

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЙТЕНКО ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 504.3.054

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ЗНЕПИЛЕННЯ
ГАЗОВИХ ВИКИДІВ**

21.06.01 – екологічна безпека

Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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


Ю.В. Войтенко

Науковий керівник – **Шишацький Алім Гаврилович** кандидат технічних наук, с.н.с.

Кам'янське – 2021

АНОТАЦІЯ

Войтенко Ю.В. Підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва шляхом знепилення газових викидів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2021.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради К 09.091.02 Дніпровського державного технічного університету Міністерства освіти і науки України, Кам'янське, 2021.

В результаті проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі запропоновано та обґрунтовано нові наукові положення, висновки та рекомендації, які дозволяють підвищити рівень екологічної безпеки агломераційного виробництва шляхом знепилення газових викидів.

Результати роботи пройшли достатню апробацію та мають впровадження, що підтверджено відповідними актами.

Загалом у дисертаційній роботі одержано наступні результати.

Проаналізовано наукові та практичні результати попередніх досліджень за темою дисертаційної роботи та встановлено, що виробництво агломерату серед технологічних процесів чорної металургії є найбільшим джерелом забруднення атмосферного повітря. У зоні впливу аглофабрик склалася несприятлива екологічна ситуація, для якої характерна висока запиленість повітря з більш ніж 10-ти кратним перевищенням гранично допустимої концентрації шкідливих речовин, яка встановлена нормативами для атмосферного повітря населених пунктів.

Проведений аналіз способів та засобів знепилення на аглофабриках металургійних комбінатів нашої держави показав недостатній рівень очищення агломераційних газів. Встановлено, що для досягнення необхідного ступеня очистки газів необхідно, в першу чергу, забезпечувати зменшення надходження пилу в повітря безпосередньо в джерелах пилоутворення. Це дозволить більш ефективно використовувати існуючі засоби знепилення, значно зменшувати концентрацію пилу в газах, що викидаються в атмосферне повітря, покращувати роботу технологічного обладнання. Необхідність підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва створює передумову для подальших досліджень в цьому науковому напрямку.

Проведено пилогазодинамічні дослідження на різних ділянках в газоходах агломашин. Розрахунки величин пилогазодинамічних параметрів за поперечним перерізом газоходів перед входом в мультициклони показали високу нерівномірність газопилового навантаження, що зумовлено конструкцією газоходів. Це погіршує роботу існуючого газоочистного обладнання.

Обґрунтована доцільність застосування розчинів ПАР для поліпшення грудкування аглошихти. Показано, що найбільш ефективним є застосування цих розчинів в пінному режимі. Проведено порівняльну характеристику та виконано аналітичний огляд фізико-хімічних характеристик основних ПАР, які можуть використовуватись для боротьби з пилом. Проаналізовано розчинність піноутворювачів, їх піноутворююча здатність, кратність та стійкість піни, пилоуловлююча здатність. Обґрунтована доцільність застосування для обезпилення газів в технологічних процесах агломераційного виробництва піноутворювача на основі триетаноламінів алкілсульфатів первинних жирних кислот (ТЕАС), який за своїми властивостями відповідає умовам застосування, є малотоксичним, відноситься до 4 класу небезпеки, вибухобезпечний, важкогорючий, із застосуванням цього піноутворювача можна одержувати піну

кратністю 150 – 200, достатньої стійкості – 750 с, існує можливість його постачання підприємствами України.

Було проведено ряд експериментальних досліджень фізико-хімічних властивостей обраної ПАР. Встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення крайового кута змочування спостерігалось в діапазоні концентрацій ПАР від 0,1 % до 2,0 %, тому для ефективного пилоуловлення рекомендовано застосування водних розчинів ТЕАС концентрацією 2 % (за масою).

Розроблено лабораторний стенд для визначення роботи адгезії. Встановлено, що оптимальні значення витрат ПАР, при яких було зафіксовано мінімальні значення сили розриву сипучих матеріалів на лабораторному стенді, складають 60 – 80 г/т аглошихти. Встановлені нами параметри – концентрації ПАР в водних розчинах та питомі витрати ПАР для обробки аглошихти – є науковою основою при розробці технології обробки аглошихти розчинами ПАР з метою зменшення викидів пилу в навколишнє середовище в процесах агломерації.

Виконані дослідження гранулометричного складу на ситовому аналізаторі огрудкованої аглошихти з додаванням розчинів ПАР під час її грудкування. Встановлено, що застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти дозволяє значно покращити грудкування аглошихти, а саме знизити частку фракції менше 3 мм в огрудкованій аглошихті та підвищити вихід фракцій в діапазоні від 5 мм до 8 мм, які, за висновком виробників, є найбільш «корисними» в процесах агломерації.

Розроблена математична модель розрахунку процесу потрапляння ПАР від піногенератора на транспортер з аглошихтою, яка дозволяє варіювати висоту розташування піногенератора, що подає ПАР на стрічку конвеєра з шихтою, та оцінювати ефективність розпилювання, визначати, яка концентрація розчину ПАР біля поверхні шихти і, тим самим, визначати раціональне розташування піногенератора. Встановлено, що найбільш раціональною є висота розміщення піногенератора 0,5 м.

Розроблено технологічну схему та змонтовано установку для обробки аглошихти розчинами ПАР. Виконано промислові випробовування застосування розчинів ПАР в пінному режимі для обробки аглошихти, під час яких були виконані дослідження запиленості газів у вакуум-камерах, перед мультициклонами та після мультициклону агломашини безпосередньо перед викидом аглогазів в атмосферне повітря. Встановлено, що застосування ПАР для обробки аглошихти дозволяє знизити початкову запиленість аглогазів, яка вимірювалась в вакуум-камерах агломашини, від 15 % до 40 %. Це дозволяє зменшувати пилове навантаження на наступні апарати газоочищення: пиловловлюючі бункери під вакуум-камерами, пиловідділяючі бункери перед мультициклоном та безпосередньо на мультициклон.

В результаті досліджень дисперсного складу пилу перед мультициклоном виявлено зменшення частки дрібнодисперсного пилу в аглогазах на 52 %, що сприяє більш ефективному використанню засобів газоочистки. Встановлено, що застосування запропонованої схеми обробки аглошихти розчинами ПАР, забезпечує загальне зменшення концентрації пилу на 86 % в аглогазах, що надходять в атмосферне повітря.

Виконані розрахунки приземних концентрацій пилу викидів аглогазів від аглофабрики «АрселорМіттал Кривий Ріг» до запропонованого методу обробки аглошихти розчинами ПАР та після обробки вказаним методом. Встановлено, що застосування методу обробки аглошихти перед її грудкуванням розчинами ПАР призведе до зниження концентрації пилу в приземному шарі атмосфери на відстані 1000 м на 54 %. Обґрунтовано доцільність використання розчинів ПАР для обробки аглошихти, що призводить до підвищення рівня екологічної безпеки за рахунок зниження ризику захворюваності населення, яке проживає в зоні впливу металургійного виробництва, в 2 рази.

Ключові слова: екологічна безпека, агломераційне виробництво, пилогазові викиди, знепилення, поверхнево-активні речовини, атмосферне повітря, аглошихта, ризик захворюваності.

ABSTRACT

Voytenko Y.V. Increasing the level of environmental safety of sinter production by dedusting of gas emissions. – Manuscript.

The thesis submitted for Candidate of Technical Science degree. Speciality 21.06.01 – ecological safety. Oles' Honchar Dnipro National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The thesis will be defended at a meeting of Specialized Academic Council K 09.09.1.02 of Dnipro State Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kamianske, 2021.

The thesis proposes and substantiates new scientific provisions, conclusions and recommendations based on the theoretical and experimental studies. These results allow to increase the level of environmental safety of sinter production by dedusting of gas emissions.

The results of the work have passed sufficient testing and received the implementation, which is confirmed by the relevant acts.

In general, the following results were obtained in the thesis.

The scientific and practical results of previous researches within the topic of thesis were analyzed. It was established that the production of sinter is the largest source of air pollution among the technological processes of iron industry. In the areas of sinter plants there is an unfavorable environmental situation, which is characterized by high dust level 10 times more than maximum allowable concentration of harmful substances, set by the standards for atmospheric air of residential areas.

The analysis of methods and means of dedusting at sinter plants of our country showed an insufficient level of sinter gases purification. It is established that in order to achieve the required degree of gas purification, it is necessary to reduce the flow of dust into the air directly in the sources of dust formation. This will allow more efficient use of existing dedusting agents, significantly reduce the concentration of dust in the gases emitted into the atmosphere, improve the operation of equipment.

The need to increase the level of environmental safety of sinter production creates a basis for further research in this area.

The dust and gas studies were carried out at different sections in the gas ducts of sintering machines. The calculations of dust and gas parameters on the cross section of the flues before entering the multicyclones showed a high irregularity of the gas and dust load due to the design of the flues. This impairs the performance of existing gas cleaning equipment.

The expediency of using surface-active substance (SAS) to improve the sinter nodulizing is substantiated. The most effective is the use of these solutions in the foam mode. A comparative description and analytical review of the physical and chemical features of the main substance that can be used to control dust. The solubility of foaming agents, their foaming ability, multiplicity and stability of foam, dust collecting ability were analyzed. The expediency of application foaming agent on the basis of trietanolamine alkyl sulfate of primary fatty acids (TEAC) is substantiated. The substance is low-toxic, belongs to the 4th class of danger, explosion-proof, flame-retardant, with the use of this foaming agent it is possible to obtain foam with a multiplicity of 150 – 200, sufficient stability – 750 s, there is a possibility of its supply by the enterprises of Ukraine.

A number of experimental studies on physical and chemical features of the selected substance were performed. It was found that the most intensive reduction of the wetting angle was observed in the range of surfactant concentrations from 0.1 % to 2.0 %, so it is recommended to use aqueous solutions of TEAC with a concentration of 2 % (by weight) for effective dust collection.

A laboratory stand has been developed to determine the work of adhesion. It is established that the optimal values of surface-active substance, at which the minimum values of the breaking force of bulk materials were recorded on the laboratory stand, are 60 – 80 g/t of sinter. The parameters set – surfactant concentrations in aqueous solutions and the amount of SAS for sinter treatment – are the scientific basis for

developing the technology of sinter treatment with surface-active substance to reduce dust emissions into the environment.

The particle size distribution studies on the sieve analyzer of the sinter charge with the addition of SAS during its nodulizing were performed. It was found that the use of SAS for sinter treatment can significantly improve the nodulizing of sinter, namely to reduce the fraction of less than 3 mm in the sinter and increase the yield of fractions in the range from 5 mm to 8 mm, which, according to manufacturers, are the most «useful» in sintering processes.

A mathematical model for calculating the process of surfactant from the foam generator to the conveyor with sinter charge was developed. This model allows to vary the height of the foam generator supplying surfactant to the conveyor belt with the charge, evaluate the spray efficiency, determine the concentration of surfactant solution near the charge surface and thus determine rational location of the foam generator. It is established that the most rational is the height of the foam generator 0.5 m.

The technological scheme is developed and the installation for processing of a sinter charge by SAS is developed. Industrial tests of the SAS in the foam mode for sinter treatment were performed along with studies of gas dust in vacuum chambers, before multicyclones and after multicyclones of the sintering immediately before the release of sinter gases into the atmosphere. It is established that the use of SAS for sinter treatment allows to reduce the initial dustiness of sinter gases, which was measured in the vacuum chambers of the sintering machine, from 15 % to 40 %. This allows to reduce the dust load on the following gas cleaning devices: dust collection hoppers under vacuum chambers, dust separation hoppers in front of the multicyclone and directly on the multicyclone.

As a result of studies of the dispersed composition of dust before the multicyclone revealed a decrease in the proportion of fine dust in sinter gases by 52 %, which contributes to a more efficient use of gas cleaners. It is established that the application of the proposed scheme of sinter treatment with surfactant solutions

provides a total reduction of dust concentration by 86 % in sinter gases entering the atmosphere.

Calculations of surface dust concentrations of emissions from sinter plant «ArcelorMittal Kryvyi Rih» to the proposed method of sinter charge treatment with surfactant solutions and after treatment by this method. It is established that the application of the method of sinter treatment before its nodulizing with SAS leads to a decrease in the concentration of dust in the surface layer of the atmosphere at a distance of 1000 m by 54 %. The expediency of using surface-active substance for sinter treatment is substantiated, which leads to an increase in the level of environmental safety by reducing the risk of morbidity of the population living in the zone of influence of metallurgical production by 2 times.

Key words: ecological safety, sinter production, dust and gas emissions, dedusting, surface-active substance, atmospheric air, sinter, morbidity risk.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Voytenko Y.V.**, Mondrusova M.S., Plyasovskaya K.A., Shishatsky A.G. A study of physicochemical processes when pelletizing sintering mixture. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2019. №2. С. 232–238.
2. **Войтенко Ю.В.**, Левицька О.Г. Підвищення екологічної безпеки селітебних територій в зонах інтенсивного забруднення атмосферного повітря. *Збірник наукових праць НГУ*. 2020. №61. С. 94–102.
3. Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Исследование параметров обработки сыпучих материалов поверхностно-активными веществами для обеспыливания воздуха. *Научный вестник Национального горничого университета*. 2013. Вып.4. С. 76–80.
4. Агапова В.Т., Нестеров А.С., Якушев В.С., Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Результаты спекания и свойства агломерата из шихт подготовленных с использованием поверхностно-активных веществ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. №25. С. 9–18.
5. **Пицык Ю.В.**, Шишацкий А.Г., Агапова В.Т. Пути повышения экологической безопасности в зоне влияния агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. №5. С. 97–99.
6. Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Дослідження методів зменшення надходження пилу в атмосферне повітря при спіканні сипучих матеріалів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. Випуск 42. С. 56–59.
7. Агапова В.Т., **Пицык Ю.В.**, Шишацкий А.Г. Снижение запыленности аглогазов методом улучшения окомкования аглошихты. *Научный вестник Национального горничого университета*. 2010. Вып. 7-8. С. 90–92.

8. **Пицык Ю.В.** Повышение эффективности очистки аглогазов регулированием фракционного состава пыли. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2010. Вип. 9-10. С. 85–88.

9. Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Влияние поверхностно-активных веществ на смачиваемость сыпучих материалов. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип.2/2010 (61) частина 1. С. 117–119.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Mondrusova M., **Voytenko Yu.**, Plyasovskaya K., Kaliberda N. Triethanolamine salts absorption on the surface of the sinter during sintering production. *Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору*. Матеріали Х Регіональної науково-практичної конференції молодих науковців та студентів. (Дніпро, 13 травня 2021). Дніпро. 2021. С. 40–42.

11. **Пицык Ю.В.**, Шишацкий А.Г. Снижение риска заболевания населения путем повышения экологической безопасности технологических процессов в металлургии. *Сборник материалов IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых "Наука и образование – 2014"*.(Астана, 11 квітня 2014). Астана. 2014. С. 3858–3861.

12. Фомин С.П., Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Исследование эффективности применения ПАВ для изменения фракционного состава пыли. *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. Збірник доповідей VIII Міжнародної наукової конференції аспірантів та студентів*. Донецьк: ДонНТУ. 2009. 33–34.

13. Фомин С.П., Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., **Пицык Ю.В.** Снижение выбросов пыли при производстве агломерата. *Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов формування принципів збалансованого розвитку*. Матеріали науково-практичної конференції. Київ. Центр екологічної освіти та інформації. 2008. С. 215–220.

14. **Пицык Ю.В.**, Фомин С.П., Шишацкий А.Г. Повышение эффективности очистки аглогазов управлением фракционным составом пыли. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 20–21.
15. Фомин С.П., Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., **Пицык Ю.В.** Оценка эффективности пылеочистки в газотранспортной системе агломашин. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 28–29.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
1.1. Екологічні проблеми чорної металургії в Україні.....	23
1.2. Еколого-географічні особливості регіона розміщення аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	26
1.3. Вплив шкідливих чинників промислових підприємств на організм людини та живі істоти.....	29
1.4. Існуючі способи боротьби з пилом в агломераційному виробництві	33
1.5. Мета, завдання і методи дослідження.....	45
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЛУ АГЛОМЕРАЦІЙНИХ ГАЗІВ ВАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ».....	47
2.1 Газодинамічні дослідження в газоходах агломашин.....	47
2.2 Оцінка запиленості газів на агломераційному виробництві ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	53
2.3 Фізичні характеристики пилу агломераційного виробництва..	58
Висновки до розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИКО- ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ОБРОБКИ АГЛОШИХТИ.....	74
3.1 Обґрунтування застосування ПАР для обробки аглошихти.....	74
3.2 Концепція вибору ПАР для знепилення викидів агломераційного виробництва.....	77

3.3 Дослідження поверхневого натягу розчинів ПАР.....	89
3.4 Оцінка змочуючих властивостей розчинів ПАР.....	101
3.5 Лабораторні дослідження параметрів обробки сипучих матеріалів поверхнево-активними речовинами методом визначення роботи адгезії.....	105
Висновки до розділу 3.....	111
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗНЕПИЛЕННЯ АГЛОГАЗІВ.....	113
4.1 Дослідження параметрів обробки сипучих матеріалів ПАР при грудкуванні аглошихти.....	113
4.2 Математична модель розсіювання ПАР над конвеєрною стрічкою.....	118
4.3 Розробка технології обробки сипучих матеріалів піною.....	126
4.4 Натурні дослідження запиленості аглогазів при застосуванні ПАР.....	131
4.5 Результати промислових досліджень дисперсного складу пилу при впровадженні системи обробки аглошихти розчинами ПАР...	135
Висновки до розділу 4.....	140
РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗНЕПИЛЕННЯ АГЛОГАЗІВ.....	142
5.1 Оцінка впливу застосування ПАР на навколишнє середовище.....	142
5.2 Аналіз впливу приземних концентрацій пилу на населення.....	144
5.3 Обґрунтування зниження ризику захворюваності населення внаслідок зменшення запиленості.....	147
Висновки до розділу 5.....	151

ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
ДОДАТКИ.....	175
ДОДАТОК А.....	176
ДОДАТОК Б.....	178
ДОДАТОК В.....	179
ДОДАТОК Г.....	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- Γ – величина адсорбції, моль/м²;
 C – концентрація пилу в газах, мг/м³;
 R – універсальна газова стала, Дж/моль·К;
 T – температура, К;
 t – температура, °С;
 σ – поверхневий натяг, Н/м;
 θ – крайовий кут змочування, град;
 V – об'єм, м³;
 P – тиск, Па;
 r – радіус бульбашки, капіляра, м;
 h – висота рідини, м;
 S – площа поверхні, м²;
 K – кратність піни;
 F – сила відриву, Н;
 W_a – робота адгезії, Дж/м²;
 m_g – газопилодинамічний параметр, г/м²·с;
 K_n^{II} – коефіцієнт нерівномірності пилового навантаження;
 ρ_p – густина розчину піноутворювача, кг/м³;
 v_i – швидкість газів, м/с;
 $D_{\text{ч}}$ – діаметр часток пилу, мкм;
 d_m – середньомедіанний розмір часток пилу, мкм;
 τ – час, с;
 q – витрати піноутворювача, г/т;
 пит – питомий;
 ККМ – критична концентрація міцелоутворення;
 ПАР – поверхнево-активні речовини;
 ТЕАС – піноутворювач на основі триетаноламінових солей алкілсульфатів
 первинних жирних спиртів.

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час інтенсивними джерелами забруднення атмосферного повітря є підприємства чорної металургії. Найбільшим джерелом забруднення серед технологічних процесів чорної металургії є виробництво агломерату. В процесі одержання агломерату відбувається величезний винос пилу з шару аглошихти. Це пояснюється значною кількістю дрібних фракцій, що не приймає участь у грудкуванні і виноситься в атмосферу з шару аглошихти в процесі спікання. У гірничо-металургійних регіонах України встановлений прямий зв'язок між техногенним забрудненням атмосферного повітря пилом та небезпекою для здоров'я населення і персоналу підприємств, збільшенням рівня пилових захворювань органів дихання. Існуючі методи та засоби пиловловлювання на металургійних комбінатах нашої держави не забезпечують необхідної очистки газових викидів від пилу. Для покращення ефективності роботи існуючих систем пилоочистки необхідно зменшити пилове навантаження на ці системи та вміст саме дрібнодисперсного пилу, яке можливо шляхом покращення процесів грудкування дрібнодисперсних фракцій аглошихти, що призведе до меншого виносу пилу. Вирішити проблему зменшення надходження пилу в атмосферне повітря можливо за рахунок застосування розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР). Тому підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва шляхом знепилення газових викидів за допомогою ПАР у процесі грудкування аглошихти є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертації покладені матеріали, що узагальнюють дослідження, виконані автором відповідно до плану НДР Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках д/б теми: «Розробка методів та засобів захисту атмосферного повітря від запилення за допомогою поверхнево-активних речовин» (№ ДР 0109U000148), а також госпдоговірних науково-дослідних

робіт № 2852/428 «Розробка способів підвищення ефективності очистки агломераційних газів і стійкості газотранспортної системи агломашин» та №3516/431 «Розробити, виготовити та ввести в експлуатацію експериментальний зразок системи обробки аглошихти поверхнево-активними речовинами» з ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», в яких автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та розв'язані наступні завдання, що визначили структуру дисертації:

- провести аналіз впливу на навколишнє середовище шкідливих чинників при роботі металургійних підприємств та шляхів зниження викидів пилу в атмосферне повітря;
- провести дослідження фізико-хімічних та пилогазодинамічних характеристик агломераційних газів на прикладі агломераційного виробництва ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»;
- обґрунтувати принципи вибору поверхнево-активних речовин для боротьби з пилом, дослідити їх фізико-хімічні властивості та визначити параметри обробки аглошихти розчинами ПАР;
- розробити методи обробки сипучих матеріалів розчинами поверхнево-активних речовин, виконати апробацію розроблених методів в промислових умовах та визначити ефективність розроблених методів знепилення аглогазів;
- виконати екологічну оцінку застосування розчинів ПАР для знепилення аглогазів.

Об'єктом дослідження є процеси формування, поширення і зниження запиленості атмосферного повітря при роботі металургійних підприємств.

Предметом дослідження є методи і засоби зниження викидів пилу в атмосферу при агломераційному виробництві з застосуванням поверхнево-активних речовин.

Методи дослідження. У дисертації використаний комплекс теоретичних і експериментальних методів досліджень:

- класична теорія аеропилогазодинаміки під час дослідження газодинамічних процесів в газоходах та вимірювання запиленості аглогазів у вакуум-камерах агломашин;

- метод мікроскопічного аналізу дисперсного складу пилу при визначенні масового розподілу часток пилу за розміром в аглогазах;

- метод найбільшого тиску бульбашки газу для дослідження розчинів ПАР та обчислювання значення поверхневого натягу аналізованих розчинів при різних концентраціях ПАР;

- лабораторні, стендові та натурні (промислові) методи досліджень при визначенні параметрів обробки сипучих матеріалів ПАР та визначенні роботи сил адгезії, при оцінці ефективності процесів грудкування аглошихти, ступеню обезпилення аглогазів та визначення якості агломерату;

- статистико-ймовірнісні методи обробки й аналізу даних натурних і експериментальних досліджень та показників екологічного ризику.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

- вперше отримані залежності поверхневого натягу та крайового кута змочування від концентрації розчину поверхнево-активної речовини типу «ТЕАС», які дозволили визначити, що найбільш ефективним для процесів грудкування аглошихти та обезпилення аглогазів є двохвідсотковий розчин ПАР;

- вперше встановлені закономірності зміни гранулометричного складу огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР при її обробці, які з достатньою точністю описуються поліномом другого порядку, що дозволяє при витратах ПАР 40 – 60 г/т забезпечити зменшення концентрації пилу в аглогазах на 86 %;

- вперше розроблено та апробовано математичну модель процесу розсіювання ПАР над конвеєрною стрічкою з урахуванням концентрації

розчину ПАР біля поверхні шихти та висоти розташування піногенератора, це дозволило встановити, що раціональне значення висоти розташування піногенератора ПАР складає 0,5 м;

- набули подальшого розвитку наукові засади розрахунку ризику забруднення навколишнього середовища та захворювання населення в зоні впливу агломераційного виробництва, котрі враховують інтенсивність надходження пилу в атмосферу та ефект пилоподавлення з використанням ПАР, що дозволяє знизити вдвічі значення ризику захворювання.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено та впроваджено систему обробки аглошихти розчином ПАР типу «ТЕАС» в аглоцеху ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка включає процеси створення розчину ПАР заданої концентрації, генерування піни, розпилення та покриття піною аглошихти, що дозволяє суттєво зменшити викиди пилу в навколишнє середовище в процесах агломерації.

2. Розроблено технологічну схему одержання піни із розчину ПАР типу «ТЕАС», яка впроваджена у вигляді експериментальної установки на аглофабриці ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що забезпечує зменшення викидів в атмосферу пилу фракції менше 20 мкм на 52 %.

3. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальному процесі Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара при проведенні практичних та лекційних занять з дисциплін «Технології основних виробництв», «Урбоекологія» та «Промислова екологія» для студентів спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища.

Особистий внесок здобувача. У дисертації узагальнені результати досліджень за період з 2007 по 2020 роки, в яких автор брала безпосередньо участь. Особисто дисертанту належить формулювання мети і основних завдань досліджень, обґрунтування положень наукової новизни та практичної значимості результатів, формування загальних висновків. Проведено аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи; обґрунтовані методи

дослідження; проведено ряд розрахункових та експериментальних досліджень на аглофабриці металургійного комбінату; здійснено обробку даних та їх аналіз; визначено причини недосконалості існуючих способів та засобів зниження запиленості атмосферного повітря при роботі металургійних підприємств і розроблені технічні рішення з підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва.

Внесок автора у наукові праці, які виконані у співавторстві, полягав: у формулюванні мети та завдань дослідження, обґрунтуванні напрямків досліджень [10]; проведенні експериментальних досліджень, інтерпретації результатів, формулюванні висновків [6]; проведенні лабораторних досліджень визначення сили адгезії при обробці сипучих матеріалів рідиною [1]; інтерпретації та статистичній обробці результатів лабораторних досліджень [3]; визначенні рівнів ризику захворювання населення, що проживає в зоні впливу агломераційного виробництва [2, 11]; експериментальних дослідженнях поверхневого натягу та крайового куту змочування розчинів досліджуваних поверхнево-активних речовин [9]; встановленні закономірностей зміни фракційного складу огрудкованої шихти від витрат ПАР [4]; участі у промислових випробовуваннях якості агломерату і обробці отриманих результатів [7]; визначенні фракційного складу пилу в аглогазах на різних ділянках газоходу [12, 14]; розрахунку приземних концентрацій шкідливих речовин в зоні впливу агломераційного виробництва [5]; обґрунтуванні доцільності застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти [13, 15].

Список праць дисертанта наведено у додатку Г роботи. Вищезазначена нумерація робіт у співавторстві відповідає списку, представленому у додатку.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи було висвітлено у доповідях на наукових конференціях: «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2008), «Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов формування принципів збалансованого розвитку» (Київ, 2008), VIII Міжнародної наукової конференції

аспірантів та студентів «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів» (Донецьк, 2009), ІХ Міжнародній науковій конференції студентів і молодих вчених «Наука і освіта – 2014» (Астана, 2014), Х Регіональній науково-практичній конференції молодих науковців та студентів «Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору» (Дніпро, 2021). За результатами роботи зроблені доповіді на науково-технічних нарадах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 15 наукових роботах, з яких: 9 статей: 8 статей у фахових наукових виданнях України з технічних наук, 1 стаття у виданні, яке включено до бази Scopus; 6 тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний текст із 43 таблицями та 52 рисунками викладено на 156 сторінках, список використаних джерел з 174 найменувань розміщено на 18 сторінках, 4 додатка – на 8 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінки.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Екологічні проблеми чорної металургії в Україні

В даний час пилові викиди промислових підприємств гірничодобувної, металургійної, будівельної та інших галузей промисловості досягли таких масштабів, що в деяких великих промислових центрах запиленість повітря в межах селітебних територій часто значно перевищує гранично-допустимі концентрації, внаслідок чого заводські райони цих міст стають непридатними для проживання [10].

Одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря в містах України є підприємства чорної металургії [133]. Частка викидів цих підприємств в загальній кількості викидів промисловості та транспорту, наприклад, по пилу становить 20 % [150]. В районах розташування потужних металургійних підприємств забруднення атмосфери на 50 – 60 % і більше обумовлено викидами саме цих підприємств [18, 20]. В Дніпропетровській області найбільшим джерелом забруднення атмосферного повітря також є підприємства гірничо-металургійного комплексу. Близько 40 % усіх викидів забруднювачів належить металургійній галузі [166, 170]. Одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря є агломераційне виробництво, де надходження пилу з аглогазами складає 17 – 31,1 %, CO – 55-77,8 %, SO₂ – 46-61 % і NO_x – 20-26 % від загальних викидів підприємств чорної металургії [113]. Аглофабрики становлять серйозну загрозу для навколишнього середовища - в світі налічується понад 1000 агломашин, сумарною продуктивністю понад 500 млн т агломерату на рік, з яких 176 знаходиться в країнах СНД [62]. В Україні знаходиться 63 агломашини, продуктивність яких складає більше ніж 40 млн т [59].

Загальні втрати компонентів агломераційної шихти з пилом перевищують 60 – 70 кг на 1 тону виробленого агломерату. Особливо високі рівні запиленості повітря мають місце на ділянках шихтопідготовки (до 60 мг/м³), а також на ділянці дробарки і відсіву дріб'язку агломерату, який повертається для повторного використання в процесах агломерації (понад 900 мг/м³) [5]. Самим потужним джерелом є надходження пилу в атмосферне повітря з аглогазами, запиленість яких під час становить 1000 мг/м³ і більше, а викиди аглогазів на більшості аглофабрик сягають величин 25000 – 50000 м³/год [59].

В роботі [113] наведені дані про масові викиди шкідливих речовин від аглофабрик України які представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Викиди шкідливих речовин в атмосферу аглофабриками металургійних підприємств України

Металургійні комбінати	Всього т/рік кг/т агломерату	В тому числі			
		пил	CO	SO ₂	NO _x
Макіївський	<u>68940</u> 14,2	<u>5241</u> 1,1	<u>60458</u> 12,4	<u>2445</u> 0,5	<u>794</u> 0,2
Єнакіївський	<u>2788</u> 1,2	<u>2765</u> 1,2	<u>19</u> -	<u>3</u> -	<u>-</u> -
«Азовсталь»	<u>67195</u> 41,6	<u>2057</u> 1,3	<u>63444</u> 39,3	<u>1012</u> 0,6	<u>681</u> 0,4
ММК Імені Ілліча	<u>297992</u> 27,1	<u>39856</u> 3,69	<u>219976</u> 20,0	<u>30448</u> 2,8	<u>7711</u> 0,7
Алчевський	<u>79360</u> 18,3	<u>11644</u> 2,7	<u>64243</u> 14,8	<u>861</u> 0,2	<u>2612</u> 0,6
Дніпровський МК	<u>143737</u> 19,0	<u>16399</u> 2,2	<u>107181</u> 14,7	<u>17279</u> 2,4	<u>2877</u> 0,4
«АрселорМіттал Кривий Ріг»	<u>114341</u> 31,0	<u>9427</u> 2,6	<u>93353</u> 25,3	<u>10492</u> 2,8	<u>1070</u> 0,3
«Запоріжсталь»	<u>81042</u> 14,1	<u>5535</u> 1,0	<u>66569</u> 11,6	<u>7514</u> 1,3	<u>1424</u> 0,2
Всього по Україні	<u>855395</u> 20,81	<u>92924</u> 1,9625	<u>675243</u> 17,262	<u>70054</u> 1,325	<u>17169</u> 0,35

Як видно з таблиці 1.1, питомі викиди пилу на різних аглофабриках відрізняються в 3,6 раза [113]. Це обумовлено як складом аглошихти, технологією процесів одержання агломерату, так і існуючою системою пилоочистки на окремих металургійних комбінатах.

Джерелом пилогазових викидів на аглофабриках є технологічне обладнання: агломераційні машини, охолоджувачі агломерату і дріб'язку агломерату, печі спікання. Крім того, пилогазові викиди надходять у навколишнє середовище з зовнішніх джерел, до яких відносяться дробарки подрібнення, грохочіння, транспортери, бункери і т. п. [72].

Аналіз основних джерел пилоутворення на аглофабриках показує, що основним джерелом надходження пилу в атмосферу є процеси спікання агломераційної шихти на агломашинах. Вміст пилу в аглогазах безпосередньо під палетою агломашин в вакуум-камерах залежить від вмісту дрібних фракцій в аглошихті, її вологості, якості грудкування і може коливатися в межах від 2000 до 6000 мг/м³ [15, 22, 100].

Розподіл газу і пилу за різними вакуум-камерами агломераційних машин неоднаковий. Найбільша кількість газу і пилу виходить з перших і останніх вакуум-камер. Це пояснюється тим, що в перших камерах частки пилу, які ще не спеклися, легко виносяться просмоктуємим повітрям, а в останніх – шар агломерату розтріскується при підході стрічки до повороту в кінці агломашини [5].

Одним з найпотужніших металургійних комбінатів в Україні є ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (раніше – «Криворіжсталь»). Взагалі м. Кривий Ріг – велике техногенне місто зі значною кількістю підприємств різних галузей промисловості. Істотно впливають на стан повітряного середовища, окрім аглофабрики та інші виробництва ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»: коксохімічне, сталеплавильне, прокатне, доменне та ін. Внаслідок дії цих джерел в повітряне середовище надходять різноманітні забруднювачі, які згідно з даними Державного управління екології і природних ресурсів в

Дніпропетровській області характеризуються високими фоновими концентраціями (додаток А).

Аналіз концентрації багатьох шкідливих речовин показав значне перевищення їх гранично-допустимих значень (наприклад, концентрація пилу, сполук заліза, марганцю, цинку, кадмію, хрому, багатьох органічних сполук, канцерогенних речовин).

Таким чином, огляд основних джерел забруднення атмосферного повітря м. Кривий Ріг показав, що одним з найпотужніших забруднювачів виступає ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», в тому числі аглофабрика металургійного комбінату.

1.2 Еколого-географічні особливості регіона розміщення аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» знаходиться на південному сході України та на південному заході Дніпропетровської області, в степовій зоні, поряд з річками Інгулець і Саксагань.

Відомо, що техногенне забруднення атмосферного повітря може посилюватись деякими метеорологічними умовами, особливо підвищеною вологістю повітря, низьким атмосферним тиском і невеликою швидкістю руху повітря. В зв'язку з цим буде доцільним проаналізувати кліматичні умови досліджуємого регіону. Клімат Криворізького регіону характеризується жарким сухим літом та відносно нехолодною зимою [12]. Середня тривалість морозного періоду складає 182 доби, максимальна – 224. В таблиці 1.2 наведені основні кліматичні характеристики, що визначають умови розсіювання шкідливих речовин в зоні впливу підприємства.

В роботі [25] були детально проаналізовані метеоумови м. Кривий Ріг в залежності від пори року. Переважний напрямок вітру – східний і північний (біля 20 – 30 % усіх щорічних напрямків); щорічно найбільша швидкість вітру була восени (7,7 – 6,6 м/с), а найменша – влітку (4,6 – 5,2 м/с). Відносна вологість повітря взимку перевищує літні показники вологості в 1,4 – 1,5 рази. Щорічно було

зафіксовано біля 200 – 230 днів, коли мав місце один з несприятливих метеорологічних факторів, а саме або відносна вологість перевищувала 75 %, або атмосферний тиск був нижче 750 мм.рт.ст., або швидкість вітру була нижче 2 м/с. Окрім того, 16,1 – 18,1 % днів щорічно було з двома і більше переліченими вище факторами, причому з них більше було в осінньо-зимовий період (10,7 – 11,2 %), ніж у весняно-літній (6,0 – 7,1 %). Також було виявлено, що сумарне забруднення атмосферного повітря було більше в осінньо-зимовий період року (концентрація пилогазових забруднювачів перевищувало ГДК на 37 – 42 %), а найменшим - влітку (спостерігалось перевищення ГДК на 23 – 27 %). Ці дані дозволяють провести зв'язок між несприятливими кліматичними умовами певної пори року зі збільшенням рівня забруднення досліджуємого регіону.

Таблиця 1.2 – Характеристика кліматичних умов в м. Кривий Ріг

№ з/п	Найменування характеристики	Величина
1	Середньорічна температура повітря, °С	8,8
2	Середня температура найбільш жаркого місяця літа	21,1
3	Середня максимальна температура найбільш жаркого місяця, °С	27,2
4	Абсолютний максимум температури повітря, °С	38,6
5	Середня температура найбільш холодного місяця року, °С	-5,0
6	Абсолютний мінімум температури повітря, °С	-33,2
7	Середня річна відносна вологість повітря, %	73
8	Середня сума опадів, мм	483
9	Середня кількість днів з туманами	61
10	Роза вітрів за багаторічними спостереженнями напрямів вітру, %:	
	- північний	15,4
	- північно-східний	16,1
	- східний	15,2
	- південно-східний	10,3
	- південний	9,8
	- південно-західний	10,3
	- західний	11,5
	- північно-західний	11,4
11	Швидкість вітру, перевищення якої складає 5%, м/с	2,5
12	Коефіцієнт, залежний від стратифікації атмосфери (А)	200

Безпосереднім об'єктом дослідження даної роботи є аглофабрика ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка виступає одним з основних джерел забруднення повітряного середовища в Кривому Розі. Вона розміщена в центральній частині підприємства. Поруч знаходиться цілий комплекс цехів: конверторний цех, комплекс доменних печей і мартенівських цехів, а також інші структурні підрозділи з великою чисельністю працівників. Враховуючи переважний напрям вітру, необхідно проаналізувати райони, розташовані на північ і на північний схід від даного аглоцеха. На північному сході на відстані 1000 – 1200 м розташований комплекс допоміжних цехів, працівники яких потрапляють під негативний вплив викидів агломераційних газів. На півночі на відстані 2500 – 3000 м знаходиться житлова зона, а також різні адміністративно-управлінські організації, освітні і лікувальні заклади. Основними джерелами викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище є дві димові труби висотою 80 м, розташовані на відстані 20 м одна від одної на території аглофабрики. Питомі викиди аглогазів через першу димову трубу складають $433 \text{ м}^3/\text{с}$, через другу – $108 \text{ м}^3/\text{с}$. Інтенсивність викидів пилу через першу та другу димові труби становлять відповідно 157 і 39 г/с.

Таким чином, в результаті аналізу основних джерел викиду шкідливих речовин аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», географічних та метеорологічних особливостей м. Кривий Ріг, особливо переважний напрямок вітру, було встановлено, що під негативну дію забруднюючих речовин, що утворюються під час спікання агломераційної шихти підпадає не тільки працюючий персонал металургійного комбінату, а і населення, що проживає в зоні впливу забруднювачів.

1.3 Вплив шкідливих чинників промислових підприємств на організм людини та живі істоти

Кривий Ріг є містом з надзвичайно складною техногенною ситуацією. Як вже вказувалося вище, окрім пилу, з викидами промислових підприємств в атмосферне повітря викидається велика кількість оксидів вуглецю, азоту, сірки, бензопірен і інші шкідливі речовини. Тому актуальним є вивчення механізму дії основних забруднюючих речовин досліджуваного регіону на організм людини.

При оцінці негативної дії пилу на організм людини має значення концентрація пилу в повітрі, а також його дисперсність [37]. Значну увагу необхідно приділяти і фізико-хімічним властивостям пилу при гігієнічній оцінці запиленості. Найдрібніший пил найбільш глибоко проникає в дихальну систему. У роботі [75] приведений відсотковий вміст пилу (по фракціях), здатного проникати в легені. Близько 25 – 40 % аерозолів, що містять частки пилу $3 - 5 \cdot 10^{-3}$ мм затримується в носоглотці, в легені потрапляє 20 – 25 % пилових часток розміром $1 \cdot 10^{-3}$ мм. Таким чином, якщо більш крупні частинки пилу при вдиханні більшою мірою затримуються у верхніх дихальних шляхах і поступово можуть видалятися зі слизом, то дрібний пил може потрапляти в легені і затримуватись там більш тривалий термін, викликаючи патології легеневої тканини, адже самоочищення органів дихання може тривати від декількох тижнів до декількох років. Окрім цього, дрібний пил має більшу поверхню контакту з легеневою тканиною, тому він більш активний. Промисловий пил металургійного виробництва відноситься до 3 класу небезпеки [33].

Для оцінки негативного впливу пилу необхідно враховувати мінералогічний його склад. Пил агломераційного виробництва складається, в основному, із з'єднань заліза, кальцію і незначної кількості з'єднань марганцю [5].

При вдиханні пилу, що містить залізо, може спостерігатися втома, пітливість, лихоманка; можливі також бронхіт, початкова стадія емфіземи, сухий плеврит, а також запальні захворювання носоглотки. З'єднання кальцію у вигляді пилу дратують слизові оболонки, викликаючи чхання і кашель. Вдихання вапняного пилу іноді може викликати запалення легенів. Окрім цього, оксид кальцію особливо сильно діє на слизову оболонку очей [24].

Встановлено, що запиленість атмосферного повітря негативно впливає на тваринний і рослинний світ. Пил, що містить окиси заліза і кальцію, при її тривалому вдиханні тваринами відкладається в легенях і надалі може викликати пилові бронхіти і емфізему легенів.

Також негативним чином на живі організми впливають різні оксиди у складі аглогазів: CO, SO₂, NO₂ [155, 161]. При систематичному отруєнні невеликими концентраціями CO спостерігаються порушення серцево-судинної і центральної нервової системи, працівники скаржаться на шум в голові та головні болі, запаморочення, підвищену стомлюваність, послаблення пам'яті та уваги, апатію і дратівливість, схуднення, відсутність апетиту, задишку, серцебиття, болі в ділянці серця і грудей [24].

При дослідженні отруєння тварин CO спостерігається різке підвищення вмісту гемоглобіну і еритроцитів, ураження печінки і надниркових залоз [24]. Авторами робіт [16, 17] проаналізовано вплив комплексу забрудників атмосферного повітря на живі істоти.

Оксиди сірки загострюють захворювання органів дихання людей і тварин. При хронічному отруєнні SO₂ у людини спостерігається погіршення нюху, риніти, фарингіти, бронхіти, кон'юнктивіти, руйнування зубів, збільшення або зменшення числа еритроцитів і вмісту гемоглобіну [24]. Також при збільшенні концентрації діоксидів сірки може відбуватися загострення респіраторних захворювань, бронхіальної астми і серцево-судинних захворювань [75]. Хімічні сполуки сірки мають і ембріотоксичний ефект дії [37]. Негативний вплив на тварин полягає в можливості затримки надбавки ваги і пригнобленні захисних

протиінфекційних реакцій організму [24]. Сірчистий ангідрид дуже шкідливий для рослин, негативно впливає на врожайність сільськогосподарських культур.

При вдиханні оксидів азоту виникає відчуття запаху і невеликого роздратування у роті, а у ряді випадків – при збільшенні концентрації – загальна слабкість і запаморочення [24]. Оксид азоту безпосередньо вражає легеневі тканини, виникають патологічні зміни у бронхах і альвеолах, на поверхні легеневої тканини можуть утворюватися кислоти з подальшим перетворенням в нітрати і нітроти, викликаючи значну подразливу дію дихальних шляхів, що в деяких випадках може привести до набряку легенів і навіть кисневої недостатності [75].

Необхідно також врахувати, що комбінована дія перерахованих компонентів, що забруднюють атмосферне повітря, може викликати більш виражений негативний ефект, ніж кожна з цих речовин окремо. Наприклад, легеневі захворювання зустрічаються частіше при забрудненні атмосферного повітря пилом у поєднанні з оксидом сірки [75].

Окрім негативної дії на живі організми спостерігається забруднення ґрунту важкими металами, як наслідок вторинного забруднення повітря пилом агломераційного виробництва, про що свідчить сильна залежність запиленості повітря і забруднення ґрунту важкими металами [32]. Пил і газові викиди агломераційних фабрик розносяться вітрами на далекі відстані і, осідаючи на поверхні ґрунту, знижують врожайність сільськогосподарських угідь на 15 – 20 % [56].

Для повнішої оцінки впливу шкідливих речовин на організм людини необхідно проаналізувати захворюваність населення, пов'язану із забрудненням атмосферного повітря і інших компонентів довкілля. Ці захворювання набувають все більшу вагу в загальній структурі захворюваності населення. Викиди промислових підприємств можуть викликати як гострі, так і хронічні захворювання різної природи. В умовах сучасного технологічного процесу спостерігається значне зростання захворювань органів дихання, системи

кровообігу і ін. В структурі загальної захворюваності перше місце як у дорослих, так і у дітей займають хвороби органів дихання [103]. У районах з гірничо-металургійними комбінатами загальна їх частка складає 56 – 74 % [37, 78]. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що більшість хімічних шкідливих речовин поступають саме через органи дихання. Встановлений прямий зв'язок між техногенним забрудненням атмосферного повітря та збільшенням рівня захворювань легень [37]. Особливу небезпеку для здоров'я населення і персоналу підприємств становлять викиди пилу [57]. Наприклад, згідно зі статистичними даними Профпатологічної служби Криворізького регіону на «АрселорМіттал Кривий Ріг» за останні роки серед знову виявлених професійних захворювань на долю пневмоконіозів доводиться від 55 до 73 % [53]. Смертність серед населення, що мешкає на прилеглих до цього підприємства територіях, від легеневих захворювань складає 8 – 10 % [16].

Відомо, що захворювання дихальних шляхів мають тенденцію до загострення під впливом запиленості повітря. Частіше стали спостерігатися гострі респіраторні захворювання, набряки легенів, бронхіальна астма [75, 104].

Численні дослідження, присвячені вивченню рівня захворюваності населення, що мешкає в техногенно небезпечних регіонах в порівнянні з населенням, яке мешкає у відносно чистій місцевості, тобто далеко від зосередження більшості промислових підприємств, свідчать про значний негативний вплив промислового виробництва на їх здоров'я [32, 103, 104].

Наприклад, в роботі [32] було досліджено рівень захворюваності дітей віком 4 – 6 років. Вибір саме цієї категорії населення був обґрунтований відсутністю впливу виробничих чинників і шкідливих звичок. Були проаналізовані 4 райони м. Кривого Рогу, у тому числі район розташування ВАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", райони розташування основних гірничо-збагачувальних комбінатів і район, розташований на значній відстані від вказаних об'єктів.

Безумовно, райони розташування промислових об'єктів є районами значного техногенного забруднення атмосферного повітря. Порівнюючи показники захворюваності дитячого населення, можна відмітити збільшення частоти захворювань органів дихання в районах техногенного забруднення в 1,5 – 2 рази, а також частоти хронічних захворювань мигдалин в 37 – 55 разів, пневмоній, бронхіальної астми в 3 – 3,5 рази і алергічних захворювань серед дитячого населення [32, 37, 103].

Окрім захворювань органів дихання, було зафіксовано, що в районі, розташованому далеко від металургійних комбінатів і інших промислових підприємств, спостерігається нижчий рівень захворювань системи кровообігу (у 1,4 – 2,1 рази), а також захворювань шкіри (у 1,2 – 1,8 рази) [32].

Таким чином, в районах з високим рівнем забруднення атмосферного повітря спостерігається більш високий рівень загальної захворюваності населення, у тому числі захворювань органів дихання, шкіри та системи кровообігу. Тому, безумовно, проблема зменшення запиленості атмосферного повітря, а також поліпшення екологічної ситуації в цілому в регіонах інтенсивного техногенного навантаження є надзвичайно актуальною.

1.4 Існуючі способи боротьби з пилом в агломераційному виробництві

Для забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища вміст пилу в атмосферному повітрі не повинен перевищувати концентрацій, встановлених чинними нормативними документами [90]. Враховуючи те, що головним джерелом пилового забруднення атмосфери в техногенних регіонах є металургійні підприємства, основним шляхом забезпечення сучасних стандартів якості атмосферного повітря є очищення викидів за допомогою пиловловлюючого устаткування [40, 121, 131].

Знепилювання аглогазів обумовлено технологічною потребою, а саме збільшити термін служби ексгаустерів, а також очистити агломераційні гази перед їх викидом в атмосферу [94].

Нині на аглофабриках застосовують в основному наступну схему збору і відводу технологічних газів від агломашин [115]:

- з усіх розташованих по довжині агломашини вакуум-камер гази збираються в загальний колектор, розміщений збоку від агломашини паралельно її осі;

- на відгалуженнях від вакуум-камер до колектора стоять інерційні пристрої, в яких за рахунок сил інерції, що виникають при поворотах, відбувається відділення тільки пилу великих фракцій;

- зібрані в колекторі запилені гази з невеликою швидкістю (до 10 м/с) рухаються до головної частини машини. При цьому великі частинки пилу під дією власної ваги випадають з потоку і збираються у розташованих під колектором пилових бункерах, звідки видаляються зазвичай за допомогою гідрозмиву.

Ефективність роботи колектора, як правило, не перевищує 60 %. Враховуючи, що викиди з високою концентрацією пилу надходять у колектор лише з перших і останніх камер, доцільніше застосовувати схеми збору і відводу агломераційних газів, при якому довжина шляху сильно запиленого газу в колекторі значно збільшується і ефективність роботи колектора помітно зростає [109, 115, 149].

Знепилювання агломераційних газів можна здійснювати в батарейних і одиночних циклонах, мокрих пиловловлювачах і електрофільтрах [18, 47, 61, 91, 115, 149].

Апарати сухого очищення дозволяють отримати уловлений пил в сухому вигляді, що полегшує його повернення у виробництво [114].

На багатьох аглофабриках типовим рішенням є установка батарейних циклонів [109], приклад батарейного циклону зображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Батарейний циклон [168]

Однак практика експлуатації виявила великі недоліки цього виду газоочистки, основними з яких є: нерівномірний розподіл газу при великій кількості циклонних елементів, що призводить до перерозподілу потоків газу між елементами; інтенсивне і нерівномірне зношення і забивання пиловипускних отворів циклонних елементів; забивання пилом направляючих апаратів циклонних елементів; руйнування агломераційного пилу, що являє собою агрегати з різнорідних частинок, у відцентровому полі циклону, що істотно знижує ступінь очищення газу [9, 115].

Окрім батарейних циклонів також набуло практичного використання застосування в якості системи пилоочистки електроциклону [63, 82, 96, 97, 110], конструкція якого дозволяє модернізувати існуючі циклони типу за рахунок додавання конструктивних елементів електрофільтрів. Ефективність електроциклону вище показників батарейного на 12 – 14 % [64].

На деяких аглофабриках замість батарейних циклонів встановлені окремі циклони великого діаметра (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Циклон для очистки повітря [174]

Зменшуючи можливість забивання пилом і нерівномірного розподілу газу за окремими елементами, одиничні циклони водночас не забезпечують високого ступеня очищення внаслідок великих розмірів і зменшення величини відцентрових сил [8]. У результаті експлуатаційний ступінь очищення, як в батарейних, так і в одиничних циклонах низька і не перевищує значень від 70 % до 85 %; запиленість очищеного газу практично завжди більше, ніж $0,5 \text{ г/м}^3$. Така концентрація пилу в газі неприпустима, по-перше, з санітарних міркувань внаслідок великого викиду пилу в повітряний басейн і, по-друге, через різке скорочення терміну служби екстаустера внаслідок ерозійного зносу [4]. Крім того, ці апарати практично не вловлюють дрібнодисперсний пил (менше ніж 20 мкм), що не дає можливості виконати необхідні норми щодо викидів.

В роботі [50] було розглянуто запропонований для встановлення агломашинах апарат інерційного осадження VAV, який проводить попередню очистку аглогазів. Цей апарат має пилову камеру з розміщеним всередині газопроникливим осаджувачем всередині, що виконується з профільних елементів. В процесі осадження беруть участь механізми гравітаційного осадження, що посилюються аеродинамікою комбінованого ходу газів.

Деяким кроком вперед стало застосування для очищення аглогазів мокрих пиловловлювачів (таких як, наприклад, скруббер Вентурі, зображений на рисунку 1.3) як у якості другого ступеня очищення, так і в якості самостійних апаратів [149]. Установа після батарейних циклонів апаратів мокрого очищення дозволяє знизити запиленість очищеного газу, однак при цьому очищенні підвищується гідравлічний опір, зростають витрати води та експлуатаційні витрати, виникає необхідність створення шламосховищ з відповідним утилізуючим обладнанням. Недоліком цього методу є також відкладення шламу в апаратах і газоходах, що призводять до абразивного зносу і корозії обладнання, висока енергомісткість мокрого очищення газів. Вихідні гази після апаратів мокрого очищення мають меншу температуру і гірше розсіюються в повітряному середовищі В результаті мокрий спосіб очищення газів від пилу значно дорожче сухого при однаковій ефективності [73].

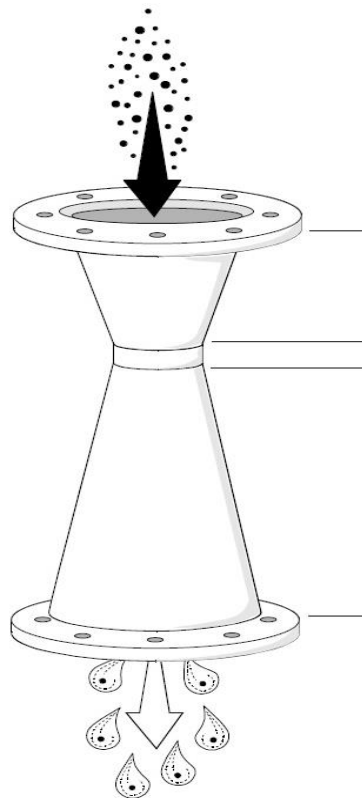


Рисунок 1.3 – Скрубер Вентурі [171]

Також широко поширені та ефективні рукавні фільтри в якості апаратів пиловловлення [3, 38, 76]. Їх застосовують для відокремлення пилу від газів і

повітря в різних галузях чорної та кольорової металургії. Найбільш поширені рукавні фільтри з гнучкими пористими перегородками. Для рукавів використовуються натуральні (бавовна, вовна) і синтетичні тканини. Рекомендують використовувати синтетику, оскільки фільтри з бавовни застосовні при температурі від 0 до 100 °С, а синтетику легше обслуговувати, ремонтувати і т. п. Скловолокно використовують при температурах від 0 до 250 °С. Недолік таких фільтрів – це їх крихкість. До переваг рукавних фільтрів можна віднести високий ступінь очищення газів від пилу (ефективність до 99 %) та невелику чутливість фільтрів до фракційного складу пилу. Недоліками рукавних фільтрів є великі габарити фільтрів, швидке зношування матеріалів рукавів, необхідність обігріву системи фільтра. Окрім цього при струшуванні з фільтра видаляється не весь пил, внаслідок чого рукава необхідно додатково очищати в середньому через кожні 3 місяці. Рукавні фільтри мають великий аеродинамічний опір (до 2000 Па) [49]. Створення нових синтетичних тканин розширює можливості використання тканинних фільтрів. Однак у вітчизняній практиці їх не застосовують через високу вартість, великі габарити, складність регенерації та низьку якість фільтрувальних тканин [47].

Крім цього на деяких аглофабриках набули поширення також електрофільтри [74, 151, 164], зображені на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Конструкція електрофільтру [167]

За допомогою цих апаратів можна уникнути недоліків, які є у батарейних циклонів і мокрих пиловловлювачів, а також мають високу ефективність. При очищенні запиленого газу в електрофільтрі можна знизити вміст пилу до 120 мг/м^3 і навіть менше. У разі високої початкової запиленості газу перед електрофільтрами встановлюють групу циклонів. Слід мати на увазі, що внаслідок великих витрат газів електрофільтри повинні мати високу продуктивність, а через великі розрідження, що створюються ексгаустерами, посилену конструкцію і газощільність корпусу. Установка електрофільтрів значно знижує викиди в повітряний басейн і підвищує термін служби ексгаустерів. До основних недоліків електрофільтрів відносяться великі габарити та висока вартість. Крім цього порушення аеродинамічного режиму, нестабільний режим енергоживлення фільтрів, проблеми очищення осаджувальних електродів від уловленої пилу різко знижує ефективність пиловловлення електрофільтром [91].

Електрофільтри стабільно працюють лише при питомому електричному опорі пилу від 10^4 до 10^{10} Ом·см. Зі зростанням електричного опору пилу ефективність роботи електрофільтру знижується. Слід мати на увазі, що ефективність електрофільтрів значно нижче при спіканні агломерату основності 3 – 3,5, що є високою, і наявності в аглошихті окислів свинцю або цинку, або застосуванні в аглошихті замасленої окалини.

Крім цього, в даний час в науковій літературі докладно описані різноманітні системи багатоступінчастого очищення газів агломераційного виробництва [28, 29, 61, 111].

Наприклад, для очищення аглогазів австрійськими вченими [129] була розроблена система «Ветфайн», яка складається зі скрубера і мокрого електрофільтру і, крім дрібного пилу, здатна уловлювати деякі хімічні сполуки. Спочатку гази, що відходять, спрямовуються на душуючий пристрій за принципом протитечії. Після попереднього очищення вони надходять через краплевловлювач на мокрий фільтр і тільки після цього викидаються через

димову трубу в атмосферу. Ефективність очищення від пилу таким способом може досягати до 98 %.

Кампанією Siemens VAI для вирішення проблеми очищення агломераційних газів була розроблена технологія MEROS (максимальне скорочення шкідливих викидів при агломерації) [67]. На першому ступені за технологією MEROS гази, що відходять, очищають, використовуючи в якості адсорбенту спеціально оброблений лігнітовий кокс або активоване вугілля. Потім у кондиціонуючому реакторі гази зволожують і охолоджують за допомогою форсунок подвійної дії (вода – стиснене повітря), після чого потік аглогазів надходить в рукавний фільтр з імпульсною очисткою. Матеріал цього фільтра покривається стійкою до хімічного і температурного впливу мембраною.

У роботі [113] наведено аналіз існуючих систем очищення на різних аглофабриках України. Широко представлені як схеми сухого очищення газів в батарейних циклонах різних типів (аглофабрики ДМК, «АрселорМіттал Кривий Ріг», Алчевського металургійного комбінату, ММК імені Ілліча, Єнакіївського металургійного заводу), мокрої газоочистки в низьконапірних трубах Вентурі («Запоріжсталь»), комбіновані схеми («Азовсталь», ММК імені Ілліча).

В якості першого ступеня очищення агломераційних газів у всіх схемах використовується колектор забрудненого газу. Ефективність осадження пилу в колекторі багато в чому визначається швидкістю руху газу і місцем його відбору з колектора. Тому на ряді аглофабрик колектори реконструйовані і вдосконалені. Так, на аглофабриці «АрселорМіттал Кривий Ріг» на чотирьох машинах змонтовані обвідні газоходи для відбору газу з середини колектора і встановлені відбірники. На агломашині № 5 відбір газів здійснюється від початку колектора, зразу після вакуум-камери № 1. За заводськими даними при стабільній роботі це забезпечувало зниження викидів пилу на 30 % в порівнянні з агломашиною № 5.

Збільшення діаметра колекторів шляхом бічних вставок було виконано на аглофабриці «Запоріжсталі», схема з відбором газу з середини колектора – на аглофабриці «Азовсталі».

Як зазначено вище, найбільш поширені схеми газоочищення з використанням батарейних циклонів. Накопичений на аглофабриках України досвід їх експлуатації показав, що найбільш прості і надійні батарейні циклони з напрямними елементами типу «гвинт». Їх декілька менший гідравлічний опір, ніж у батарейних циклонів з напрямними елементами типу «розетка», дозволяє збільшити висоту шару шихти, а незначне налипання пилу практично виключає перетоки газу і, тим самим, підвищує ефективність його очищення. Такі циклони працюють на аглофабриках Єнакіївського металургійного заводу та Алчевського металургійного комбінату, причому високу надійність на останньому показали батарейні циклони з тангенціальним введенням газу, що експлуатувалися протягом семи років [165].

В даний час на аглофабриках України намітилася тенденція до спорудження багатоступневих газоочисток [76]. При цьому існуючі схеми, в яких остаточне очищення проводилося в батарейних циклонах, доповнюють більш ефективними апаратами. Так, на аглофабриці «Азовсталі» остаточне очищення агломераційних газів після модернізованих батарейних циклонів відбувається в низьконапірних трубах Вентурі. На аглофабриці комбінату імені Ілліча газу зони спікання після батарейних циклонів очіщуються в скруберах МП-ВТІ. Планується установка електрофільтрів фірми «Спеік» (Франція) після батарейних циклонів на Єнакіївському заводі [165]. ПАТ «Запоріжсталь» приступив до активної фази монтажу основного газоочисного обладнання – рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією. В ході процесу газу проходять через спеціальний фільтр, виготовлений з тканини європейських виробників Польщі та Німеччини (Kaiser, BWF Envirotec). Принцип роботи нових газоочисток агломашин полягає в багатоступневому очищенні відхідних газів: газ очищається спочатку в одному рукавному фільтрі, далі надходить в

адсорбер, де відбувається очищення від сірчистого ангідриду (SO_2), а після в другій рукавний фільтр, що забезпечує очищення повітря від пилу [169].

Для вибору найбільш ефективної системи пиловловлювання на деяких аглофабриках були проведені порівняльні випробування двоступеневої схеми очищення газів (батарейний циклон і два паралельно включених електрофільтрів), і одноступінчастої схеми (електрофільтр) [4]. Випробування показали, що двоступенева система очистки в цілому давала гірші результати (92-95 % в залежності від швидкості газу при ефективності батарейного циклону 87%), ніж одноступенева (ефективність 95,5 %). Причиною цього є відокремлення в циклоні великих часток з відносно низьким питомим електричним опором, в результаті чого опір шару високодисперсною пилу на осаджувальних електродах підвищувався, і електрофільтр працював в режимі інтенсивної зворотної корони. При одноступінчастій системі очистки забезпечується хороша регенерація як осаджувальних, так і коронуючих електродів, а також поліпшуються умови роботи екстаустера, який працює при більш низькій запиленості.

Одним з основних факторів, що зумовлює пиловинос при агломерації, є підготовка шихтових матеріалів до спікання на стадії грудкування [73]. Одним зі способів підготовки шихти до спікання є спосіб, при якому шихта підлягає додатковому зволоженню та обробці стислим повітрям. Однак недоліком даного способу є невисока ефективність при грудкуванні шихт з підвищеним вмістом тонкоподрібнених фракцій. Наступним кроком на шляху удосконалення грудкування є спосіб, що включає її змішування, зволоження та грудкування, при якому одночасно з подачею рідини в зоні зволоження матеріали обробляють стислим повітрям під тиском 3 – 5 атм., спрямованим під кутом 45 – 90 град. до поверхні шару шихти. Це дозволяє збільшити площу та підвищити рівномірність зволоження [20].

Досвід знепилення повітря [106, 108] вказує, що підвищити ефективність існуючих методів очищення повітря можливо шляхом зменшення надходження

пилу безпосередньо від джерел пилоутворення. Так в роботі [26] наведені дані про підвищення ефективності знепилення повітря в вугільних шахтах у 2 – 3 рази методом зрошення шляхом попереднього зволоження вугільного пласта розчинами поверхнево-активних речовин. В роботі [83] вказано, що застосування піни при проведенні виробок прохідницькими комбайнами для зменшення пилоутворення при руйнуванні гірських порід з наступним пилоутворенням дозволяє зменшити запилення повітря в гірських виробках на 99 %.

Розробкою наукових основ захисту атмосферного повітря від запилення за допомогою ПАР займались вчені Англії, США, Болгарії, Польщі, Російської федерації ще в минулому сторіччі, використовуючи розчини ПАР на вугільних шахтах [79]. В нашій державі проводились чисельні роботи в цьому напрямку в ІГТМ НАНУ, МакНДІ, Інституті хімії ВМС НАНУ. Так, в 60 – 80 р.р. 20-го сторіччя для боротьби з пилом у вугільних шахтах застосовували змочувач ДБ – неіоногенну поверхнево-активну речовину – суміш поліетіленгліколь-алкілфенілових ефірів. З 1970 року у вугільних шахтах почали застосовувати розчини поверхнево-активних речовин, які були розроблені як піноутворювачі для гасіння пожеж: ДС-На, ДС-РАС, ПО-1, «Прогрес» та інші [26, 83]. Розчини цих речовин подавались в зону пилоутворення в вигляді піни. В 70 роках в інститутах НАН України та інших науково-дослідних установах СРСР були розроблені піноутворювачі, спеціально призначені для боротьби з пилом у вугільних шахтах. Їх застосування забезпечило підвищення ефективності знепилення рудничного повітря від 50 % до 70 % порівняно із застосуванням зрошення чистою водою [95, 136]. Серед найвідоміших вчених в галузі боротьби з пилом можна назвати Абрамова Ф.О., Гельфанда Ф.М., Роменского Л.П., Бересневича П.В., Тищука В.Ю., Гриньова В.М., Швидкого М.І., Голінька В.І, Гагауза П.Г., Алієва Г.М., Коузова П.А., Колесника В.Є., Большини Є.П., Кащеєва М.А., Владі В.О., Ляховко А.Д. та ін. [4, 12, 26, 49, 50, 54, 58, 63, 64, 95, 98, 117, 134, 139, 142, 143, 144]. Значний внесок в розв'язання проблеми забруднення і захисту атмосфери при

виробництві агломерату внесли такі вчені, як: Фомін С.П., Задара В.М., Шишацький А.Г., Агапова В.Т., Петляк О.Г., Нестеров А.С., Якушев В.С. та ін. [2, 87, 107, 123, 124, 136, 138, 140]. Попередні розробки були спрямовані на боротьбу з пилом, що виділяється в повітря під час добування та переробки мінеральної сировини. Ці методи не завжди забезпечують необхідну ступінь обезпилення повітря, або їх ефективне застосування є неможливим з технологічних причин. Тому постала задача розробки методів та засобів зменшення надходження пилу в атмосферне повітря за рахунок покращення процесів грудкування аглошихти та підвищення газопроникності шару аглошихти за допомогою ПАР в умовах виробничих процесів аглофабрик, що є безумовно актуальним.

1.5 Мета, завдання і методи дослідження

Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня екологічної безпеки агломераційного виробництва.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та розв'язані наступні **завдання**, що визначили структуру дисертації:

- провести аналіз впливу на навколишнє середовище шкідливих чинників при роботі металургійних підприємств та шляхів зниження викидів пилу в атмосферне повітря;

- провести дослідження фізико-хімічних та пилогазодинамічних характеристик агломераційних газів на прикладі агломераційного виробництва ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»;

- обґрунтувати принципи вибору поверхнево-активних речовин для боротьби з пилом, дослідити їх фізико-хімічні властивості та визначити параметри обробки аглошихти розчинами ПАР;

- розробити методи обробки сипучих матеріалів розчинами поверхнево-активних речовин, виконати апробацію розроблених методів в промислових умовах та визначити ефективність розроблених методів знепилення аглогазів;

- виконати екологічну оцінку застосування розчинів ПАР для знепилення аглогазів.

Методи дослідження. У дисертації використаний комплекс теоретичних і експериментальних методів досліджень:

- класична теорія аеропилогазодинаміки під час дослідження газодинамічних процесів в газоходах та вимірювання запиленості аглогазів у вакуум-камерах агломашин;

- метод мікроскопічного аналізу дисперсного складу пилу при визначенні масового розподілу часток пилу за розміром в аглогазах;

- метод найбільшого тиску бульбашки газу для дослідження розчинів ПАР та обчислювання значення поверхневого натягу аналізованих розчинів при різних концентраціях ПАР;

- лабораторні, стендові та натурні (промислові) методи досліджень при визначенні параметрів обробки сипучих матеріалів ПАР та визначенні роботи сил адгезії, при оцінці ефективності процесів грудкування аглошихти, ступеню обезпилення аглогазів та визначення якості агломерату;

- статистико-ймовірнісні методи обробки й аналізу даних натурних і експериментальних досліджень та показників екологічного ризику.

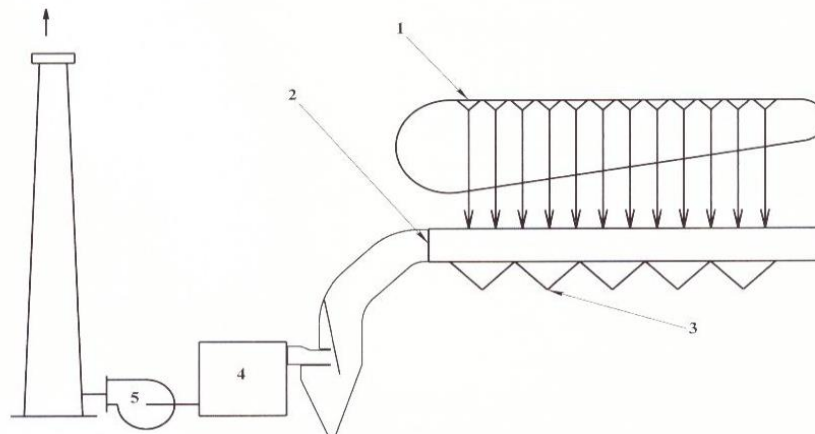
Основні положення розділу 1 опубліковані автором в наукових працях: [1, 2, 21, 84, 85, 86, 87, 122, 123, 124, 140, 141, 145, 158, 163].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЛУ АГЛОМЕРАЦІЙНИХ ГАЗІВ ВАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

2.1 Газодинамічні дослідження в газоходах агломашин

В умовах аглоцеху ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» газотранспортна магістраль складної конфігурації (рис. 2.1) експлуатується при значних витратах аглогазів $5400 - 7500 \text{ м}^3/\text{хв}$ з вмістом пилу $2000 - 5000 \text{ мг}/\text{м}^3$ і температурою $110 - 140^\circ\text{C}$. Очистка аглогазів від пилу в газотранспортній системі здійснюється в два етапи: в газозбірному колекторі (2) та в мультициклоні (4).



1 – вакуум-камери, 2 – газозбірний колектор, 3 – пилозбірники,
4 – мультициклон, 5 – ексгаустер

Рисунок 2.1 – Схема газотранспортної магістралі агломашини № 5

Були виконані дослідження газопилодинамічних характеристик безпосередньо на двох агломашинах аглофабрики ВАТ „АрселорМіттал Кривий Ріг” [123]. Дослідження поля швидкості газового потоку у відповідних газоходах перед входом в мультициклон на агломашинах № 2 і № 5 виконано відповідно до нормативів [34].

Для виконання вимірів поля швидкостей в газоходах використовувались наступні засоби вимірів, реактиви та обладнання:

- трубки напірні НПОГАЗ;
- манометри типу ММН-2400;
- манометри U-подібні водяні;
- термометри скляні технічні;
- барометр;
- штангенциркуль;
- рулетка металева;
- трубки медичні гумові або поліетиленові;
- спирт етиловий;
- вода дистильована.

Виміри проводились при встановленому русі потоку газу. Ділянка, обрана для вимірювань, повинна бути розташована на відстані не менше $3 \div 5 D_e$ від входу в мультициклон (де D_e – ефективний діаметр перерізу газоходу на вимірюваній ділянці, [м]). Ефективний діаметр газоходу визначається за формулою:

$$D_e = \frac{2 \cdot A \cdot B}{A + B}, \quad (2.1)$$

де A і B – внутрішні розміри газоходу прямокутного перерізу, [м] (відповідно висота і ширина газоходу).

Кількість точок вимірів (n) в поперечному перерізі газоходу приймалось відповідно до вимог [34].

Вимірювання запиленості газів в газоході агломашини № 2 виконувалось в 9 точках поперечного перерізу газоходу (вибір точок для вимірювань визначався як вимогами розподілу поперечного перерізу газоходу на рівновеликі ділянки, так і фактичною наявністю технологічних отворів на досліджуваних ділянках газоходів агломашин).

Схема розміщення точок у поперечному перерізі газоходу агломашини № 2 для вимірювання запиленості газів наведена на рисунку 2.2, а саме вказана відстань від стінки (м).

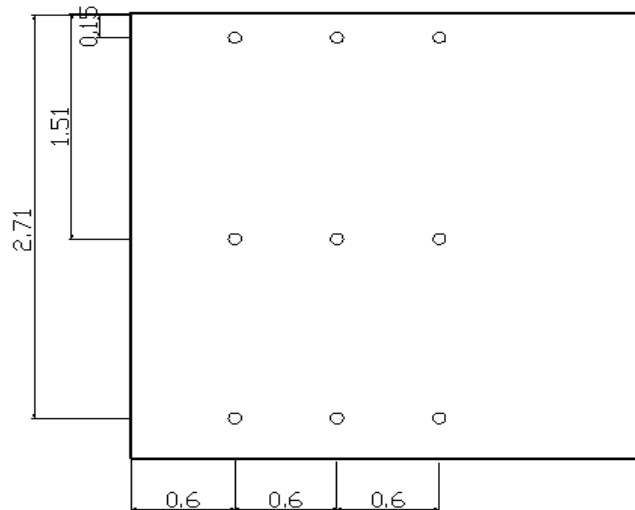


Рисунок 2.2 – Розміщення точок вимірів запиленості газів у газоході агломашини №2 перед мультициклоном.

Схема розміщення точок у поперечному перерізі газоходу агломашини № 5 для вимірювання запиленості газів наведена на рисунку 2.3, а саме вказана відстань від стінки (м).

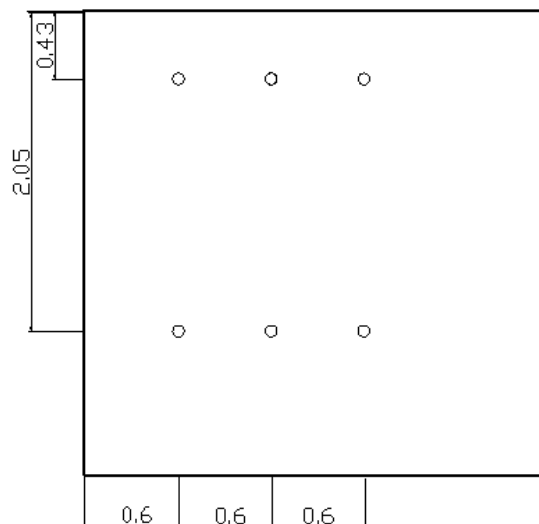


Рисунок 2.3 – Розміщення точок вимірів запиленості газів у газоході агломашини № 5 перед мультициклоном.

Швидкість руху газів V в газоході визначалась за формулою:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_g}{\rho}}, \quad (2.2)$$

де P_g – динамічний тиск газу, [Па],

ρ – густина газу в газоході, [кг/м³].

Вимірювання швидкостей газового потоку в обраних перетинах газоходів агломашин проводилися при різних режимах роботи агломашин. Так, в різних серіях виміру швидкостей температура відхідних газів лежала в діапазоні від 103⁰С до 125⁰С, а розрідження від 800 до 820 мм вод. ст. Слід зазначити, що, по-перше, більшому значенню температури газів, що відходять відповідає більша швидкість газового потоку, яка, як зазначалося вище, перераховувалася для нормальних умов, а, по-друге, в кожній серії вимірювань у відповідних перерізах газоходів спостерігалася загальна закономірність профілю швидкостей газового потоку. Результати вимірювань поля швидкості на агломашині № 2 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Швидкості газового потоку перед мультициклоном агломашини № 2

№ отв.	Швидкість, м/с	Відстань від стінки газоходу, м							
		0,2	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
1	V_{max}	20,1	14,4	13,2	14,6	14,6	20	14,4	
	V_{min}	10,4	9	9,7	9,7	11,6	12,7	13,8	
	$V_{сер}$	15,7	12,2	11,4	12,1	13,5	14,9	14	15,7
2	V_{max}	23,7	18,2	18,5	17,2	16,8	17,9	16,8	
	V_{min}	12,7	13,8	12,7	12,2	12,3	13,4	15,7	
	$V_{сер}$	16,1	16,5	16,4	15,4	14,5	15,8	16,2	16,6
3	V_{max}	21,9	14,8	15,3	15,7	15,7	13,7	14,2	
	V_{min}	12,7	12,3	11,1	12,3	9,1	6,4	6,4	
	$V_{сер}$	16,1	14	13,3	14	13,8	9,8	8,4	7,4

Епюра поля швидкості перед мультициклоном агломашини № 2 наведено на рисунку 2.4.

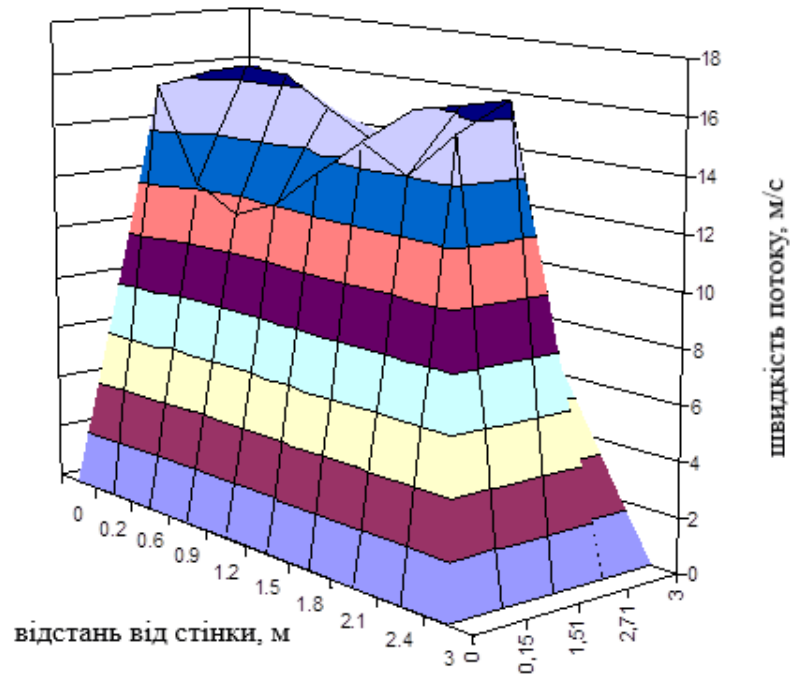


Рисунок 2.4 – Епюра поля швидкостей газового потоку перед мультициклоном агломашини № 2

Результати вимірювань поля швидкості на агломашині № 5 наведено в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Швидкість газового потоку перед мультициклоном агломашини № 5

№ отв.	Швидкість, м/с	Відстань від стінки газоходу, м							
		0,2	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4
1	V_{max}	8,4	11,6	10,7	10,7	10	12,5	14,6	-
	V_{min}	6,4	9,7	8,2	80,2	6,4	7,3	7,3	-
	$V_{сер}$	7,6	10,7	9,5	9,3	8,6	10,4	11	-
2	V_{max}	26,1	26,6	24,4	22,3	19,6	20,3	23,8	-
	V_{min}	23,8	24,6	21,1	19,4	18	17,6	20,8	-
	$V_{сер}$	25	25,6	23,1	21	18,7	19,4	22	22,3

Епюра поля швидкості газового потоку перед мультициклоном агломашини № 5 наведено на рисунку 2.5

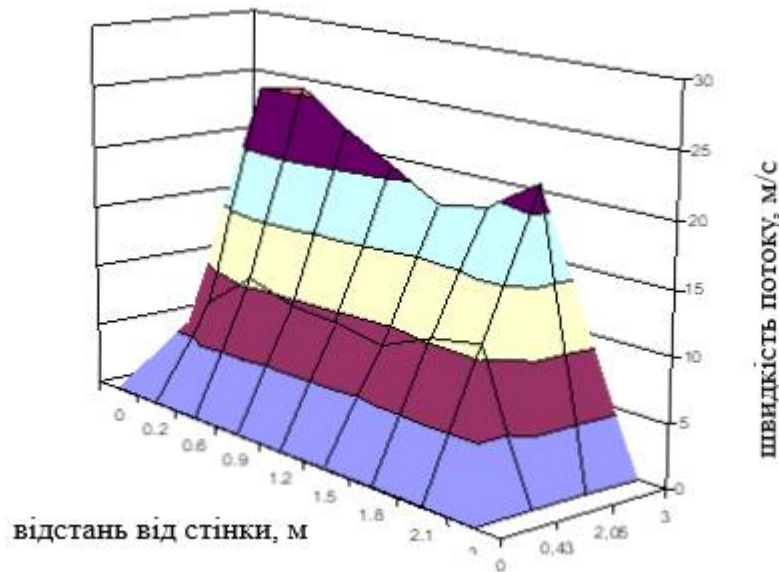


Рисунок 2.5 – Епюра поля швидкостей газового потоку перед мультициклоном агломашини № 5

Аналіз даних таблиць 2.1, 2.2 і їх графічної інтерпретації, наведеної на рисунках 2.4 та 2.5, показує, що профілі швидкостей по всьому перетину газоходу на агломашинах № 2 і № 5 відрізняється високим ступенем нерівномірності. Причому, ця нерівномірність на окремих агломашинах має різний характер. На агломашині № 2 зміна профілю швидкостей газового потоку спостерігається, в основному, уздовж лінії вимірювання, а на агломашині № 5 має місце зменшення швидкості газового потоку біля стінок газоходу (отв.1), в той час, як уздовж лінії (перпендикулярно до площини) вимірювань в обох отворах профіль швидкостей змінюється незначно.

Аналіз конструкції вузла газоходу на вході в мультициклони показує, що для забезпечення оптимального пилового навантаження на окремі секції мультициклона бажано дотримання рівномірності газорозподілу саме поперек перетину. Саме тому параметри газового потоку на ділянці входу в мультициклон на агломашині № 5 більшою мірою раціональні з точки зору подальшої пилоочистки газів, ніж на агломашині № 2. Більш повно і об'єктивно судити про вплив конструкції газоходів на ефективність роботи мультициклона

можна на підставі вимірів запиленості газів і дисперсного складу пилу в окремих точках газових потоків.

2.2 Оцінка запиленості газів на агломераційному виробництві ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Дослідження запиленості газів здійснювалися в наступних перетинах газоходів агломашин:

- у вакуум-камерах агломашини № 5;
- перед входом газів в мультициклони агломашин № 2 і № 5;
- після мультициклонів на агломашинах №№ 1, 2 і 3 перед викидом в атмосферне повітря.

Вимірювання запиленості газів у вакуум-камерах агломашини № 5 виконувалось в центрі поперечного перерізу кожної з вакуум-камер №№ 5; 6; 7 і 8.

Дослідження концентрації пилу по перетину газового потоку проводилось ваговим методом. Для виконання вимірів концентрацій пилу в газоходах використовувалися наступні засоби вимірів і обладнання:

- аспіратори вакуумні, обладнані вимірювальними ротаметрами,
- трубки повітрязбірні з насадками,
- трубки вакуумні,
- ваги аналітичні,
- аерозольні фільтри ФПП-15-1,5,
- аерозольні алонжи,
- секундоміри,
- рулетка металева.

Дослідження запиленості аглогазів виконувались відповідно до вимог діючих нормативних документів [34, 52, 68].

Концентрація пилу C_i в i -тій точці газоходу визначалась за формулою:

$$C_i = \frac{(m_k - m_0) \cdot 1000}{L \cdot \tau}, \quad (2.3)$$

де m_0 , m_k – відповідно, маса аерозольного фільтру до і після аспірації запиленого повітря через нього в процесі вимірів, [мг];

m_0 и m_k визначалися шляхом зважування аерозольних фільтрів на аерозольних аналітичних вагах з точністю до 0,1 мг;

L – витрати газу через аерозольний фільтр, [л/хв];

L визначались по показникам ротаметру на аспіраційному пристрої;

τ – час аспірації газу через аерозольний фільтр, [хв];

τ фіксувався секундоміром.

Повітрязбірний патрубок в газоході необхідно розміщувати строго назустріч газопиловому потоку. В процесі відбору запиленого газу необхідно дотримуватись ізокінетичності, тобто швидкість «входу» запиленого повітря в повітрязбірний патрубок має дорівнювати швидкості руху газів в цій точці. З цією метою повітрязбірні трубки мають бути обладнані змінними насадками.

Результати вимірювань концентрації пилу у вакуум-камерах наведені в таблиці 2.3, де C_{max} – максимальне значення запиленості, [мг/м³]; C_{min} – мінімальне значення запиленості, [мг/м³]; $C_{сер}$ – середнє значення запиленості, [мг/м³].

Таблиця 2.3 – Значення запиленості газів в вакуум-камерах агломашини №5

Номер вакуум-камери	Запиленість газів у вакуум-камерах агломашини №5, мг/м ³		
	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
5	4180	5136	3873
6	2568	3120	2400
7	3472	3930	2836
8	4008	4523	3876

Концентрацію пилу в агломераційних газах в вакуум-камерах агломашини №5 наведено на рисунку 2.6.

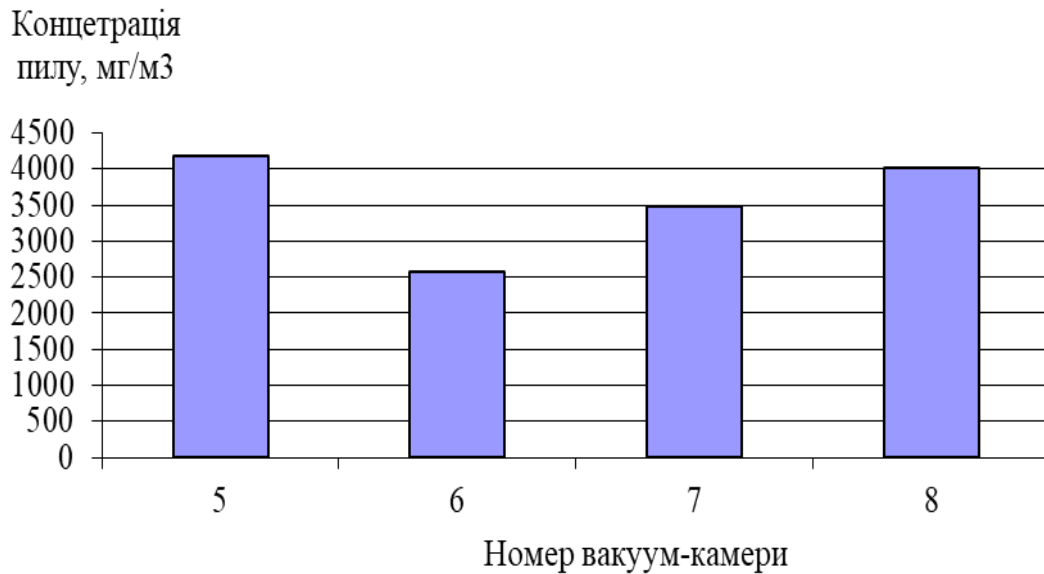


Рисунок 2.6 – Розподіл запиленості газів по довжині агломашини (на ділянці вакуум-камер № 5 - № 8)

З метою встановлення залежності формування газопилових потоків від конструкції газоходів виконані дослідження запиленості газів в поперечних перерізах газоходів агломашин № 2 і № 5 перед входом в мультициклони.

Результати вимірювань запиленості у обраних точках газохода агломашини № 2 перед мультициклоном наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення запиленості газів у поперечному перерізі газоходу агломашини № 2 перед входом в мультициклон

№ технологічного отвору	Запиленість газів (мг/м ³) на різних відстанях від входу в технологічний отвір								
	0,6 м			1,2 м			1,8 м		
	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
1	2943	3020	2731	3040	3136	2820	3120	3380	2923
2	2234	2403	2060	2163	2206	2106	2380	2506	2080
3	3130	3210	2984	3144	3186	3006	2844	3006	2640

Результати вимірювань запиленості у обраних точках газохода агломашини № 5 наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Значення запиленості газів у поперечному перерізі газоходу агломашины № 5 перед входом в мультициклон.

№ технологічного отвору	Запиленість газів (мг/м ³) на різних відстанях від входу в технологічний отвір								
	0,6 м			1,2 м			1,8 м		
	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
1	2376	2501	2200	2403	2490	2230	2480	2511	2211
2	2445	2492	2386	2400	2511	2270	2505	2550	2410

Аналіз даних таблиці 2.4 і таблиці 2.5 показує, по-перше, що рівень запиленості газів в газоході агломашины № 2 значно вище ($C_{сер} = 2980$ мг/м³), ніж в аналогічному поперечному перерізі агломашины № 5 ($C_{сер} = 2440$ мг/м³), а по-друге, у газоході агломашины № 2 має місце високий ступінь нерівномірності запиленості газів по поперечному перерізу газоходу, в той час як у газоході агломашины № 5 рівень запиленості вздовж перерізу газоходу змінюється незначно.

У результаті вимірів запиленості газів після мультициклону перед їх викидом в навколишнє середовище отримані наступні результати, які наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Значення запиленості газів, які викидаються в атмосферне повітря після очистки в мультициклоні, мг/м³.

№ а/м	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
1	720	915	550
2	798	862	603
3	845	1120	660

Одним з можливих напрямів збільшення ефективності очищення газів від пилу в мультициклони є забезпечення рівномірності газопилового навантаження на окремі його елементи.

Ступінь рівномірності газопилового навантаження на окремі елементи мультициклону в першу чергу визначається розподілом мас пилу по поперечному перерізу газоходу на вході в мультициклон. Кількісною характеристикою газопилового навантаження в окремих ділянках перетину

газоходу може служити запропонований нами газопилодинамічний параметр, який визначається з виразу:

$$m_g = C_i \cdot V_i, \quad (2.4)$$

де C_i – запиленість газів в i -тому поперечному перерізі газоходу, $[\text{г}/\text{м}^3]$;

V_i – швидкість газів в цьому перерізі, $[\text{м}/\text{с}]$.

Значення величин газопилодинамічного параметру по перетину газоходів перед входом в мультициклон на агломашинах № 2 і № 5 наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Величини газопилодинамічного параметру m_g в окремих елементах поперечного перерізу газоходів агломашин № 2 і № 5 перед входом в мультициклон, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$

№ а/м, отв.	Газопилодинамічний параметр		
	Відстань від стінки до входу в технологічний отвір, м		
	0,6	1,2	1,8
№2, отв. 1	35,9	36,8	46,5
№2, отв. 2	36,0	33,3	37,6
№2, отв. 3	50,4	44,0	27,9
№5, отв. 1	25,2	22,0	25,8
№5, отв. 2	62,6	50,4	48,6

Як видно з даних таблиці 2.7, значення величини газопилодинамічного параметру в межах поперечного перетину газоходів агломашин № 2 і № 5 відрізняються високим ступенем нерівномірності.

Наявність пилезборочних бункерів перед входом в мультициклон чинить істотний вплив на формування лінії току газів на вході в мультициклон. З цієї точки зору інтерес представляють величини газопилодинамічного параметру по довжині отвору 3 агломашини № 2 і отвору 2 агломашини № 5, так як ці отвори в газоходах знаходяться ближче до вхідного отвору в мультициклон, і запилені гази з цієї частини газоходу, в основному надходять безпосередньо в мультициклон. За значеннями величини газопилодинамічного параметру визначався коефіцієнт нерівномірності пилового навантаження у досліджуваних перетинах газоходу за формулою:

$$K_n^n = \frac{m_{g \max}}{m_{g \min}}, \quad (2.5),$$

де $m_{g \max}$ – максимальне значення газопилодинамічного параметру в перерізі, [Г/(м²·с)];

$m_{g \min}$ – мінімальне значення газопилодинамічного параметру в перерізі, [Г/(м²·с)].

Наведені значення газопилодинамічних параметрів вказують на високу ступінь нерівномірності пилового навантаження вздовж вхідних каналів у мультициклон. Особливо висока нерівномірність цього параметру має місце на агломашині № 2, де коефіцієнт нерівномірності по довжині отвору складає величину 1,8. На агломашині № 5 коефіцієнт нерівномірності складає величину близько 1,3.

2.3 Фізичні характеристики пилу агломераційного виробництва

Ступінь шкідливості пилу для компонентів навколишнього середовища, а також вибір методів та засобів знепилення газів залежить від цілого ряду фізико-хімічних характеристик пилу. До основних характеристик відносяться мінералогічний та дисперсний склад пилу [119].

Мінералогічний склад пилу залежить, в першу чергу, від речового складу аглошихти. За даними агломераційної лабораторії ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в період наших досліджень в склад аглошихти входило 12 компонентів. Кількісний вміст компонентів аглошихти приведений в таблиці 2.8.

У комплексі дослідження фізико-хімічних характеристик пилу аналіз дисперсного складу є обов'язковим методом контролю. Без характеристики ступеня дисперсності промислового пилу не можна об'єктивно оцінити ефективність діючих пилоочисних пристроїв і розрахувати ступінь очищення повітря проєктованими пристроями.

Таблиця 2.8 – Розрахунковий склад штабелю аглошихти

№ з/п	Вид сировини	Вологість компонентів сировини, %	Витрати комп. аглошихти, кг/т
1	аглоруда	4,8	114,13
2	концентрат	8,94	351,94
3	шлам	17,9	85,33
4	відсів	4,97	226,56
5	пил колошн.	11,4	26,16
6	окалина	2,6	56,03
7	ОТС	15,1	14,21
8	Мп-шлак	10,5	7,58
9	вапно	0	18,78
10	шлак сталепл.	3,5	29,27
11	вапн. пил	0	5,55
12	вапняк	2,2	40,18
13	торф	25,1	11,31
14	паливо	6,5	28,18

В теперішній час існує безліч методів дисперсного аналізу, які можуть ґрунтуватися на механічному розділенні часток, індивідуальному їх вивченні, седиментометрії, а також оптичні та гідроаеродинамічні методи [4, 58].

Наприклад, ситовий аналіз дисперсних матеріалів заснован на механічному поділі частинок за крупністю. Просіваючи матеріал через різні сита, можна визначити масовий розподіл за декількома фракціями. Однак даний метод можна застосовувати тільки для аналізу пилу, який добре просіюється, і, крім цього, не підходить для дрібнодисперсних фракцій пилу, так як нижня межа розмірів градусок досить обмежена [58].

Седиментометричні методи аналізу засновані на процесі осідання дисперсної фази під впливом зовнішніх сил у дисперсійному середовищі, яке перебуває у спокійному стані. У динамічних методах, на відміну від седиментометричних, середовище в період аналізу знаходиться в постійному русі. Для застосування цих методів необхідно, щоб пил, що аналізується, був однакового мінералогічного складу [58].

Мікроскопічний метод дослідження застосовується для оцінки розподілу часток пилу по кількості їх у фракціях. Він заснован на візуальному вивченні окремих часток – визначенні їх кількості, форми і розмірів.

Як видно з наведених у таблиці 2.8 даних, судити про однорідність мінералогічного складу пилу, що міститься в аглогазах, неможливо. Це ускладнює застосування для дослідження дисперсного складу пилу деяких вище перерахованих сучасних методів, які відрізняються достатньою точністю вимірів.

Саме тому в якості методу дослідження дисперсного складу нами був обраний мікроскопічний аналіз, на достовірність результатів якого не впливає різна густина компонентів дисперсного матеріалу, його оптичні та інші властивості.

Дисперсний склад пилу в газах агломашин визначався в наступних перетинах газоходів:

- у вакуум-камерах агломашини № 5;
- перед входом газів в мультициклон агломашин № 2 і № 5;
- після мультициклона на агломашинах №№ 1, 2 і 3 перед викидом в атмосферне повітря.

Дисперсний склад пилу в газоходах агломашин проводився оптичним методом.

Фільтри з тканини ФПП-15, які використовувалися для визначення запиленості газів у відповідних перерізах газоходів, після їх зважування розчинялися за допомогою ксилолу на предметному склі. Після висушування комплексу «скло-розчинений фільтр» проводився підрахунок кількості частинок пилу кожної фракції наступних діапазонів: <10; 10 – 20; 20 – 40; 40 – 60; 60 – 80; 80 – 100 мкм.

Лінійні розміри часток визначали за допомогою молекулярної мікрометричної лінійки мікроскопа. При скануванні уздовж довільної лінії проводився підрахунок частинок кожної фракції. Далі визначалася частка частинок (у %), що потрапили в певний діапазон їх розмірів. Потім проводився перерахунок на масовий вміст (у %) для кожного діапазону розмірів.

Основна складність полягала у виділенні окремих частинок дійсно пилу від конгломератів, що утворилися при розчиненні фільтрів.

Результати вимірювань дисперсного складу пилу у вакуум-камерах агломащини № 5 наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Дисперсний склад пилу у вакуум-камерах агломащини № 5 [%]

№ кам.	Процентний вміст пилу за вказаними фракціями					
	Діаметр, мкм					
	<10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
5	0,51	3,2	10,4	20,49	35,7	29,8
6	0,8	4,1	10,4	24,71	31,91	28,08
7	0,7	4,1	11,3	19,71	39,41	24,78
8	0,42	3,9	8,3	20,01	36,9	30,47

Щільність розподілу маси частинок пилу за розміром у різних вакуум-камерах (№ 5 – № 8) агломащини №5 за розмірами наведено на рисунку 2.7.

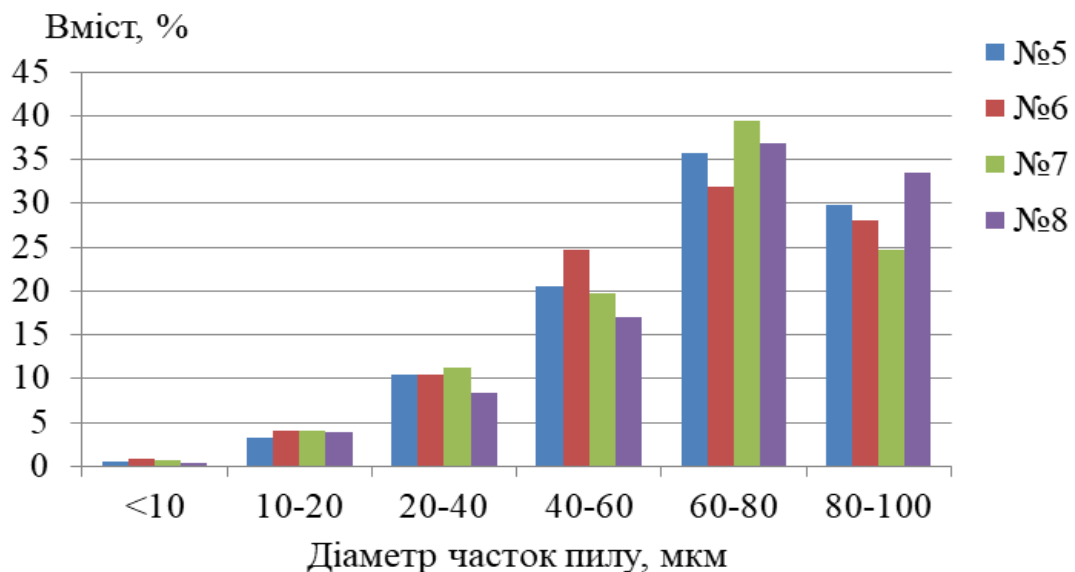


Рисунок 2.7 – Щільність розподілу пилу за розміром в вакуум-камерах агломащини № 5

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром в вакуум-камерах агломащини № 5 наведена на рисунку 2.8.

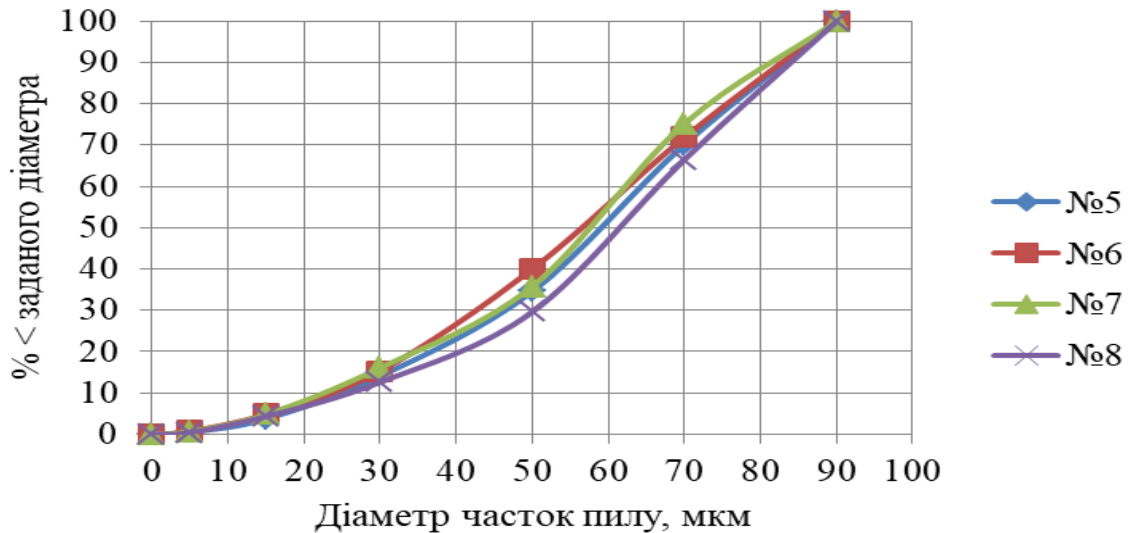


Рисунок 2.8 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром в вакуум-камерах агломашини №5

Як видно з наведених результатів дослідження дисперсного складу пилу, що надходить в газоходи агломашин через вакуум-камери, спочатку зі збільшенням ступеня спікання аглошихти (вакуум-камери № 5 – № 7) відбувається зменшення розмірів пилових частинок, що виносяться, а потім має місце деяке збільшення розмірів частинок пилу (вакуум-камера № 8). Виконані раніше дослідження запиленості газів в цих вакуум-камерах (таблиця 2.3) вказують на початкове зниження концентрації пилу, а потім на її збільшення. Збільшення розмірів пилових частинок ($D_{\text{ч}}$, мкм) поряд зі збільшенням запиленості газів по довжині агломашини створює високе пилове навантаження на системи пилоочистки газів (пилоосаджувальні камери, мультициклони), що негативно позначається на ефективності їх роботи. Середньомедіанні розміри частинок пилу в вакуум-камерах агломашини № 5 наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Середньомедіанні розміри частинок пилу в вакуум-камерах агломашини № 5

№ камери	5	6	7	8
d_m , мкм	59	56	57	62

Результати визначення дисперсного складу пилу в газоході агломашини № 2 перед мультициклоном наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Дисперсний склад пилу в аглогазах, вимірний в різних точках поперечного перетину газоходу перед мультициклоном агломашини № 2 [%]

№ отв	Відстань від стінки газоходу, м	Процентний вміст пилу за вказаними					
		Діаметр, мкм					
		<10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
1	0,6	0,24	1,71	7,43	24,9	30,7	35,02
	1,2	0,43	2,5	10,29	28,65	31,66	26,47
	1,8	0,3	2,59	12,8	23,35	35,29	25,67
2	0,6	0,46	2,4	5,8	16,58	38,8	35,96
	1,2	0,66	4,6	11,21	25,71	34,01	23,81
	1,8	0,48	4,69	13,69	27,38	30,28	23,48
3	0,6	0,65	2,8	6,7	18,38	32,48	38,99
	1,2	0,54	5,39	12,58	20,4	31,15	29,94
	1,8	0,7	6,2	10,96	22,9	30,39	28,85

Щільність розподілу маси пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 2 (отвір №1) наведено на рисунку 2.9.

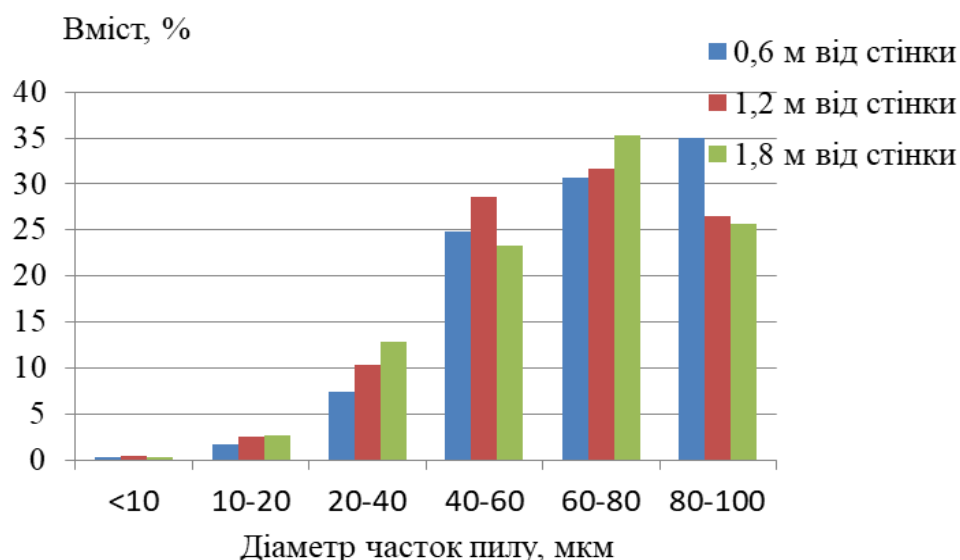
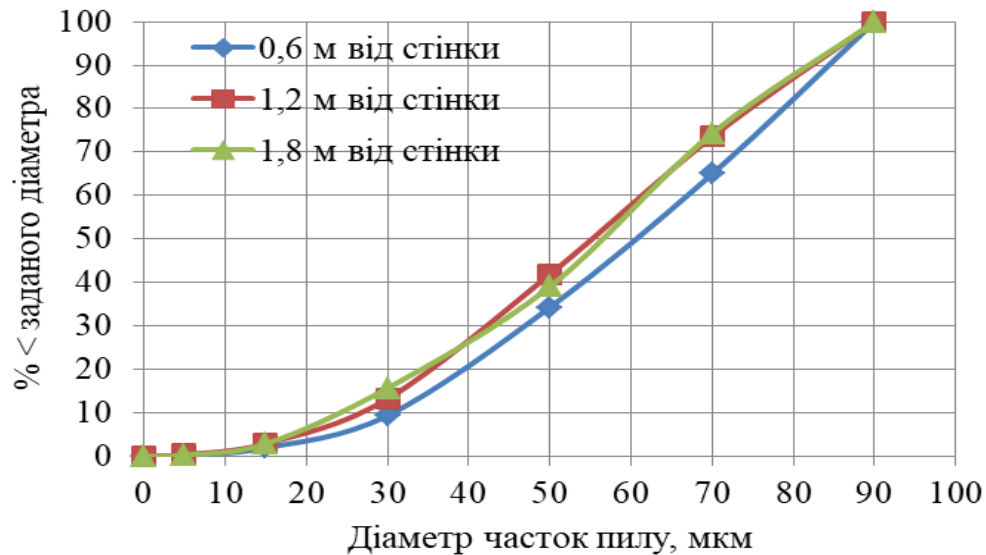


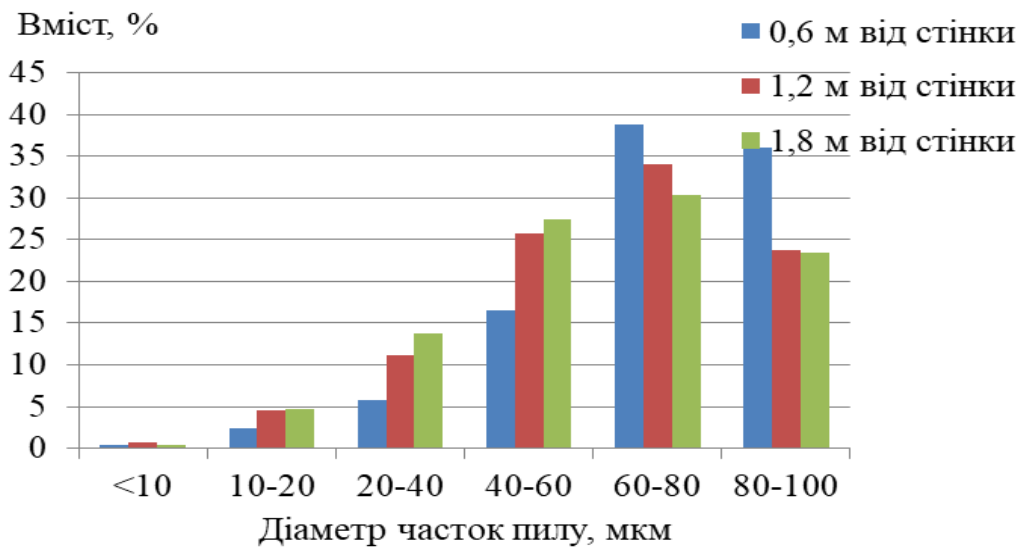
Рисунок 2.9 – Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 2 (отвір №1)

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 2 (отвір 1) наведена на рисунку 2.10.



Рисунки 2.10 та 2.11 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (1 отвір)

Щільність розподілу маси пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (отвір № 2) наведено на рисунку 2.11.



Рисунки 2.10 та 2.11 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (1 отвір)

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (отвір 2) наведена на рисунку 2.12.

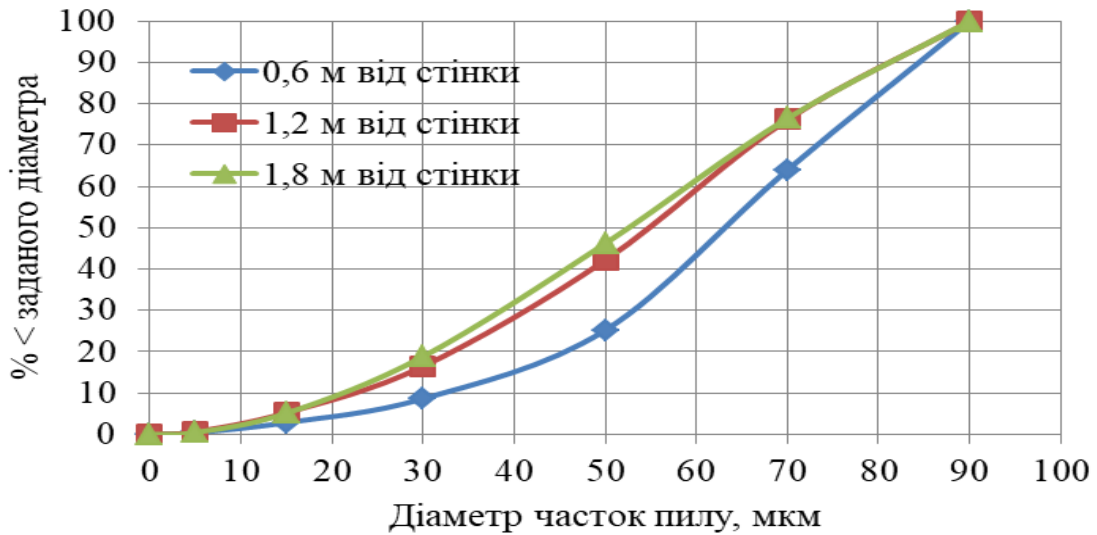


Рисунок 2.12 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (2 отвір)

Щільність розподілу маси пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (отвір № 3) наведено на рисунку 2.13.

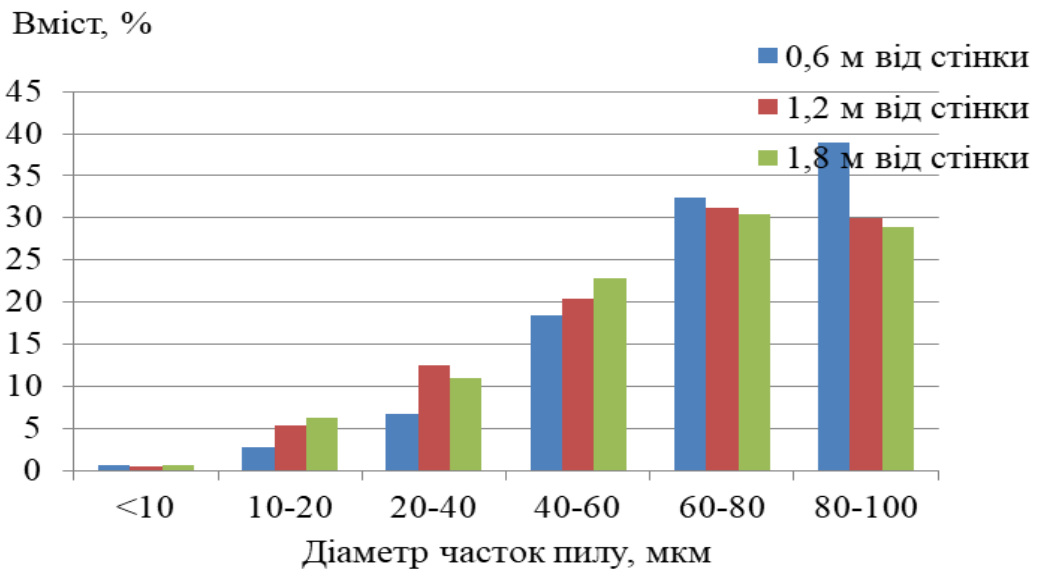


Рисунок 2.13 – Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (отвір № 3)

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (отвір 3) наведено на рисунку 2.14.

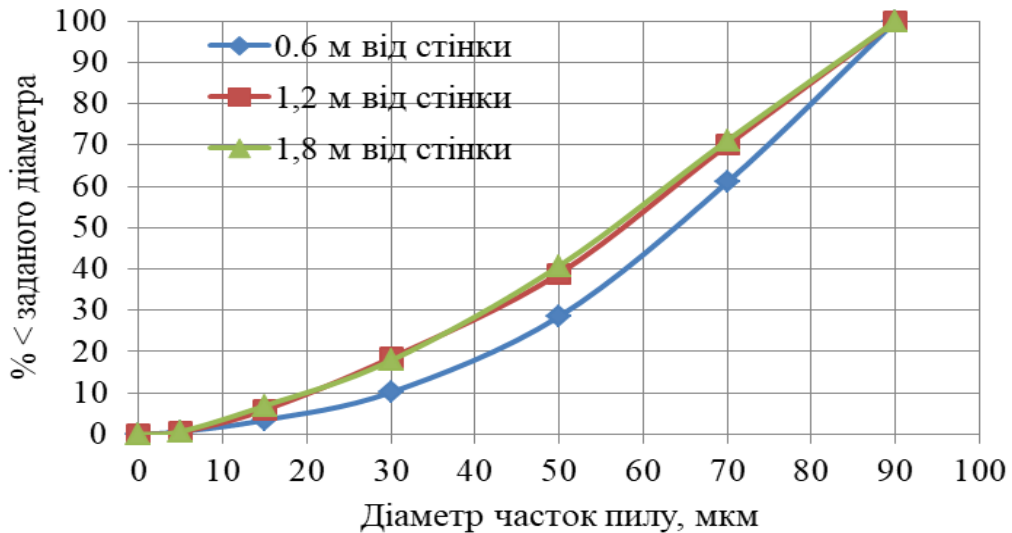


Рисунок 2.14 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 2 (3 отвір)

Середньомедіанні розміри часток пилу перед мультициклоном агломації № 2 наведені в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Середньомедіанні розміри часток пилу перед мультициклоном агломації № 2

№ отв.	1			2			3		
	0,6	1,2	1,8	0,6	1,2	1,8	0,6	1,2	1,8
Відстань від стінки газоходу, м									
d_m , мкм	61	55	56	64	55	52	64	58	57

Результати визначення дисперсного складу перед мультициклоном агломації № 5 наведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Дисперсний склад пилу в аглозагах, виміряний в різних точках поперечного перетину газоходу перед мультициклоном агломації № 5 (2 отвір) [%]

Відстань від стінки газоходу, м	Процентний вміст пилу за вказаними фракціями					
	Діаметр, мкм					
	<10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
0,6	0,7	5,45	9,65	15,37	36,6	32,23
1,2	0,45	4,19	12,18	21,37	32,15	29,66
1,8	0,49	4	12,52	22,03	32,53	28,43

Щільність розподілу маси пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 5 наведено на рисунку 2.15.

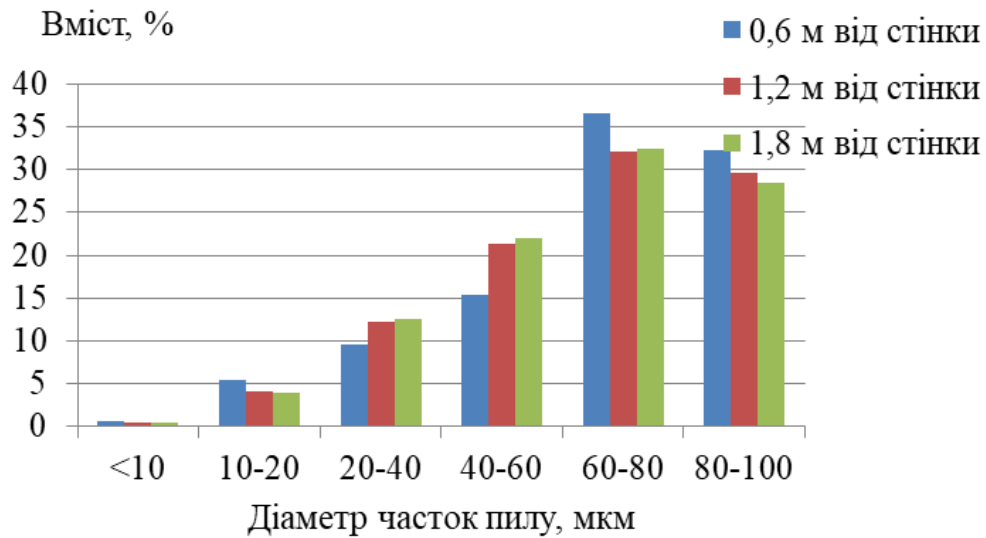


Рисунок 2.15 – Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 5

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 5 наведена на рисунку 2.16.

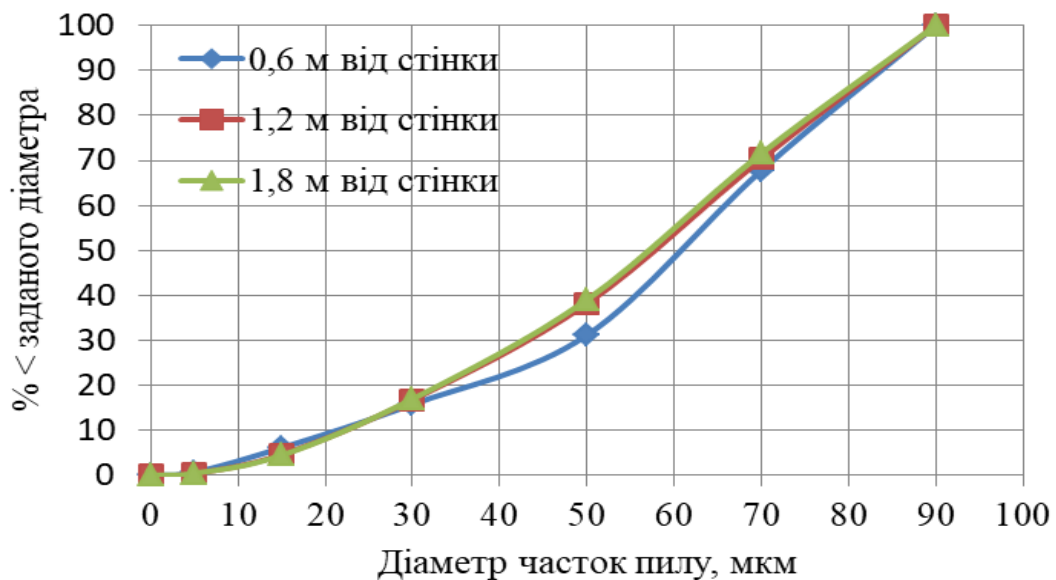


Рисунок 2.16 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломації № 5

Середньомедіанні розміри часток пилу перед мультициклоном агломації № 5 наведені в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Середньомедіанні розміри часток пилу перед мультициклоном агломації № 5

Відстань від стінки газоходу, м	0,6	1,2	1,8
d_m , мкм	61	58	57

Аналіз даних щодо визначення дисперсного складу пилу перед мультициклоном агломації № 2 показує, що значний чинник на формування пилогазового потоку на даній ділянці газоходу впливає конструкція газоходу. По-перше, наявність повороту пилогазового потоку на виході з колектора у обвідний газохід обумовлює інерційний рух пилових частинок до протилежної стінки обвідного газоходу (про цей факт свідчить також абразивний знос цих стінок пиловим потоком на агломаціях № 1–№ 4). Якщо більш дрібні частинки пилу «встигають» рівномірно розподілитися по перетину газового потоку за рахунок процесів турбулентної дифузії, то більші за розміром пилові частинки продовжують переміщатися в пилогазовому потоці в периферійних газових струменях. Аналіз результатів визначення дисперсного складу в різних точках перетину газоходу перед мультициклоном підтверджує цей факт. Як видно з таблиці 2.12, саме біля стінок газоходу на агломації № 2 на відстані 0,6 м на всіх трьох отворах середньомедіанний діаметр частинок пилу більше, ніж в інших точках перетину газоходу.

Наявність нерівномірного дисперсного складу пилу по перерізу газоходу на вході в мультициклон, безумовно, негативно позначається на ефективності пилоочищення в ньому, так як окремі секції мультициклона мають різне пилове навантаження.

Результати визначення дисперсного складу пилу після мультициклона наведено в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Дисперсний склад пилу в аглогазах, які викидається в атмосферне повітря [%]

№ агломашини	Процентний вміст пилу за вказаними фракціями					
	Діаметр, мкм					
	<10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
2	0,52	4,71	20,31	38,13	23,82	12,51
3	0,5	4,4	18,6	36	21,9	18,6

Щільність розподілу маси пилу за розміром в аглогазах, які викидаються в атмосферне повітря наведено на рисунку 2.17.

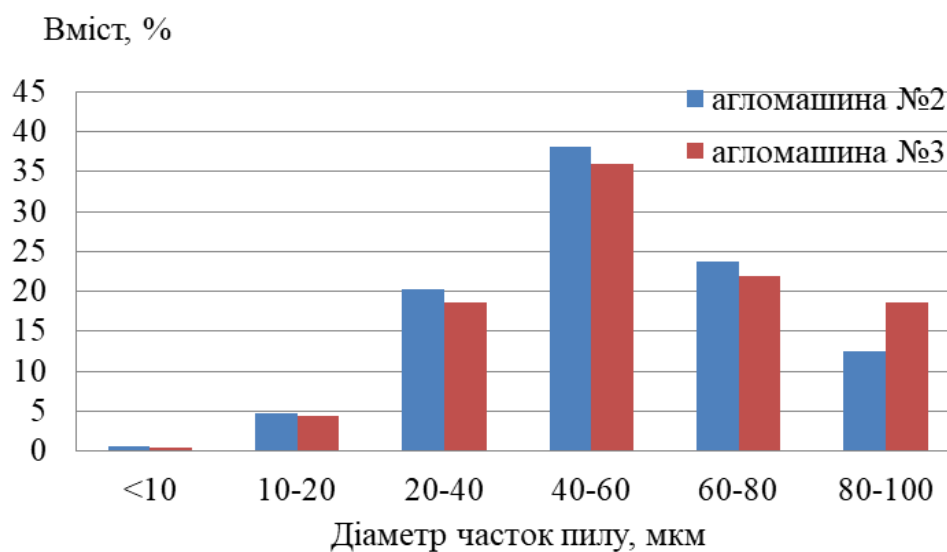


Рисунок 2.17 – Щільність розподілу пилу за розміром в аглогазах, які викидаються в атмосферне повітря

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром після мультициклона, тобто в аглогазах, які викидаються в атмосферне повітря наведена на рисунку 2.18.

Середньомедіанні розміри часток пилу після мультициклона наведені в таблиці 2.16.

Таблиця 2.16 – Середньомедіанні розміри часток пилу після мультициклона, що викидаються в атмосферне повітря

№ агломашини	2	3
d_m , мкм	42	44

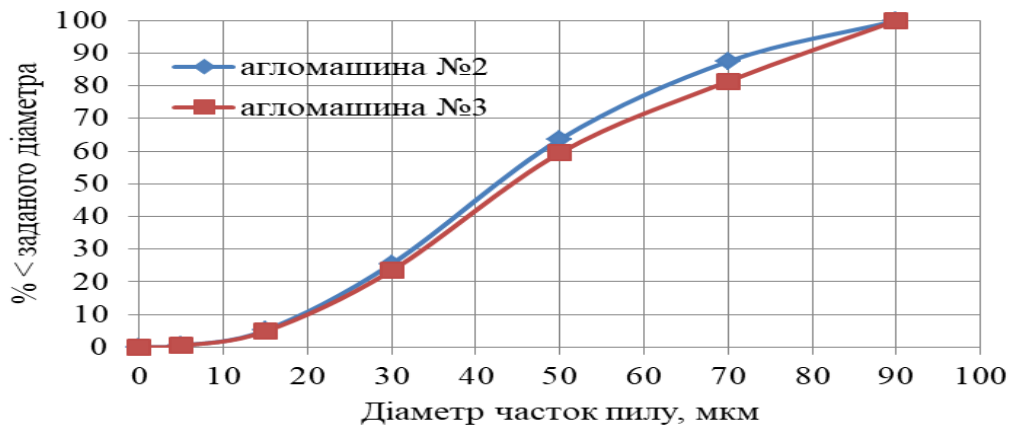


Рисунок 2.18 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром в аглогазах, які викидаються в атмосферне повітря

Аналіз даних з дослідження дисперсного складу перед мультициклоном на агломашині № 5, які наведені в таблиці 2.13 і на рисунках 2.15 – 2.16, показує, що фракційний склад пилу по всьому перетину на даній ділянці газоходу має практично однакове значення. Так середньомедіанний розмір часток на відстанях 0,6; 1,2; і 1,8 м становив, відповідно, величини 61, 58 і 57 мкм (табл. 2.14). Однорідність фракційного складу пилу по перерізу газоходу перед входом в батарейний циклон, безумовно, сприяє більш рівномірному навантаженню за пилоочисткою його окремих елементів і, як результат, більш ефективну його роботу. Окрім цього, слід відзначити той факт, що поряд з більш високою запиленістю газів на агломашині № 2 у порівнянні з агломашиною № 5 на ділянці газоходу перед мультициклоном має місце також велика крупність пилових частинок на агломашині № 2 ($d_m = 64$ мкм для агломашини № 2 і $d_m = 57$ мкм для агломашини № 5). Це, безумовно, позначається на більш низькій ефективності пилоочищення газів в мультициклоні агломашини № 2 і, як результат, більш швидкому зношуванню лопаток ротора ексгаустера. Наявність в аглогазах перед мультициклоном більш великих фракцій пилових частинок на агломашині № 2 в порівнянні з агломашиною № 5 обумовлено відмінністю конструкції газоходів. На агломашині № 2 аглогази із газозбірного колектору відбираються із його середини, тобто шлях руху аглогазів складає половину довжини колектору. На

агломащині № 5 аглогази із газозбірного колектору відбираються на початку колектору і шлях руху аглогазів від останньої вакуум-камери дорівнює довжині колектору. Тим самим на агломащині № 5 створюються умови для відділення із аглогазів пилових часток великих фракцій в пилові бункери, розміщені під газозбірним колектором.

На рисунку 2.19 наведені дані по дисперсному складі пилу перед мультициклоном і після нього на агломащині № 2.

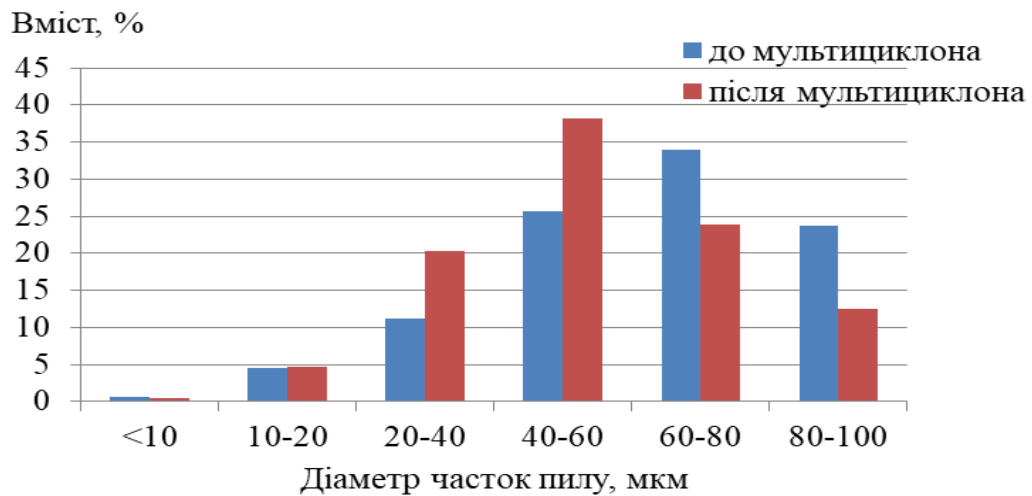


Рисунок 2.19 – Щільність розподілу пилу за розміром агломащини № 2

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром до та після мультициклона наведено на рисунку 2.20.

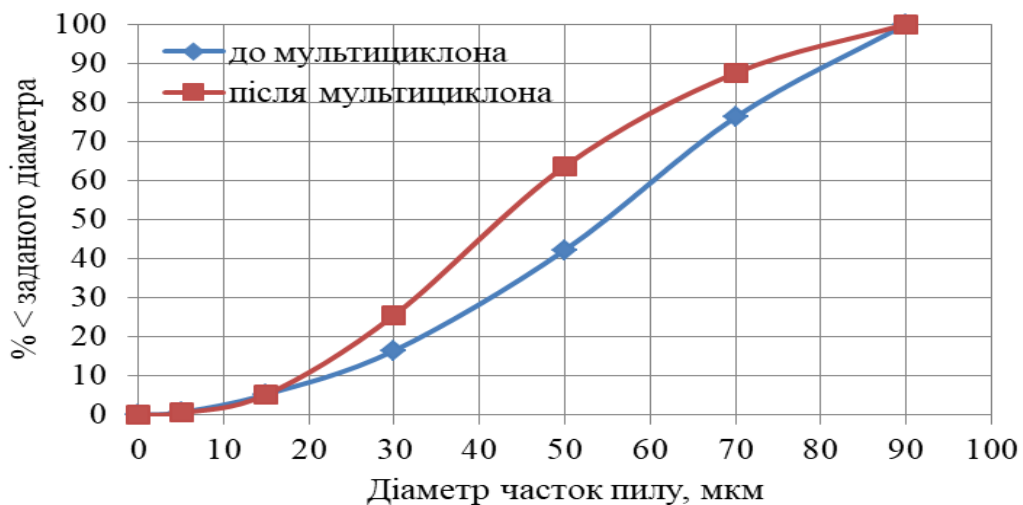


Рисунок 2.20 – Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром агломащини № 2

Зіставивши ці дані з даними про запиленість газів перед мультициклоном і після нього перед викидом в атмосферне повітря (таблиці 2.4 – 2.6), можна розрахувати ефективність вловлення окремих фракцій пилу в мультициклоні. Так, ефективність вловлення фракцій пилу менше 50 мкм становить 49 %, фракцій пилу з розміром частинок більше 50 мкм – 84 %. Досить низька (менше 50 %) ефективність вловлювання дрібних фракцій пилу в мультициклоні обумовлює інтенсивне надходження пилу в навколишнє середовище, тим самим ускладнюючи екологічний стан в зонах розміщення потужних металургійних комплексів. Зменшити викиди пилу в навколишнє середовище можливо як за рахунок застосування сучасних високоефективних засобів очищення аглогазів, так і за рахунок зменшення надходження пилу в аглогази шляхом удосконалення технологічних процесів одержання агломерату. Останній метод є більш перспективним, так як поряд із зменшенням забруднення атмосферного повітря покращується робота технологічних систем аглофабрики та підвищується якість одержаного агломерату.

Висновки до розділу 2

1. В даному розділі визначені характеристики поля швидкостей газового потоку в вакуум-камерах агломашини, в газоходах агломашин та перед входом в мультициклон. Встановлено, що конструкція газоходів певним чином впливає на поле швидкостей газового потоку перед входом в мультициклони. Показано, що параметри газового потоку на ділянці входу в мультициклон на агломашині № 5 більш сприятливі для пилоочистки газів в мультициклоні, ніж в агломашині № 2.

2. Виміряні концентрації пилу в вакуум-камерах, в газоходах агломашин перед входом в мультициклони та після мультициклонів. Встановлено, що запиленість газів на вході в мультициклон агломашини № 2 в 1,2 рази вище, ніж на тій же ділянці агломашини № 5. Це зумовлено недосконалістю

конструкції відвідного газоходу агломаши́ни №2. Показано, що ефективність пилоочистки газів в мультициклоні агломаши́ни № 2 становить 72 %.

3. Проведено дослідження дисперсного складу пилу на різних ділянках газоходів агломаши́н. Встановлено, що на фракційний склад пилу в вакуум-камерах значний вплив має швидкість газів через шар спікаємої аглошихти. Виявлено, що зі збільшенням швидкості газового потоку в вакуум-камерах збільшується розмір пилових часток, що виносяться з шару аглошихти.

4. Встановлено, що при загальній ефективності пилоочистки газів в мультициклоні агломаши́ни № 2 72 % ефективність пилоочистки фракцій менше 50 мкм складає 49 %, а фракцій більше 50 мкм – 84 %. Недостатня ступінь пилоочистки газів в мультициклоні, особливо пилу дрібних фракцій, зумовлена, в першу чергу, нерівномірністю поля швидкостей і запиленості газів за перерізом газоходу на вході в мультициклон за рахунок конструкції газоходів агломаши́ни на дільниці «колектор-мультициклон». Порівняно невисока ефективність уловлювання крупнодисперсного пилу в мультициклоні може бути однією з основних причин швидкого зношування лопаток роторів ексгаустерів на агломашинах з обвідним газоходом.

5. Розрахунки величин пилогазодинамічних параметрів за поперечним перерізом газоходів перед входом в мультициклони на агломашинах № 2 і № 5 показали високу нерівномірність газопилового навантаження. Особливо висока ступінь нерівномірності пилового навантаження спостерігалась на вході в мультициклон агломаши́ни № 2. Це зумовлено недосконалістю конструкції газоходів на даній агломашині.

6. Встановлено, що зменшити викиди пилу в навколишнє середовище можливо як за рахунок застосування сучасних засобів очищення аглогазів, так і за рахунок зменшення надходження пилу в аглогази шляхом удосконалення технологічних процесів одержання агломерату.

Основні положення розділу 2 опубліковані автором в наукових працях:
[1, 2, 84, 122, 123, 124, 141]

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ОБРОБКИ АГЛОСИХТИ

3.1 Обґрунтування застосування ПАР для обробки аглошихти

Як вказано в розділі 1.1, одним із потужних джерел запилення атмосферного повітря є агломераційне виробництво. Практично всі аглофабрики в Україні розміщені в великих індустріальних центрах, де сконцентрована велика кількість інших виробництв, які також вносять значний вклад в забруднення навколишнього середовища. Тому вирішення завдання зменшення викидів пилу на аглофабриках є необхідною умовою покращення загального екологічного стану (особливо атмосферного повітря) в цих містах та на прилеглих територіях.

Аналіз результатів чисельних досліджень [4, 109, 115, 119, 149], а також виконані вимірювання пилодинаміки аглогазів на аглофабриці ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [123] показує, що основним джерелом надходження пилу в аглогази є процеси спікання аглошихти. Причому, найбільш інтенсивне надходження пилу в аглогази спостерігається на початку стрічки спікання, яке обумовлено недостатнім ступенем грудкування дрібних фракцій аглошихти, в результаті чого вони легко виносяться із шару аглошихти і надходять в аглогази [152, 159, 162]. Надходження пилу в кінці стрічки спікання викликане недостатньою міцністю одержаного агломерату, утворенням при його ломанні значної частки дрібного агломерату, що завжди супроводжується значним пилоутворенням [65, 120, 128]. Тому вирішити завдання зменшення надходження пилу в аглогази можливо за рахунок покращення процесів грудкування аглошихти перед її надходженням на стрічку спікання та за рахунок збільшення міцності готового агломерату [154].

Процеси грудкування аглошихти пов'язані із застосуванням зрошувальної води. В загальному випадку грудкування аглошихти протікає в барабанах, які обертаються, за рахунок злипання змоченої аглошихти. Аглошихта складається із великої кількості компонентів (як правило, 12 і більше). Деякі компоненти є гідрофобними. Тому, під час, вони недостатньо змочуються водою, що обумовлює малоефективне грудкування аглошихти [51].

Більшість сучасних методів управління змочуванням дисперсних матеріалів засновано на застосуванні ПАР [45, 88, 93, 132]. Введення в водні розчини ПАР зменшує поверхневий натяг цих розчинів та крайовий кут змочування. Тим самим забезпечується краще змочування гідрофобних часток дисперсних матеріалів. Покращення процесів змочування усіх компонентів аглошихти забезпечить підвищення ступеню її грудкування.

Обробка сипучих матеріалів розчинами ПАР може здійснюватись як за допомогою зрошування, так і піною [138]. Застосування піни для обробки сипучих матеріалів має цілий ряд переваг перед обробкою розчинами ПАР за допомогою зрошування. По-перше, подача шару піни на поверхню сипучих матеріалів дозволяє зменшити неорганізовані викиди пилу за рахунок безпосередньої ізоляції джерела пилоутворення. По-друге, за рахунок більш тривалого часу (в декілька раз) взаємодії шару піни з пилом сипучих матеріалів змочуючі властивості розчинів ПАР, з яких одержується піна, використовуються в більш повній мірі в порівнянні із зрошенням диспергованими розчинами ПАР, так як на формування адсорбційного шару молекул ПАР на поверхні розділу фаз необхідно не менш 0,5 с, а крапельки розчину ПАР із форсунок зрошення до зони взаємодії з пилом долітають за час від 0,1 до 0,2 с. По-третє, сили адгезії частинок пилу із пухирьками піни завжди більші, чим з поверхнею відповідного розчину ПАР. Тому частки пилу інтенсивно переходять в рідку фазу піни, легко злипаються в агрегати [132]. Слід відмітити, що в результаті саморуйнування пухирьків піни та її взаємодії з поверхнею сипучого матеріалу відбувається поступове надходження

вивільного розчину ПАР в шар сипучого матеріалу. Тим самим процеси зв'язування часток пилу, утворення агрегатів пилових часток та злипання сипучого матеріалу протікає як під час взаємодії його з піною, так і при взаємодії з вивільненою із піни рідиною. При цьому, перспективним напрямком ефективного застосування піни для обробки сипучого матеріалу є забезпечення тривалого часу (до декількох хвилин) їх взаємодії в процесі переміщення та перевантаження сипучих матеріалів.

Для ефективного застосування піни необхідно вирішити низку наукових та практичних задач. По-перше, важливим завданням є вибір поверхнево-активних речовин, які є добрими піноутворювачами, мають хороші змочуючі властивості по відношенню до оброблюваних піною матеріалів, випускаються промисловістю України, є екологічно безпечними. Вирішення цього завдання вимагає визначення фізико-хімічних характеристик досліджуємих ПАР, випробовування їх піноутворюючих властивостей, лабораторних, стендових та промислових досліджень процесів обробки піною сипучих матеріалів, які спрямовані на визначення питомих витрат піноутворювачів на обробку сипучих матеріалів, оцінку ефективності процесів грудкування аглошихти та ступеню обезпилення аглогазів, визначення якості агломерату.

Необхідною умовою ефективного застосування піни для обробки сипучих матеріалів є визначення таких параметрів як оптимальні концентрації піноутворювачів в водних розчинах, кратність піни, її стійкість[123, 142, 144]. Одним із важливих параметрів пінного способу обезпилення є кратність піни [143]. Причому, для умов обробки сипучих матеріалів, які відрізняються значною полідисперсністю, найбільш оптимальною кратністю піни є її значення 150 – 200 [135, 137, 139].

3.2 Концепція вибору ПАР для знепилення викидів агломераційного виробництва

На сьогодні для боротьби з пилом все більше одержують розповсюдження поверхнево-активні речовини [51, 105, 125, 138]. Вони застосовуються при зрошенні сипучих мінеральних матеріалів, при зв'язуванні пилу, що осів на поверхні, при обробці масиву гірських порід рідиною під тиском, при застосуванні в вигляді піни. Головною особливістю ПАР є здатність адсорбувати на поверхнях поділу фаз, що знижує надлишок міжфазової поверхневої енергії, тим самим покращуючи змочення поверхні твердої фази, включаючи й поверхні гідрофобних речовин [44, 112]. Ця здатність обумовлена побудовою молекул ПАР, які складаються із двох частин, що відрізняються своїми властивостями: полярної групи з гідрофільними властивостями і неполярної з гідрофобними властивостями [11]. Така побудова молекул ПАР сприяє їх досить гарній розчинності в воді. Окрім цього, вони мають спорідненість до неполярних фаз. Тому ці речовини завжди поверхнево-активні на межі розділу «рідина – повітря», «рідина – тверде тіло». Адсорбція молекул ПАР на межі розділу фаз різко змінюють властивості поверхні [27, 148].

За адсорбційними властивостями, властивостями адсорбційних шарів, а також за поверхнево-активними властивостями усі ПАР поділяються на дві великі групи: дійсно розчинні та колоїдні [35].

До дійсно розчинних в воді відносяться ПАР, які мають недостатню гідрофільну групу (спирти, аміни), або недостатньо великий вуглеводневий радикал. Такі речовини мають недостатні змочуючі та піноутворюючі властивості. Колоїдні ПАР мають високу поверхневу активність. При досягненні деякої порогової концентрації вони утворюють у воді колоїдні агрегати – міцели [11]. Таку концентрацію назвали критичною концентрацією міцелоутворення (ККМ). Звичайно значення ККМ досить мале і становить від

0,001 до 0,01 моль/л. Колоїдні ПАР мають великі вуглеводневі радикали та сильно гідрофільні полярні групи. Такі ПАР мають високу змочуючу та піноутворюючу здатність [89].

За хімічними властивостями колоїдні ПАР розділяють на [88]:

- аніонактивні;
- катіонактивні;
- неіоногенні;
- амфотерні.

Аніонактивні ПАР утворюють в водному розчині аніони – негативно заряджені поверхнево-активні іони. Катіонактивні ПАР утворюють в водному розчині катіони – позитивно заряджені поверхнево-активні іони. Неіоногенні ПАР не дисоціюють у воді на іони. Амфотерні ПАР змінюють заряд поверхнево-активного іона в залежності від реакції середовища. Для боротьби з пилом на практиці, в основному, застосовуються ПАР, які відносяться до перших трьох груп.

Розглянемо основні аніонактивні ПАР [88].

«Прогрес» – суміш алкілсульфонатів вторинних спиртів:



де R – вуглеводневий радикал, що вміщує від 8 до 18 атомів вуглецю. Може застосовуватись як добавка до зрошувальної води для покращення змочування гідрофобного пилу (концентрація в воді – долі відсотків), а також як піноутворювач при його концентраціях в воді 1 % і більше. Біологічно розкладаємий.

«Сульфоноли» – це суміш натрієвих солей алкілбензосульфонатів:



Сульфонол НП-1 вміщує 12 атомів вуглецю, а сульфонол НП-3 – 9 атомів вуглецю. Застосовується як змочуючи та піноутворююча добавка.

«Сульфонат» – це суміш алкілсульфокислот з алкільними остатками. Вміщує 12 – 18 атомів вуглецю.

«Азолят А» – суміш натрієвих солей моно- і діалкілбензосульфокислот. За зовнішнім виглядом – це паста білого кольору з вмістом активної речовини від 44 % до 55 %, сульфату натрію від 10 % до 15 %, непросульфованих речовин – не більше 3 %. Застосовується як добавка до води для покращення її змочуючих властивостей. Реакція – слабо лужна [127].

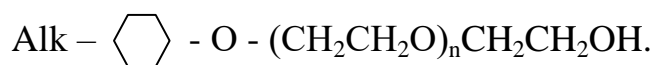
Піноутворювач ПО-1 – це суміш натрієвих солей сульфокислот. Має наступний склад:

- керосиновий контакт – 84 %;
- етиловий спирт – 11 %;
- кістковий клей – 4,5 %;
- сода каустична – до нейтралізації розчину.

ПО-1 добре розчиняється в воді, має також добрі піноутворюючі властивості.

«ДС-РАС» – суміш натрієвих солей алкіларілсульфокислот. Це густа паста від жовтого до світло-коричневого кольору, добре розчиняється в воді, є також хорошим піноутворювачем.

Серед неіоногенних ПАР можна виділити «Змочувач ДБ» – це продукт синтезу олефінів фенолу та окислу етилену. За хімічним складом – це суміш поліетиленглікольалкілфенілових ефірів. Алкільний залишок має розгалужений вуглеводневий ланцюг з числом вуглецевих атомів 4 – 5:



Змочувач ДБ добре розчиняється в воді будь-якої жорсткості. Розчини ДБ добре змочують поверхню гідрофобних матеріалів уже при концентраціях змочувача в соті долі відсотків. Із розчинів ДБ одержують піну, але вона відрізняється порівняно невисокою стійкістю [23].

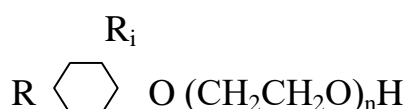
Змочувач ДБ широко застосовується в системах зрошувальних пилоподавляючих установок. Його застосування обумовлено здатністю знижувати поверхневий натяг води до значень нижче 30 мН/м при концентраціях 0,1 % і нижче. Окрім цього, він є найменш токсичною

речовиною серед ПАР, які застосовуються для боротьби з пилом. До недоліків ДБ слід віднести відносно невисоку піноутворюючу здатність. Так, виконані нами дослідження показали, що на існуючих типах піногенераторів із водних розчинів ДБ концентрацією в 1 % одержується піна кратністю 40 – 60, а стійкість такої піни складає не більше 4 – 5 хв. Подальше збільшення концентрації ДБ практично не впливає на піноутворюючі властивості. З метою покращення піноутворюючих властивостей розчинів ДБ нами було запропоновано введення в водні розчини ДБ гідролізованого поліакриламід (ПАА). Ця речовина являє собою водорозчинний лінійний полімер з молекулярною вагою 50000 і вище: $(-\text{CH}_2-\text{CH}-)_n$



ПАА одержують шляхом полімеризації мономеру акриламід. Полімер може вміщувати від 5 до 20 % молярних карбоксильних груп (-COOH). ПАА випускається промисловістю в вигляді гелю з концентрацією його в воді від 6 % до 25 %, або в вигляді гранул з вмістом ПАА від 40 % до 45 % [148].

«Змочувачі ОП-7 та ОП-10» одержують в результаті з'єднання молекул окислу етилену з моно- та діалкілфенолом:



де R і R_i – вуглеводневі залишки;

n – кількість молекул кислу етилену в загальній хімічній формулі речовини, n=7 – для ОП-7, n=10 – для ОП-10.

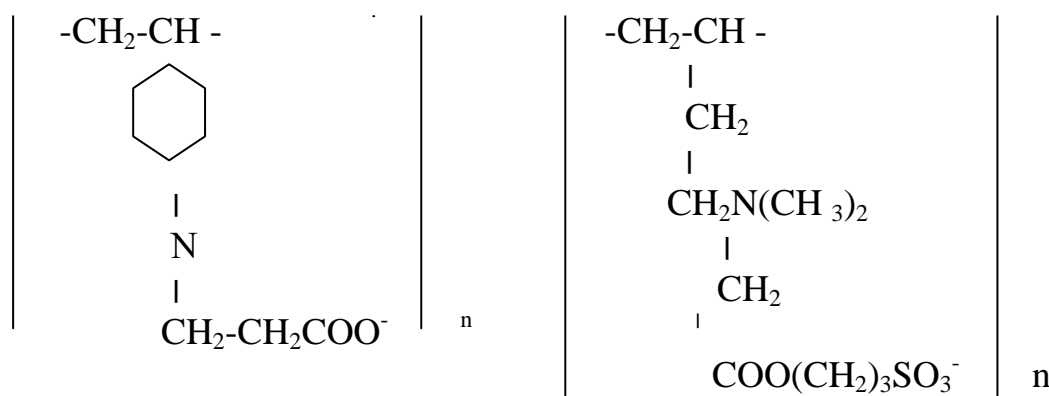
Змочувачі ОП-7 та ОП-10 мають вигляд пасти, яка розчиняється в воді при її підігріванні. Розчинність цих речовин не залежить від жорсткості води, вони нетоксичні.

Піноутворювач ТЕАС представляє собою водний розчин триетаноламінових солей алкілсульфатів первинних жирних спиртів фракції C₁₀-C₁₃ або суміші фракцій C₇-C₁₂ та C₁₀-C₁₃ в співвідношенні 1:1 із загальною

хімічною формулою $R-CH_2OSO_3N(C_2H_5)_3$. Піноутворювач ТЕАС являє собою концентровану рідину, що належить до біологічно розкладних піноутворювачів, малотоксичний, належить до 4 класу небезпеки, невибухонебезпечен, важкогорючий, температура самозаймання $430\text{ }^\circ\text{C}$.

До амфотерних ПАР відносяться:

- алкіламінокарбонові кислоти ($RNH(CH_2)_nCOOH$);
- алкіламіноалкансульфонати і сульфати ($AAAC_1 - RN(R')-R''-SO_3Me$ і $AAAC_2 - RN(R')-R'' - OSO_3Me$ відповідно);
- полімерні амфотерні ПАР – продукти ступінчастою конденсації амінів, формальдегіду, похідні целюлози. Наприклад,



У структурі молекул цих речовин можуть поєднуватися особливості інших амфотерних ПАР [88].

Порівняльна токсикологічна характеристика найрозповсюджених ПАР представлена в таблиці 3.1 [147].

Відмінними властивостями ПАР у водних розчинах є їх здатність адсорбуватися на поверхні розділу фаз [157, 160]. При зволоженні такими розчинами дисперсних матеріалів відбувається плівкова адсорбція молекул ПАР на поверхні розділу фаз. У адсорбційному шарі орієнтація молекул відбувається так, що гідрофільна група молекули знаходиться у водній фазі, а гідрофобна спрямована в бік твердої поверхні [35].

Таблиця 3.1 – Порівняльна токсикологічна характеристика деяких ПАР

№ з/п	Назва продукту	Основні параметри гострої токсичності, мг/кг			Клас токсичності по ЛД ₅₀ при введенні в шлунок, мг/кг
		ЛД ₀	ЛД ₅₀	ЛД ₁₀₀	
1.	Сульфенол НП-3	500	1000	2000	III
2.	Нейтралізований чорний контакт (НЧК)	1000	1500	2500	III
3.	Алкілсульфонат	750	1500	3000	III
4.	Змочувач НБ	750	1500	3000	III
5.	Сульфенол	500	1500	3000	III
6.	Змочувач ОП-7	1900	2210	2500	III
7.	«Прогрес»	1500	1800	3000	III
8.	ДС – РАС	3000	2300	4000	III
9.	ПО – 1	3500	5000	7000	IV
10.	ПО №1 (Агідель)	5800	6800	7600	IV
11.	ТЕАС	6000	9849	13000	IV
12.	ПО №2	7300	9500	12100	IV

де ЛД₀ – максимально переносима доза;

ЛД₅₀ – середня доза речовини, що викликає загибель половини членів досліджуємої групи;

ЛД₁₀₀ – середня доза речовини, що викликає загибель 100% членів досліджуємої групи.

Величина адсорбції відповідно до закону Гіббса визначається залежністю поверхневого натягу від концентрації ПАР в розчині [35]:

$$\Gamma = -\frac{C_n}{RT} \frac{d\sigma}{dC_n}, \quad (3.1)$$

де Γ – величина адсорбції, [моль/м²];

C_n – концентрація ПАР в розчині, [моль/м³];

R – універсальна газова стала, [Дж/моль·К];

T – температура, [К];

σ – поверхневий натяг, [Н/м].

З іншого боку, інтенсивність адсорбції в шарі товщиною δ можна представити у вигляді

$$\Gamma = (C_{adc} - C_p) \cdot \delta, \quad (3.2)$$

де C_{adc} – концентрація ПАР у адсорбційному шарі; C_p – концентрація ПАР в розчині.

З (3.1) і (3.2) випливає

$$\frac{C_{adc}}{C_p} = 1 - \frac{1}{\delta RT} \frac{d\sigma}{dC_p}. \quad (3.3)$$

Враховуючи, що товщина адсорбційного шару порівнянна з розмірами молекул і може становити 10^{-9} м, з (3.3) випливає, що співвідношення C_{adc}/C_p може досягати значень 10^4 , тобто концентрація ПАР у адсорбційному шарі в десятки тисяч разів вище, ніж у розчині [55, 156]. Швидкість насичення поверхневого шару молекулами ПАР залежить від будови речовини. Збільшення концентрації ПАР в розчині сприяє зниженню поверхневого натягу тільки до деякого значення концентрації. Подальше підвищення концентрації ПАР не призводить до зниження поверхневого натягу [43].

При вивченні електропровідності розчинів ПАР було встановлено, що у водних розчинах поряд з іонами і молекулами ПАР знаходяться великі заряджені агрегати – міцели [116]. Зміна структури розчинів, пов'язана з утворенням міцел, відбувається при досягненні певної концентрації, характерної для кожного виду ПАР. Міцели можуть містити від декількох десятків до декількох сотень молекул ПАР [31, 153].

Піноутворюючу здатність ПАР різних класів порівняти дуже складно. Це пояснюється різними умовами випробувань, при яких отримано характеристики різними авторами [23, 60, 127]. Найчастіше піноутворююча здатність розчинів ПАР визначається кратністю одержуваної в певних умовах піни

$$K = \frac{V_n}{V_p}, \quad (3.4)$$

де V_n , V_p – об'єм піни і розчину, з якого одержана піна.

Для розчинів, що містять незначну кількість піноутворюючої речовини, при якій практично не змінюється густина розчину, кратність піни визначається шляхом вимірювання об'єму піни і розчину, з якого вона отримана [148]. На значення кратності піни, отриманої за допомогою різних піногенераторів, істотно впливають умови відбору проби, їх конструкція, геометричні характеристики і тиск подачі розчину. Тому, відповідно до стандартних методик, визначення кратності піни проводять на спеціальному стенді, що включає наступні елементи:

- генератор піни середньої кратності;
- насос продуктивністю до 6 л/с при тиску 0,6 МПа;
- напірний рукав; всмоктуючий рукав;
- ємність для приготування розчину піноутворювача об'ємом не менше 200 л;
- ємність для збору піни обсягом не менш 100л; манометр з діапазоном вимірювань тиску 0-0,8 МПа.



Приготовлений розчин піноутворювача через всмоктувальний рукав насосом подають під тиском 0,6 МПа у напірний рукав, на виході з якого встановлений ГПС (генератор піни середньої кратності). Після заповнення ємності піни її кратність визначають за формулою (3.4).

У лабораторних умовах оцінки піноутворюючої здатності використовується метод Роса-Майлса, заснований на визначенні висоти стовпа піни в скляному циліндрі при виливанні в нього розчину ПАР [46, 118]. Піноутворююча здатність деяких ПАР, визначена за цим способом, представлена в таблиці 3.2.

При дослідженнях піноутворюючої здатності одних і тих же ПАР в залежності від концентрації було встановлено, що зі збільшенням концентрації піноутворення спочатку збільшується, а потім практично залишається постійною при збільшенні концентрації аж до межі розчинності [93, 116]. Зазвичай зміну піноутворюючої здатності зі зростанням концентрації

пов'язують з міцелоутворенням. При досягненні певної, характерної для даного ПАР, концентрації досягається максимальне піноутворення, після чого завершується формування адсорбційного шару і знижується швидкість дифузії молекул ПАР до поверхні розділу фаз [27].

Таблиця 3.2 – Піноутворююча здатність ПАР (метод Роса-Майлса)

Поверхнево-активна речовина	R	Концентрація ПАР, %	Висота стовбура піни, мм
R-CH ₂ -  -SO ₃ -Na	C ₇ H ₁₅ C ₉ H ₁₉ C ₁₁ H ₂₃	0,15	134 186 201
R-CH-  -SO ₃ -Na I CH ₃	C ₉ H ₁₉ C ₁₁ H ₂₃ C ₁₃ H ₂₇	0,15	162 210 174
R-SO ₃ Na	C ₁₂ H ₂₅ C ₁₄ H ₂₉ C ₁₅ H ₃₁	0,25	210 220 245
R-COONa	C ₁₀ H ₂₁ C ₁₂ H ₂₅ C ₁₄ H ₂₉	0,3	175 212 255
ТЕАС		0,3-1	350-500
ПЕГАС		0,3-1	230-380

Для практичного застосування піни важливе значення має її стійкість, тобто час існування обсягу піни або окремої бульбашки, а також вплив на стійкість температури і запиленості повітря. Стійкість піни залежить від поверхневого натягу, в'язкості і дисперсної структури піни [116]. Середній діаметр бульбашок залежить від типу ПАР, його концентрації в розчині, а також способу отримання піни. На початковій стадії існування піни середній розмір бульбашок може становити від 60 до 100 мкм. Надалі починається процес укрупнення бульбашок, зниження тиску усередині бульбашки, який можна розрахувати за формулою:

$$P_{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma}{r_{\sigma}}, \quad (3.5)$$

де r_{σ} – радіус бульбашки.

На відміну від рідин, піни є структурованими системами і мають деякі властивості твердих тіл, що проявляється в здатності піни зберігати якийсь час свою форму. Умова рівноваги піни може бути записана у вигляді [26]

$$P_{\sigma} - P_a = \frac{2}{3} \cdot \sigma \cdot S_{\text{пит}}, \quad (3.6)$$

де P_{σ} , P_a – тиск усередині бульбашки і зовнішній тиск;

$S_{\text{пит}}$ – питома поверхня розділу фаз у піні.

Модуль пружності піни визначається виразом:

$$\mu = \frac{2}{5} \cdot (P_{\sigma} - P_a). \quad (3.7)$$

Враховуючи, що тиск усередині бульбашки тим вище, чим менше діаметр бульбашки, можна зробити висновок про більшу поверхню розділу фаз і в'язкості дрібнодисперсної піни. З цього випливає, що міцність адгезійного шару дрібнодисперсної піни значно вище, ніж крупнодисперсної [79]. Вміст солей у розчинах ПАР, а також підвищення температури призводить до зниження в'язкості і стійкості піни. При незначних концентраціях ПАР у розчинах (від 0,1 % до 0,2 % за масою) розмір бульбашок в піні може становити 200 мкм і більше. При концентраціях ПАР в розчині від 1 % до 3 % стійкість і пружність піни істотно зростає. У міру старіння піни розміри бульбашок зростають, знижується пружність піни і поступово відбувається її руйнування і витікання з неї рідини. Між структурно-механічними властивостями піни, пружністю піни та інтенсивністю закінчення з неї рідини існує певне співвідношення, яке залежить від типу ПАР [147]. Високу в'язкість мають піни, отримані з розчинів насичених жирних кислот і спиртів. Для збільшення

стабільності піни в розчині можуть бути введені поліакриламід, карбоксиметил целюлози, полівініловий спирт та ін

Властивості піни, отриманої з піноутворювачів промислового значення, представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Властивості піни

ПОКАЗНИКИ	Марка піноутворювача загального значення			
	ПО-3АІ	ПО-3НП	ТЕАС	ПО-6ТС
Водневий показник концентрату (рН)	8,0-10,0	7,0-10,5	7,0-9,0	7,8-10,0
Температура застигання, °С	-3	-3	-6	-3
Густина при 20 ⁰ С, кг/м ³	1020-1080	1020-1100	1000-1200	1000-1200
Концентрація робочого розчину, % (об),	2	2	2	2
Стійкість піни середньої кратності, с (руйнування 50% об'єму піни)	600	750	750	720

Кратність піни, одержуваної в промислових умовах в залежності від типу ПАР і способу отримання піни може становити від 20 до 1000 одиниць [101].

В даний час ПАР широко використовуються в промисловості для боротьби з пилоутворенням при навантаженні-розвантаженні і транспортуванні дисперсних матеріалів. У агломераційному виробництві в шихтових матеріалах і в готовому агломераті внаслідок наявності дрібних фракцій мають місце значні втрати сировини з пилом [5]. Для боротьби з пилоутворенням застосовуються гідрозрошення і обробка піною. Для гідрозрошення використовують воду та розчини ПАР різних складів (табл. 3.4)

Не зважаючи на високу ефективність знепилення наведеними складами в порівнянні з водою, гідрозрошення характеризується значними витратами води. Виконані експериментальні дослідження знепилення методом низьконапірного гідрозрошення [26 ,83] показали, що ефективність пилопригнічення в значній мірі залежить від типу ПАР і його концентрації в розчині. Залежно від умов

обробки ефективність знепилення складала від 65 % до 90 % [135, 143]. Однак висока ступінь знепилення мала місце при високих витратах розчинів.

Таблиця 3.4 – Ефективність гідрозрошення при застосуванні розчинів ПАР

Найменування ПАР	Хім. формула	Концентрація в водному розчині, %	Ефективність знепилення, %
Полігліцериди	$R-CO(CH_2-CH-CH_2O)_n-R$ R- фракція синтетичних жирних кислот (C_6-C_{18}); $n=2-30$	0,0001 – 1,00	64-90
Поліетиленгліколієві ефіри ді-(три-бутил) фенолів(>токсичність)		0,0001 – 1,00	60-85
Вміст компонентів, %: Поліакріламід-(1-2) 10^{-4} Піноутворювач ДС-РАС-0,05-0,1 Вода - інше	Розчинення здійснювалось при підвищеній температурі	0,0001 – 1,00	55-70
Алкиламінобіспропіонат натрію	$RN=(CH_2-CH_2-COONa)_2$ R- алкільний радикал (C_6-C_{20}) Розчинення в воді при нормальній температурі	0,00005-0,20	85-95
ТЕАС	Розчинення в воді при нормальній температурі $R-CH_2OSO_3N(C_2H_5)_3$	0,001-0,20	70-95

У технологічних процесах виробництва агломерату значне перезволоження шихти негативно позначається на ефективності спікання аглошихти, а також може спричинити налипання її на стрічку конвеєра при транспортуванні [20]. Враховуючи, що найбільш висока запиленість має місце на ділянці труски і транспортування повернення агломерату конвеєром після барабана гасіння, знепилення гідрозрошенням не є ефективним через високу температуру дріб'язку агломерату (понад 150°C). Використовуючи метод обробки компонентів аглошихти в пінному режимі, можна усунути ці негативні ефекти [144].

Характер фізико-хімічних процесів, що відбуваються при взаємодії піни з дисперсними матеріалами, залежить від властивостей ПАР, кратності піни, а також від умов взаємодії твердих частинок з піною. У результаті плівкової

адсорбції молекул ПАР на поверхні твердих частинок на першій стадії відбувається взаємне злипання між твердими частинками і бульбашками піни [148]. У міру адсорбції молекул ПАР на твердій поверхні зменшується їх концентрація в плівці бульбашки, що згодом призводить до руйнування бульбашок піни. Швидкість руйнування бульбашок залежить від умов взаємодії піни і дисперсних матеріалів. Дослідження показали, що використання пінного методу знепилення дозволяє скоротити витрати розчинів ПАР на знепилення в 4 – 7 разів в порівнянні з методом гідрозрошення. Особливо висока ефективність (до 95 %) досягається при використанні ПАР з високою піноутворюючою здатністю і кратністю піни >150 [95].

Аналіз фізико-хімічних властивостей розглянутих вище ПАР та вимог до їх застосування для обезпилення інтенсивних джерел пилоутворення показує, що в найбільшій мірі для цих умов відповідає піноутворювач ТЕАС. Це обгрунтовано тим, що за допомогою даного піноутворювача можна одержувати піну кратністю не нижче 150, ТЕАС має достатню стійкість – 750 с, він належить до біологічно розкладних піноутворювачів, малотоксичний, відноситься до 4 класу небезпеки, невибухонебезпечен, важкогорючий і існує можливість його постачання підприємствами України. Перспективним напрямком є також застосування змочувача ДБ, але на даний час виробничих потужностей для його виробництва в Україні не існує.

3.3 Дослідження поверхневого натягу розчинів ПАР

Існує дві групи методів виміру поверхневого натягу речовин:

- динамічні методи засновані на тому, що поверхневий натяг – величина σ (Н/м, Дж/м²) – визначається по параметрах, що характеризує деякий процес, наприклад, довжину капілярних хвиль, що поширюються по поверхні рідини.

- статичні методи засновані на тому, що поверхневий натяг σ визначається по величині, характерної для даного стану [44].

Майже всі методи виміру поверхневого натягу засновані на використанні рівняння Лапласа [45, 88]:

$$P' - P'' = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3.8)$$

яке показує, що різниця гідростатичних тисків у суміжних фазах (P' і P'' - тиски газу й рідини) дорівнює добутку міжфазного поверхневого натягу на кривизну поверхні (R). Безпосередній вимір кривизни поверхні (R_1 й R_2) складний. Більш просте визначення поверхневого натягу σ для поверхонь, що представляють собою фігуру обертання навколо вертикальної осі. У цьому випадку $R_1 = R_2 = R$ і рівняння Лапласа має вигляд:

$$P' - P'' = \frac{2 \cdot \sigma}{R}. \quad (3.9)$$

Найбільш поширеними методами вимірів поверхневого натягу розчинів ПАР є [146]:

- метод найбільшого тиску бульбашки газу,
- метод нерухомої краплі,
- метод капілярного підняття,
- метод відриву кільця, пластинки або циліндра,
- метод рахунку крапель.

Широке застосування знайшов вимір поверхневого натягу методом найбільшого тиску газової бульбашки.

Вимір поверхневого натягу розчинів при збільшенні температури цим методом засновано на визначенні максимального тиску, який необхідний для продавлювання бульбашки газу через капіляр, опущений на певну глибину в досліджуваній розчин або для видавлювання краплі рідини [112].

Загальний тиск у міхурі газу (P) визначається співвідношенням:

$$P = g \cdot h \cdot (\rho_1 - \rho_2) + \frac{2 \cdot \sigma}{r}, \quad (3.10)$$

де ρ_1 ρ_2 – густина розчину й інертного газу відповідно,
 r – радіус капіляра, зануреного на висоту h у розчин.

Ця формула дає вірні результати тільки для капілярів досить малого діаметра.

Метод не залежить від крайового кута змочування, тому можна вибрати капіляр, для якого максимальний тиск відповідає формуванню бульбашки на зовнішньому зрізі капіляра, тобто можна не враховувати крайовий кут змочування [146].

Виходячи з цього, слід зауважити, що поверхневий натяг рідин, які змочують матеріал капіляра, доцільно вимірювати за допомогою товстостінних капілярів, а поверхневий натяг розчинів, що не змочують матеріал капіляра, вимірювати за допомогою капілярів мінімальної товщини.

При вимірі поверхневого натягу необхідно дуже точно визначати глибину занурення капіляра в розчин. У ряді випадків це зв'язано зі значною похибкою. Для усунення цього недоліку можна застосовувати трохи видозмінений варіант методу з використанням двох капілярів різного діаметра, занурених на однакову глибину (спосіб Сагдена) [148].

У цьому варіанті для розрахунку використовують формулу:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \left[(P_1 - P_2) / \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right], \quad (3.11)$$

де r_1 і r_2 – ефективні радіуси капілярів,

P_1 і P_2 – максимальні тиски в газових бульбашках.

Метод, що враховує максимальний тиск в газовій бульбашці, дозволяє визначити поверхневий натяг с точністю від 2 % до 10 % [27].

Вимір поверхневого натягу методом нерухомої краплі є самим точним. Форма краплі розчину, що розташована на твердій підкладці, яка не змочується

або змочується погано, залежить від поверхневого натягу, різниці густини рідкої фази та газової, прискорення вільного падіння й кількості фази, що утворює краплю [60].

Початок координат, звичайно, вибирають співпадаючої з вершиною краплі, або відповідному нульовому гідростатичному тиску.

Для визначення поверхневого натягу краплю фотографують і на знімку вимірюють висоту та радіус. Один з найнадійніших способів розрахунку оснований на використанні таблиць Башфорта й Адамса. У цих таблицях наведені теоретичні форми крапель із точністю до п'ятого знака [93].

Існують інші способи обмірювання краплі, наприклад спосіб Дорсея, у якому знову ж використовуються таблиці Башфорта й Адамса.

Існує метод визначення поверхневого натягу (σ) за формулою, де всі параметри також визначають за таблицями Башфорта й Адамса. Метод нерухомої краплі вважається одним із самих надійних способів визначення поверхневого натягу при збільшенні температури, його точність за даними різних дослідників перебуває в межах від 0,5 % до 3 % [44].

Метод капілярного підняття застосовується, якщо відомий крайовий кут змочування розчину ПАР θ .

З рівняння Лапласа видно, що має місце перепад тиску, обумовлений кривизною поверхні. Якщо на плоскій поверхні рідини є скривлена ділянка, то додатково створюється тиск, що виштовхує, спрямований нагору – якщо меніск ввігнутий, і тиск, спрямований униз – якщо меніск опуклий [112].

Це різниця тисків під меніском і на плоскій поверхні врівноважується підйомом або опусканням рідини в капілярі.

У найпростішому випадку передбачається, що меніск має форму сфери, а об'єм рідини вище рівня h , тобто висотою x зневажаємо. На основі рівняння Лапласа для цього випадку можна написати:

$$\sigma = \frac{g \cdot h \cdot \rho \cdot r}{2 \cdot \cos \theta}, \quad (3.12)$$

де $g = 9,8$ [м/с²];

h – висота рідини в капілярі, [м];

ρ – густина рідини, [кг/м³];

r – радіус капіляра, [м];

θ – крайовий кут змочування, [град].

Метод капілярного підняття забезпечує точність виміру поверхневого натягу від 0,3 % до 1,0 % [112].

Метод відриву кільця або пластинки заснований на вимірі сили відриву від поверхні розчину ПАР.

У цьому методі кільце, виготовлене з матеріалу, не взаємодіючого з рідиною горизонтально занурюють у рідину й потім повільно піднімають. Силу відриву реєструють різними способами, наприклад, з використанням тензодатчиків [45].

На кільце діють поверхнево-капілярні сили, вони збільшуються аж до моменту відриву.

Якщо $R \approx r$, то для сили в момент відриву:

$$F = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma. \quad (3.13)$$

Однак $R > r$, крім того, у момент відриву деяка кількість рідини у вигляді крапель може залишитися на поверхні кільця. Для обліку цих ефектів у розрахункову формулу вводять поправочний коефіцієнт f , виражений у вигляді функції від безрозмірних параметрів R/r й R^3/V . V - об'єм рідини, що піднімається з менісками вище плоского рівня рідини й визначається з формули:

$$F = V \cdot \rho \cdot g. \quad (3.14)$$

Поверхневий натяг розраховують зі співвідношення:

$$\sigma = (F/4 \cdot \pi \cdot R \cdot r) \cdot [f \cdot (R/r) \cdot (R^3/V)]. \quad (3.15)$$

Метод відриву циліндра також заснований на вимірюванні сили відриву. Передбачається, що вертикальні стінки циліндра не змочуються під час експерименту [45].

Сила F дорівнює силі ваги рідини, що піднімається вище горизонтальної поверхні розчину.

Зусилля відриву може бути визначено за допомогою різних методів. Метод відриву кільця або пластинки дає можливість визначати поверхневий натяг с точністю від 3 % до 5 % [60, 127].

Метод рахунку крапель – один з найбільш поширених методів визначення поверхневого натягу рідин – полягає у вимірюванні ваги або визначенні числа крапель, які утворюються при витіканні з деякого обсягу рідини і повільно відриваються з носика сталагмометра. Незважаючи на поширеність цього методу, його теорія до цього часу не розроблена і його використання ґрунтується на емпіричних даних [93].

Метод полягає у тому, що вага краплі, яка падає під дією сили тяжіння з носика сталагмометра, буде тим більше, чим більше поверхневий натяг рідини.

Вага однієї краплі P_g , що витікає з об'єму V_{cm} , який містить N крапель при густині рідини ρ_k і прискоренні сили тяжіння g , буде дорівнювати:

$$P_g = \frac{V_{cm} \cdot \rho_k \cdot g}{N}. \quad (3.16)$$

З іншого боку, вага краплі, що відривається, пропорційна силі поверхневого натягу σ , що утримує краплю на кінці капіляра радіусом r_l :

$$P_g = 2 \cdot \pi \cdot r_l \cdot \sigma. \quad (3.17)$$

Ця залежність справедлива, коли крапля відривається по внутрішньому діаметру трубки $2r_l$, що практично неможливо. Тому у формулу вводять коефіцієнт $f(r_l/v_k^{1/3})$, що є функцією радіуса капіляра r_l і об'єму краплі:

$$P_g = 2 \cdot \pi \cdot r_l \cdot \sigma \cdot f(r_l/v_k^{1/3}). \quad (3.18)$$

Отже,

$$\sigma = \frac{V_{cm} \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \cdot \frac{1}{f\left(\frac{r_1}{v_k^{1/3}}\right)} \cdot \frac{\rho_k}{N}. \quad (3.19)$$

Вираз $\left[\frac{V_{cm} \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \cdot \frac{1}{f\left(\frac{r_1}{v_k^{1/3}}\right)} \right]$ є постійним для даного сталагмометра (A_c^i).

Тоді

$$\sigma = A_c \cdot \frac{\rho_k}{N}. \quad (3.20)$$

Завдяки доступності і простоті апаратури, а також простоті визначення значень поверхневого натягу метод рахунку крапель знайшов широке поширення і для визначення σ розчинів ПАР [147]. Однак використання цього методу в класичному варіанті, коли рахунок крапель проводиться людиною візуально при визначенні динамічного поверхневого натягу, неможливо.

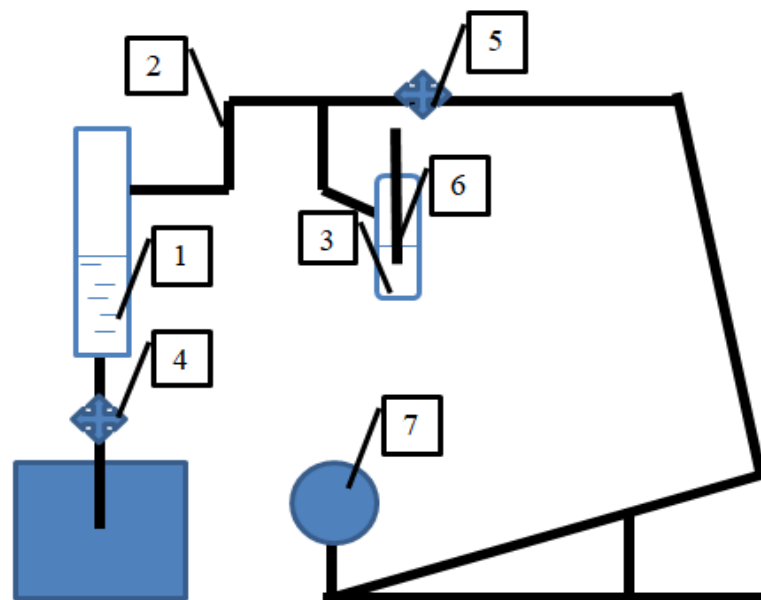
В роботі [80] було запропоновано пристрій для автоматичного рахунку крапель, виконаний у вигляді врівноваженого важеля, одне плече якого має баланс, а друге - майданчик для прийому крапель і платиновий контакт на кінці, здатний поринати в чашечку зі ртуттю при ударі краплі й замикати електричний ланцюг лічильника імпульсів. Цей пристрій інерційний і не може бути застосований при вимірі $\sigma_{дин}$ рідини, де потрібна реєстрація швидко падаючих крапель (5 – 10 крапель/с).

У пристрої, запропонованому С.А. Нікітіной та А.Б. Таубманом [80], краплі при падінні перетинають потік світла від освітлювача, чим знижують освітленість фотоопору. Виникаючі імпульси фотоструму в ланцюзі, впливаючи на реле, замикають і розмикають ланцюг електромагнітного лічильника. Пристрій є складним і інерційним через характеристики фотоопорів (ФСК-1) та електромагнітного реле.

Існує ще ціла низка методів визначення поверхневого натягу, наприклад, метод висячої краплі, метод нерухомої краплі та інші. Але ці методи, в основному, застосовуються при визначенні поверхневого натягу розплавів металів, тому для дослідження розчинів ПАР вони не можуть бути застосовані [23, 43].

В дисертаційній роботі для визначення поверхневого натягу використовується метод найбільшого тиску бульбашки газу.

Дослідження проводили за допомогою приладу Ребіндера (рисунок 3.1).



- 1 – розподільна лійка; 2 – трубка; 3 – пробірка; 4 – кран;
5 – кран; 6 – трубка з капілярним кінчиком; 7 – манометр.

Рисунок 3.1 – Прилад для визначення поверхневого натягу

Основною частиною цього приладу є трубка з капілярним кінчиком 6, яка занурена у пробірку 3. Під час роботи приладу в пробірці над рівнем рідини за допомогою розподільної лійки (аспіратора) 1 створюється розрідження (за рахунок витікання води). Над трубкою 6 тиск буде атмосферним, а в пробірці 3 створюється розрідження. Найбільша різниця тиску забезпечує відрив бульбочки газу, що буде утворюватись на кінці капіляру.

Поверхневий натяг σ залежить від максимального тиску газу P у момент відриву бульбочки від капіляра:

$$\sigma = k \cdot P, \quad (3.21)$$

де k – стала приладу.

Стала k визначається експериментальним шляхом за тиском бульбочки газу у стандартній рідині з постійним значенням σ при певній температурі. Для водних розчинів в якості стандартної рідини використовують воду, значення поверхневого натягу води в залежності від температури наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Залежність поверхневого натягу води від температури

t, °C	10	15	20	25	30
σ , мДж/м ²	74,22	73,49	72,75	71,97	71,18

Для стандартної рідини:

$$\sigma_0 = k \cdot P_0, \quad (3.22)$$

звідки:

$$k = \sigma_0 / P_0. \quad (3.23)$$

Тоді:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot P / P_0. \quad (3.24)$$

Тиск P в системі вимірюють за допомогою похилого манометра 7, у якого один кінець контактує з атмосферою, а інший – з вакуумною системою. Краном 4 регулюють розрідження таким чином, щоб було зручно рахувати бульбочки газу, які проскакують через капіляр.

Щоб підготувати установку до роботи розподільну лійку 1 (рис. 3.1) заповняли водою таким чином, щоб вода не потрапила до трубки 2. Дистильовану воду заливали у пробірку 3 до позначки, кінчик капіляра при

цьому повинен контактувати з поверхнею, відкривали кран 4 і встановлювали з його допомогою швидкість проскоку бульбашок повітря з інтервалом 3 – 5 секунд. Середнє значення максимального рівня рідини фіксували в манометрі 7. Таким же чином вимірювали максимальний рівень розчинів поверхнево-активної речовини і за допомогою формул обчислювали значення поверхневого натягу аналізованих розчинів при різних концентраціях ПАР.

Як вказувалось вище, для досліджень в даній роботі була обрана аніоноактивна ПАР ТЕАС [140].

Відповідно до технічних умов піноутворювач ТЕАС має наступні фізико-хімічні показники:

- зовнішній вигляд – рідина жовто-коричневого кольору;
- водневий показник 1 %-ного розчину (рН) – 7-9;
- густина, [кг/м³] – 1000-1200;
- масова частка триетаноламінових солей алкілсульфатів, [%] – 22 – 27;
- кінематична в'язкість, [м²/с] – $0,4 \cdot 10^{-4}$;
- температура замерзання, [°С] – мінус 8;
- стійкість піни 2 %-ного розчину, [с] – 240;
- показник змочуючої здатності 2 %-ного розчину, [с] – 8 [88].

Визначення поверхневого натягу здійснювалось на розчинах ПАР, що готувались на дистильованій, водопровідній та морській воді (використовувалася вода, відібрана з акваторії Азовського моря). Вибір для дослідження в якості розчинника морської води пояснюється можливим застосуванням засобу обробки агломераційної шихти розчинами ПАР для металургійних комбінатів м. Маріуполь: ММК імені Ілліча та «Азовсталь», де в деяких технологічних процесах агломераційного виробництва використовується саме морська вода замість водопровідної.

Солоність води Азовського моря складає приблизно 1,2 % [172], склад солей у воді наступний: хлориди – 88,7 %, сульфати – 10,8 %, карбонати – 0,3 %, сполуки азоту, фосфору, кремнію – 0,2 % [173].

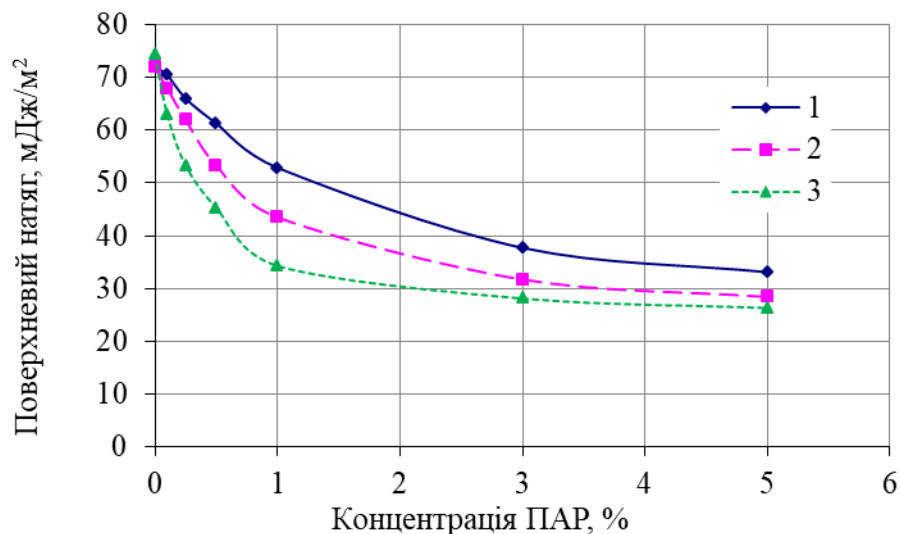
Зазначена характеристика визначалися як на чистій воді, так і на розчинах ПАР. Концентрації ПАР у воді (за масою) становили від 0,1 % до 5 %. Дані вимірювання поверхневого натягу [мДж/м²] наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Залежність величини поверхневого натягу [мДж/м²] від концентрації ПАР у розчинах (%)

Вид води	Величина поверхневого натягу (мДж/м ²) при концентраціях ПАР в водних розчинах (%)						
	0	0,1	0,25	0,5	1	3	5
1	72	70,43	66,03	61,3	52,9	37,7	33,1
2	71,9	67,88	61,93	53,3	43,5	31,7	28,4
3	74,4	62,93	53,3	45,3	34,3	28,1	26,3

Примітка. 1 – дистильована; 2 – водопровідна; 3 – морська.

Залежність поверхневого натягу від концентрації ПАР у розчинах наведено на рисунку 3.2.



1 – дистильована; 2 – водопровідна; 3 – морська.

Рисунок 3.2 – Залежність поверхневого натягу від концентрації ПАР у розчинах

З наведених даних видно, що за допомогою введення навіть незначної кількості поверхнево-активної речовини (від 0,5 % до 2 % за масою) можна знизити поверхневий натяг з 72 до 30 мДж/м², що сприяє поліпшенню змочування пилу.

Було встановлено, що для розчинів ТЕАС зменшення поверхневого натягу в 2 рази в дистильованій воді спостерігалось при концентрації ПАР у водному розчині близько 3,5 %, у водопровідній – при концентрації 2 %, а в морській воді – при концентрації 1 %.

Як видно з рисунку 3.2 (крива 3), в розчинах, приготовлених на морській воді найнижчі значення поверхневого натягу досягаються при менших концентраціях ПАР. По-перше, як зазначено в роботі [7], наявність солей в малих концентраціях знижує поверхневий натяг води. Також можна припустити, що це пов'язано з хімічної природою ТЕАС ($R-CH_2OSO_3N(C_2H_5)_3$), де $R = C_{11} - C_{17}$). Відомо, що рН морської води рахунок утворення карбонатної буферної системи коливається в інтервалі 7.5 – 8.4, тобто середовище слаболужне. У роботі [101] розглянуто вплив концентрації гідроксиду натрію на поверхнево-активні властивості поліелектроліту лігносульфонату натрію, та зроблено висновок про посилення полярності його сульфогруп. До складу молекули ТЕАС також входить сульфогрупа, і логічно припустити, що при зміщенні рН в лужну область її полярність і, як наслідок, поверхнева активність всієї молекули також посилюється. Це, зокрема, підтверджується тим, що поверхнева активність ТЕАС при переході від дистильованої води до морської, збільшується в 3,8 разів. Таким чином, імовірно, у морській воді створюються умови для більш щільного заповнення поверхні мономолекулярним шаром ПАР порівняно з водопровідною та дистильованою водою [158, 163].

Як видно з наведених на рисунку 3.2 досліджень, подальше збільшення концентрації цих розчинів ПАР не призводить до значного зменшення поверхневого натягу. Це свідчить про те, що при вказаних концентраціях ТЕАС відбувається практично повне насичення адсорбційних шарів молекул цим ПАР на межі розділу «рідина-газ».

Нами були також виконані дослідження поверхневого натягу водних розчинів змочувача ДБ з добавками поліакриламідом (ПАА). Результати досліджень приведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Поверхневий натяг водних розчинів змочувача ДБ з добавками ПАА, [мДж/м²]

Концентрація ПАА, %	Концентрація ДБ, %							
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
0	65,14	57,52	43,63	33,75	29,59	28,95	28,80	28,90
0,05	-	-	43,60	34,10	29,75	28,92	28,60	29,40
0,20	-	-	43,00	29,10	28,80	29,20	28,80	28,80

Як видно із наведених в таблиці даних добавка ПАА в водні розчини ДБ практично не впливає на їх поверхневий натяг. Разом з тим, випробування розчинів композицій ДБ+ПАА концентрацією його від 0,1 % до 0,2 % в воді дозволяє одержувати піну на існуючих типах ежекційних піногенераторів кратністю 150 – 200, а на вентиляторних – 600 – 1000. При цьому стійкість піни підвищується до 10 – 14 хв.

3.4 Оцінка змочуючих властивостей розчинів ПАР

Одним із основних параметрів розчинів ПАР є крайовий кут змочування, який впливає на змочування твердих матеріалів. Методика вимірювання крайового кута змочування (θ) полягає в наступному: на свіжу, очищену від домішок поверхню твердого тіла наносять краплю досліджуваної рідини; крапля проектується на екран, потім її контур або окреслюється, або фотографується. До отриманого контуру краплі проводять дотичну у точці перетину трьох фаз. Кут між дотичною і твердою поверхнею, спрямований у бік рідини, вимірюють транспортиром. Вимірювання проводять кілька разів і беруть середнє значення [105].

До недоліків методу слід віднести складність отримання чистих (неокислених) поверхонь, неможливість визначення впливу форми та розмірів частинок на зміну змочуваності останніх, неможливість вимірювань в динамічних умовах і низьку точність при невеликих і дуже великих кутах θ [147].

Один з найбільш поширених методів визначення змочуваності порошків водними розчинами поверхнево-активних речовин – плівкова флотація. На поверхню досліджуваної рідини висівається пил, визначається час від початку розсіву пилу на поверхню розчину до його повного осідання в рідині або в разі поганої змочуваності до умовно прийнятого рівня. Цей час і приймається за критерій оцінки ефективності змочувача [146].

Метод плівкової флотації був розроблений для оцінки процесів збагачення вугілля. Він добре відображає сутність явищ, що протікають в реальних умовах, коли кількість рідини в декілька разів перевершує кількість оброблюваної твердої речовини і час контакту рідкої та твердої фази досить тривалий. Хоча цей метод постійно вдосконалюється, в основному в напрямку рівномірного і швидкого нанесення певної кількості досліджуваного пилу [51, 132] та визначення замість часу осідання швидкості занурення пилу в розчин [мг/с], для оцінки розчинів ПАР, що використовуються при зрошенні, він є не зовсім доречним. Так як висівання пилу здійснюється на поверхню рідини, адсорбційний шар якої вже сформований і досяг рівноважного стану, співвідношення твердої і рідкої фази не відповідає умовам, які мають місце при зрошенні.

Аналогічні недоліки, що не дозволяють правильно оцінити роботу змочувачів в динамічних умовах, має і метод просочування порошків [105], що полягає у визначенні або кількості рідини, що всмоктується порошком, або у визначенні часу, необхідного для просочення певного шару пилу. Крім того, в цьому методі крім явищ змочування на результатах поглинання рідини порошкоподібною речовиною позначається вплив капілярних сил [148].

Цікавий і досить точний метод, що заснований на визначенні теплоти змочування [39], але, так як мінімальний час, необхідний для зняття перших показників, становить близько 1 хв, він, ймовірно, буде перспективний для оцінки дії ПАР, що використовуються при попередньому зволоженні масиву,

коли час контакту рідини з твердою поверхнею досить великий, і непридатний для оцінки ПАР, що використовуються при зрошенні.

У вищій технічній школі у Вроцлаві [105] розроблено новий прилад для оцінки змочуючої здатності ПАР. Принцип роботи приладу полягає в подачі спрямованого струменю запиленого повітря до поверхні досліджуваного розчину і визначенні кількості пилу, що прилип до рідини, по зміні початкової запиленості повітря. До недоліків методу слід віднести неконтрольованість часу настання адсорбційної рівноваги на межі рідина-газ, неможливість визначення впливу тривалості контакту рідини з пиловою часткою на процес змочування, а також невідповідність співвідношення твердої та рідкої фази умов, які мають місце при зрошенні [27].

Вперше прилад для оцінки змочувальної дії ПАР при зрошенні, що моделює осадження пилу, що знаходиться в зваженому стані, краплями рідини, був запропонований П.А. Ребіндером [93]. Він складався з трубки, що грає роль пилової камери, в кришку якої була вмонтована бюретка, що заповнюється досліджуваною рідиною і закінчується капіляром. У середині трубки містився краплеловлювач.

Для отримання порівнянних даних прилад був незабаром вдосконалено. У кришку приладу монтувалися замість однієї дві бюретки, на дні розміщувалися три закриті кришками стаканчика, з яких два знаходилися під капілярами бюреток, а третій призначався для уловлювання осідаючого під власною вагою пилу. Краплі рідини, проходячи через запилений простір, захоплювали частинки і утворювали суспензію у воді і розчині змочувача, по мутності яких і визначали пиловловлюючу здатність змочувача. У цьому приладі робота змочувача вивчається в статичних умовах (відрив краплі від капіляра відбувається в момент сформованості адсорбційного шару) і в динамічних (зіткнення часток пилу з рухомою краплею); однак, не виключена можливість і осідання пилу на краплю до відриву її від капіляра.

Всі перераховані методики та прилади не дозволяють кількісно оцінити вплив ПАР на результати взаємодії рідини з пилом при їх короткочасному контакті.

Крім дослідження поверхневого натягу водних розчинів ПАР нами було досліджено значення крайових кутів змочування даних розчинів при різних концентраціях методом вимірювання капілярного підняття рідини [140].

Дані вимірювання крайового кута змочування в градусах наведені в таблиці 3.8.

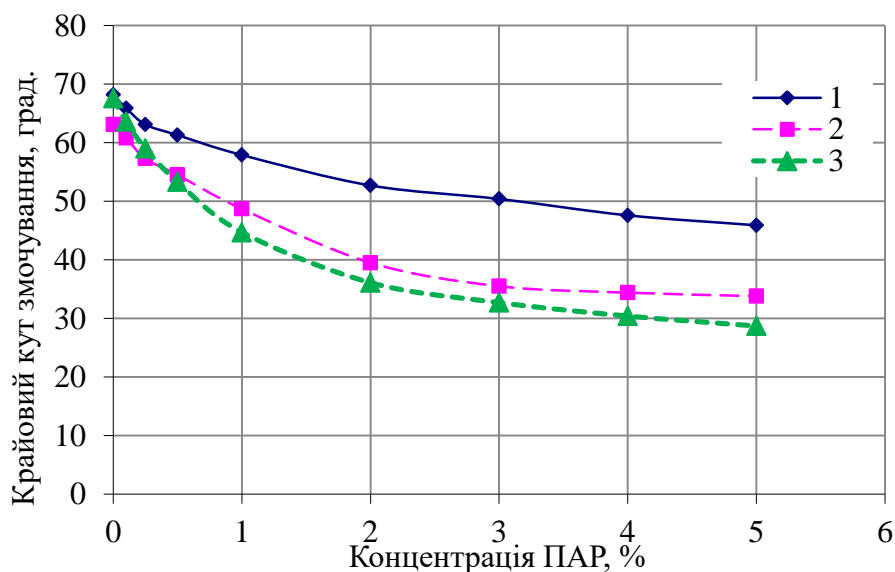
Таблиця 3.8 – Залежність величини крайового кута змочування в градусах від концентрації ПАР у розчинах [%]

Вид води	Величина крайового кута змочування в градусах при концентраціях ПАР в водних розчинах (%)						
	0	0,1	0,25	0,5	1	3	5
1	68,2	65,9	63,1	61,3	57,9	50,4	45,9
2	63,1	60,8	57,3	54,5	48,7	35,5	33,8
3	67,6	63,6	59	53,3	44,7	32,7	28,7

Примітка. 1 – дистильована; 2 – водопровідна; 3 – морська.

Залежність крайового кута змочування від концентрації ПАР в розчинах наведено на рисунку 3.3.

Показано, що при використанні розчинів ПАР концентрацією 2 % на дистильованій воді, значення крайового кута змочування складало 50 градусів, на водопровідній воді – 38 градусів, а на морській – 35 градусів. Виявлене, що подальше збільшення концентрації цих розчинів ПАР не призводить до значного зменшення поверхневого натягу та крайового кута змочування. Це свідчить про те, що при вказаних концентраціях ТЕАС відбувається практично повне насичення адсорбційних шарів молекул цим ПАР на межі розділу «рідина-газ».



1 – дистильована; 2 – водопровідна; 3 – морська.

Рисунок 3.3 – Залежність крайового кута змочування від концентрації ПАР в розчинах

Таким чином вперше отримані залежності поверхневого натягу та крайового кута змочування від концентрації розчину поверхнево-активних речовин типу «ТЕАС», які дозволили визначити, що найбільш ефективним для процесів грудкування аглошихти та обезпилення агрогазів є двохвідсотковий розчин ПАР.

3.5 Лабораторні дослідження параметрів обробки сипучих матеріалів поверхнево-активними речовинами методом визначення роботи адгезії

Адгезійні процеси впливають на інтенсивність грудкування дрібнодисперсних пилових матеріалів [43, 127]. Внаслідок адгезії дисперсних часток протікають процеси їх злипання, що сприяє інтенсивності зростання грудок пилоподібних твердих матеріалів в кульки відповідного розміру при переміщенні сипучих матеріалів в барабанах огрудкування, які обертаються з відповідною круговою швидкістю [44].

Адгезія – це взаємодія між поверхнями тіл різної природи, що контактують одне з одним. Механізми адгезії можуть бути різними:

- хімічний,
- дифузійний,
- електричний (утворення подвійного електричного шару),
- адсорбційний,
- механічний та ін.

Адгезія створює між двома матеріалами з'єднання певної міцності, зумовлене міжмолекулярними силами [41]. Можна виділити адгезію між рідинами, між рідиною і твердим тілом та між двома твердими тілами. Вочевидь, що змочування і розтікання передбачають наявність хоч би однієї речовини в рідкому стані і обумовлені адгезійною взаємодією в дисперсних системах. Якщо розглядати адгезію між твердими тілами, то їй в більшості випадків сприяє попередня адгезія рідини на їх поверхні для покращення необхідного контакту. Взагалі адгезія і змочування доповнюють один одного і певним чином характеризують міжфазну взаємодію в дисперсних системах [112].

Робота адгезії W_a , що характеризує міцність адгезійного зв'язку, визначається роботою зворотного розриву адгезійного зв'язку, віднесеного до одиниці площі контакту. Вона вимірюється в Дж/м². Повна робота адгезії, що відноситься до всієї площі контакту тіл S , дорівнює:

$$W_s = W_a \quad (3.25)$$

Робота адгезії збільшується зі збільшенням поверхневого натягу вихідних компонентів. З іншого боку, робота адгезії залежить від крайового кута змочування відповідного твердого тіла рідиною. В цілому робота адгезії записується рівнянням [93]:

$$W_a = \sigma_{p.z.} \cdot (1 + \cos \theta), \quad (3.26)$$

де $\sigma_{р.г.}$ – поверхневий натяг рідини на межі «рідина – газ», [Дж/м²],

θ – крайовий кут змочування рідиною поверхні твердого тіла, [градус].

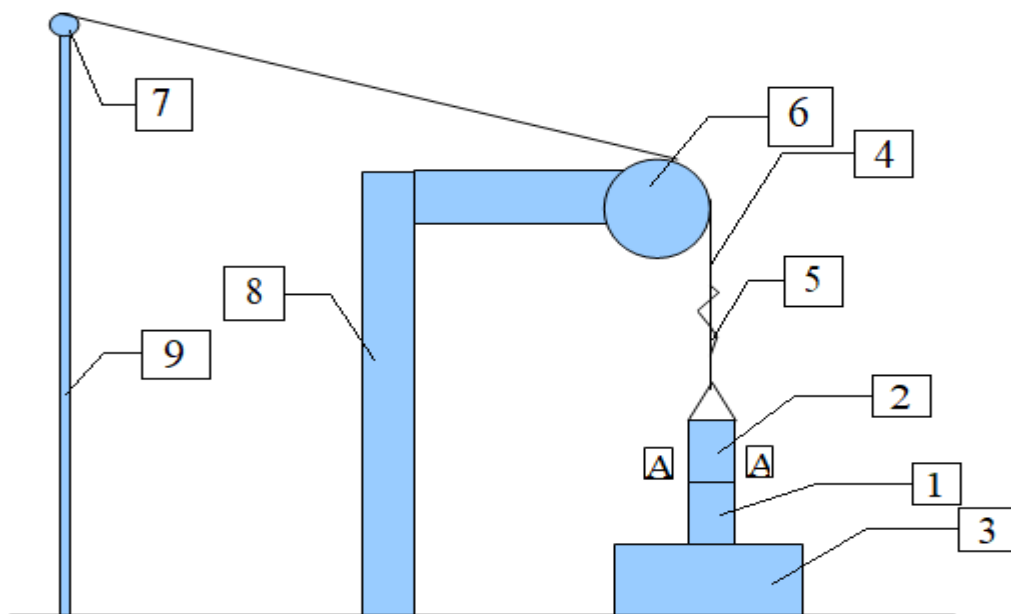
Теоретично визначити роботу адгезії підчас досить складно. Це, по-перше, викликано наявністю шорсткості поверхневого шару твердої фази та її полі дисперсністю, по-друге, тверда фаза підчас складається із різноманітних матеріалів, для кожного із яких крайовий кут змочування буде різним. На наш погляд роботу адгезії і адгезійну міцність можливо визначити при безпосередньому розриві (руйнуванні) відповідного з'єднання. На можливість визначення роботи адгезії непрямыми методами вказується в ряді наукових робіт [13, 41, 42, 45].

Аналіз грудкування аглошихти показує, що в його основі знаходяться механізми агрегації окремих частинок шихти, за якими в техніці оцінки стану сипучих матеріалів закріпився термін «злипання» [42]. Механізм злипання сипучих матеріалів досить складний. На ступінь злипання, в першу чергу, впливає вологість сипучих матеріалів. Вкриті плівкою води окремі частки сипучого матеріалу в більшій мірі утворюють агрегати, злипаються, чим недостатньо вологі. Абсолютно сухі сипучі матеріали взагалі не агрегуються. З метою інтенсифікації процесів грудкування аглошихти її вологість за допомогою зрошення доводять приблизно до 10 % [15].

Як показала практика грудкування аглошихти в «барабанах-грудкувачах», значна доля дрібних фракцій матеріалу шихти не приймає участі в грудкуванні, надходить на стрічку спікання агломерату, звідки в вигляді пилу поступає в аглогази. Це обумовлено як недостатньою рівномірністю зволоження матеріалу аглошихти водою, так і недоліками, які знаходяться в самому механізмі фізико-хімічних процесів, які протікають при застосуванні води для зволоження сипучих матеріалів.

В основі злипання зволжених сипучих матеріалів знаходяться процеси адгезії. Як вказувалось вище, робота адгезії залежить від таких фізико-хімічних параметрів рідини, як поверхневий натяг рідини та крайовий кут змочування

матеріалу рідиною. Підвищити якість злипання (в нашому випадку грудкування) сипучих матеріалів можна шляхом зменшення роботи адгезії. Для зменшення роботи адгезії при обробці сипучих матеріалів рідиною нами запропоновано застосовувати водні розчини поверхнево-активних речовин. З метою визначення роботи адгезії розроблений лабораторний стенд, на якому робота адгезії оцінювалась на основі визначення роботи, яка витрачалась на розрив зліпленого сипучого матеріалу [6]. Схема лабораторного стенду наведена на рисунку 3.4.



1 – нерухомий стакан, 2 – рухомий стакан, 3 – електронні ваги, 4 – канат,
5 – демфіруюча пружина, 6 – центруючий шків, 7 – шків намотування канату,
8, 9 – стійки, А-А – лінія контакту стаканів.

Рисунок 3.4 – Лабораторний стенд для визначення роботи адгезії

Принцип визначення роботи стенду наступний: основна частина стенду – це нерухомий стакан 1 і рухомий стакан 2, внутрішній діаметр кожного становив 25 мм, а висота 30 мм; нерухомий стакан мав дно, рухомий стакан являв собою циліндр; нерухомий і рухомий стакани склались в одно ціле так, що вісі їх співпадали, для того на нерухомому стакані знаходились

центрувальні виступи; контакт матеріалу стаканів був мінімальний, для чого на рухомому стакані в місті контакту із зовні циліндру була знята фаска.

В складені стакани засипався оброблений відповідною рідиною сипучий матеріал. Зверху на матеріал розміщався вантаж, який створював стиснення із зусиллям 75 г/см^2 . Матеріал під вантажем витримувався протягом 5 хв., після чого вантаж видалявся.

Стакани із стиснутим матеріалом розміщувалися на електронні ваги 3, які дозволяли визначити вагу розміщених на них предметів з точністю до 0,1 г. За допомогою канату 4 через шківів 6 і 7 здійснювалось повільне підймання верхнього стакану до моменту розриву нижнього і верхнього стаканів. За допомогою електронних ваг визначалася сила F [Н], затрачена на розривання сипучого матеріалу:

$$F = (m_p - m_0) \cdot g, \quad (3.27)$$

де m_p – показання електронних ваг в момент розриву матеріалу, [г];

m_0 – вага верхнього стакану із «відірваним» матеріалом, [г].

Питома сила розриву визначалась за формулою:

$$F_p = \frac{F}{S}, \quad (3.28)$$

де S – площа розриву сипучого матеріалу по поперечному перетину «А-А», [м^2].

Слід відзначити, що для зручності вимірів нами після встановлення стаканів на електронні ваги їх показання «обнулялися» і фіксація значень m_p і m_0 здійснювалась по показникам «втрати» ваги матеріалу під час його підймання. Швидкість підймання верхнього стакану за допомогою канату складала 1 мм/с. Для зменшення впливу можливих динамічних значень швидкості на канаті 4 встановлювалась демфіруюча пружина 5.

В даному дослідженні використовувалась аглошихта з аглофабрики «АрселорМіттал Кривий Ріг». Маса сипучого матеріалу в стакані становила 25 г. Висота шару сипучого матеріалу в верхньому стакані після стиснення становила 10 мм.

Для дослідження роботи адгезії при обробці сипучих матеріалів розчинами ПАР нами використовувався піноутворювач ТЕАС. Висушена аглошихта оброблялась розчином ПАР з питомими витратами 80 л/т, що відповідає кінцевій вологості аглошихти на барабан-огрудковувач аглофабрики. Концентрація ПАР в розчинах для обробки забезпечувала відповідні питомі витрати ПАР 20; 50; 60; 80; 100 та 150 г/т [141].

Отримані нами результати вимірювання сили адгезії наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Залежність сили розриву від витрат ПАР

Витрати ПАР, г/т	0	20	50	60	80	100	150
$F_a, \text{Н/м}^2$	304,49	243,47	210,2	196,94	144,29	200	204,08

Результати математичної обробки [19, 71] отриманих значень сили адгезії адгезії ($F_a, \text{Н/м}^2$) та витрат ПАР ($q, \text{г/т}$) представлено на рисунку 3.5.

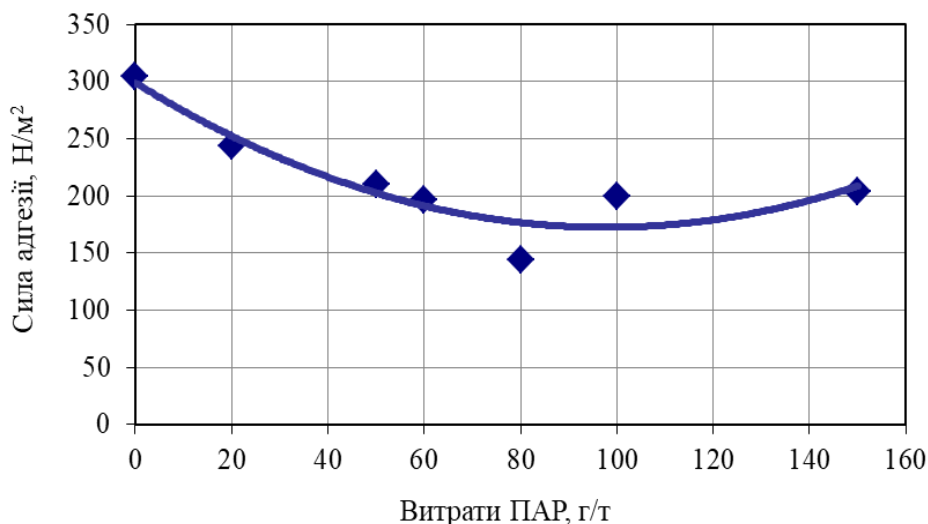


Рисунок 3.5 – Залежність сили адгезії від витрат ПАР

Встановлена залежність з достатнім ступенем точності ($R^2 = 0,86$) описується поліномом другого порядку, яка дозволяє визначати раціональні значення витрат ПАР з мінімальними значеннями сили адгезії:

$$F_a = 0,0132 \cdot q^2 - 2,5887 \cdot q + 299,02. \quad (3)$$

Таким чином встановлено, що витрати ПАР при мінімальних значеннях сили адгезії складають 60 – 80 г/т аглошихти, та є науковою основою при розробці технології обробки аглошихти розчинами ПАР з метою зменшення викидів пилу в навколишнє середовище в процесах агломерації.

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтована доцільність застосування розчинів ПАР в пінному режимі для покращення процесів грудкування аглошихти. Це дозволяє збільшити час взаємодії шару піни з пилом сипучих матеріалів, збільшити площу взаємодії поверхні сипучих матеріалів з піною. Також сили адгезії частинок пилу із пухирьками піни більші, ніж з поверхнею відповідного розчину ПАР, що сприяє кращій агрегації часток пилу.

2. Виконаний аналітичний огляд фізико-хімічних характеристик ПАР, а саме: розчинності, піноутворюючої здатності, кратності та стійкості піни, пилоуловлюючої здатності. Обґрунтована доцільність застосування для обезпилення газів в технологічних процесах агломераційного виробництва піноутворювача на основі триетаноламінів алкілсульфатів первинних жирних спиртів (ТЕАС), який за своїми властивостями відповідає умовам застосування, є малотоксичним, відноситься до 4 класу небезпеки, вибухобезпечний, важкогорючий, із застосуванням цього піноутворювача можна одержувати піну кратністю 150 – 200, достатньої стійкості – 750 с, існує можливість його постачання підприємствами України.

3. Досліджені основні фізико-хімічні властивості розчинів піноутворювача ТЕАС: поверхневий натяг, крайовий кут змочування. Встановлено, що поверхневий натяг розчинів цієї ПАР зменшується з 72 мДж/м² (чиста вода) до 30 мДж/м² (при концентрації ПАР в воді 2 %). Показано, зниження крайового кута змочування до значень 35 – 38% при використанні розчинів ПАР концентрацією 2 %. Виявлено, що подальше збільшення концентрації цих розчинів ПАР не призводить до значного зменшення поверхневого натягу та крайового кута змочування. Вперше отримані залежності поверхневого натягу та крайового кута змочування від концентрації розчину ТЕАС, які дозволили визначити, що найбільш ефективним для процесів грудкування аглошихти та обезпилення аглогазів є двохвідсотковий розчин ПАР.

4. Визначена на лабораторному стенді робота адгезії, яка є визначальною в процесах грудкування сипучих матеріалів. Встановлено, що оптимальні витрати ПАР складають 60 – 80 г/т аглошихти. Визначені нами параметри – концентрації ПАР в водних розчинах та питомі витрати ПАР для обробки аглошихти – є науковою основою при розробці технології обробки аглошихти розчинами ПАР з метою зменшення викидів пилу в навколишнє середовище в процесах агломерації.

Основні положення розділу 3 опубліковані автором в наукових працях: [124, 140, 141, 145, 158, 163].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗНЕПИЛЕННЯ АГЛОГАЗІВ

4.1 Дослідження параметрів обробки сипучих матеріалів ПАР при грудкуванні аглошихти

Ефективність процесу агломерації в значній мірі залежить від якості грудкування аглошихти, яка визначає як газопроникність шихти і температуру в зоні спікання, так і показники якості готового агломерату (фракційний склад, механічна міцність) [126]. Наявність у аглошихті дріб'язку агломерату (до 15% за масою), зумовлює погіршення грудкування шихти в барабані-огрудковувачі. При низькій якості грудкування значно збільшується частка повернутого дріб'язку в готовому агломераті, а також винос пилу із аглогазами із шару аглошихти перед її спіканням [111].

Як показали дослідження [1, 85, 140], введення ПАР до складу аглошихти сприяє поліпшенню грудкування аглошихти, а, отже, збільшенню газопроникності шару і підвищенню вертикальної швидкості спікання агломерату. ПАР мають здатність знижувати поверхневий натяг. При попаданні на тверді частки ПАР внаслідок плівкової адсорбції відбувається не тільки поліпшення, але і прискорення змочування дисперсних матеріалів, їх пластифікація. При цьому за рахунок збільшення сил адгезії підвищується злипання частинок. На підставі виконаних досліджень, які приведені в третьому розділі, а також з урахуванням показників токсичності різних ПАР з метою обробки компонентів шихти в агломераційному виробництві рекомендовано в якості ПАР використовувати ТЕАС.

Дослідження ефективності обробки аглошихти розчинами ПАР було виконано на лабораторному стенді ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Стенд

включав в себе: барабан-огрудковувач аглошихти, піч для спікання агломерату, установку для розсіву огрудкованої аглошихти, установку для розсіву готового агломерату, установку для визначення міцності готового агломерату. Піч для спікання обладнана міні ексгаустером та системою видалення і очистки аглогазів. Устаткування стенду відповідає нормативам, які діють в системі металургійної промисловості. Усі випробування виконувались відповідно до методик, затверджених Мінпромполітики України. Для дослідження використовувалась аглошихта, яка була відібрана на аглофабриці перед барабаном-огрудковувачем до її зволоження водою для грудкування. В процесі дослідження контролювали гранулометричний склад огрудкованої аглошихти, готового агломерату, показники міцності агломерату, час спікання і запиленість аглогазів після їх очищення. Проба аглошихти масою 75 кг завантажувалась в барабан змішувач-огрудковувач, де шихта оброблювалась протягом 4 хв. без зволоження, а потім ще 6 хв. зі зволоженням аглошихти. Обробку аглошихти ПАР проводили безпосередньо в барабані в процесі її грудкування. Після грудкування проводили контроль насипної щільності огрудкованої шихти, а потім на ситовому аналізаторі визначали її гранулометричний склад. Гранулометричний склад аглошихти визначався по фракціям: більше 12 мм; 12–8 мм; 8–5 мм; 5–3 мм; менше 3 мм [1, 122]. В таблиці 4.1 наведено гранулометричний склад огрудкованої шихти при різних витратах ПАР.

Таблиця 4.1 – Гранулометричний склад аглошихти після її грудкування

№ з/п	Витрати ПАР, г/т	Фракційний склад аглошихти, %					Без фракції менше 3мм	Волог. шихти, %
		>12мм	12-8мм	8-5мм	5-3мм	<3 мм		
1	0	6,42	4,85	13,75	25,03	49,95	50,05	7,1
2	0	4,93	4,09	13,31	24,63	53,04	46,96	8,1
3	10	7,42	6,13	16,67	25,59	44,19	55,81	7,15
4	20	7,95	6,4	18,68	29,52	37,45	62,55	8,3
5	20	6,35	4,07	15,33	26,35	47,9	52,10	7,6
6	30	12,44	9,64	18,96	28,19	30,77	69,23	8
7	40	9,65	7,04	18,85	32,72	31,74	68,26	7,5
8	40	9,75	6,22	16,18	28,94	38,91	61,09	8,1
9	70	5,07	4,01	14,26	27,03	49,63	50,37	7,9
10	100	8,45	5,7	15,73	33,16	36,96	63,04	8,2
11	100	4,99	3,7	12,9	24,34	54,07	45,93	7,8

Встановлені закономірності зміни гранулометричного складу огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР при її обробці, які з достатньою точністю описуються поліномами другого порядку, що наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Закономірності зміни гранулометричного складу огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР

№	Фракція огрудкованої аглошихти	Залежність процентного вмісту різних фракцій аглошихти (y , %) від витрат ПАР (q , г/т)	Величина достовірності апроксимації
1	Менше 3 мм	$y_1 = 453769q_1^2 - 4426,8 q_1 + 48,274$	0,853
2	Від 3 до 5 мм	$y_2 = -109407q_2^2 + 1380,8 q_2 + 25,066$	0,954
3	Від 5 до 8 мм	$y_3 = -131373 q_3^2 + 1153,8 q_3 + 14,945$	0,934
4	Від 8 до 12 мм	$y_4 = -87560 q_4^2 + 742,3 q_4 + 5,2073$	0,915
5	Більше 12 мм	$y_5 = -125695 q_5^2 + 1150,8 q_5 + 6,5155$	0,875

Графічну інтерпретацію залежностей процентного вміста фракцій огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР, наведених в таблиці 4.2, представлено на рисунку 4.1.

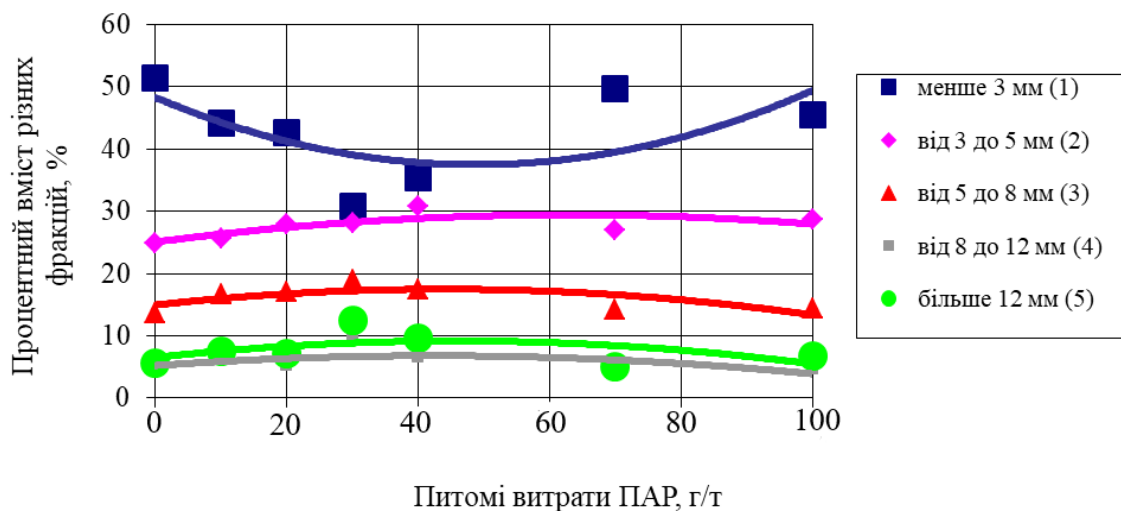


Рисунок 4.1 – Графічна інтерпретація залежностей процентного вміста фракцій огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР

Аналіз результатів виконаних стендових досліджень показав, що застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти замість технічної води дозволяє значно покращити грудкування аглошихти. Це, в першу чергу,

стосується значного зменшення частки фракції менше 3 мм в огрудкованій аглошихті. Причому, як показує крива (1) рисунка 4.1 зменшення фракцій менше 3 мм спостерігається при поступовому збільшенні концентрації ПАР в аглошихті до значень, що відповідають питомим витратам ПАР від 40 до 60 г/т. При подальшому підвищенні концентрації ПАР в аглошихті спостерігається збільшення частки цих фракцій в огрудкованій аглошихті. Введення розчинів ПАР в аглошихту обумовлює збільшення частки фракцій в діапазоні від 5 до 8 мм, які вважаються найбільш «корисними» в процесах агломерації, з 14 % до 19 % (крива (3) рис. 4.1), а в діапазоні 3 – 5 мм з 25 % до 30 % (крива 2, рис. 4.1).

Також на лабораторному стенді виконувались дослідження фракційного складу готового агломерату та визначення показників міцності агломерату. В результаті цих досліджень було виявлено зменшення частки готового агломерату фракції -5 мм з 23 % до 18 % при обробці аглошихти перед спіканням розчинами ПАР. Відповідно спостерігалось збільшення більш «корисної» фракції готового агломерату (5 – 20 мм) з 30 % до 43 %. Для визначення показників міцності проба агломерату завантажувалась в барабан грохочіння, який автоматично вимикався після 200 обертань. Було виявлено зменшення частки фракції -0,5 мм (при дослідженні шихти, яка оброблювалась розчинами ПАР) з 8,2 % до 4,2 %, що безумовно буде зменшувати пиловинос з готового агломерату в реальних виробничих умовах.

Стендові дослідження процесів грудкування аглошихти із застосуванням розчинів ПАР підтвердили результати лабораторних досліджень по визначенню сили розриву сипучих матеріалах, оброблених розчинами ПАР. Причому, одержані лабораторні та стендові результати показали близькі за абсолютними значеннями величини питомих витрат ПАР та наявність оптимальних значень цих величин. Це підтверджує той факт, що в основі грудкування аглошихти лежать процеси злипання сипучих матеріалів, а також те, що процеси злипання протікають в оптимальному режимі при мінімальних значеннях роботи адгезії.

Результати контролю запиленості аглогазів, які викидались в атмосферне повітря при спіканні аглошихти на стендовій установці, приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Запиленість аглогазів в залежності від питомих витрат ПАР на обробку аглошихти

№ з/п	Витрати ПАР, г/т	Концентрація пилу, мг/м ³
1	0	348
2	10	184
3	20	90
4	30	187
5	40	145
6	70	99
7	100	161

Визначені концентрації пилу в агломераційних газах, які викидались в атмосферне повітря під час спікання аглошихти на стендовій установці дозволили встановити залежність розподілу концентрації пилу в аглогазах (C , мг/м³) від питомих витрат ПАР (q , г/т).

Встановлена залежність наведена на рисунку 4.2, яка з достатнім ступенем точності ($R^2 = 0,82$) описується поліномом другого порядку (4.1).

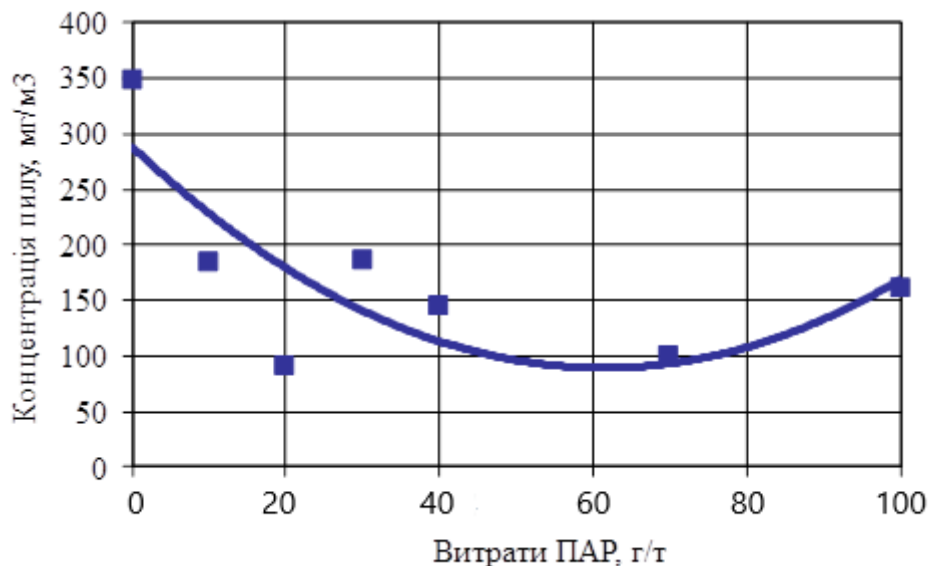


Рисунок 4.2 – Залежність запиленості аглогазів від концентрації ПАР в аглошихті

$$C = 0,0531 \cdot q^2 - 6,5037 \cdot q + 288,58. \quad (4.1)$$

Як видно із таблиці 4.3 і рисунка 4.2, застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти забезпечує зменшення запиленості аглогазів більш як в 3 рази. Причому, найменші значення запиленості спостерігаються при концентрації ПАР в аглошихті, що відповідає витратам ПАР 60 г/т. Тобто, із покращенням ступеню грудкування аглошихти відбувається зменшення виносу пилу із шару аглошихти при її спіканні.

Одержані результати лабораторних та стендових досліджень дозволяють зробити висновок про доцільність застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти з метою зменшення запиленості аглогазів.

4.2 Математична модель розсіювання ПАР над конвеєрною стрічкою

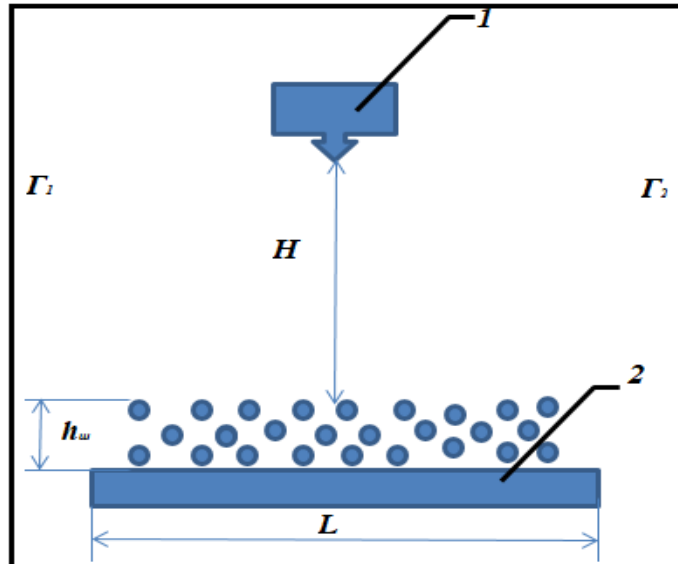
Одним із важливих параметрів, що визначають ефективність застосування ПАР для обробки аглошихти перед грудкуванням, є висота розміщення піногенератора над конвеєрною стрічкою з шаром аглошихти.

На рисунку 4.3 наведено загальний вигляд процесу розсіювання ПАР над конвеєрною стрічкою в умовах аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».



Рисунок 4.3 – Потрапляння ПАР на конвеєр

Розглянуто математичну модель розрахунку процесу потрапляння ПАР від піногенератора на транспортер з аглошихтою. Розрахункова схема процесу, що моделюється показана на рисунку 4.4.



1 – піногенератор; 2 – конвеєрна стрічка з шаром аглошихти; H – висота між шаром шихти та піногенератором; $h_{\text{ш}}$ – висота шихти на конвеєрі; L – ширина конвеєрної стрічки

Рисунок 4.4 – Розрахункова схема

В фізичній моделі процесу приймається, що ПАР в кількості Q потрапляє з піногенератора на поверхню шихти. Для моделювання цього процесу використовується наступне рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + Q_0 \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (4.2)$$

де C – концентрація ПАР; u , v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; w_s – швидкість гравітаційного осідання ПАР, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; (x_0, y_0) – координати джерела викиду ПАР (форсунка); Q_0 – інтенсивність викиду ПАР з форсунки; $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ – дельта-функція Дірака, за допомогою якої моделюється положення форсунки.

Граничні умови:

1. На частині границі Γ_1 , де потік входить в розрахункову область, концентрація забруднення відома, забруднення, що вноситься ззовні, зазвичай не враховується, а саме $C_{\Gamma_1} = 0$;

2. На границі Γ_2 , де повітряні маси витікають із розрахункової області, нехтують дифузійним переносом відносно до конвективного, тобто $\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0$ на границі Γ_2 , де $\vec{V} \cdot \vec{n} \geq 0$.

3. На верхній та нижній границі ставиться умова $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$, де n – зовнішня нормаль до границі.

Початкова умова для моделюючого рівняння має вигляд $C|_{t=0} = 0$.

Для чисельного розв'язання рівняння (4.7) використовується метод сіток. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній сітці. У конвективних похідних складові односпрямованого перенесення записуються у вигляді [130]:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}.$$

З урахуванням даних співвідношень конвективні похідні апроксимуються розділеними різницями «проти потоку» на верхньому часовому шарі [130]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,l}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Компоненти швидкості u визначаються на вертикальних гранях різницевих осередків, а компоненти швидкості v – на горизонтальних гранях. Індeksi цих граней відповідають індексам осередків, розташованих правіше або вище відповідної границі.

Другі похідні апроксимуються наступним чином [130]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ - \mu_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ - \mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

де L_x^+ , L_x^- , L_y^+ , L_y^- , M_{xx}^+ , M_{xx}^- , M_{yy}^+ , M_{yy}^- – умовні позначення різницевих операторів.

Похідна за часом апроксимується:
$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

З урахуванням наведених вище позначень різницевий аналог рівняння переносу (4.2) записується як:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} +$$

$$+ L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + \quad (4.3)$$

$$L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}.$$

Позначаємо δ_{ij} – число «1» або «0», в залежності від того, розташоване чи ні в різницевому осередку « ij » джерело подачі ПАР. Значення q_{ij} – дорівнює інтенсивності Q_0 джерела подачі ПАР, розміщеного в різницевому осередку « ij », поділений на площу цього осередка: $q_{ij} = Q_i(t)/(\Delta x \Delta y)$.

Далі проводиться розщеплення різницевого рівняння (4.3) на чотири різницевих рівняння так, щоб на кожному кроці враховувався лише один напрямок перенесення збурень, який визначається знаком при конвективній похідній [130]. В цьому випадку різницеві рівняння мають вигляд:

– на першому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ; \end{aligned}$$

– на другому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$, $c = n + \frac{1}{4}$,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ; \end{aligned}$$

– на третьому кроці розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$, $c = n + \frac{1}{2}$,

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ; \end{aligned}$$

– на четвертому кроці розщеплення $k = n + 1$, $c = n + \frac{3}{4}$,

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^n \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l . \end{aligned}$$

У наведених різницевих рівняннях використовується значення

$$\bar{q}_l = \frac{q_l}{\Delta x \Delta y} .$$

Значення функції δ_l тотожно дорівнює нулю у всіх осередках, крім тих, де розташоване джерело ПАР.

Оскільки на кожному кроці розщеплення шаблон різницевих рівнянь має трикутну форму, то на верхньому часовому шарі невідоме значення функції «С» знаходиться за методом «стрімкого рахунку».

При проведенні обчислювального експерименту приймається [14]:

$$\mu_x = 0,1 \cdot u ,$$

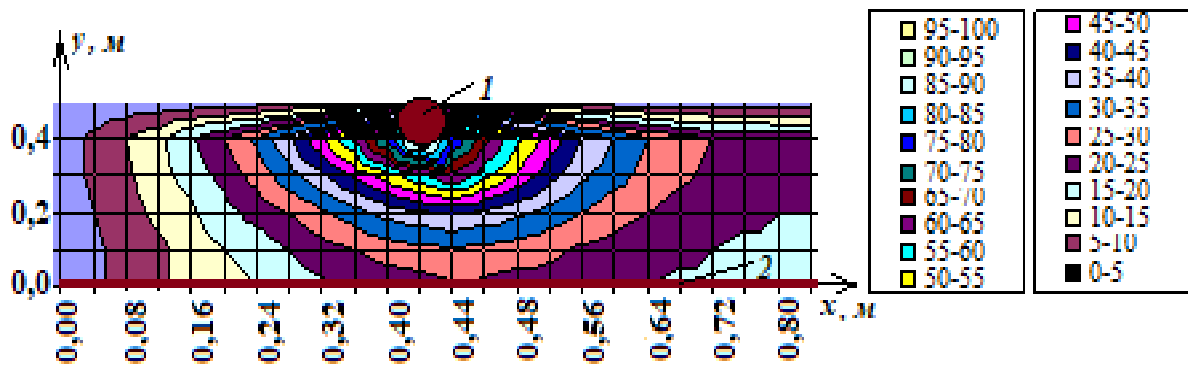
$$\mu_y = 0,1 \cdot v .$$

На базі побудованої чисельної моделі було проведено обчислювальний експеримент.

При проведенні обчислювального експерименту використовувалися такі початкові дані:

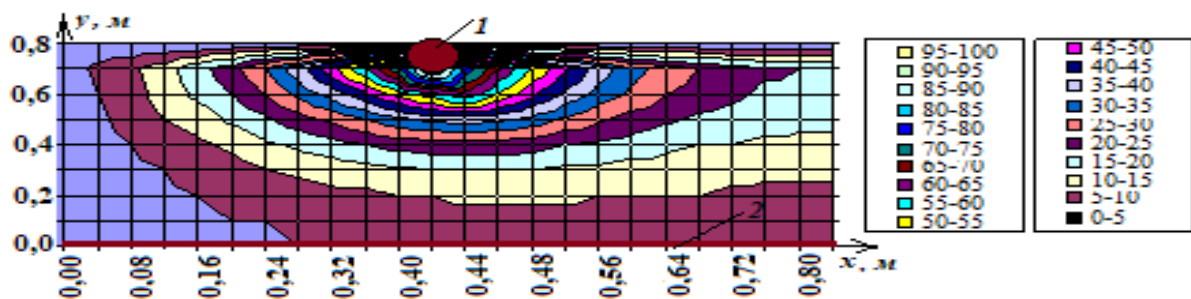
1. Розміри розрахункової області: 1 м*1 м
2. Швидкість повітряного потоку 0,5 м/с.
3. Інтенсивність подачі розчину 1750 л/год, що відповідає продуктивності конвеєрної стрічки по переміщенню аглошихти 500 т/год, питомі витрати ПАР 60 г/т, концентрація ПАР в розчинах 2 %.

При проведенні обчислювального експерименту варіювалася висота розміщення піногенератора, що подає розчин ПАР на конвеєрну стрічку. На рисунках 4.5 – 4.7 показано розподіл концентрації розчину ПАР для різних висот розташування піногенератора у відсотковому значенні від максимального (від 0 до 100 %), які позначено різними кольорами.



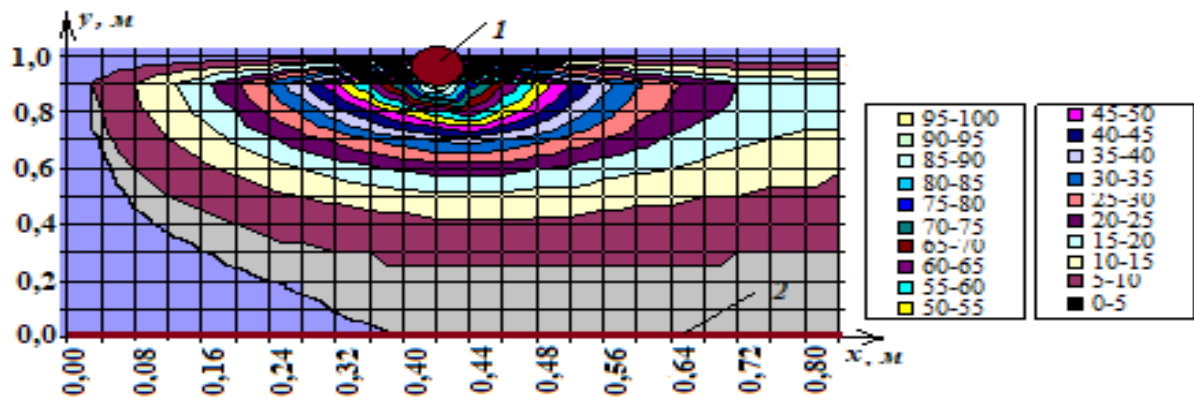
1 – піногенератор; 2 – шар аглошихти

Рисунок 4.5 – Поле концентрації розчину ПАР для висоти розташування піногенератора $H=0,5$ м



1 – піногенератор; 2 – шар аглошихти

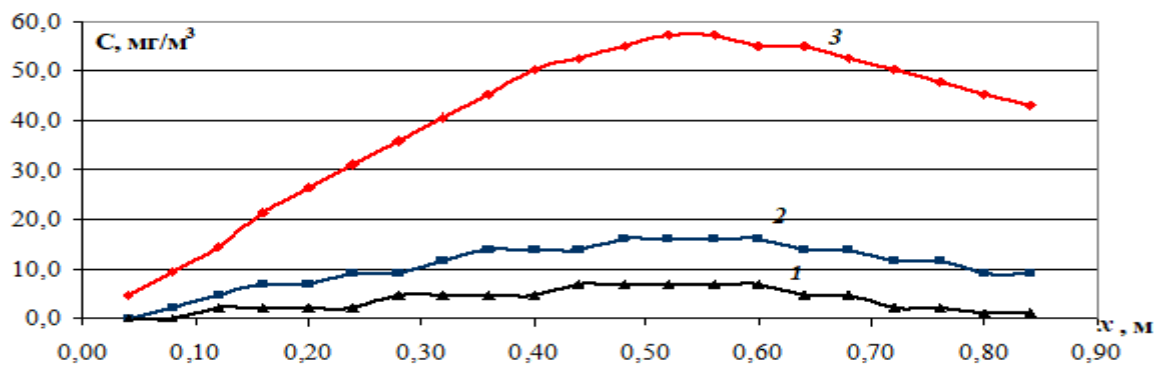
Рисунок 4.6 – Поле концентрації розчину ПАР для висоти розташування піногенератора $H=0,8$ м



1 – піногенератор; 2 – шар аглошихти

Рисунок 4.7 – Поле концентрації розчину ПАР для висоти розташування піногенератора $H=1$ м

Далі, на рисунку 4.8 показано значення концентрації розчину біля поверхні аглошихти для різних висот розташування піногенератора.



1 – висота 1 м; 2 – висота 0,8 м; 3 – висота 0,5 м.

Рисунок 4.8 – Значення концентрації розчину біля поверхні аглошихти для різних висот розташування піногенератора

Розроблена математична модель та її чисельна реалізація дозволяє варіювати висоту H розташування піногенератора, що подає ПАР на стрічку конвеєра з шихтою, та оцінювати ефективність розпилювання, визначати, яка концентрація розчину ПАР біля поверхні шихти і, тим самим, визначати раціональне розташування піногенератора, що подає ПАР. Встановлено, що найбільш раціональна висота $H=0,5$ м, що пояснюється найбільшою концентрацією розчину ПАР біля поверхні аглошихти.

4.3 Розробка технології обробки сипучих матеріалів піною

Як показали дослідження пилогазодинамічних процесів, виконані безпосередньо в умовах експлуатації аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», наведені в розділі 2, основним джерелом надходження пилу в атмосферне повітря в умовах цього виробництва є процеси спікання аглошихти на полетах агломашин. Причому надходження пилу в аглогази в процесі спікання аглошихти, а також при транспортуванні і перевантаженні готового агломерату залежить від якості її грудкування, газопроникності шару шихти на палетах агломашин та ефективності спікання агломерату [109]. Для підвищення ефективності процесу агломерації необхідно забезпечити таку газопроникність спікаємого шару, при якій кількість повітря, що просмоктується екстаустером, і продуктів згоряння буде достатнім для повного згоряння коксового дріб'язку, активізації процесів взаємодії між мінералогічними компонентами шихти, збільшення вертикальної швидкості спікання [115, 149]. Оптимізація газопроникності спікаємого шару дозволяє інтенсифікувати процеси тепломасообміну в спікаємому шарі, за рахунок чого швидкість руху зони горіння не лімітується нестачею кисню [5, 72]. За рахунок підвищення повноти згоряння коксового дріб'язку в шихті можливо зниження його витрат в шихті [18].

Аналіз результатів чисельних науково-дослідних робіт, присвячених боротьбі з запиленням атмосферного повітря, та виконані нами дослідження показують, що найбільш ефективним способом застосування розчинів ПАР для боротьби з пилом є обробка сипучих матеріалів піною, одержаною із відповідних розчинів ПАР [2, 87, 124, 135, 143]. Переваги застосування піни для обробки сипучих матеріалів, яким є, наприклад, аглошихта на аглофабриках, детально викладені в розділі 3.1 дисертаційної роботи. Причому, як показали результати попередніх наших досліджень [140] найбільш ефективно застосування піни кратністю 150 – 200. На основі аналізу технологічного процесу підготовки аглошихти до грудкування прийшли до

висновку, що найбільш доцільно введення піни в аглошихту в шихтовому відділенні на ділянці, де в аглошихту введені усі компоненти [144].

На аглофабриці ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» було змонтовано експериментальний зразок установки, призначений для обробки аглошихти розчинами ПАР в пінному режимі. Вузол обробки аглошихти розчинами ПАР в загальному технологічному процесі наведено на рисунку 4.9.

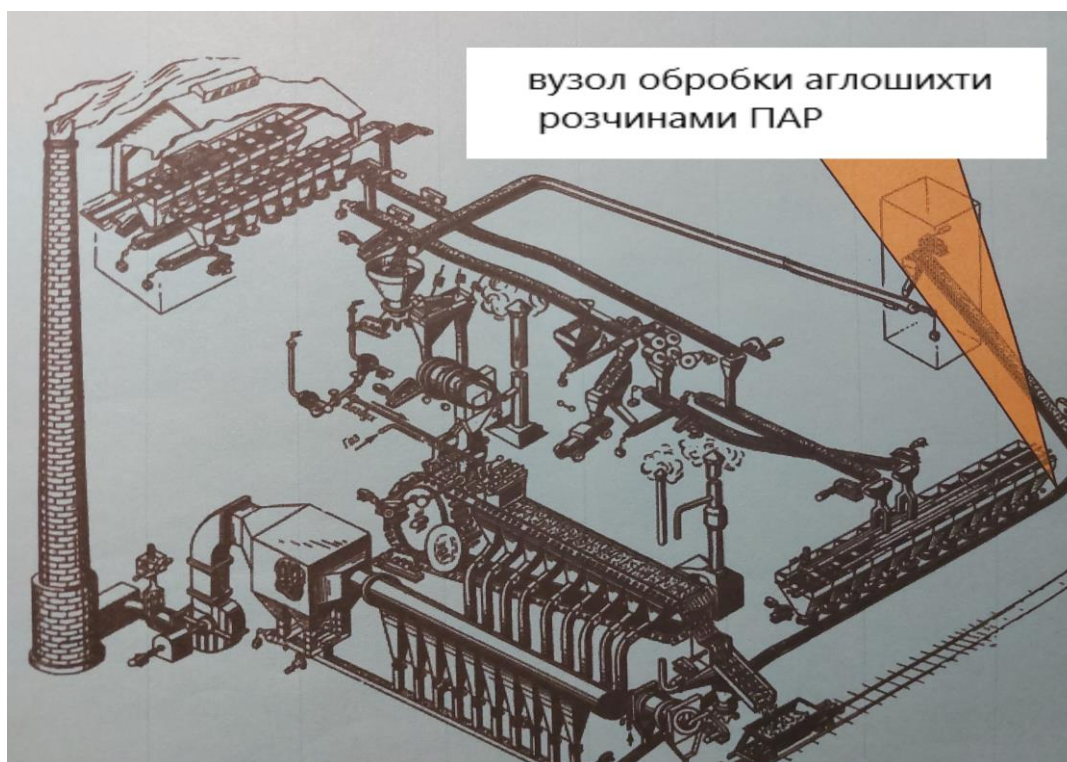
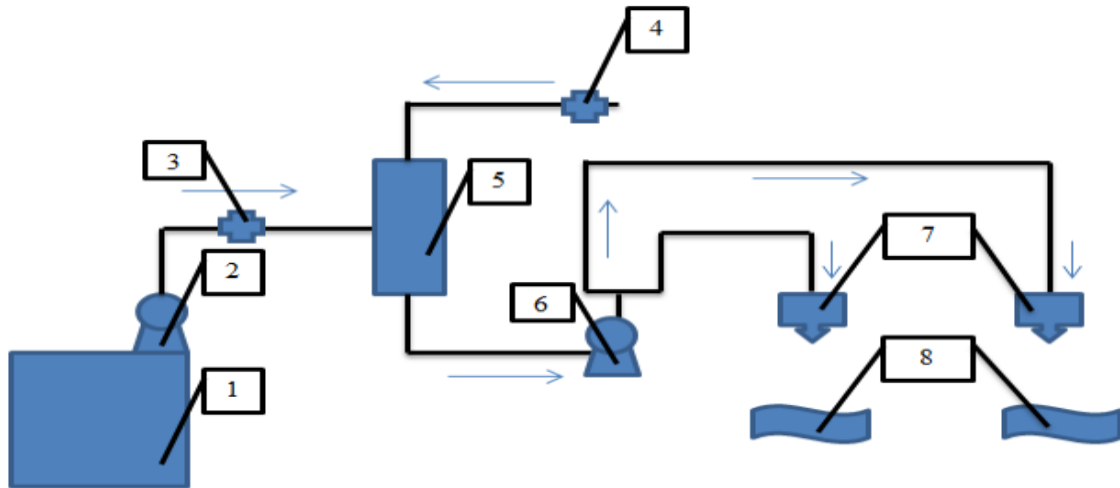


Рисунок 4.9 – Вузол обробки аглошихти в загальному технологічному процесі

Основні технологічні вузли установки відповідали розробленій технологічній схемі, наведеній на рисунку 4.10.

Запропонована технологія обробки аглошихти піною полягає в наступному. В шихтовому відділенні встановлюється ємність з піноутворювачем 1, за допомогою насоса-дозатора 2 піноутворювач під тиском від 1,2 до 1,6 МПа подається в змішувач 5. В змішувач постійно надходить вода за допомогою крану 4 під тиском приблизно 0,6 МПа. В результаті в змішувачі 5 утворюється розчин піноутворювача концентрацією 2 %. Із змішувача розчин

ПАР під тиском приблизно 0,6 МПа по системі трубопроводів надходить в ежекційні піногенератори 7, які встановлені над стрічкою конвеєра з аглошихтою 8. В результаті відбувається укриття піною аглошихти, яка подається конвеєрною стрічкою в барабан-огрудковувач.



- 1 – ємність з піноутворювачем, 2 – насос-дозатор подачі піноутворювача,
 3 – кран подачі ПАР, 4 – кран подачі води, 5 – змішувач, 6 – насос подачі
 розчину ПАР, 7 – піногенератори, 8 – конвеєрні стрічки

Рисунок 4.10 – Технологічна схема одержання піни

Загальний вигляд піногенератора при його випробуванні на стенді наведено на рисунку 4.11.

Система обробки аглошихти піною автоматизована, що дозволяє при зупинці стрічки зупиняти роботу піногенератора, тому подача піни на стрічку конвеєра 8 здійснюється тільки при роботі конвеєра і наявності на стрічці аглошихти. Витрати піноутворювача регулюються за допомогою перетворювача частоти електричного струму, який подається на двигун насоса-дозатора. В результаті регулювання витрат піноутворювача підтримуються задані питомі витрати ПАР на обробку аглошихти (60 г/т).

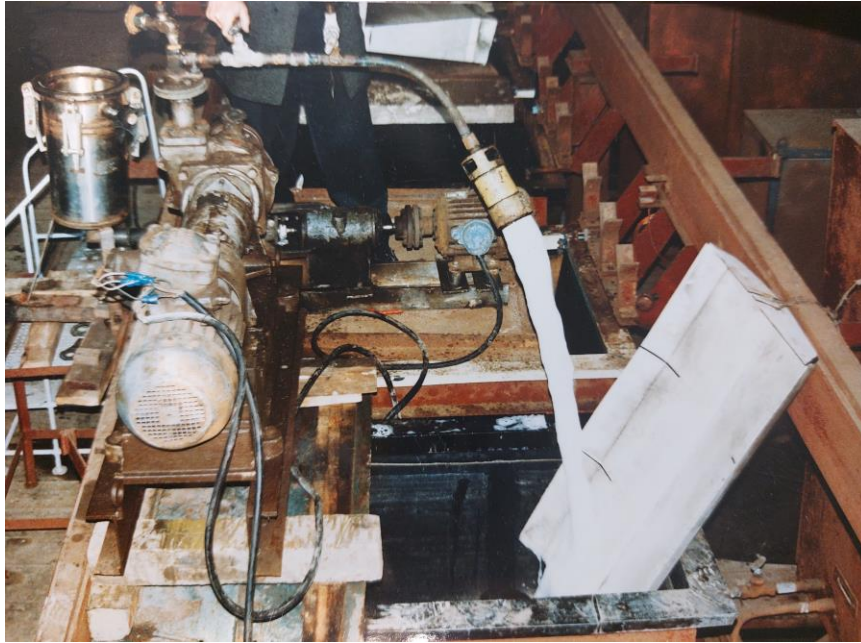


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд піногенератора при його випробуванні на стенді

На аглофабриках в більшості випадків використовується технічна вода, тому технологічною схемою передбачено її очистку за допомогою фільтру, що служить для очистки технічної води від зважених часток перед її надходженням в змішувач. Також повинні бути передбачені фільтри для очистки ПАР та його розчинів від зважених часток перед надходженням на піногенератори.

Електричні клапани, встановлені на гідравлічній сітці технологічної схеми і служать для забезпечення включення (відключення) роботи піногенераторів в залежності від руху (зупинки) стрічки конвеєрів, а також наявності (відсутності) аглошихти на відповідних конвеєрах.

Контроль тиску в системі подачі технічної води та розчинів ПАР здійснюється за допомогою манометрів.

Витрати ПАР, яка подається через змішувач 5 в піногенератори 7, здійснюється регулюванням частоти обертів на насосі-дозаторі за допомогою перетворювача частоти струму, наприклад, типу X200-004HFEE, наведеного на рисунку 4.12.



Рисунок 4.12 – Перетворювач частоти серії X200

На індикаторі перетворювача частоти за допомогою рукоятки управління встановлюється задане значення продуктивності аглофабрики за аглошихтою (наприклад, 500 т/год). Одночасно вмикається насос-дозатор і секундомір. Визначається продуктивність насоса-дозатора, л/год. Порівнюється отримана продуктивність з даними тарувального графіку (рис. 4.13).

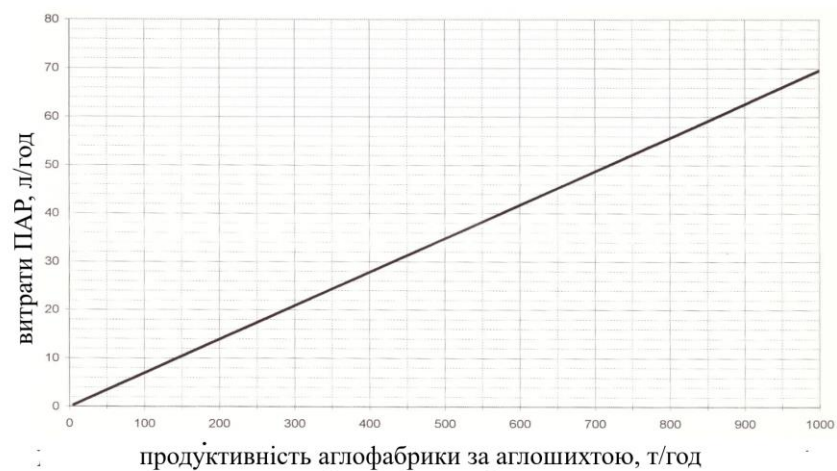


Рисунок 4.13 – Тарувальний графік насоса-дозатора

Підтримання постійних питомих витрат [г/т] ПАР на обробку аглошихти здійснюється автоматично за допомогою електронних ваг, сигнал від яких про витрати аглошихти [т/год] на конвеєрній стрічці надходить на електронну схему перетворювача частоти струму.

Випробування цієї технологічної схеми обробки аглошихти на аглофабриці ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» показало її технологічність та надійність. Систему обробки аглошихти розчином ПАР типу «ТЕАС» впроваджено в аглоцеху ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що дозволяє суттєво зменшити викиди пилу в навколишнє середовище в процесах агломерації.

4.4 Натурні дослідження запиленості аглогазів при застосуванні ПАР

У розділі 1.4 було визначено, що оптимізувати процеси спікання агломерату можливе за рахунок обробки аглошихти розчинами ПАР. З метою визначення концентрацій пилу в аглогазах були виконані експериментальні дослідження в промислових умовах [2, 123]. Режимми обробки аглошихти забезпечували питомі витрати ТЕАС в аглошихті від 20 до 120 г/т.

Дослідження запиленості газів здійснювалися у вакуум-камерах, перед мультициклоном та після мультициклону перед викидом в атмосферне повітря без обробки розчинами ПАР. Потім вмикалась установка подачі та знову проводились виміри концентрації. Шляхом порівняння значень концентрацій, виміряних при промислових дослідженнях, визначалось зниження викиду часток пилу в атмосферу.

Вибір точок для вимірювань визначався як вимогами розподілу поперечного перерізу газоходу на рівнозначні ділянки, так і фактичною наявністю технологічних отворів на досліджуваних ділянках газоходів агломашин. Дослідження концентрації пилу по перетину газового потоку проводилось ваговим методом та виконувались відповідно до вимог діючих нормативних документів [34, 52, 68].

Результати вимірів запиленості аглогазів в вакуум-камерах агломашини № 5 наведено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Запиленість газів (мг/м³) в вакуум-камерах агломашини № 5

Обробка аглошихти	Номер вакуум-камери											
	5			6			7			8		
	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
без ПАР	4180	5136	3873	2568	3120	2400	3472	3930	2836	4008	4523	3876
з ПАР (60 г/т)	2483	2732	2007	2140	2524	1822	3007	3254	2503	3443	3623	2980
Ефект впливу, %	41	47	48	17	19	24	13	17	12	14	20	23

Значення концентрацій пилу в аглогазах в вакуум-камерах агломашини № 5 до обробки аглошихти розчинами ПАР та після запропонованої обробки розчинами ПАР з витратами 60 г/т наведено на рисунку 4.14.

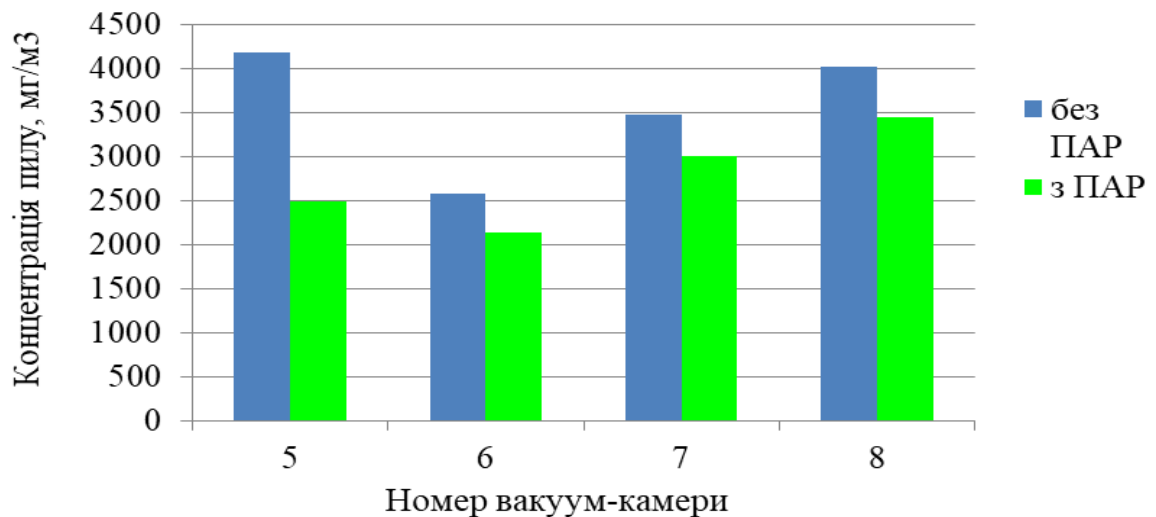


Рисунок 4.14 – Концентрація пилу в аглогазах в вакуум-камерах агломашини №5

Розглянуто питання зниження початкової запиленості аглогазів безпосередньо під полетами агломашин. Наведені в таблиці 4.4 та на рисунку 4.14 результати пилового контролю показують, що застосування ПАР для обробки аглошихти дозволяє знизити початкову запиленість аглогазів, яка вимірювалась в вакуум-камерах агломашини № 5, від 15 % до 40 %. Це, безумовно, дозволяє зменшувати пилове навантаження на наступні апарати газоочищення: пиловловлюючі бункери під вакуум-камерами, пиловідділяючі бункери перед мультициклоном та безпосередньо на мультициклон [145].

Результати вимірів концентрації пилу перед мультициклоном наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Запиленість газів (мг/м³) перед мультициклоном при різних витратах ПАР на обробку аглошихти

Питомі витрати ПАР на обробку аглошихти, г/т	Номер агломашини					
	2			5		
	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}	$C_{сер}$	C_{max}	C_{min}
0	2980	3380	2580	2440	2550	2330
20	2135	2478	1792	1702	1984	1420
40	2005	2348	1662	1675	1895	1455
60	1608	1879	1337	1567	1806	1328
80	1543	1859	1227	1420	1736	1104
100	1754	1946	1562	1481	1803	1159
120	1806	2014	1598	1630	1924	1336

Виконана статистична обробка результатів експериментальних досліджень, показано що залежність концентрації пилу перед мультициклоном для агломашини № 2 (C_1 , мг/м³) та для агломашини № 5 (C_2 , мг/м³) від питомих витрат ПАР (q , г/т) з достатнім ступенем точності ($R_1^2 = 0,95$ та $R_2^2 = 0,894$) описується поліномами другого порядку, що мають наступний вигляд:

$$C_1 = 0,204 \cdot q^2 - 32,954 \cdot q + 2892,3, \quad (4.4)$$

$$C_2 = 0,1428 \cdot q^2 - 22,716 \cdot q + 2322,7. \quad (4.5)$$

Результати статистичної обробки наведено на рисунку 4.15.

Наведені на рисунку 4.15 дані показують, що в результаті застосування ПАР запиленість аглогазів перед мультициклонами агломашин № 2 та № 5 зменшується приблизно на 40 %. Причому рівень запиленості газів в газоході агломашини № 2 вище, ніж в аналогічному поперечному перерізі агломашини № 5, що можливо зумовлено високою нерівномірністю пилогазового навантаження.

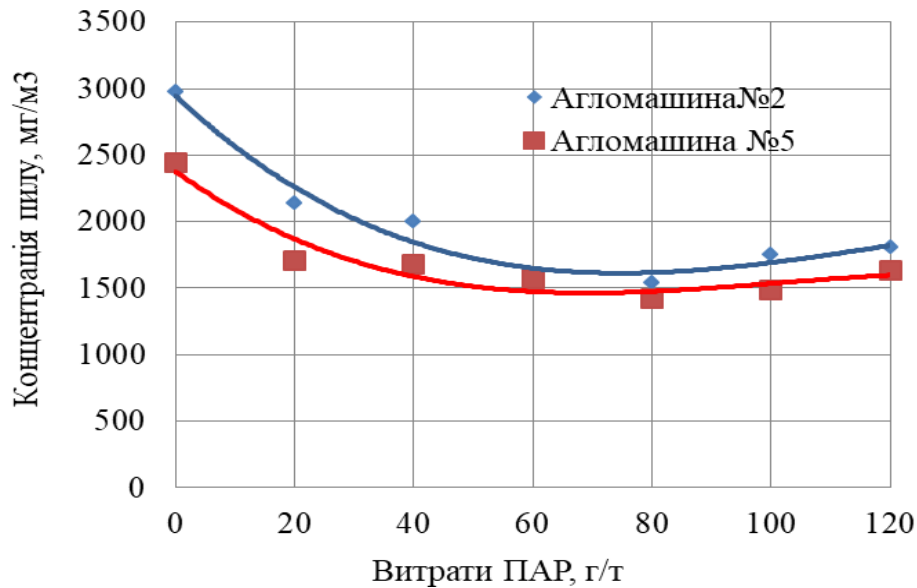


Рисунок 4.15 – Запиленість газів (мг/м³) перед мультициклоном при різних витратах ПАР на обробку аглошихти

Результати вимірів концентрації пилу після очистки в мультициклоні наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Запиленість газів після мультициклона при різних витратах ПАР на обробку аглошихти, мг/м³

Питомі витрати ПАР на обробку аглошихти, г/т	$C_{сер},$ мг/м ³	$C_{max},$ мг/м ³	$C_{min},$ мг/м ³
0	845	1120	570
20	482	559	405
40	450	621	279
60	225	318	132
80	119	145	93
100	131	154	108
120	155	188	122

Встановлена залежність концентрації пилу після мультициклона (C , мг/м³) від питомих витрат ПАР (q , г/т) з достатнім ступенем точності ($R^2 = 0,964$) описується поліномом другого порядку, що виглядає наступним чином:

$$C = 0,0712 \cdot q^2 - 14,08 \cdot q + 818,05, \quad (4.6)$$

Результати апроксимації експериментальних даних наведено на рисунку 4.16.

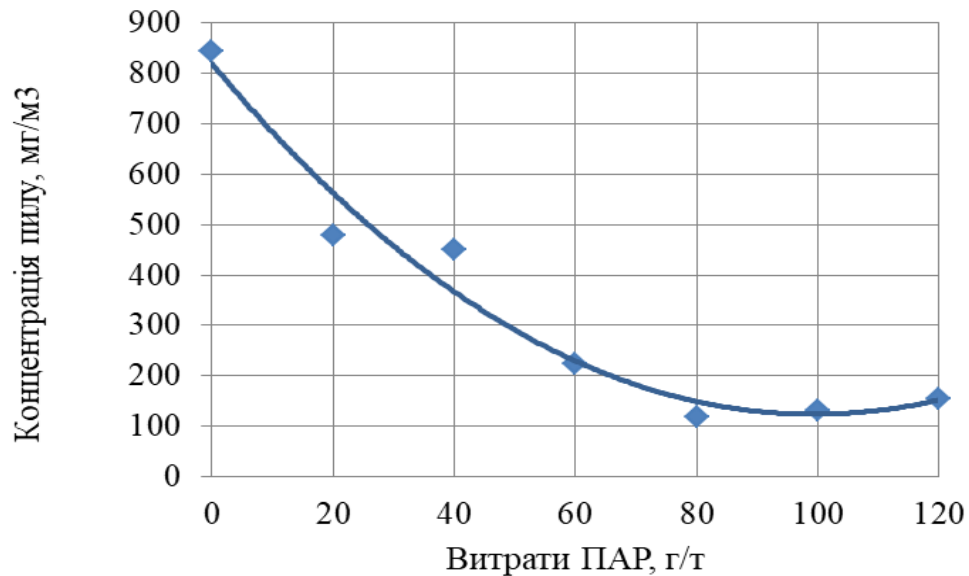


Рисунок 4.16 – Запиленість газів (мг/м^3) після мультициклона при різних витратах ПАР на обробку аглошихти

Результати контролю запиленості аглогазів після очищення їх в мультициклоні (табл. 4.6) показують, що застосування ПАР для обробки аглошихти дозволяє знизити запиленість аглогазів, які викидаються в атмосферне повітря на 86 %. Це обумовлено, на наш погляд, як зменшенням початкової запиленості аглогазів, які надходять в мультициклон, так і дисперсним складом пилу в очищуємих аглогазах.

Як видно із наведених в таблицях 4.4 – 4.6 та на рисунках 4.14 – 4.16 результатів контролю запиленості аглогазів на різних ділянках руху аглогазів в газоходах агломашин застосування піни для обробки аглошихти розчинами ПАР дозволяє знизити концентрацію пилу в аглогазах на усіх ділянках газоходу.

4.5 Результати промислових досліджень дисперсного складу пилу при впровадженні системи обробки аглошихти розчинами ПАР

У комплексі дослідження характеристик пилу аналіз дисперсного складу є обов'язковим методом контролю. Без характеристики ступеня дисперсності

промислового пилу не можна об'єктивно оцінити ефективність діючих пилоочисного пристроїв і розрахувати ступінь очищення повітря проєктованими пристроями [36].

Після аналізу існуючих способів дослідження дисперсного складу пилу [4, 58], детально розглянутих в розділі 2.3 дисертаційної роботи, в якості методу дослідження дисперсного складу нами був обраний мікроскопічний аналіз, на достовірність результатів якого не впливає різна густина компонентів дисперсного матеріалу, його оптичні та інші властивості.

Проводився підрахунок кількості частинок пилу кожної фракції наступних діапазонів: <10; 10–20; 20–40; 40–60; 60–80; 80–100 мкм.

Лінійні розміри часток визначали за допомогою молекулярної мікрометричної лінійки мікроскопа. Проводився підрахунок частинок кожної фракції, визначалася частка частинок (у %), що потрапили в певний діапазон їх розмірів і перераховувалась кількість на масовий вміст (у %) для кожного діапазону розмірів.

Були виконані дослідження дисперсного складу пилу аглогазів [84, 85, 122, 124] на агломашинах № 2 і № 5 без застосування ПАР та при обробці аглошихти розчинами ПАР з витратами 60 г/т. Результати виконаних досліджень наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Фракційний склад пилу в аглогазах

Місце відбору	діаметр, мкм	<10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Перед мультициклоном а/м №2	без ПАР	0,54	5,39	12,58	23,96	30,38	27,15
	з ПАР	0,32	2,59	9,18	25,15	35,6	27,16
Перед мультициклоном а/м №5	без ПАР	0,45	4,19	12,18	27,15	33,37	22,66
	з ПАР 70	0,24	1,98	9,02	30,66	31,32	26,78

Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном на агломашинах № 2 і № 5 наведено на рисунках 4.17 – 4.18.

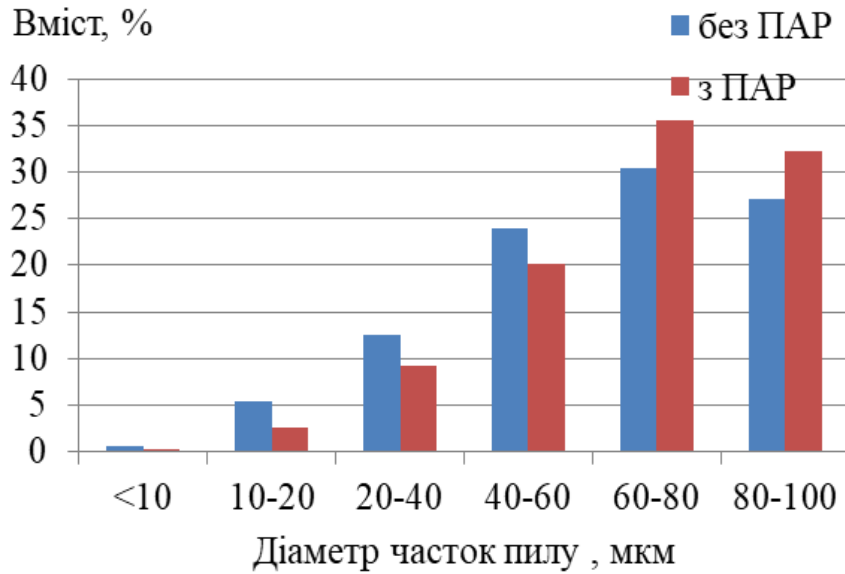


Рисунок 4.17 – Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 2

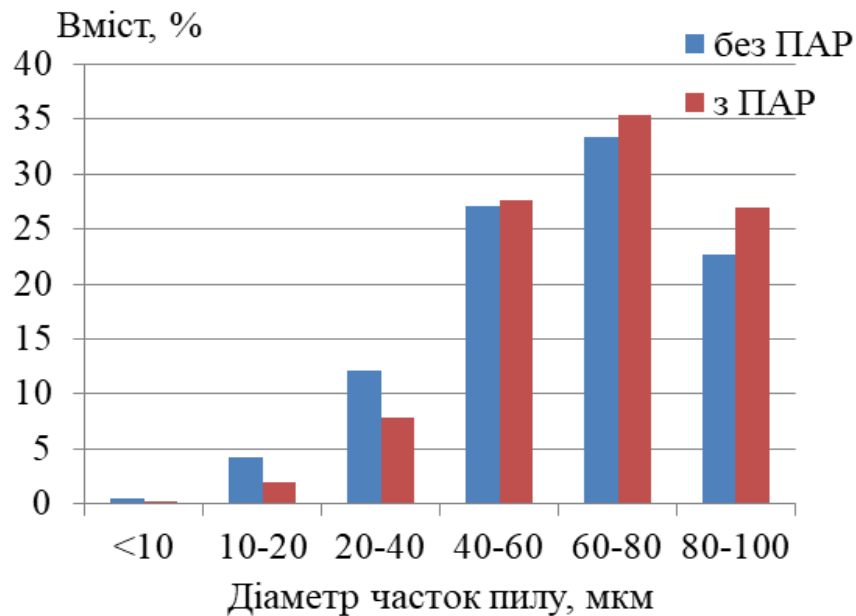


Рисунок 4.18 – Щільність розподілу пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 5

Інтегральна крива масового розподілу часток пилу за розміром перед мультициклоном агломашин № 2 і № 5 наведено на рисунках 4.19 – 4.20.

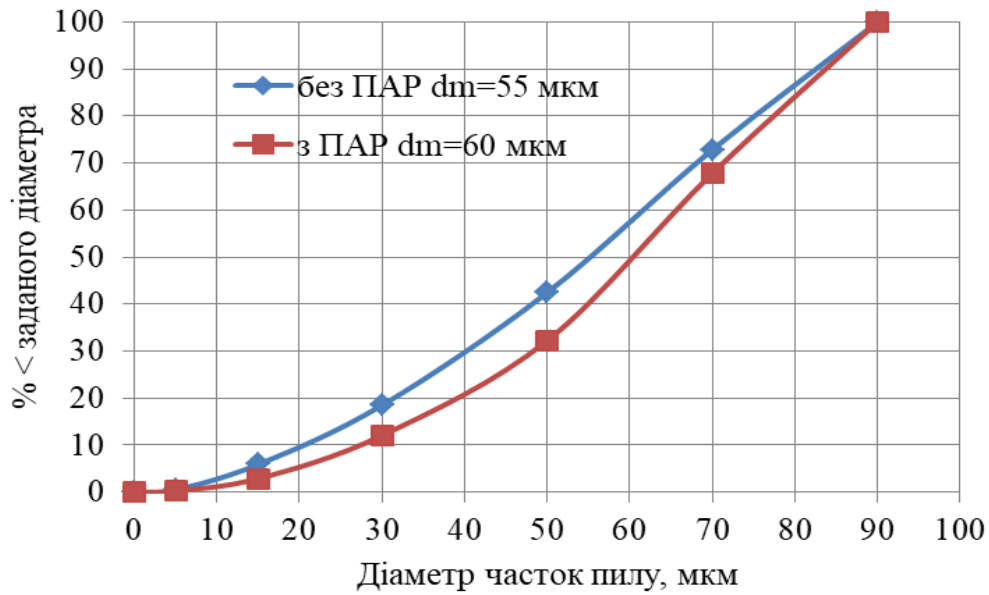


Рисунок 4.19 – Масовий розподіл часток пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 2

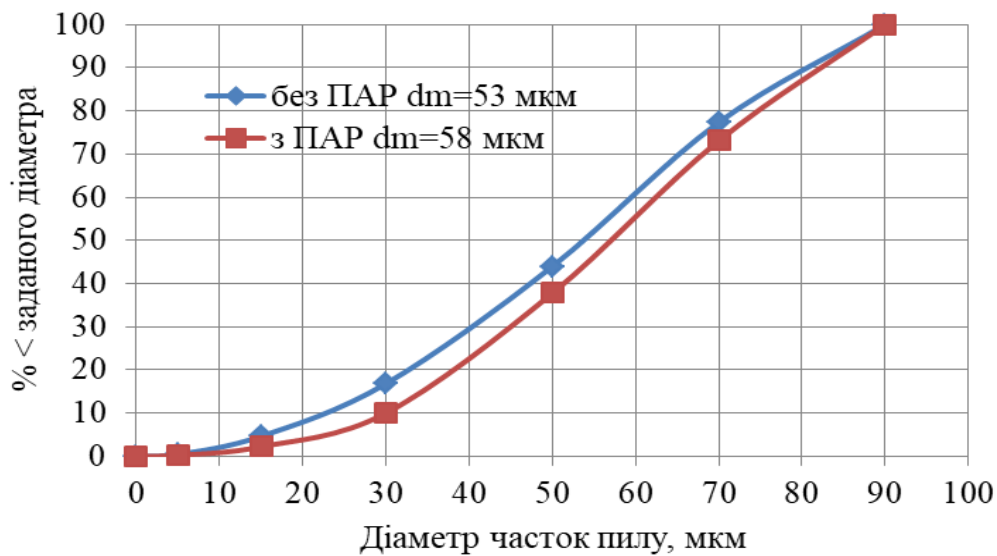


Рисунок 4.20 – Масовий розподіл часток пилу за розміром перед мультициклоном агломашини № 5

Аналіз даних, приведених в таблиці 4.7 та на рисунках 4.17 – 4.20 показав, що при використанні ПАР середньомедіанний розмір часток пилу в аглогазах перед їх кінцевою очисткою в мультициклонах збільшується для агломашини № 2 з 55 до 60 мкм та з 53 до 58 мкм для агломашини № 5. Зменшення частки дрібних фракцій пилу, що надходить в аглогази із

аглошихти, яка спікається, пояснюється тим, що застосування ПАР дозволяє ліофілізувати поверхню твердих часток і полегшує процес змочування як великих, так і дрібних фракцій аглошихти. Це сприяє покращенню процесів грудкування аглошихти, що є передумовою для поліпшення ефективності очистки аглогазів в мультициклонах.

Безумовно важливим показником при дослідженні фракційного складу пилу є аналіз вмісту саме дрібнодисперсного пилу, тому що по-перше, ця фракція пилу практично не вловлюється в існуючих апаратах газоочистки, а по-друге, дрібнодисперсний пил найбільш негативно впливає на організм людини, більш глибоко проникаючи в легені і затримуючись там на довгий час. Отримані нами дані по вмісту дрібнодисперсного пилу наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Процентний вміст часток пилу перед мультициклоном фракції менше 20 мкм

№ а/м		без ПАР	з ПАР
2	За кількістю	81,66	73,12
	За масою	5,93	2,91
5	За кількістю	78,19	68,28
	За масою	4,64	2,22

Аналіз отриманих даних показав, що при введенні ПАР в аглошихту відбувається зниження частки дрібних фракцій перед мультициклоном. Так, перед мультициклоном а/м № 2 вміст фракції діаметром менше 20 мкм знизилась на 51 % (з 5,93 % до 2,91 %); вміст фракції 20–40 мкм – на 27 % (з 12,58 % до 9,18 %). Перед мультициклоном а/м № 5 вміст фракції діаметром менше 20 мкм знизилась на 52 % (з 4,64 % до 2,22 %); вміст фракції 20–40 мкм – на 26 % (з 12,18 % до 9,02 %).

Висновки до розділу 4

1. Проведено дослідження на лабораторному стенді ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», які показали, що застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти дозволяє значно покращити грудкування аглошихти. Встановлено зменшення частки фракції менше 3 мм в огрудкованій аглошихті з 50 % до 30 %. Показано збільшення частки фракцій в діапазоні від 5 до 8 мм, які вважаються найбільш «корисними» в процесах агломерації, з 14 % до 19 %. Обґрунтовано, що найкращі показники грудкування були зафіксовані при питомих витратах ПАР 40 – 60 г/т.

2. В результаті стендових досліджень встановлено, що застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти забезпечує також зменшення запиленості аглогазів більш як в 3 рази. Причому, найменші значення запиленості спостерігаються при витратах ПАР 60 г/т. Тобто, із покращенням ступеню грудкування аглошихти відбувається зменшення виносу пилу із шару аглошихти при її спіканні.

3. Розроблено математичну модель визначення концентрації розчину ПАР біля поверхні шихти, яка дозволила обґрунтувати раціональну висоту розташування піногенератора, що складає 0,5 м.

4. Розроблено технологічну схему обробки аглошихти розчинами ПАР, змонтований експериментальний зразок установки та впроваджено у виробництво систему обробки аглошихти розчинами ПАР на аглофабриці ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», призначену для обробки аглошихти розчином піноутворювача типу «ТЕАС» в пінному режимі на конвеєрах шихтового відділення аглофабрики.

5. Проведено промислові дослідження запиленості газів у вакуум-камерах, перед мультициклонами та після мультициклону агломашини. Показано зниження з 15 % до 40 % початкової запиленості аглогазів, яка вимірювалась в вакуум-камерах агломашини № 5, що дозволяє зменшувати

пилове навантаження на наступні апарати газоочищення. Встановлено зменшення на 40 % в результаті застосування ПАР запиленості аглогазів перед мультициклонами агломашин № 2 та № 5 в результаті застосування ПАР.

6. Встановлено, що в результаті впровадження системи обробки аглошихти розчинами ПАР при дослідженні концентрації пилу в аглогазах після очищення їх в мультициклоні, спостерігається зниження концентрації пилу на 86 %. Це зумовлено як зменшенням початкової запиленості аглогазів, які надходять в мультициклон, так і дисперсним складом пилу в аглогазах.

7. Проаналізовано дисперсний склад пилу аглогазів до і після засосування розчинів ПАР типу «ТЕАС» мікроскопічним методом. Показано зменшення частки дрібних фракцій пилу розміром менше 20 мкм на 52 % при застосуванні розчинів ПАР для обробки аглошихти.

8. Експериментальні дослідження, виконані безпосередньо в промислових умовах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», підтвердили результати теоретичних, лабораторних та стендових досліджень зменшення надходження пилу в атмосферне повітря при впровадженні системи обробки аглошихти розчинами ПАР.

Основні положення розділу 4 опубліковані автором в наукових працях: [1, 2, 21, 84, 85, 87, 122, 123, 124, 141, 145].

РОЗДІЛ 5

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗНЕПИЛЕННЯ АГЛОГАЗІВ

5.1 Оцінка впливу застосування ПАР на навколишнє середовище

Як показано в попередніх розділах цієї роботи, в результаті неефективного грудкування аглошихти в процесі її спікання значно збільшується винос пилу зі спікаємого шару, що призводить не тільки до погіршення екологічної ситуації в зоні впливу підприємства, але і до зниження ефективності виробництва в цілому.

З метою поліпшення грудкування аглошихти і зменшення викидів пилу з агломераційними газами в шихтовому відділенні аглоцеху ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлена система обробки аглошихти ПАР.

Як показали дослідження, обробка аглошихти розчинами ПАР сприяє поліпшенню грудкування аглошихти, а, отже, збільшенню газопроникності шару. Як було вказано в розділі 3.2, в якості ПАР для обробки аглошихти застосовується піноутворювач ТЕАС, який згідно «Висновку державної санітарно-епідеміологічної експертизи» відноситься до малонебезпечних (IV клас небезпеки) шкідливих речовин. У порівнянні з іншими аніоноактивними ПАР ТЕАС є найменш біологічно-активною речовиною, і при забезпеченні герметичності обладнання та автоматичного регулювання роботою системи обробки аглошихти поверхнево-активними речовинами практично виключається інгаляційна або контактна дія ТЕАС на організм обслуговуючого персоналу.

При виконанні вимог «Інструкції по експлуатації СОАПАР» практично виключається потрапляння ТЕАС в воду і в каналізаційну систему. З огляду на відсутність системи водовідведення в шихтовому відділенні аглоцеху навіть

при випадкових розливах ПАР потрапляння в каналізаційні стоки виключається.

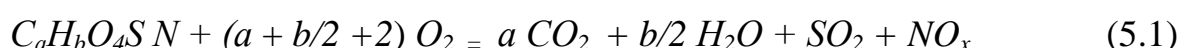
При забрудненні ґрунтів в результаті розливу ПАР знятий шар забрудненого ґрунту підлягає видаленню на полігони твердих відходів згідно з вимогами безпеки при поводженні з відходами 4-го класу небезпеки.

За ступенем біорозпаду ТЕАС відноситься до м'яких аніоноактивні ПАР. При попаданні в компоненти навколишнього середовища протягом чотирьох років ступінь біорозпаду досягає 94 – 96 %.

При обробці аглошихти ТЕАС в пінному режимі за рахунок герметичності вузлів системи обробки аглошихти ПАР практично виключається потрапляння в ґрунт, водні об'єкти і повітря.

У процесі спікання аглошихти, обробленої ТЕАС в пінному режимі з масовим вмістом в аглошихті в тисячних частках, внаслідок термічної дисоціації в середовищі кисню і аглогазів при температурах до 1200°C утворюються окисли азоту і сірки.

У загальному випадку процес термічної дисоціації ТЕАС можна представити у вигляді:



де a , b – кількість атомів відповідного хімічного елементу в хімічній формулі речовини.

Для оцінки зміни складу аглогазів в результаті застосування ТЕАС був виконаний термодинамічний розрахунок процесу термічної дисоціації компонентів ТЕАС в спікаємому шарі аглошихти. Отримані розрахункові дані щодо збільшення концентрацій компонентів в аглогазах за рахунок газоподібних продуктів, що виділяються внаслідок термічної дисоціації ТЕАС представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Збільшення концентрації шкідливих речовин за рахунок продуктів термічної дисоціації компонентів ТЕАС, мг/м³

Речовина	Температура, °С			
	1000	1100	1200	1300
CO ₂	$1,92 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$
SO ₂	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
NO	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$

При визначених витратах ПАР токсичні компоненти SO₂ и NO_x утворюються в мізерно малих кількостях і не впливають на склад викидів в атмосферу.

5.2 Аналіз впливу приземних концентрацій пилу на населення

Агломераційний цех розташовано далеко по території ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», однак вже на відстані 2,4 км від джерела викиду знаходиться житлова зона з густонаселеними вулицями Металургійного району. Взагалі в Металургійному районі м. Кривий Ріг проживає більше 70000 мешканців. Однак, враховуючи загальну площу району (52 км²), детальному аналізу підлягає територія, що знаходиться в безпосередній близькості від ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а саме: вул. Криворіжсталі, вул. Яковлева, вул. Нахімова, бул. Тбіліська, вул. Чавуноливарна та ін. Окрім житлових будинків в зоні впливу викидів шкідливих речовин розташовані чисельні магазини продовольчих та непродовольчих товарів, відділення банків та поштові відділення, центр первинної медико-санітарної допомоги. На відстані близько 3 км на північно-захід знаходиться дитячий садок «Малинка», ЗОШ № 15, а також на відстані близько 3,5 км знаходиться Криворізький будівельний коледж, трохи далі Криворізький медичний коледж та Державний університет економіки та технології. Розташування агломераційного цеху відносно житлової зони зображено на рисунку 5.1.

Для оцінки впливу промислових викидів від агломераційного виробництва були виконані розрахунки приземних концентрацій при викиді аглогазів від аглофабрики «АрселорМіттал Кривий Ріг» з використанням Методики розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин [70].

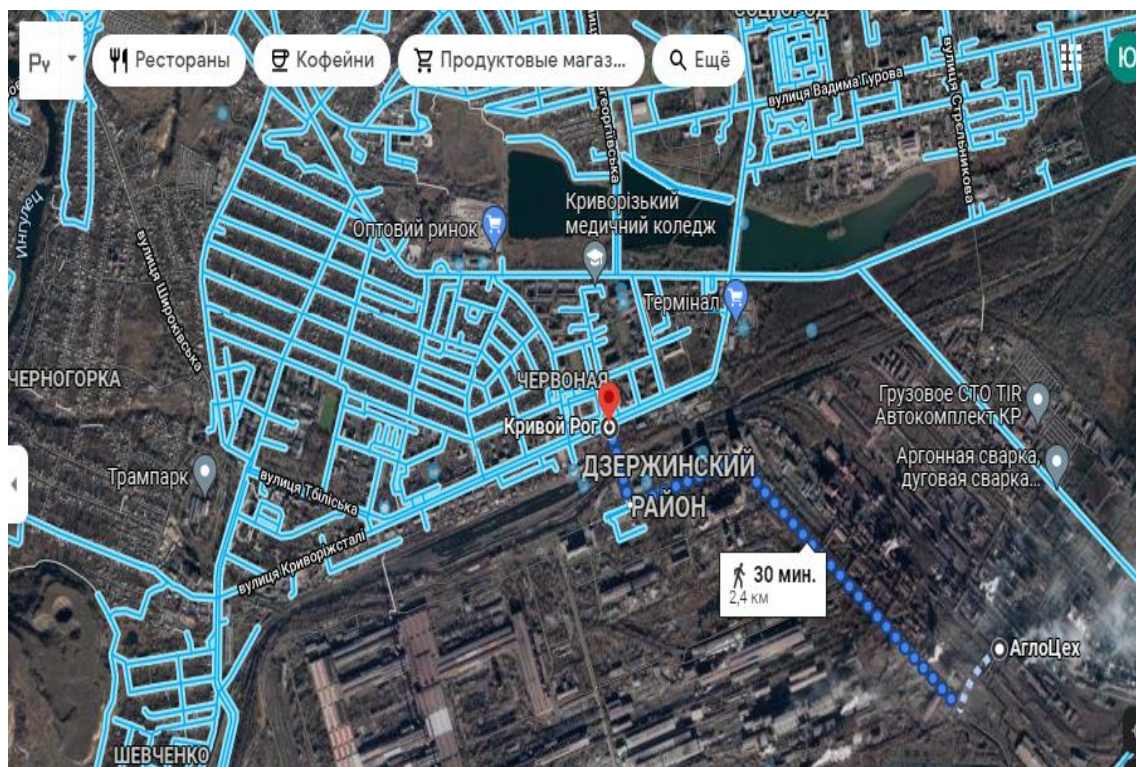


Рисунок 5.1 – Карта агломераційного цеху та прилеглої житлової зони

При експлуатації аглоцеху викиди шкідливих речовин в атмосферу здійснюються через дві димові труби. Вихідні дані по джерелам викидів, що були використані для розрахунку розсіювання компонентів аглогазів, представлені в таблиці 5.2.

Було проведено порівняння отриманого в результаті досліджень розподілу концентрацій пилу в приземному шарі атмосфери [87]. Результати розрахунку концентрацій на певних відстанях від джерела викиду наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.2 – Характеристики джерел викидів шкідливих речовин (ШР) від аглоцеху

Джерело викиду ШР	Висота труби, м	Діаметр труби, м	Питомі викиди аглогазів, м ³ /с	Інтенсивність викидів ШР, г/с				
				пил		СО	SO ₂	NO ₂
				без ПАР	з ПАР			
Димова труба №1	80,0	6,4	433,33	157,12	109,98	1780,16	44,396	64,934
Димова труба №2	80,0	4,5	108,33	39,28	33,38	445,04	11,099	16,233

Таблиця 5.3 – Розподіл пилу в приземному шарі атмосфери

Підготовка аглошихти	Концентрації (мг/м ³) на різних відстанях (м) від джерела				
	500	1000	2000	3000	5000
Без ПАР	1,366	1,621	1,346	1,115	0,861
З ПАР	0,708	0,744	0,704	0,672	0,636

Було побудовано карти розсіювання пилу до обробки аглошихти перед грудкування розчинами ПАР (рис. 5.2) та після впровадження запропонованого способу обробки аглошихти (рис. 5.3), на яких x , y – відстань від джерела забруднення, м; к.т. – контрольна точка на вул. Криворіжсталі.

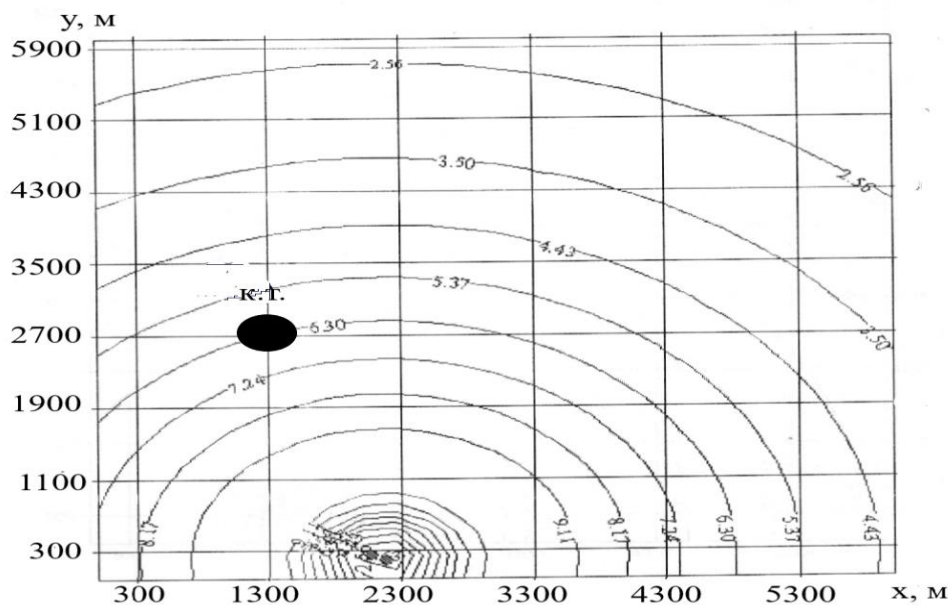


Рисунок 5.2 – Карта розсіювання пилу до застосування розчинів ПАР для обробки аглошихти

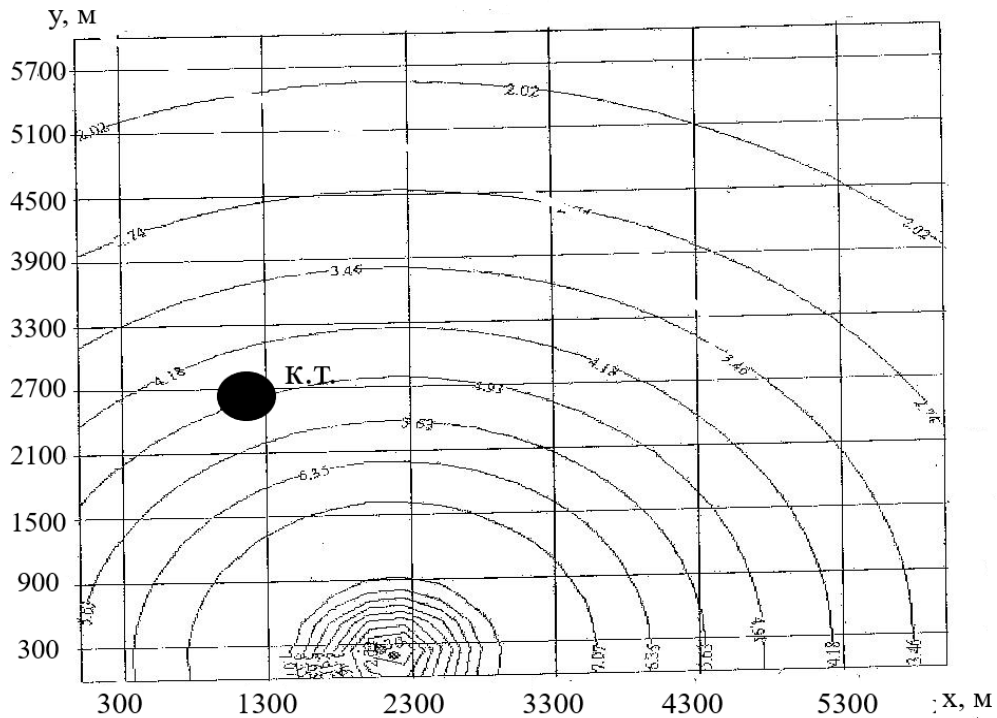


Рисунок 5.3 – Карта розсіювання пилу при застосуванні розчинів ПАР для обробки аглошихти

Наведено, що у м. Кривий Ріг у житловій зоні Металургійного району на вулиці Криворіжсталі, що розташована на відстані 2400 м від димової труби аглофабрики, фактична концентрація пилу складає 6,3 ГДК_{с.д.} до застосування, та 4,91 ГДК_{с.д.} – після застосування способу обробки аглошихти розчинами ПАР.

5.3 Обґрунтування зниження ризику захворюваності населення внаслідок зниження запиленості

Враховуючи складну екологічну ситуацію в промислових регіонах, в тому числі в м. Кривий Ріг, необхідно більш детально дослідити зв'язок підвищених концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі та захворюваності населення, що проживає у екологічно забруднених промислових регіонах.

На здоров'я людини впливає сукупність цілого ряду факторів: спадкові захворювання, соціально-економічне становище, медичне обслуговування,

спосіб життя і шкідливі звички, якість життєдіяльності та забруднення навколишнього природного середовища. Визначити у розвитку захворювання органів дихання частки саме забруднення атмосферного повітря є досить важкою задачею.

Нині одним із найбільш розповсюджених сучасних підходів до визначення зв'язку між забрудненням атмосферного повітря та здоров'ям населення є методологія оцінки ризику. Існує декілька методик, за допомогою яких можна визначити ризик захворюваності, пов'язаної зі шкідливою дією факторів навколишнього природного середовища [48, 66, 69, 77, 81, 102].

Щоб оцінити ризик необхідно, по-перше, визначити небезпеки, тобто відібрати визначальні фактори та хімічні речовини. В даній роботі проведено дослідження залежності зниження захворюваності населення внаслідок зменшення виносу пилу в процесах агломерації залізної руди.

Одним з методів оцінки ризику захворюваності є розрахунок ймовірності захворювання на основі значення інтегрального показника, запропонований В.В. Ткачовим [66, 92]. Чисельно ризик можна оцінити за формулою:

$$R = 8,6x_1 + 6,0x_2 + 19,4x_3k_1 + 6,4x_4k_2k_3, \quad (5.2)$$

де R – інтегральний показник ризику захворювання; x_1 – вік працівника, роки; x_2 – стаж роботи, роки; x_3 – стаж роботи, враховуючи контакт з пилом, роки; x_4 – концентрація пилу в повітрі, мг/м³; k_1 – коефіцієнт, що враховує вміст SiO₂ (табл. 5.4); k_2 – коефіцієнт, що враховує мінеральний склад і концентрацію пилу в повітрі (для порідного пилу з вмістом в ньому вільного кремнезему 10 – 70 % цей коефіцієнт дорівнює 2,3); k_3 – коефіцієнт, що враховує важкість праці (табл. 5.5).

Таблиця 5.4 – Значення коефіцієнту k_1 в залежності від вмісту вільного діоксиду кремнію (ВДК)

Вміст ВДК	Менше 2,0	2,1 – 10,0	10,1 – 70,0	70,1 і більше
Коефіцієнт k_1	0,6	0,8	1,0	1,2

Коефіцієнт, що враховує вміст діоксиду кремнію для нашого випадку приймаємо 0,8. Коефіцієнт, що враховує мінеральний склад, для породного пилу дорівнює 2,3.

Таблиця 5.5 – Значення коефіцієнту k_3 в залежності від категорії умов праці за показниками тяжкості робочого процесу

Показник	Категорія тяжкості праці				
	Ia – легка робота	Iб – легка робота	IIa–робота середньої важкості	IIб-робота середньої важкості	III – важка робота
k_3	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8

Формула (5.2) використовувалась для розрахунку інтегрального показника та оцінки ризику захворювання населення, що мешкає в зоні безпосереднього впливу аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Оцінка проводилась на прикладі населення віком 40 років, категорія важкості роботи прийнята I (коефіцієнт k_3 дорівнює 1,1). Таким чином $x_1 = x_2 = x_3 = 40$ [21].

Враховуючи, що в дисертаційній роботі оцінювався ризик захворюваності населення, а не працівників, враховувалось перевищення ГДК пилу в повітрі робочої зони над ГДК в атмосферному повітрі. Ризик захворювання людини визначають виходячи з величини інтегрального показника (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Залежність ризику захворювання (%) від інтегрального показника захворюваності

Інтегральний показник	1000-1150	1151-1200	1201-1250	1251-1300	1301-1350	1351-1400	1401-1450	1451-1500	1501-1550	1551-1600	> 1600
Ризик захворювання,%	до 2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90

Результати визначення ризику захворюваності для вибраної категорії населення на різних відстанях від джерела викиду (аглофабрика ВАТ «АрселорМіттал Кривий ріг») наведено в таблиці 5.7 [21, 86].

Таблиця 5.7 – Ризик захворюваності населення (%) залежно від відстані до джерела викиду пилу (м).

Підготовка аглошихти	Інтегральний показник ризику, R					Ризик захворювання, %				
	Відстань до джерела викиду, м									
	500	1000	2000	3000	5000	500	1000	2000	3000	5000
без ПАР	1382	1415	1379	1349	1316	40	50	40	30	30
з ПАР	1297	1301	1296	1292	1287	20	20	20	20	20

Отримані результати свідчать про те, що істотне зменшення винесення пилу з агломераційними газами, внаслідок обробки агломераційної шихти перед спіканням розчинами ПАР, призводить до зниження захворюваності населення в селітебній зоні поблизу агломераційної фабрики, наприклад, на відстані 2000 м в два рази.

Також ризик для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря можна оцінити, визначивши коефіцієнт небезпеки згідно з методичними рекомендаціями [99], порівнюючи фактичні отримані дози з безпечними рівнями впливу:

$$HQ = AD/RfD, \quad (5.3)$$

де: HQ – коефіцієнт небезпеки; AD – середня отримана доза, [мг/кг]; RfD – референтна, тобто безпечна доза, [мг/кг].

Формула розрахунку середньої добової дози (AD) при інгаляційному впливі речовини має вигляд:

$$AD = [(Ca \cdot Tout \cdot Vout) + (Ch \cdot Tin \cdot Vin)] \cdot EF \cdot ED / (BW \cdot AT \cdot 365), \quad (5.4)$$

де: AD – середня добова доза речовини, [мг/кг]; Ca – концентрація речовини в атмосферному повітрі, [мг/м³]; Ch – концентрація речовини в повітрі приміщення, [мг/м³]; $Tout$ – час, що людина проводить поза приміщенням, [год/добу]; Tin – час, що людина проводить в приміщенні, [год/добу]; $Vout$ – швидкість дихання людиною при знаходженні поза приміщенням, [м³/год]; Vin – швидкість дихання людини в приміщенні, [м³/год]; EF – кількість днів на рік впливу, [днів/рік]; ED – тривалість впливу, [років]; BW – маса тіла людини, [кг]; AT – період осереднення експозиції, [років]; 365 – кількість днів в році.

Безпечну дозу визначаємо аналогічним чином за формулою (5.4), використовуючи замість фактичної концентрації пилу її гранично допустиму концентрацію. $RfD = 0,146$ мг/кг. Результати розрахунків коефіцієнтів небезпеки, як характеристик ризику розвитку захворювання, на різних відстанях від аглофабрики ВАТ „АрселорМіттал Кривий Ріг” наведені в таблиці 5.8 [21, 158].

Таблиця 5.8 – Добові дози і коефіцієнти небезпеки залежно від відстані до джерела викиду пилу (м)

Підготовка аглошихти	Середня добова доза, AD , мг/кг					Коефіцієнт небезпеки, HQ				
	Відстань до джерела викиду, м									
	500	1000	2000	3000	5000	500	1000	2000	3000	5000
без ПАР	0,398	0,47	0,39	0,325	0,25	2,73	3,219	2,67	2,23	1,712
з ПАР	0,206	0,22	0,205	0,196	0,18	1,41	1,507	1,404	1,342	1,233
Ефект впливу, %	48	53	47	40	28	48	53	47	40	28

Показано, що зниження розрахункового коефіцієнта небезпеки, наприклад, на відстані 2000 м складає 47 % при використанні запропонованої технології та схеми обробки аглошихти розчинами ПАР перед її спіканням.

Таким чином, проведені дослідження по визначенню інтегрального показника ризику захворювання та коефіцієнту небезпеки, вказують на значний вплив агломераційного виробництва на довкілля, а також підтверджують ефективність запропонованих способів пилоподавлення з використанням ПАР, що дозволяє знизити вдвічі значення ризику захворювання.

Висновки до розділу 5

1. Проаналізовано вплив впровадження запропонованого методу обробки аглошихти розчинами поверхнево-активних речовин на організм людини та навколишнє середовище, встановлено, що ТЕАС є найменш біологічно-активною речовиною, і при забезпеченні герметичності обладнання та автоматичного регулювання роботою системи обробки аглошихти поверхнево-активними речовинами практично виключається інгаляційна або

контактна дія ТЕАС на організм обслуговуючого персоналу. При виконанні вимог «Інструкції по експлуатації СОАПАР» практично виключається потрапляння ТЕАС в воду і в каналізаційну систему.

2. Показано, що при встановлених витратах ПАР токсичні компоненти SO_2 и NO_x , що виділяються внаслідок термічної дисоціації при спіканні агломераційної шихти, утворюються в мізерно малих кількостях і не впливають на склад викидів в атмосферу.

3. Проведено розрахунки концентрацій пилу в приземному шарі атмосфери та встановлено, що застосування методу обробки аглошихти перед її грудкуванням розчинами ПАР призведе до зниження концентрації пилу в приземному шарі атмосфери на відстані 1000 м на 54 %.

4. Досліджено зв'язок підвищених концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі та захворюваності населення, що проживає у екологічно забруднених промислових регіонах. В якості підходу до встановлення зв'язку між станом навколишнього природного середовища та здоров'ям населення обрано методологію оцінки ризику. Набули подальшого розвитку наукові засади розрахунку ризику забруднення навколишнього середовища та захворювання населення в зоні впливу агломераційного виробництва, які враховують інтенсивність надходження пилу в атмосферу та ефект пилоподавлення з використанням ПАР, що дозволяє знизити вдвічі значення ризику захворювання.

Основні положення розділу 5 опубліковані автором в наукових працях: [2, 21, 86, 87, 141, 145].

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій розв'язано актуальне науково-практичне завдання зниження шкідливого впливу пилу при роботі металургійних підприємств на стан забруднення атмосфери за рахунок обезпилення аглогазів двоохвідсотковим розчином поверхнево-активної речовини типу «ТЕАС», встановлення закономірностей зміни гранулометричного складу огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР та визначення раціональної висоти розташування піногенератора над конвеєрною стрічкою, що у сукупності забезпечує зменшення техногенного впливу на атмосферу, підвищення рівня екологічної безпеки та зниження вдвічі значення ризику захворювання населення в зоні впливу агломераційних робіт.

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному:

1. Виконано аналіз впливу на навколишнє середовище шкідливих чинників під час роботи металургійних підприємств. Виявлено, що основним джерелом забруднення атмосферного повітря пилом є процеси спікання агломераційної шихти на агломашинах, при цьому вміст пилу в аглогазах може коливатися від 2000 до 6000 мг/м³. Запропоновані рішення з знепилення аглогазів шляхом покращення процесів грудкування аглошихти перед її надходженням на палети агломашин з використанням розчинів поверхнево-активних речовин.

2. Визначено особливості аерогазопилового навантаження у газоходах агломашин № 2 і № 5 в умовах аглофабрики ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та встановлено високу нерівномірність поля швидкостей і запиленості газів на вході в мультициклони, що приводить до недостатньої ступіні пилоочистки газів, особливо від пилу дрібних фракцій. Відзначено, що при загальному зниженні концентрації пилу в аглогазах після очистки в мультициклоні на 72 %, пилоочистка фракцій розміром менше 50 мкм складає тільки 49 %.

3. Визначені пріоритетні класи ПАР для боротьби з пилом. Обґрунтовано доцільність застосування для обезпилення газів в технологічних процесах агломераційного виробництва піноутворювача на основі триетаноламінових солей алкілсульфатів первинних жирних спиртів (ТЕАС), який є малотоксичним, вибухобезпечним, важкогорючим, дозволяє одержувати піну кратністю 150 – 200 з стійкістю – 750 с та є можливість його постачання підприємствами України.

4. Проведено комплекс лабораторних досліджень фізико-хімічних властивостей ПАР типу «ТЕАС» та вперше встановлені залежності поверхневого натягу і крайового кута змочування від концентрації розчину поверхнево-активної речовини, які дозволили рекомендувати до використання у процесах грудкування аглошихти та обезпилення аглогазів двохвідсотковий розчин ТЕАС.

5. Проведено експериментальні дослідження в промислових умовах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», вперше встановлені закономірності зміни гранулометричного складу огрудкованої аглошихти від питомих витрат ПАР у процесі її обробці, які з достатньою точністю описуються поліномом другого порядку, що дозволяє при витратах ПАР 40-60 г/т забезпечити зменшення концентрації пилу в аглогазах на 86 %.

6. Вперше розроблено та апробовано математичну модель процесу розсіювання ПАР над конвеєрною стрічкою з урахуванням концентрації розчину ПАР біля поверхні шихти та висоти розташування піногенератора, що дозволяє визначати раціональну висоту розташування піногенератора над конвеєрною стрічкою, та дало можливість рекомендувати для промислових умов аглоцеху «АрселорМіттал Кривий Ріг» розташування піногенератора на висоті 0,5 м.

7. Розроблено та впроваджено систему обробки аглошихти розчином ПАР типу «ТЕАС» в аглоцеху ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», яка включає процеси створення розчину ПАР заданої концентрації, генерування піни,

розпилення та покриття піною аглошихти, що забезпечує зменшення викидів в атмосферу пилу фракції до 20 мкм в процесах агломерації на 52 %.

8. Отримав подальший розвиток метод розрахунку ризику забруднення навколишнього середовища та захворювання населення в зоні впливу агломераційного виробництва, котрі враховують інтенсивність надходження пилу в атмосферу та ефект пилоподавлення з використанням ПАР, що дозволяє знизити вдвічі значення ризику захворювання.

9. Результати роботи впроваджені у виробництво ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у вигляді технологічної схеми обробки аглошихти розчинами ПАР; в навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара при проведенні практичних та лекційних занять з дисциплін «Технології основних виробництв», «Урбоекологія» та «Промислова екологія» для студентів спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агапова В.Т., Нестеров А.С., Якушев В.С., Шишацкий А.Г., Пицък Ю.В. Результаты спекания и свойства агломерата из шихт подготовленных с использованием поверхностно-активных веществ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. №25. С. 9–18.
2. Агапова В.Т., Пицък Ю.В., Шишацкий А.Г. Снижение запыленности аглогазов методом улучшения окомкования аглошихты. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2010. Вип. 7–8. С. 90–92.
3. Александров М. Оборудование REDECAM для систем пылеудаления и газоочистки (REDECAM Group S.r.s Италия). *Межотраслевой научно-технический журнал «Пылегазоочистка»*. 2014. № 7. С. 13–19.
4. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Москва : Металлургия, 1986. 544 с.
5. Андоньев С.М., Филиппев С.В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. Москва : Металлургия, 1973. 200 с.
6. Андрианов Е. И. Методы определения прочности реологических характеристик порошкообразных материалов. Москва : Химия, 1981. 256 с.
7. Архипкин В.С., Добролюбов С.А. Океанология. Физические свойства морской воды. Москва : МАКС Пресс, 2005. 216 с.
8. Батлук В.А., Проскуріна І.В., Ляшеник А.В. Математична модель процесу очищення запиленого потоку у відцентрово-інерційних пиловловлювачах. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2010. № 1(27). С. 31–36.
9. Батлук В.А., Шальский Г.Г., Проскурина И.В. Система обеспыливания в коксохимическом производстве. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2005. №20. С. 218–229.
10. Баштаннік М.П., Жемера Н.С., Кіптенко Є.М., Козленко Т.В. Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. *Наукові*

праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. 2014. Вип. 266. С. 70–93.

11. Березкин В.И. Введение в физическую адсорбцию и технологию углеродных адсорбентов. Санкт-Петербург : Виктория плюс, 2013. 409 с.
12. Бересневич П.В., Ткаченко А.В. Микроклимат железорудных карьеров и нормализация их атмосферы. Ленинград : Гидрометиздат, 1987. 180 с.
13. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. Москва : Химия, 1974. 345 с.
14. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
15. Берштейн Р.С. Совершенствование технологии спекания агломерата. Днепропетровск : Промінь, 1975. 11 с.
16. Богоявленская В.Ф., Бичева Е.Г., Стащенко А.В., Гураль О.И., Екимова А.А., Вознюк Е.Ф. Экспериментальное исследование эмбриотоксического действия комплекса загрязнителей атмосферного воздуха в Криворожском промышленном регионе. *Гигиена и санитария*. 1999. №1. С. 59–61.
17. Богоявленская В.Ф., Бичева Е.Г., Стащенко А.В., Екимова А.А., Вознюк Е.Ф. Влияние комплекса загрязнителей окружающей среды горнодобывающего и металлургического промышленного региона на потомство белых крыс F1. *Гигиена и санитария*. 2001. №3. С. 21–23.
18. Большая Е.П. Экология металлургического производства : учебн. пособ. Новотроицк : НФ НИТУ "МИСиС", 2012. 155 с.
19. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва : Наука, 1986. 544 с.
20. Величко А.Г., Бобылев В.П., Турищев В.В. Эколого-технологические аспекты расширения ресурсосберегающих функций агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 2. С. 107–109.

21. Войтенко Ю.В., Левицька О.Г. Підвищення екологічної безпеки селітебних територій в зонах інтенсивного забруднення атмосферного повітря. *Збірник наукових праць НГУ*. 2020. №61. С. 94–102.
22. Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. Общая металлургия. Москва : Академкнига, 2005. 768 с.
23. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. Москва : Химия, 1975. 512 с.
24. Вредные вещества в промышленности / Под ред. Н.В. Лазарева. Ленинград : Химия, 1969. 536 с.
25. Гапон В.А. Техногенное загрязнение атмосферного воздуха металлургического региона в зависимости от времени года и метеоусловий. *Довкілля та здоров'я*. 2001. №1. С. 29–31.
26. Гельфанд Ф.М., Журавлев В.П. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах. Москва : Недра, 1975. 288 с.
27. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. Санкт-Петербург : Лань, 2004. 336 с.
28. Герасимов Л.К. Решение экологических и энергосберегающих задач при производстве агломерата. *Сталь*. 1994. №4. С. 78–81.
29. Герасимов Л.К., Добряков Г.Г. Эффективность пылеосаждения в элементах газоотводящих трактов агломашин. *Сталь*. 1993. №8. С. 188–191.
30. Голінько В.І., Савельєв Д.В., Чеберячко І.М., Пустовой Д.С. Зниження концентрації дрібнодисперсного пилу при проходці гірничих виробок з використанням енергії вибуху. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2019. № 57. С.169–177.
31. Головин Ю. И., Викторов С. Д., Тюрин А. И. Размерные эффекты упругих и прочностных свойств отдельных фаз и межфазных границ поликристаллических материалов. *Известия Российской Академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. №5. С. 573–577.

32. Горбань Т.В., Гапон В.О. Рівень захворюваності дітей – мешканців м. Кривий Ріг. *Довкілля та здоров'я*. 2006. №4. С. 63–65.
33. ГОСТ 12.1.007- 76. Классификация и общие требования безопасности. Москва : Издательство стандартов, 1976. 7 с.
34. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. Москва, 1990. 17 с.
35. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Москва : Мир, 1984. 306 с.
36. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Ленинград : Химия, 1972. 428 с.
37. Додина Л.Г. Некоторые аспекты влияния антропогенного загрязнения окружающей среды на здоровье населения. *Гигиена и санитария*. 1998. №3. С. 48–52.
38. Ермаков И.В. Удаление пыли в различных технологических системах GORCOSA (Испания). *Межотраслевой научнопрактический журнал «Пылегазоочистка»*. 2017. № 14. С. 8–11.
39. Журавлев В.П., Рыжих Л.И., Поелуев А.П., Волкова В.П. Теплота смачивания угля растворами. *Вопросы безопасности в горной промышленности*. Москва : Недра, 1967. С. 27–31.
40. Звіт про стратегічну екологічну оцінку (СЕО). Стратегії розвитку Дніпропетровської області на період до 2020 року / Марушевський Г., Аїєва О. Дніпропетровськ : Проект МЕРМ, 2014. 94 с.
41. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. Москва : Химия, 1974. 455 с.
42. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. Москва : Химия, 1967. 372с.
43. Зимон А.Д. Занимательная коллоидная химия. Москва : Агар, 2002. 169 с.
44. Зимон А.Д. Коллоидная химия : Общий курс. Москва : Красанд, 2019. 342 с.

45. Зимон А.Д. Коллоидная химия. Москва : Химия, 2001. 289 с.
46. Казаков М.В., Дяглева Л.К., Одинец М.В. Пенообразующая способность вторичных алкилсульфатов и нормальных алифатических спиртов. *Пены, получение и применение, ч.1*. 1974. С.101–106.
47. Казюта В.И., Мантула В.Д., Швец М.Н. Опыт применения рукавных фильтров для очистки аглогазов. *Сталь*. 2004. №11. С. 113–116.
48. Канцельсон Б.А., Привалова Л.И. «Оценка риска» и гигиеническая регламентация – альтернативы или взаимодополняющие подходы. *Токсикологический вестник*. 1996. №4. С. 5–10.
49. Кащеев М.А., Влади В.А., Манзенко С.В., Кащеев Е.М. Преимущества и недостатки применения рукавных фильтров в агломерационном производстве и технические решения по повышению эффективности газоочистки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С. 96–100.
50. Кащеев М.А., Владі В.О., Руденко М.Р. Підвищення ефективності роботи газоочистного обладнання в агломераційному виробництві. *Метал та лиття України*. 2020. №1. С. 9–15.
51. Кирин Б.Ф. Повышение смачиваемости угольной пыли растворами поверхностно-активных веществ. *Научные труды Московского ин-та радиоэлектроники и горной электромеханики*. 1965. С. 203–207.
52. КНД 211.2.3.063-98. Метрологическое обеспечение. Отбор проб промышленных выбросов. Инструкция. Киев, 1998. 21 с.
53. Ковальчук Т. А., Орехова О. В., Павленко О. І. Оцінка професійних ризиків розвитку захворювань у металургів. *Вісник проблем біології і медицини*. 2014. №3(2). С. 84–92.
54. Колесник В.Е., Павличенко А.В. Розробка способів зниження рівня екологічної небезпеки від пилових викидів вугільних шахт. Міжвідомчий зб. наук. праць. Геотехнічна механіка. 2016. Вип. 128. С. 167–178.

55. Колесников В. А., Ильин В. И., Бродский В. А., Колесников А. В. Электрофлотация в процессах водоочистки и извлечения ценных компонентов из жидких техногенных отходов. Обзор. *Теоретические основы химической технологии*. 2017. Т.5, №4. С. 361–375.
56. Корытова А.И., Щербаченко Л.Г. Изучение индуцированных загрязнениями коксохимического завода изменений роста и развития ячменя. *Охрана труда и окружающей среды в технологических процессах энергетики и черной металлургии : Сб. науч. тр.* Днепропетровск : ДГУ, 1989. С. 115–119.
57. Костюк І. Ф., Капустник В. А. Професійні хвороби : Підручник. Київ : Здоров'я, 2003. 582 с.
58. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград : Химия, 1974. 280 с.
59. Кривченко ЮБ., Шишняк Ю. В. Агломашины в Украине. Вся украинская агломерация: нынешнее состояние агломерационных производств в Украине и перспективы их технического развития. *Металл*. 2008. № 1. С. 28–35.
60. Кругляков П.М., Хаскова Т.Н. Физическая и коллоидная химия : учеб. пособие. Москва : Высш. шк., 2005. 319 с.
61. Лепехин Л.А., Алехин А.А., Некеров В.Д., Полушкин М.Е. Модернизация системы очистки газов от пыли при производстве агломерата. *Сталь*. 1992. №2. С. 91–93.
62. Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии. В 2-х т. Москва : Интермет Инжиниринг, 2000. 412+408 с.
63. Ляховко А.Д. Оценка эффективности применения Электроциклона для снижения экологической опасности пылевых выбросов агломерационных фабрик. *I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми науковопромислового комплексу регіонів»*. 14–17 квітня 2015 р. Рубіжне : ІХТ СНУ ім. В. Даля, 2015. С. 149–153.

64. Ляховко А.Д., Рудаков Д.В. Перспективы применения электроциклона для снижения объемов пылевых выбросов металлургических предприятий (на примере г. Днепродзержинска). *Збірник наукових праць НГУ*. 2013. №41. С. 134–139.
65. Малышев В. П., Макашева А. М., Кайкенов Д. А., Красикова Ю. С. Разработка вероятностной теории самоизмельчения руд. *Комплексное использование минерального сырья*. 2018. №4. С. 87–97.
66. Мантина, А.Ю. Комплексная оценка профессионального риска с учетом индивидуально аккумулированного воздействия производственных факторов. *Неразрушающий контроль: сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность»*. 2016. С. 205–209.
67. Марченко В.И. MEROS – новый процесс очистки отходящих аглогазов. *Сталь*. 2007. №11. С. 153–155.
68. МВВ №081/12-0161-05. Викиди газопилові промислові. Методика виконання вимірювань масової концентрації речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в організованих викидах стаціонарних джерел гравіметричним методом. Київ, 2005. 18 с.
69. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. *Офіційний вісник України від 10.01.2003*. Київ : Основа, 2003. № 52. С. 233.
70. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД – 86. Ленинград : Гидрометеиздат, 1986.
71. Митропольский А.К. Техника статический вычислений. Москва : Наука, 1971. 576 с.
72. Мищенко И. М. Черная металлургия и охрана окружающей среды. Донецк : ГВУЗ ДонНТУ, 2012. 446 с.

73. Мищенко И.М., Егоров Н.Т. Возможности кардинального сокращения пылевых и газовых выбросов в агломерационном производстве. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. №4. С. 113–116.
74. Мошкина С.А., Васьков С.А. Современные мокрые электрофильтры. *Межотраслевой научно-технический журнал «Пылегазоочистка»*. 2014. №7. С. 5–8.
75. Музичук Н.Т. Вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення. *Довкілля та здоров'я*. 2000. №2. С. 38–41.
76. Мысливец Д.К. Использование высокоэффективного газоочистного оборудования производства фирмы INTENSIV INFESTA CIPRES FILLTR (Швеция) в металлургической промышленности при новом строительстве и реконструкции (ЗАО «СовПлим»). *Межотраслевой научно-технический журнал «Пылегазоочистка»*. 2013. № 5. С. 10–12.
77. Нагорна А. М., Вітте П. М., Соколова М. П., Кононова І. Г., Орехова О.З., Мазур В. В. Оцінка ризику розвитку професійних захворювань у працівників металургійної, вугільної промисловості та машинобудування України. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2012. №3(31). С. 3–13.
78. Неменко Б.А., Илиясова А.Д., Арынова Г.А. Оценка степени опасности мелкодисперсных пылевых частиц воздуха. *Вестник КазНМУ*. 2014. №3(1). С. 133–135.
79. Никитин В.С. Борьба с пылью в угольных шахтах за рубежом. Москва : Профиздат, 1967. 176 с.
80. Никитина С.А., Таубман А.Б. Устройство для автоматического счета капель. *Коллоидный журнал*. 1961. №3. С. 20–23.
81. Орехова О.В., Павленко О.І. Сучасна модель інтегральної оцінки ризику захворюваності з тимчасовою втратою працездатності у працівників

- сучасної гірничометалургійної галузі України. *Довкілля та здоров'я*. 2019. №3(92). С. 47–52.
82. Петров В.А., Инюшкин Н.В., Ермаков А.А. Электроциклон – эффективный аппарат для очистки промышленных газов от твердых частиц. *Экология и промышленность России*. 2010. № 5. С. 7–10.
83. Петрухин П.М., Гродель Г.С., Кривохижа Б.М. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. Москва : Недра, 1981. 271с.
84. Пицык Ю.В. Повышение эффективности очистки аглогазов регулированием фракционного состава пыли. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2010. Вип. 9–10. С. 85–88.
85. Пицык Ю.В., Фомин С.П., Шишацкий А.Г. Повышение эффективности очистки аглогазов управлением фракционным составом пыли. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 20–21.
86. Пицык Ю.В., Шишацкий А.Г. Снижение риска заболевания населения путем повышения экологической безопасности технологических процессов в металлургии. *Сборник материалов IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых "Наука и образование – 2014"*. Астана. 2014. С. 3858–3861.
87. Пицык Ю.В., Шишацкий А.Г., Агапова В.Т. Пути повышения экологической безопасности в зоне влияния агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. №5. С. 97–99.
88. Поверхностно-активные вещества : Справочник / под ред.: Абрамзона А.А., Гаевого Г.М. Ленинград : Химия, 1979. 376 с.
89. Полторак О.М. Термодинамика в физической химии. Москва : Высшая школа, 1991. 319 с.
90. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 26.06.91 № 1268-ХІІ. Верховна Рада України. Офіційне видання. Київ : Відомості Верховної Ради України. 1991. № 41. С. 546.

91. Пухлий В.А., Колывай А.Г. Фильтры для очистки газов от пыли в цементной и металлургической промышленности. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2001. №2. С. 77–79.
92. Расчет и регулирование персональных доз ведущих вредных факторов (пыль, шум, вибрация) как вынужденная мера профилактики заболевания (защита временем) / Гигиенические требования к предприятиям угольной промышленности и организации работ. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.3.570-96. – Москва : Минздрав России, 1998. С. 52–57.
93. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Москва : Наука, 1979. 384 с.
94. Риетич И. Реконструкция системы пылеулавливания станции для десульфурации жидкого чугуна с целью увеличения производительности и стабильности работы (IRMA project system d.o.o серия). *Межотраслевой научно-практический журнал «Пылегазоочистка»*. 2016. № 11. С. 16–19.
95. Роменский, Л.П. Пена как средство борьбы с пылью. Київ : Наукова думка, 1976. 161с.
96. Рудаков Д.В., Ляховко А.Д. Исследования эффективности пылеулавливания опытной установки «ЭЛЕКТРОЦИКЛОН». *Форум гірників – 2014 : матеріали міжнар. конф.*, 1–4 жовтня 2014 р. Дніпропетровськ : Лізунов Прес, 2014. С. 185–190.
97. Рудаков Д.В., Ляховко А.Д. Обоснование применения электроциклона для очистки пылевых выбросов металлургических предприятий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 4. С. 128–131.
98. Рудаков Д.В., Ляховко О.Д., Павличенко А.В. Шляхи зниження екологічної небезпеки газопилових викидів металургійних комбінатів. *Збірник статей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія*

- та практика вирішення екологічних проблем в металургійній та гірничо-видобувній промисловості». Дніпропетровськ : НМА. 2013. С. 79–81.*
99. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / под ред. Ю.А. Рахманина, С.М. Новикова, Т.А. Шашиной и др. Москва : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143с.
 100. Савинов В.М., Дробный О.Ф., Садыков Н.Х. Аспирация хвостовых частей агломашин. *Сталь*. 2007. № 2. С. 143.
 101. Савицкий Д. П., Макарова К.В., Макаров А.С. Поверхностно-активные свойства водных растворов лигносульфоната натрия. *Химия растительного сырья*. 2012. № 2. С. 41–45.
 102. Севальнев А.І., Шаравара Л. П. Система оцінки та керування професійними ризиками захворюваності у працівників металургійного підприємства повного циклу. *Вісник проблем біології та медицини*. 2016. №1(2). С. 57–60.
 103. Сітало С.Г. Забруднення довкілля Кривбасу та його вплив на захворювання населення. *Довкілля та здоров'я*. 2008. №4. С. 31–34.
 104. Скачков М.В., Верещагин Н.Н., Скачкова М.А., Калинина Т.Н., Осиян С.А. Антропогенные факторы окружающей среды и их роль в развитии острых респираторных заболеваний. *Гигиена и санитария*. 1998. №6. С. 11–13.
 105. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах / под ред. В.В. Кудряшова. Москва : Наука, 1979. 196 с.
 106. Состав для пылеподавления / К.И. Карасев, Е.Т. Воронов и др.; А.с. № 894208 СССР, кл. Е 21 F 5/00. заявл. 17.03.82; опубл. 30.09.83, Бюл.№36.
 107. Спосіб виробництва агломерату / С.П. Фомін, В.Т. Агапова, А.Г. Шишацький [та ін.]. Пат. 200512496 Україна, МПК С22В 5/20 №15185; заявл. 26.12.2005; опубл.15.06.2006, Бюл.№6.

108. Способ производства агломерата / А.М. Росицкий, О.А. Симонов и др.; А. с. № 536239 СССР, кл. С 22 В 1/20. заявл. 20.06.75; опубл. 25.11.76, Бюл.№43.
109. Старк С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. Москва : Металлургия, 1977. 328 с.
110. Степанов Г.Ю., Зицер И.М. Инерционные воздухоочистители. Москва : Машиностроение, 1986. 184 с.
111. Сулейманов М.Г., Короткова Л.И., Алехин А.А., Полушкин М.Е. Улучшение условий труда на аглофабриках. *Сталь*. 1993. №12. С. 73–77.
112. Сумм Б.Д. Коллоидная химия. Москва : Academia, 2017. 416 с.
113. Теверовский Б.З., Шелудько И.Б., Демуш С.Г., Яценко В.Е., Демуш С.Г. Основные направления защиты воздушного бассейна от выбросов вредных веществ аглофабриками Украины. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 1995. №1. С. 86–89.
114. Теверовский Б.З., Яценко В.Е., Демуш С.Г., Шелудько И.Б. Моделирование процесса разделения аэрозолей в инерционных аппаратах газоочистки. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 1994. №3. С. 79–82.
115. Теверовский, Б.З. Очистка промышленных газов в черной металлургии. Киев : Техника, 1993. 152 с.
116. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. Москва : Химия, 1975. 264 с.
117. Тищук В.Ю., Ковальова І.Б. Пилоподавлення при підготовці вугілля до коксування. *Углекимический журнал*. 2018. №2. С. 28.
118. Трапезников А.А. Некоторые свойства пленок и пен и вопросы их устойчивости. *Пены. Получение и применение. Часть I. Физико-химия пен*. Москва : ВНИИПО, 1974. С. 8–37.

119. Третинник В.Ю. Охрана окружающей среды в угольной, горнодобывающей промышленности и гидротехническом строительстве. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2001. №5. С. 65–70.
120. Тусупбаев Н. К. Композиционные аэрофлоты для интенсификации флотации золотосодержащих руд. *Международная научно-практическая конференция «Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов»*. 2016. С. 23.
121. Фещенко О.Л., Каменева Н.В. Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 2. С. 28–32.
122. Фомин С.П., Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., Пицык Ю.В. Повышение эффективности очистки аглогазов управлением фракционным составом пыли. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 28–29.
123. Фомин С.П., Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., Пицык Ю.В. Снижение выбросов пыли при производстве агломерата. *Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов формування принципів збалансованого розвитку. Матеріали науково-практичної конференції*. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2008. С. 215–220.
124. Фомин С.П., Шишацкий А.Г., Пицык Ю.В. Исследование эффективности применения ПАВ для изменения фракционного состава пыли. *Охрана навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. Збірник доповідей VIII Міжнародної наукової конференції аспірантів та студентів*. Донецьк : ДонНТУ, 2009. С. 33–34.
125. Фролов Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 1. Подготовка компонентов агломерационной шихты к спеканию. *Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”*. 2017. № 4. С. 33–40.

126. Фролов Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 2. Смешивание и окомкование агломерационной шихты. *Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация"*. 2017. № 5. С. 40–48.
127. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Москва : Химия, 1982. 463 с.
128. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Ресурсосберегающие технологии добычи руд на больших глубинах. *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 8. С. 23–33.
129. Хофштадлер К., Мурауэр Ф., Штайнер Д., Геберт В. Новая система газоочистки «Ветфайн» для цехов по производству агломерата и окатышей. *Сталь*. 2002. №5. С. 71–74.
130. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. Київ : Наук. думка, 1997. 368 с.
131. Шальский Г.Г., Проскурина И.В., Ведмедева Т.Б. Процесс обеспыливания на перегрузочных пунктах ленточных конвейеров. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2007. №23. С. 77–84.
132. Шановская С.С. Применение смачивающих веществ при борьбе с угольной пылью. *Сборник трудов МакНИИ*. Том 6. Москва : Углетехиздат, 1952. С. 48–54.
133. Шатоха В.І. Сталій розвиток чорної металургії: Монографія. Дніпропетровськ : «Дріант», 2015. 184 с.
134. Швидкий М.І., Гненна О.В. Накопичувальна та комплексна дія шкідливих факторів на робітників підземного Кривбасу. *Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр.* 2015. Вып. 83. С. 217–220.
135. Шишацкий А.Г. Борьба с пылью при погрузке сыпучих материалов. *Безопасность труда в промышленности*. 1982. №11. С. 31–32.

136. Шишацкий А.Г. Оптимизация параметров пенного метода борьбы с угольной пылью. *Борьба с угольной пылью*. Київ : Наукова думка, 1980. С. 126–128.
137. Шишацкий А.Г. Пылеподавление пеной при работе очистных и проходческих комбайнов. *Безопасность труда в промышленности*. 1987. №1. С. 53–54.
138. Шишацкий А.Г. Технологические схемы пылеподавления пеной в угольных шахтах. *Борьба с угольной пылью*. Київ : Наукова думка, 1980. С. 128–134.
139. Шишацкий А.Г., Гринев В.М., Ищук И.Г. Пылеподавление пеной на струговых установках. *Уголь*. 1978. №11. С. 59–60.
140. Шишацкий А.Г., Пицык Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на смачиваемость сыпучих материалов. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип.2 (61) ч.1. С. 117–119.
141. Шишацкий А.Г., Пицык Ю.В. Исследование параметров обработки сыпучих материалов поверхностно-активными веществами для обеспыливания воздуха. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. Вип.4. С. 76–80.
142. Шишацкий А.Г., Роменский Л.П., Буянов А.Д. Борьба с пылью с помощью пены при работе комбайнов типа 2К-52. *Уголь Украины*. 1975. №5. С.43–44.
143. Шишацкий А.Г., Роменский Л.П., Гринев В.М. Определение параметров пылеподавления пеной при работе угольных комбайнов. *Горный журнал. Известия ВУЗов*. 1978. №10. С. 76 – 80.
144. Шишацкий А.Г., Роменский Л.П., Старцев А.И. Пылеподавление пеной при проведении выработок комбайном «Ясиноватец-2». *Уголь Украины*. 1977. №12. С. 33–34.

145. Шишацький А.Г, Піцик Ю.В. Дослідження методів зменшення надходження пилу в атмосферне повітря при спіканні сипучих матеріалів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. Випуск 42. С. 56–59.
146. Шубенкова Е. Г. Коллоидная химия. Поверхностные явления : практикум. Омск, 2015. 64 с.
147. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1982. 348 с.
148. Щукин, Е.Д., Перцов, А.В., Амелина, Е.А.. Коллоидная химия. Москва : Высш. шк., 2006. 444 с.
149. Юдашкин М.Я. Очистка газов в металлургии. Москва : Металлургия, 1976. 384 с.
150. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. Москва : ИКЦ “Академкнига”, 2002. 469 с.
151. Cao R.J., Tan H.Z., Xiong Y.Y., Mikulčić H., Vujanović M., Wang X. et al. Improving the removal of particles and trace elements from coal-fired power plants by combining a wet phase transition agglomerator with wet electrostatic precipitator. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 161. P. 1459–1465.
152. Chen P., Hu Y., Gao Z. Discovery of a novel cationic surfactant: ributyltetradecyl –Phosponium chloride for Iron ore flotation: from prediction to experimental verification. *Mineral*. 2017. № 7 (12). P. 1–15.
153. Evstigneyev E.I., Yuzikhin O.S., Gurinov A.A. Chemical structure and physicochemical properties of oxidized hydrolysis lignin. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. №88(8). P. 1295–1303.
154. Fan T., Zhoua G., Wanga J. Preparation and characterization of awettingagglomeration-based hybrid coal dust suppressant. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. 113. P. 282–291.

155. Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report on a WHO Working Group. Bonn, Germany 13–15 January 2003. 94 p.
156. Inyang H. I., Bae S., Pando M. A. Contaminant dust suppression materials: a cost-effectiveness estimation methodology. *Measurement*. 2016. №93. P. 563–571.
157. Li J., Zhou F., Liu H. The selection and application of a compound wetting agent to the coal seam water infusion for dust control. *Int. J. Coal Prep. Util.* 2015. № 36. P. 192–206.
158. Mondrusova M., Voytenko Yu., Plyasovskaya K., Kaliberda N. Triethanolamine salts absorption on the surface of the sinter during sintering production. *Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору. Матеріали X Регіональної науково-практичної конференції молодих науковців та студентів*. Дніпро. 2021. С. 40–42.
159. Pattanaik A., Venugopal R. Investigation of Adsorption Mechanism of Reagents (Surfactants) System and its Applicability in Iron Ore Flotation – An Overview. *Colloid and Interface Science Communications*. 2018. 25. P. 41–65.
160. Ren W., Wang D., Guo Q. Application of foam technology for dust control in underground coal mine. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2014. № 24. P. 13–16.
161. Silva R.A. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change. *Environmental Research Letters*. 2013. Vol. 8. № 3. 11 p.
162. Sophia J. S., Quast K., Jason N.C. Effects of eh and pH on the oleate flotation of iron oxides. *Mineral*. 2015. №83. P. 97–104.
163. Voytenko Y.V., Mondrusova M.S., Plyasovskaya K.A., Shishatsky A.G. A study of physicochemical processes when pelletizing sintering mixture. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2019. №2. P. 232–238.

164. Yang Z., Zheng C., Chang Q., Wan Y., Wang Y., Gao X. Fine particle migration and collection in a wet electrostatic precipitator. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 2017. Vol. 67. Iss. 4. P. 498–506.
165. Вся українська агломерация. [Електронний ресурс]: Режим доступу: Все аглофабрики України (readmetal.com) <https://readmetal.com/?p=1803>
166. Екологічний паспорт Дніпропетровської області. Д.: Державне управління ОНПС в Дніпропетр. обл., 2013. – 131 с. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/protection/protection1/dnipropetrovska>
167. Международная экологическая биржа. Электрофилтры. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.ecointernexchange.com/rus/15/20/08/index.php>
168. Мультициклон. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5850824/page:13/>
169. ПАТ «Запоріжсталь» розпочав монтаж основного обладнання для газоочистки агломашин №3 – 4. . [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.zaporizhstal.com/pres-centr/novini/pao-zaporozhstal-pristupil-k-montazhu-osnovnogo-oborudovaniya-na-gazoochistkah-aglomashin-3-4/>
170. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2012 рік. Дніпропетровськ : Дніпропетровська обласна 146 державна адміністрація. 2013. 207 с. [Електронний ресурс] : Режим доступу: <http://www.menr.gov.ua/dopovidi/regionalni/1124-rehionalni-dopovidi-pro-stannavkolyshnoho-pryrodnoho-seredovishcha-u-2012-rotsi>
171. Скруббер Вентури. [Електронний ресурс]: Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%B5%D1%80_%D0%92%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B8

172. Соленость воды и солевой баланс Азовского моря. [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://esimo.oceanography.ru/esp1/index.php?sea_code=11§ion=6&menu_code=1018
173. Химический и ионный состав морской воды. Справочные таблицы. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://infotables.ru/geografiya/315-morya-i-okeany-ionnyj-i-khimicheskij-sostav-morskoj-vody-tablitsa>
174. Циклон для очистки воздуха. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://stankiexpert.ru/wp-content/uploads/2016/08/ciklon-dlja-ochistki-vozduha.jpg>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А 1 – Фонові концентрації шкідливих речовин в зоні впливу аглоцеха.

№ з/п	Назва забруднюючої речовини	Значення фонові концентрації, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Клас шкідливості
1	Вуглецю оксид	6	3	4
2	Сірки діоксид	0,033	0,05	3
3	Азоту діоксид	0,09	0,04	2
4	Вуглеводи граничні	0,4	1*	4
5	Ксилол	0,08	0,2	3
6	Хром VI валентний (в перерахунку на триоксид хрому)	0,006	0,0015	1
7	Водень ціаністий	0,08	0,01	2
8	Натрію гідроксид	0,004	-	-
9	Сажа	0,06	0,05	3
10	Алюмінію оксид	0,04	0,01	2
11	Кальцію оксид	0,2	0,05	3
12	Магнію оксид	0,16	0,05	3
13	Цинку оксид	0,2	0,05	3
14	Етилен	1,2	3	3
15	Гас	0,48	-	
16	Водень хлористий по молекулі HCl	0,08	0,2	2
17	Кислота азотна по молекулі HNO ₃	0,16	0,15	2
18	Аерозоль лакофарбних матеріалів	0,04		
19	Бенз(а)пірен	0,4 мкг на 100 м ³	0,1 мкг на 100 м ³	1
20	Стирол	0,016	0,002	2
21	Ізопрен	2,0	0,003	2
22	Заліза оксид	0,16	0,04	3
23	Марганець і його сполуки	0,004	0,001	2
24	Фториды добре розчинні неорганічні	0,012	0,01	2
25	Фториды погано розчинні неорганічні	0,08	0,03	2
26	Фтористі газоподібні сполуки	0,008	0,005	2
27	Бензин нафтовий	2,0	1,5	4

Продовження Додатку А

28	Бутилацетат	0,04		
29	Толуол	0,24	0,6	3
30	Спирт бутиловий	0,04	0,1	3
31	Спирт етиловий	2,0	5	4
32	2-Етоксietанол	0,28		
33	Уайт-спірит	0,4	1(ОБРВ)	
34	Масло мінеральне нафтове	0,02	0,05(ОБРВ)	
35	Пил неорганічний зі вмістом SiO ₂ 20-70%	0,12	0,1	3
36	Пил неорганічний зі вмістом SiO ₂ більше 70%	0,06	0,05	3
37	Пил неорганічний зі вмістом SiO ₂ менше 20%	0,2	0,15	3
38	Ацетон	0,14	0,35	3
39	Пил вугільного концентрату	0,044		
40	Пил аглодоменного виробництва	0,06		
41	Пил гумовий	0,04		
42	Пил абразивно-металевий	0,16	0,05	
43	Кислота сірчана	0,12	0,1	2
44	Свинець і його сполуки	0,0004	0,0003	1
45	Кремнію диоксид аморфний	0,008	0,02(ОБРВ)	
46	П'ятиокис ванадію	0,008	0,002	1
47	Нікель металевий	0,004	0,001	2
48	Міді оксид	0,008		
49	Етилацетат	0,04	0,1	4
50	Зола сланцева	0,12	0,1	1
51	Зола мазутна	0,08		
52	Кальцію карбонат	0,06	0,05	3
53	Пил деревини	0,04		
54	Кадмію оксид	0,0012	0,0003	2
55	Олова оксид (2)	0,08	0,02	3
56	1,3-Бутадієн (дивініл)	1,2	1	4
57	2-Метилпропен (ізобутилен)	0,04		
58	Пропілен	1,2	3	3
59	α-метилстирол	0,016	0,04	3
60	Хлоропрен	0,008	0,002	2
61	Епіхлоргідрин	0,08	0,2	2
62	Спирт ізобутиловий	0,04	0,1	4
63	Дібутилфталат	0,04		
64	Акролеїн	0,012	0,03	2

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор аглодоменого
департаменту

Листопадів В.С.



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи Піцик Юлії Володимирівни на тему "Підвищення екологічної безпеки агломераційного виробництва шляхом знепилення газових викидів"

Результати з досліджень:

- питомих витрат ПАР на обробку аглошихти для зниження пилонадходження в аглогази агломашин;
- впливу параметрів обробки аглошихти на дисперсний склад пилу та пилодинам іку в аглогазах газоходів агломашин;
- концентрацій ПАР в піноутворюючих розчинах системи обробки аглошихти.

використані при розробці та впровадженні системи обробки аглошихти розчинами ПАР (СОАПАР) в шихтовому відділенні аглоцеху ВАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг".

Головний управляючий з агломерації

Сапунов А.В.

Заст. начальника управління –
начальник ОНЖМТіО
технічного управління,
к.т.н.

Оторвін П.І.

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Дніпровського національного
університету ім. О. Гончара, к.т.н., доц.
Дмитро СВИНАРЕНКО

« » 20 __ р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Войтенко Юлії
Володимирівни
«Підвищення екологічної безпеки агломераційного виробництва шляхом
знепилення газових викидів»
в навчальний процес Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

Складений науково-методичною комісією в складі:

Голова комісії: д.т.н., проф. Русакова Т.І.

Члени комісії: к.т.н., доц. Левицька О.Г., к.т.н., доц. Долженкова О.В., к.т.н.,
с.н.с. Шишацький А.Г.

Комісія склала чинний акт про те, що результати дисертаційної роботи Войтенко Ю.В. впроваджені в навчальний процес на кафедрі «Безпеки життєдіяльності», а саме, розроблені засоби та заходи боротьби з надходженням пилу в атмосферне повітря від інтенсивних техногенних джерел на основі дослідження фізико-хімічних властивостей окремих поверхнево-активних речовин.

Наведені Войтенко Ю.В. результати дослідження зв'язку забруднення навколишнього середовища та захворюваності населення, а також використані методики розрахунку ризику використовується при проведенні практичних та лекційних занять з дисциплін «Технології основних виробництв», «Урбоекологія» та «Промислова екологія». Впроваджені наступні матеріали:

- Метод дослідження фізико-хімічних властивостей ПАР та визначення питомих їх витрат на обробку аглошихти (до практичного циклу викладання дисципліни «Промислова екологія»);
- Метод дослідження пило газодинамічних процесів в газоходах аглофабрик (до лекційного циклу викладання дисципліни «Технології основних виробництв»);
- Конструктивні рішення із розробки технологічних схем обробки аглошихти розчинами ПАР (до лекційного циклу викладання дисципліни «Промислова екологія»);
- Метод визначення ризику захворювання населення в техногенно-навантажених регіонах (до лекційного та практичного циклу викладання дисципліни «Урбоекологія»).

Продовження Додатку В

Використання результатів дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

Даний акт складено для представлення в Спеціалізовану Вчену раду і не є підставою для отримання премій та інших винагород.

В. о. зав.каф. БЖД

проф., д.т.н.



Тетяна РУСАКОВА

доц., к.т.н.



Олена ЛЕВИЦЬКА

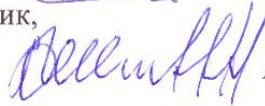
доц., к.т.н.



Олена ДОЛЖЕНКОВА

науковий керівник,

с.н.с., к.т.н.



Алім ШИШАЦЬКИЙ

ДОДАТОК Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Voytenko Y.V.**, Mondrusova M.S., Plyasovskaya K.A., Shishatsky A.G. A study of physicochemical processes when pelletizing sintering mixture. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2019. №2. С. 232–238.
2. **Войтенко Ю.В.**, Левицька О.Г. Підвищення екологічної безпеки селітебних територій в зонах інтенсивного забруднення атмосферного повітря. *Збірник наукових праць НГУ*. 2020. №61. С. 94–102.
3. Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Исследование параметров обработки сыпучих материалов поверхностно-активными веществами для обеспыливания воздуха. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. Вип.4. С. 76–80.
4. Агапова В.Т., Нестеров А.С., Якушев В.С., Шишацкий А.Г., **Пицык Ю.В.** Результаты спекания и свойства агломерата из шихт подготовленных с использованием поверхностно-активных веществ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2012. №25. С. 9–18.
5. **Пицык Ю.В.**, Шишацкий А.Г., Агапова В.Т. Пути повышения экологической безопасности в зоне влияния агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. №5. С. 97–99.
6. Шишацький А.Г., **Піцик Ю.В.** Дослідження методів зменшення надходження пилу в атмосферне повітря при спіканні сипучих матеріалів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. Випуск 42. С. 56–59.
7. Агапова В.Т., **Пицык Ю.В.**, Шишацкий А.Г. Снижение запыленности аглогазов методом улучшения окомкования аглошихты. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2010. Вип. 7-8. С. 90–92.

8. Пицык Ю.В. Повышение эффективности очистки аглогазов регулированием фракционного состава пыли. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2010. Вип. 9-10. С. 85–88.

9. Шишацкий А.Г., Пицык Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на смачиваемость сыпучих материалов. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип.2/2010 (61) частина 1. С. 117–119.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

10. Mondrusova M., Voytenko Yu., Plyasovskaya K., Kaliberda N. Triethanolamine salts absorption on the surface of the sinter during sintering production. *Сучасні науково-технічні дослідження у контексті мовного простору*. Матеріали Х Регіональної науково-практичної конференції молодих науковців та студентів. (Дніпро, 13 травня 2021). Дніпро. 2021. С. 40–42.

11. Пицык Ю.В., Шишацкий А.Г. Снижение риска заболевания населения путем повышения экологической безопасности технологических процессов в металлургии. *Сборник материалов IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2014»*. (Астана, 11 квітня 2014). Астана. 2014. С. 3858–3861.

12. Фомин С.П., Шишацкий А.Г., Пицык Ю.В. Исследование эффективности применения ПАВ для изменения фракционного состава пыли. *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. Збірник доповідей VIII Міжнародної наукової конференції аспірантів та студентів*. (Донецьк, 26 квітня 2009). Донецьк: ДонНТУ. 2009. С. 33–34.

13. Фомин С.П., Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., Пицык Ю.В. Снижение выбросов пыли при производстве агломерата. *Екологічні проблеми гірничо-металургійного комплексу України за умов формування принципів збалансованого розвитку. Матеріали науково-практичної конференції*. (Дніпро, 14 травня 2008). Київ : Центр екологічної освіти та інформації. 2008. С. 215–220.

- 14. Пицык Ю.В.,** Фомин С.П., Шишацкий А.Г. Повышение эффективности очистки аглогазов управлением фракционным составом пыли. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 20–21.
- 15. Фомин С.П.,** Агапова В.Т., Шишацкий А.Г., Петляк О.Г., **Пицык Ю.В.** Оценка эффективности пылеочистки в газотранспортной системе агломашин. *Проблеми екологічної безпеки*. Кременчук. 2008. С. 28–29.