. Energy consumption reduction in underground mine ventilation system: an integrated approach using mathematical and machine learning

models toward sustainable mining. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 3. P. 1038. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17031038>.

64. Швагер Н. Ю., Худик М. В. Мікрокліматичні умови праці на робочих місцях збагачувальних фабрик. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2025. Вип. 41, № 3–4. С. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.41-3-4.2025.55-62>.

65. Tykhenko O., Glyva V., Levchenko L., Burdeina N. et al. Study of air deionization factors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2, No. 10 (128). P. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300909>.

66. Kostenko V., Bohomaz O., Kostenko T., Kutniashenko O. Improvement of microclimatic working conditions for miners in deep mines. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2024. Vol. 39, No. 3. P. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.3.11>.

67. Костенко В. К., Богомаз О. П., Каменець В. І., Акулич А. М. Удосконалення провітрювання та покращення мікрокліматичних умов у вибоях глибоких шахт. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2026. № 6. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-22>.

68. Kostenko V., Zavialova O., Novikova Y. et al. Substantiating the parameters of quickly erected explosion-proof stopping. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 4. P. 145–153. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.12>.

69. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Використання шахтних вод для нормалізації мікроклімату в гірничих виробках глибоких шахт. *Вісник Криворізького національного університету*. 2015. Вип. 40. С. 27–33.

70. Лапшин О. О. Застосування водоповітряного форсункового охолодження рудникового повітря з використанням шахтних вод. *Сталий*

розвиток промисловості та суспільства : Міжнар. наук.-техн. конф. Кривий Ріг, 2013. Т. 1. С. 198–199.

71. Лапшин А. А., Немченко А. А., Ошмянский И. Б. Кондиционирование воздуха на глубоких горизонтах шахты. *Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку – 2010*: Міжнар. наук.-техн. конф. Кривий Ріг, 2010. С. 175–176.

72. Лапшин О. О. Нормалізація мікроклімату у виробках шахт із заповненням виробленого простору твердіючою закладкою. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2007. Вип. 15. С. 123–128.

73. Беляев Н. Н., Русакова Т. И. Математическое моделирование процесса вентиляции тупиковой подземной выработки. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2015. № 47. С. 36–41. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2015_47_7 (дата звернення: 13.05.2026).

74. Лапшин А. А., Серебренников Э. В. Моделирование температурных режимов насыщенного водяными парами воздуха при охлаждении шахтных выработок. *Охорона праці та навколишнього середовища на гірничих підприємствах гірничо-металургійного комплексу* : зб. наук. праць. 2008. Вип. 10. С. 90–95.

75. Корбут В. П., Рибачов С. Г. Експериментальні дослідження дворівневого повітряно-струминного огороження відкритої поверхні промислових ванн великих розмірів. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2021. Вип. 36. С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.6-13>.

76. Voznyak O., Myroniuk Kh., Sukholova I. et al. Physical models of ventilation system fittings in special conditions. *Theory and Building Practice: JTBP*. 2021. Vol. 3, No. 1. P. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.042>.

77. Yevsieiev V., Holod I. Evolution of approaches to intelligent microclimate control in industrial environments: A review of models for cyber-

physical systems. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2026. Вип. 107. С. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2026.107.07>.

78. Олійник Т. А., Невзоров В. В. Тонке грохочення як спосіб вирішення технологічних питань при виробництві високоякісних залізрудних концентратів. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип. 57. С. 80–89.

79. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista J. N. M., Sarkis A. M., Leal Filho L. S., Pádua T. F., Béttega R. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39, No. 10. P. 1359–1370. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1747073>.

80. Chaedir B., Kurnia J., Sasmito A. P., Mujumdar A. Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>.

81. Олійник Т. А., Скляр Л. В., Олійник М. О. Дослідження умов селективного руйнування мінеральних комплексів при збагаченні гематит-ільменітових руд. *Збагачення корисних копалин*. 2015. Вип. 60 (101). С. 45–52.

82. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплого середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Київ: Мінрегіон України, 2012. URL: https://www.ksv.biz.ua/publ/dstu/dstu_b_en_iso_7730_2011/3-1-0-1468.

83. НПАОП 0.00-1.82-18. Правила охорони праці під час дроблення і сортування, збагачення корисних копалин і огрудкування руд та концентратів. Київ: Держпраці, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0666-18#Text>.

84. Awbi H. B. Ventilation of buildings. 2nd ed. London: Spon Press, 2003. 214 p.

85. Nazaroff W. W. Indoor particle dynamics. *Indoor Air*. 2004. Vol. 14, Suppl. 7. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00286.x>.

86. Whitworth A. J., Forbes E., Verster I., Jokovic V., Awatey B., Parbhakar-Fox A. Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 7. Art. 100451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>.
87. König U., Verryn S. M. C. Heavy mineral sands mining and downstream processing: value of mineralogical monitoring using XRD. *Minerals*. 2021. Vol. 11, No. 11. Art. 1253. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11111253>.
88. Lozhnikov O., Sobko B., Pavlychenko A. Technological solutions for increasing the efficiency of beneficiation processes at the mining of titanium-zirconium deposits. *Inżynieria Mineralna*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.29227/IM-2023-01-07>.
89. Dionori F., Zehtabchi M. The role of transport-related innovation in the mining sector. *Global Challenges for Innovation in Mining Industries* / ed. A. Daly, D. Humphreys, J. Raffo, G. Valacchi. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. P. 117–141. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108904209.006>.
90. Wills B. A., Finch J. Mineral processing technology. 7th ed. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 2006. 385 p.
91. Сокур Л. М., Бабець Е. К., Сокур Н. И., Чебенко Ю. Н. Дробильно-сортировочное и транспортное оборудование: монография. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2011. 236 с.
92. Маланчук З. Р., Корнієнко В. Я., Сорока В. С., Васильчук О. Ю. Транспортні системи гірничих підприємств: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2018. С. 105–182.
93. Швагер Н. Ю., Заїкіна Д. П. Аналіз професійної захворюваності на гірничодобувних підприємствах Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету*. 2018. Вип. 46. С. 99–104.

94. Сокур М. І., Кіяновський М. В., Воробйов О. М., Сокур Л. М., Сокур І. М. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2014. 304 с.
95. Wu Z. H., Hu Y. J., Lee D. J., Mujumdar A. S., Li Z. Y. Dewatering and drying in mineral processing industry: potential for innovation. *Drying Technology*. 2010. Vol. 28, No. 7. P. 834–842. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.490485>.
96. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Використання шахтних вод для нормалізації мікроклімату в гірничих виробках глибоких шахт. *Вісник Криворізького національного університету*. 2015. Вип. 40. С. 27–33.
97. Гутовський Д. В., Жученко О. А. Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2024. № 2 (23). С. 18–26.
98. Ковальов А. В., Петухов І. І., Михайленко Т.П. Математичне моделювання теплопередачі у повітряно-крапельному потоку камери підшипника ГТД. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 6. С. 23–30.
99. Meyris A., Khalatov A., Kovalenko G. Experimental study of heat transfer and hydraulic resistance at cross flow of tube bundle with indentations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 4, No 8 (88) (2017), – pp. 17-21.
100. Вакуленко Д. та Мілейковський В. Моделювання ефективності теплоутилізації регенеративного пристрою за різними підходами. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, т. 41, 2022, с. 32- 38, 2022. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.41.32-38>.
101. Зеленська І. О. Побудова розв’язку системи сингулярно збурених диференціальних рівнянь з диференціальною точкою звороту. *Вісник*

Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2023. № 1. С. 116–121.

102. Гацький А. К., Гацький І. А. Синтез управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання. *Гірничий вісник.* 2023. Вип. 111. С. 163–169.

103. Sakhrieh, A. (2019). The adiabatic flame temperature and laminar flame speed of methane premixed flames at varying pressures. *Acta Periodica Technologica*, (50), 220-227. <https://doi.org/10.2298/APT1950220S>.

104. Shen, B., Liu, Z., Han, Y., & Tan, M. (2024). A study of the methane oxidation mechanism and reaction pathways using reactive molecular simulation and nonlinear manifold learning. *ACS Omega*, 9(42), 43301-43312. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c07094>.

105. Трегубов, Д., Трегубова, Ф. (2024). Дослідження впливу надмолекулярної будови на параметри пожежної небезпеки вуглеводнів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 8(2), 133-146.

106. Орехова О. В. (2016). Сучасний стан умов праці в металургійному виробництві України. *ScienceRise: Medical Science*. 10(6). 33–38 <https://doi.org/10.15587/2519-4798.2016.79865>.

107. Пілов П.І., Левченко К.А., Шутов В.Ю., Самофал І.В., Чумак О.М., Корчагін Є.П. (2019). Розробка технології збагачення техногенного родовища Вільногірського гмка. *Збагачення корисних копалин: Науково-технічний збірник.* Вип. 74(115). 3-12.

108. Chaedir, B. A., Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., & Mujumdar, A. S. (2021). Advances in dewatering and drying in mineral processing. *Drying Technology*, 39(11), 1667–1684. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907754>.

109. Duchesne, C., Thibault, J. and Bazin, C. (1997), Modelling and dynamic simulation of an industrial rotary dryer. *Dev. Chem. Eng. Mineral Process.*, 5: 155-182. <https://doi.org/10.1002/apj.5500050301>.

110. Brar, L. S., Sharma, R. P., & Dwivedi, R. (2015). Effect of vortex finder diameter on flow field and collection efficiency of cyclone separators. *Particulate Science and Technology*. 33(1): 34-40.
111. Tsai, C. J., Chen, D. R., Chein, H., Chen, S. C., Roth, J. L., Hsu, Y. D., Biswas, P. (2004). Theoretical and experimental study of an axial flow cyclone for fine particle removal in vacuum conditions. *Journal of Aerosol Science*. 35(9): 1105-1118.
112. Xie, B., Li, S., Jin, H., Hu, S., Wang, F., & Zhou, F. (2018). Analysis of the performance of a novel dust collector combining cyclone separator and cartridge filter. *Powder Technology*, 339, 695–701. <https://doi.org/10.1016/j.powt>.
113. Сукач С. В. (2013). Програмний комплекс для автоматизації вентиляційної системи навчально-лабораторних приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*. 26. ННДПБОП. 119 – 124.

ДОДАТОК А

Патенти на корисну модель



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **157215** (13) **U**
(51) МПК (2024.01)
E21F 1/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2024 00849	(72) Винахідник(и):	Лапшин Олександр Єгорович (UA), Лапшин Олександр Олександрович (UA), Гацький Анатолій Костянтинович (UA), Ярошенко Ганна Миколаївна (UA)
(22) Дата подання заявки:	19.02.2024	(73) Володілець (володільці):	КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусевича, буд. 11, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	19.09.2024	(74) Представник:	Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	18.09.2024, Бюл.№ 38		

(54) СИСТЕМА ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

(57) Реферат:

Система для вентиляції промислових приміщень містить відсмоктувальний і припливний повітроводи. Система виконана у вигляді комбінованого відсмоктувально-припливного повітроводу так, що відсмоктувальний повітровід розміщений коаксіально у припливному повітроводі. Діаметр припливного повітроводу приймається більше діаметра відсмоктувального повітроводу в 1,4 рази. Припливний повітровід має випускні отвори, які обладнані вихідними патрубками, з можливістю формування струменів припливного повітря, які спрямовані в зону робочих місць у промисловому приміщенні.

UA 157215 U



УКРАЇНА

(19) UA (11) 156625 (13) U
(51) МПК (2024.01)
E21F 1/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 00825	(72) Винахідник(и): Лапшин Олександр Єгорович (UA), Лапшин Олександр Олександрович (UA), Гацький Анатолій Костянтинович (UA), Ярошенко Ганна Миколаївна (UA)
(22) Дата подання заявки: 19.02.2024	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 18.07.2024	(73) Володілець (володільці): КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Віталія Матусевича, буд. 11, м. Кривий Ріг, 50052 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 17.07.2024, Бюл.№ 29	(74) Представник: Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255

(54) СПОСІБ ПОВІТРООБМІНУ В ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ

(57) Реферат:

Спосіб повітрообміну в промислових приміщеннях включає видалення забрудненого повітря і надання в приміщення чистого повітря. Видалення забрудненого повітря від джерел виділення шкідливих речовин і надання в приміщення чистого повітря з атмосфери здійснюють за допомогою комбінованого відсмоктувально-припливного повітроводу так, що відсмоктувальний повітровід розміщують коаксіально в припливному повітроводі з утворенням між ними повітропровідного простору, за площею перерізу, рівною площі перерізу відсмоктувального повітроводу. Вимірюють швидкість повітря у припливному повітроводі і регулюють її відносно швидкості повітря у відсмоктувальному повітроводі.

UA 156625 U

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації
та відомості про апробацію її результатів

Основні положення й результати дисертації опубліковані в таких працях:

Список публікацій здобувача:

• в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Обґрунтування вибору системи очищення та кондиціонування аспіраційного повітря барабанних сушарок при збагаченні титано-цирконієвих руд. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2026. 42(1). С. 71–78. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.42-1.2026.71-78> (Фахове видання категорії Б)

2. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інтегрована система адаптивного керування тепловологісним режимом промислових приміщень на базі коаксіальної рекуперації та багатошарової ізоляції. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2026. Вип. 57. С. 40–58. (Фахове видання категорії Б)

3. Lapshyn O. Ye., Yaroshenko H. M. Optimisation of air exchange and heat transfer using coaxial air ducts. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2025. Vol. 23, No. 1. P. 10–20. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2025-1-23-10-20>. (Фахове видання категорії Б)

• які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інноваційний підхід до вентиляції промислових приміщень шляхом інтенсифікації повітрообміну сумісним повітроводом в робочих зонах. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 2024)*. Кривий Ріг, 2024. С. 34. URI: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6960>;

5. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Інженерні підходи до керування мікрокліматом у виробничих приміщеннях: моделі, розрахунки, результати. *Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнар. наук.-техн. конф.*

(Кривий Ріг, 2025). Кривий Ріг, 2025. С. 82. URI: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/7265>.

6. Ярошенко Г. М. Моделювання теплових процесів як засіб підвищення безпеки та енергоефективності виробничих приміщень. *Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Черкаси, 12–13 берез. 2026 р.). Черкаси, 2026. С. 246–247. <https://bk.chdtu.edu.ua/konferenciyyi/>.

7. Ярошенко Г. М. Заходи щодо поліпшення умов праці при термічній обробці мінеральної сировини. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки*: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Дніпро, 28–29 квіт. 2026 р.). Дніпро, 2026. С. 68–69.

8. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Дослідження повітрообміну як чинника формування мікроклімату у приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд. *Наука, промисловість, суспільство*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 27–29 трав. 2026 р.). Кривий Ріг, 2026. С. 25. <https://www.knu.edu.ua/storage/files/.pdf>.

9. Лапшин О. Є., Ярошенко Г. М. Удосконалення теплоізоляційного мату для зниження теплонадходжень від нагрітих поверхонь промислового обладнання. *Наука, промисловість, суспільство*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 27–29 трав. 2026 р.). Кривий Ріг, 2026. С. 83. <https://www.knu.edu.ua/storage/files/.pdf>.

- **які додатково відображають наукові результати дисертації:**

10. Патент 156625, Україна, МПК E21F 1/00 (2024.07). Спосіб повітрообміну в промислових приміщеннях. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Гацький А. К., Ярошенко Г. М.; винахідники та володільці: Криворізький національний університет; № u202400825; заявл. 19.02.2024; опубл. 17.07.2024, Бюл. № 29.

11. Патент 157215, Україна, МПК E21F 1/00 (2024.09). Система для вентиляції промислових приміщень. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Гацький А. К., Ярошенко Г. М.; винахідники та володільці: Криворізький національний університет; № u202400849; заявл. 19.02.2024; опубл. 18.09.2024, Бюл. № 38.

ДОДАТОК В

Акти впровадження

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

IMEX minerals

«ІМЕКС МІНЕРАЛС»

03113, Україна, Київ, вул. Полковника ШUTOва,
9А ЄДРПОУ 39489151, тел. +38-066-237-90-55
e-mail: imex.minerals@gmail.com

АКТ

використання (впровадження) результатів дисертаційної роботи
Ярошенко Ганни Миколаївни на тему: «Управління мікрокліматичними параметрами
умов праці в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд», поданої на здобуття
наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 263 «Цивільна безпека»

Цей акт складено керівництвом ТОВ «Імекс Мінералс» в особі директора Кравченка Віталія Сергійовича, що діє на підставі Статуту, про те, що результати дисертаційного дослідження Ярошенко Ганни Миколаївни прийняті до використання в інженерно-управлінській практиці підприємства.

Зазначені результати використовуються під час проведення технічного аудиту умов праці, а також при розробці технічних завдань на модернізацію виробничих потужностей підрядних підприємств, з якими ТОВ «Імекс Мінералс» співпрацює у сфері переробки та збагачення титано-цирконієвих руд.

Зокрема, у практичну діяльність компанії впроваджено наступні наукові та практичні результати:

1. Аналітична модель динаміки запиленості повітря робочої зони поблизу барабанних сушарок. Використовується технічним відділом Товариства при оцінці професійних ризиків та погодженні графіків технологічних перерв для персоналу на виробничих лініях партнерів, враховуючи доведений у дисертації критичний інтервал.
2. Удосконалена математична модель формування теплового режиму виробничого приміщення. Використовується як методична база для розрахунку необхідних обсягів повітрообміну під час експертизи проєктів вентиляції сушильних відділень.
3. Комплексна схема вентиляції та аспірації, захищена патентами України на корисну модель, що включає застосування протитечійного коаксіального повітропроводу та адаптивного пневмодинамічного буфера. Дане інженерне рішення внесено до переліку рекомендованих енергоефективних технологій при формуванні вимог ТОВ «Імекс Мінералс» до екологічної та санітарної модернізації збагачувальних фабрик.

Ефект від впровадження: Використання науково-обґрунтованих результатів дисертаційної роботи Ярошенко Г.М. дозволило підвищити якість проведення технічних аудитів, забезпечити об'єктивний контроль за станом повітряного середовища на підрядних виробництвах та сформувати ефективні інженерні рішення, що гарантують дотримання нормативних параметрів мікроклімату і безпеки праці.

Впровадження має безпосередній науково-технічний та соціальний ефект, який полягає у зниженні ризиків професійних захворювань серед працівників гірничо-збагачувальної галузі.

Директор ТОВ «Імекс Мінералс»

В. С. КРАВЧЕНКО





ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Криворізького
національного університету

Владислав Чубаров

« 17 » серпня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи ЯРОШЕНКО Ганни
Миколаївни на тему: «Управління мікрокліматичними параметрами умов
праці в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд» у навчальний
процес

Комісія у складі: голови – декана гірничо-металургійного факультету, професора, д.т.н. В. Калініченка, членів комісії: завідувача навчально-методичного відділу С. Івашури, завідувача кафедри охорони праці та цивільної безпеки, професора, д.т.н. Н. Швагер, доцента кафедри охорони праці та цивільної безпеки, к.т.н. Л. Янової, доцента кафедри охорони праці та цивільної безпеки, к.т.н. О. Нестеренко, склали цей акт, котрий засвідчує факт впровадження в освітній процес результатів дисертаційного дослідження Г. Ярошенко на тему: «Управління мікрокліматичними параметрами умов праці в приміщеннях збагачення титано-цирконієвих руд», шляхом інтеграції матеріалів дисертаційного дослідження до: лекційного курсу та переліку практичних занять освітнього компонента «Аерологія гірничих підприємств», що викладається для здобувачів першого (бакалавр) рівня вищої освіти, лекційного курсу та переліку практичних занять освітнього компонента «Проектування вентиляції промислових підприємств», що викладається для здобувачів другого (магістр) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Охорона праці» спеціальності J4 «Охорона праці». Зокрема:

1. «Аерологія гірничих підприємств»:

- у лекційному курсі: висвітлено закономірності формування температурних полів у робочій зоні та впроваджено результати математичного моделювання конвективного теплообміну від нагрітого обладнання;
- у лабораторному практикумі: застосовано методику дослідження повітрообміну як визначального чинника формування мікроклімату в приміщеннях збагачення (на прикладі титано-цирконієвих руд).

2. «Проектування вентиляції промислових підприємств»:

– у лекційному курсі: впроваджено удосконалені алгоритми розрахунку необхідного повітрообміну з урахуванням конвективних теплонадходжень від нагрітих поверхонь технологічного обладнання;

– у практичних заняттях та курсовому проектуванні: використано розроблену конструкцію теплоізоляційного мату як інженерного заходу для зниження теплових навантажень і оптимізації систем вентиляції.

– З метою підвищення наукового і методичного рівня лекційного матеріалу, наблизивши тематику практичних і лабораторних занять до реальних умов сучасного виробництва та покращити загальну якість підготовки фахівців за спеціальністю J4 «Охорона праці».

Комісія засвідчує відповідність упроваджених результатів дисертаційного дослідження Г. Ярошенко тематиці освітнього процесу та навчальним вимогам, що діють у Криворізькому національному університеті для підготовки здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю J4 «Охорона праці».

Голова комісії:

Декан гірничо-металургійного факультету,

д.т.н., проф.

Всеволод КАЛІНІЧЕНКО

Члени комісії:

Завідувач навчально

методичного відділу

Світлана ІВАШУРА

Завідувач кафедри ОПЦБ,

д.т.н., професор

Наталія ШВАГЕР

Доцент кафедри ОПЦБ,

к.т.н., доцент

Людмила ЯНОВА

Доцент кафедри ОПЦБ,

к.т.н., доцент

Оксана НЕСТЕРЕНКО