

Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка  
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГАСК Євген Анатолійович**

УДК 631.362.3;621.928:93

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ  
ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ РОТАЦІЙНИМ ЦИКЛОНОМ ПЕРЕСУВНИХ  
ЗЕРНОВИХ СЕПАРАТОРІВ**

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

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  
\_\_\_\_\_ Є.А. Гаєк

Науковий керівник: **Харченко Сергій Олександрович**,  
доктор технічних наук, доцент

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Гаск Є.А.* обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку циклоном пересувних зернових сепараторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (Технічні науки). – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності процесу очищення повітряного потоку в аспіраційних системах, які входять до складу зернових сепараторів та визначають їх продуктивність.

Подальше підвищення продуктивності зернових сепараторів, що викликає збільшення концентрації дрібнодисперсних частинок домішок та пилу, стримане недостатньою ефективністю роботи аспіраційних систем при очищенні повітряного потоку. Класичне удосконалення пиловловлювачів аспіраційних систем, їх окремих елементів, вичерпано та обмежено конструктивними особливостями пересувних зернових сепараторів.

На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень обґрунтовано перспективний напрямок підвищення ефективності очищення запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу на пересувних зернових сепараторах шляхом застосуванням розробленого ротаційного циклону з багатодисковим доочисником. Збільшення ефективності процесу очищення запиленого ПП в пиловловлювачах потребує додаткових впливів на дисперсні частинки щодо забезпечення їх інтенсивного перерозподілення в робочих зонах.

Розроблений ротаційний циклон має дві робочі зони: основну та зону доочищення. Розроблений циклон складається з лопатевого завихрювача, основного циліндричного каналу, осаджувальної камери та доочисника.

Повітряний потік з частинками легких домішок та пилю на вході в розроблений циклон потрапляють на лопатевий завихрювач, де відбувається його розкручування навколо вісі. Під дією відцентрових сил відбувається перерозподіл дисперсних частинок від вісі до периферії основного каналу. Стінки каналу виконані з періодично-розташованими щілинами, через які відбувається проміжне відведення дисперсних частинок до осаджувальної камери. Після основного очищення, запилений ПП з дрібнодисперсними частинками направляється до дисків доочисника на доочищення. За рахунок обертання дисків, які встановлені на відстані один від одного, дисперсні частинки відкидаються через щілини основного каналу до осаджувальної камери. При цьому очищений повітряний потік рухається між дисків та через їх центральний отвір до патрубку. Комплексний вплив активного завихрювача та багатодискового доочисника, разом з проміжним відведенням дисперсних частинок, дозволяє інтенсифікувати процес очищення запиленого повітряного потоку та сприяє збільшенню продуктивності пересувних зернових сепараторів.

Моделювання динаміки дисперсних частинок в робочих зонах розробленого ротаційного циклону ґрунтується на основних положеннях механіки гетерогенних середовищ, аеродинаміки. Використано наступний алгоритм теоретичних досліджень розробленого ротаційного циклону: моделювання динаміки несучої та дисперсної фаз запиленого повітряного потоку в основному каналі, дослідження процесу очищення повітряного потоку в багатодисковому доочиснику розробленого ротаційного циклону.

Побудовані рівняння руху двофазного середовища, за допомогою яких встановлені закономірності складових швидкості несучої фази та частинок дисперсної фази в робочих зонах розробленого ротаційного циклону. Отримані кінцеві вирази, щодо визначення радіальної, осьової та тангенціальної складових швидкостей повітряного потоку та дисперсних частинок. Встановлені закономірності зміни складових швидкостей компонентів фаз в залежності від конструктивно-технологічних параметрів розробленого циклону, які дозволили визначити координати дисперсних частинок при їх перерозподілі.

Дослідженнями встановлено, що складові швидкості багатофазного середовища залежать на 15...35 % від конструктивно-технологічних параметрів розробленого ротаційного циклону, що підтверджує можливість перерозподілу дисперсних частинок та інтенсифікації процесу очищення запиленого повітряного потоку.

При математичному моделюванні обґрунтовані умови процесу очищення та властивості запилених повітряних потоків пересувних зернових машин, які визначають ефективність їх розділення в робочих зонах розробленого циклону.

Критеріями ефективності процесу очищення запиленого повітряного потоку обрано коефіцієнти очистки основного каналу та доочисника, які складають загальний коефіцієнт очистки розробленого ротаційного циклона. Встановлені залежності фракційної ефективності очищення запиленого повітряного потоку робочих зон розробленого ротаційного циклону від дисперсних частинок характерного діапазону розмірів. Встановлено, що загальна ефективність процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном становить 85...92 %.

Для уточнення діапазонів варіювання конструктивно-технологічних параметрів розробленого ротаційного циклону проведені експериментальні дослідження на розробленій лабораторній установці з використанням дисперсних частинок пилу природного гранулометричного складу.

Отримані експериментальні залежності складових швидкості компонентів запиленого повітряного потоку в робочих зонах, ефективності розробленого ротаційного циклону шляхом застосування розроблених і типових методик експериментальних досліджень.

Експериментально встановлено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт очищення розробленого ротаційного циклону на 4...4,8 % до 89...93,8 %. Діапазони варіювання отриманих параметрів основного каналу ротаційного циклону склали: кута нахилу лопатей  $\alpha = 10...30^\circ$ , частоти обертання ротора  $\Omega = 1000...2000$  об/хв.



Для визначення швидкості повітряного потоку в робочих зонах розробленого ротаційного циклону використано трубку Піто і мікроманометр, анемометр Testo 416. Проведеною відеозйомкою процесу, встановленими залежностями швидкості повітряного потоку експериментально підтверджено перерозподіл дисперсних частинок в робочих зонах, забезпечивши інтенсивне очищення повітряного потоку.

Отримані експериментальні залежності загального коефіцієнту очищення розробленого ротаційного циклону від дисперсних частинок різних розмірів при діапазоні швидкості повітряного потоку, який є характерним для аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів. Отриманий загальний коефіцієнт очищення повітряного потоку розробленого ротаційного циклону варіюється в межах 87,5...92,5 %.

Для розробленого ротаційного циклону експериментально отримані раціональні діапазони варіювання конструктивних параметрів доочисника: відстань між дисками  $h = 0,9...1,5$  мм; діаметр внутрішнього отвору диска  $D_d = 30...40$  мм; ширина доочисника  $l_0 = 0,4...0,6$  м.

За умови максимальної ефективності та мінімального гідравлічного опору встановлені діапазони кількості дисків та діаметру їх центрального отвору: 6...9 шт та 0,02...0,03 м, відповідно. Діапазон варіювання гідравлічного опору розробленого ротаційного циклону з доочисником, за визначених його раціональних параметрів, склав 130...180 Па.

Виконаним завданням експериментальних досліджень також стало встановлення розбіжності результатів експериментальних та теоретичних досліджень, яка не перевищує 4,3 % при ідентифікації показників коефіцієнтів очищення та гідравлічного опору розробленого ротаційного циклону.

Виконано комплексне обґрунтування параметрів розробленого ротаційного циклону з багатодисковим доочищувачем, яке ураховує: етапність процесу очищення запиленого повітряного потоку, проміжне відведення дисперсних частинок, технологічні показники роботи пересувних зернових сепараторів і фізико-механічні властивості дисперсних частинок домішок та пилу.

Виробнича апробація розробленого РЦ проведена у відповідності до діючих міжнародних і державних стандартів, методів натурних випробувань та імітаційного моделювання.

В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу очищення запиленого повітряного потоку рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів розробленого ротаційного циклону: кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha = 17...22^\circ$ ; частота обертів ротора  $\Omega = 125...175$  рад/с; ширина відкриття жалюзі  $b = 12,5...17,5$  мм; кількість дисків доочисника  $n = 5...7$  шт; відстань між дисками в доочисника  $h = 1,25...1,75$  мм. Встановлено, що за вказаними параметрами загальний коефіцієнт очищення розробленим ротаційним циклоном складає  $\eta = 90,7...90,8$  %.

За результатами досліджень розроблено нормативно-технічну документацію на розроблений ротаційний циклон, яка передана та використовується в серійному виробництві зернових сепараторів та зерноочисних комплексів на СВПТ «Механік» (м. Житомир).

Виробничими випробуваннями розробленого ротаційного циклону встановлено, що ефективність процесу очищення зернових сумішей від легких домішок та пилу підвищується на 30...35 % до 88...90,8 %, що обумовлює збільшення продуктивності пересувних зернових сепараторів на 20...23,2 %. Використання розробленого ротаційного циклону дозволило отримати нормовану запиленість обслуговуючій робочій зоні пересувних зернових сепараторів до 3,7 мг/м<sup>3</sup>. Визначено, що інтенсифікація процесу очищення запиленого повітряного потоку, за рахунок використання розробленого ротаційного циклону, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 5,17 % та 4,77 %, відповідно.

Використання модернізованих сепараторів з розробленим ротаційним циклоном в умовах ТОВ «Маковій» та навчально-дослідного поля ХНТУСГ дозволило отримати загальний річний економічний ефект 132 тис. грн.

Ключові слова: процеси очищення, запилений повітряний потік, циклон, інтенсифікація, продуктивність, коефіцієнт очищення.

## Список публікацій здобувача

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Харченко С.А., Гаек Е.А. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2013. Вип.135. С. 87 – 92.

2. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в разработанном циклоне. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2014 Vol. 16, № 7. С. 42 – 46.

3. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей дисперсной фазы в запылённом воздушном потоке. *Вібрації в техніці та технологіях*. Всеукраїнський журнал: ВНАУ. Віниця, 2014. Т.1, № 73. С. 44 – 49.

4. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей несущей фазы в рабочей зоне прямооточного циклона. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв*: Вісник ХНТУСГ. 2014. Вип.152. С. 114 – 120.

5. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в зоне доочистителя разработанного прямооточного циклона. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2015. Вип.156. С. 237 – 242.

6. Гаек Е.А. Оптимизация конструктивно-кинематических параметров разработанного циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Інженерія природокористування*. 2015. № 1(3). С.123 – 127.

7. Гаек Е.А. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований в разработанном циклоне аспирационных систем зерноочистительных машин. *Технічні системи і технології тваринництва: Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип.157. С. 203 – 208.

8. Гаек Е.А., Бекетова И.С. Способ повышения эффективности процесса очистки запылённого воздушного потока циклоном аспирационных систем зерновых сепараторов. *Інженерія природокористування*. 2015. № 2(4). С.101 – 105.

9. Гаек Е.А. Алгоритм математического моделирования частиц дисперсной фазы запылённого воздушного потока. *MOTROL «Commission of Motorization and Energetics in Agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol.18, №7. P. 79 – 83

10. Харченко С.А., Гаек Е.А. Эффективне очищення запиленого повітряного потоку ротаційними циклонами на зернопереробних підприємствах. *International research and practice conference. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences*. Radom, 2017. P. 218 – 221.

11. Харченко С.А., Гаек Е.А. Эффективность очистки запыленного воздушного потока циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Інженерія природокористування: Журнал ХНТУСГ*. 2018. № 1(9). С. 79 – 82.

12. Харченко С.А., Гаек Е.А. Энергоемкость и металлоемкость процесса очистки запылённого воздушного потока модернизированным сепаратором СВС-25М. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2019. Вип.199. С.351 – 357.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Харченко С.А., Гаек Е.А. Повышение эффективности очистки запылённого воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали наукової конференції студентів Сумського НАУ (1-8.11.2014 р.)*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми: СНАУ, 2014. С. 62.

14. Харченко С.А., Гаек Е.А. Интенсификация процесса очистки воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ХНТУСГ: «Молодь і технічний прогрес в АПК»*. Харків: ХНТУСГ. 2014. С.87.

15. Гаек Е.А., Суламанідзе Е.А. Анализ способов повышения эффективности работы аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів (присвяченій 40-річчю Сумського НАУ)*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми: СНАУ, 2017. С.64.

16. Гаек Е.А. Очистка запылённого воздушного потока ротационными циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Матеріали Всеукраїнській студентської наукової конференції (13-17.11.2017 р.)*. Суми, 2017. С. 662.

17. Гаек Е.А. Эффективная очистка запылённого воздушного потока ротационными циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції: Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С.218-220.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

18. Циклон: пат. 103446 У України: МПК В04С 3/00. № а 2012 14122; заявл. 11.12.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. №19.

19. Циклон ротацийний: пат. 137443 У України: МПК В04С 3/06. № u 2019 02582; заявл. 18.03.2019; опубл. 25.10.2019, Бюл. №20.

## ABSTRACT

*Haiek Y.A.* The parameters substantiation of the air flow purification process by rotary cyclone of mobile grain separators. - Qualified scientific work on the rights of manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.11 – Machines and means of mechanization of agricultural production (technical sciences). – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of scientific and practical task of current importance concerning the efficiency increasing of the dusty cleaning process of the air stream in the aspiration systems, which are part of the mobile grain separators and determine their productivity and conditions of safe operation.

Further increase in the productivity of grain separators, which causes an increase in the concentration of fine particles of impurities and dust, is limited by the insufficient effectiveness of the aspiration systems in the purification of air flow. The existing means and methods of improving the precipitators of aspiration systems, their individual elements, are exhausted and limited by the constructional features of mobile grain separators. Increasing the efficiency of the dusty air stream purification process in precipitators requires additional effects on the dispersed particles to provide their intense redistribution in the work areas.

Based on the evaluation and analysis of the studies results, a forward-looking direction for improving the efficiency of cleaning dusty air streams from light impurities and dust on mobile grain separators using a developed rotary cyclone with a multi-disk cleaner was substantiated. The intensification of the process of cleaning the dusty air stream in the developed rotary cyclone is realized due to the stepwise purification of the flow in the main working area and the refining zone, the introduction of intermediate removal of the dispersed particles.

The main elements of the developed cyclone are the paddle swirl, the main cylindrical louver channel of blind, the precipitating chamber and the disk of extra purifier. The particles flow of light impurities and dust at the inlet of the developed cyclone enters on the paddle swirl, where it is untwisted around the axis. Under centrifugal forces the dispersed particles are redistributed from the axis to the periphery of the main channel. The walls of the channel are made with periodically located slits, through which there is an intermediate removal of the dispersed particles to the precipitating chamber. After basic purification, the air stream with fine particles is sent to the extra- purifier disks for further purification. Due to the rotation of the disks, which are located at a distance from each other, the dispersed particles are thrown through the slits of the main channel to the precipitation chamber. In this case, the refined air flow moves between the disks and through their central opening in the nozzle. The combined effect of the active swirler and multi-disk extra- purifier, together with the intermediate removal of the dispersed particles, allows to intensify the process of purification the dusty air stream and helps to increase the productivity of mobile grain separators.

The modeling of the dispersed particles dynamics in the working zones of a developed rotary cyclone is based on the basic theses of the mechanics of heterogeneous environments, aerodynamics. The scientific and methodological principles of modeling the dynamics of dusty air flow, based on the motion of a heterogeneous environment with the properties of viscous liquids, have been further developed, taking into account the parameters of the developed rotary cyclone, which ensure the normalization dustiness of the service zone and increase the productivity of dustiness grain separator.

The algorithm of theoretical studies of the developed rotary cyclone consisted of the following stages: modeling of the dynamics of the carrier and dispersed phases of the dusty air stream in the main channel, the study of the process of purification of air flow in a multi-disk extra- purifier of the developed rotary cyclone.

Mathematical models of the dynamics of a two-phase dusty air flow environment in the working zones of a rotary cyclone are developed. The models take into account the structural and technological parameters of the developed rotary cyclone, the properties of dusty air flow.

The equations of motion of the two-phase medium are constructed, by which the regularities of the velocity components of the carrier phase and the particles of the dispersed phase in the working zones of the developed rotary cyclone are ascertained. The regularities of changes in the velocities components of the phases were determined depending on the structural and technological parameters of the developed cyclone, which made it possible to determine the coordinates of the dispersed particles during their redistribution.

Due to studies, it has found that the velocity components of the multiphase environment depend on 15...35 % of the structural and technological parameters of the developed rotary cyclone, which confirms the possibility of intensification of the purification process of dusty air flow.

During the mathematical modeling it was substantiated the conditions of the purification process and the properties of dusty air streams of mobile grain separators, which determine the efficiency of their separation in the working zones of the developed cyclone. Coefficients of cleaning of the main channel and purifier, which make up the

total coefficient of purification of the developed rotary cyclone, has been selected as the criteria for the efficiency of the purification process the dusty air stream. Due to the studies it was ascertained the relationship between the structural and technological parameters of the developed rotary cyclone with the criteria for the process efficiency of the dusty air stream purification, which takes into account the step-by-step modeling of the basic purification of the dusty air stream and its extra-purification. The dependences of the fractional efficiency of cleaning the dusty air flow of the working zones of the developed rotary cyclone from the dispersed particles of the characteristic size range were ascertained.

Experimental studies were conducted to clarify of variation ranges of the design and technological parameters of the rotary cyclone.

The efficiency of of purification the dusty air stream using dispersed dust particles of a natural granulometric composition was experimentally investigated by the developed and typical methods at the laboratory facility.

The experimental dependences of the velocity components of the dusty air flow phases in the working zones and the efficiency of the developed rotary cyclone were obtained. To determine the velocity of air in the working areas of the developed rotary cyclone a Pitot tube and micromanometer, anemometer Testo 416 were used.

By the video recording of the process, the established dependencies of the air velocity it was experimentally confirmed the redistribution of dispersed particles in the working zones, providing intensive purification of the air stream. It is experimentally ascertained that a rise of the air flow velocity (in the studied ranges) increases the purification ratio of the developed rotary cyclone by 4...4,8 %.

The experimental dependences of the total purification coefficient of the developed rotary cyclone from the size of the dispersed particles in case of the air velocity range, which is typical for the aspiration systems of mobile grain separators, were obtained.

As a result of a multifactor experiment of the dusty air stream purification process, the following rational values of the constructively- technological variables of the developed rotational cyclone are recommended: the swirler blades inclination angle



$\alpha = 17...22$  deg; rotor speed  $\Omega = 125...175$  rad/s; the opening width of the blinds  $b = 12.5...17.5$  mm; the number of discs of the extra-purifier  $n = 5...7$  pcs; the distance between the disks in the after-cleaner  $h = 1.25...1.75$  mm. It is determined that by the indicated parameters the total purification coefficient by the developed rotary cyclone is  $\eta = 90,7...90,8$  %.

The result of the research is also the identification of the range of the hydraulic resistance variation of the developed rotary cyclone with the extra-purifier (in the case of its determined rational parameters) which was 130...180 PA.

For the first time, a comprehensive substantiation of the parameters of the developed rotary cyclone in relation to the coefficients of purification and hydraulic resistance, technological parameters and physico-mechanical properties of the dispersed particles of the dusty air stream was carried out.

The objective of the experimental studies was also to ascertain the discrepancy between the results of experimental and theoretical studies, which does not exceed 4.3% in identifying the coefficients of the purification coefficients and hydraulic resistance of the developed rotary cyclone.

Complex substantiation of the parameters of the developed rotary cyclone with a multi-disk extra-purifier has been carried out. It takes into account: the stage of the process of cleaning the dusty air stream, the intermediate removal of the dispersed particles, the technological parameters of the mobile grain separators and the physical and mechanical properties of the dispersed particles and dust.

Production testing of the developed rotary cyclone was carried out in accordance with the current standards and methods of field tests, together with representatives of the mechanical engineering plant of SVPT "Mechanic" and specialists of L. Pogorely UkrNIPIPT. The technological process of purification of dusty air stream in mobile grain separators of type OVS and SHS has been improved. It has been complete to the existing ones with the present intermediate removal of the dispersed particles and the purification of the dusty air stream.

It is ascertained that the use of rotary cyclone increases the efficiency of the

process of clearing the dusty air stream from light impurities and dust by 30... 35%, provides the normalized dustiness of the working area of mobile grain separators 3.1... 3.7 mg / m<sup>3</sup> and helps to increase their productivity by 20 ... 23.2%.

Regulatory and technical documentation for a rotary cyclone with an extra-purifier has been developed, which is transferred and used in mass production of grain separators and grain purification complexes at SVPT "Mechanic".

The use of modernized separators with a developed rotary cyclone in the conditions of LLC "Makovy" and the educational and research field of the KhNTUSG allowed to obtain a total annual economic effect of 132 thousand UAH.

**Key words:** cleaning processes, dusty air flow, cyclone, intensification, productivity, cleaning coefficient.

#### List of publications of the applicant

List of publications in which the main scientific results of the dissertation have been published:

1. Kharchenko S.A. The method of increasing the efficiency of the process of purification of air flow and the development of a cyclone of aspiration systems of grain cleaning machines / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Mechanization of agricultural production: Bulletin of KhNTU of agriculture*. – Kh., 2013. - Issue 135. - P.87–92.

2. Тищенко Л.Н. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в разработанном циклоне / Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Гаек Е.А. // *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. –Lublin-Rzeszow. – 2014. – Vol. 16, № 7. – С. 42 – 46.

3. Kharchenko S.A. Towards a mathematical model of the velocity field of the dispersed phase in a dusty air stream / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Vibrations in Engineering and Technology*. - Vinnytsia: VNAU. - 2014. - Vol. 1, No. 73. - P. 44 - 49.

4. Kharchenko S.A. Towards the construction of a mathematical model of the velocity field of the carrier phase in the working zone of a flow cyclone / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Modern directions of technology and mechanization of processes of*

*processing and food productions: Bulletin of KhNTU of agriculture.* - H., 2014. - Issue 152. - pp. 114 - 120.

5. Kharchenko S.A. Towards the construction of a mathematical model of the dynamics of dusty air flow in the area of the extra-purifier of the developed flow cyclone / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Mechanization of agricultural production: Bulletin of KhNTU of agriculture.* - Kh., 2015. - Issue 156. - P. 237 - 242.

6. Hayek E.A. Optimization of structural-kinematic parameters of the developed cyclone of aspiration systems of grain cleaning machines. *Engineering of nature management.* –Kh., 2015. - № 1 (3). - P.123 - 127.

7. Hayek E.A. Comparative analysis of the results of experimental and theoretical studies in the developed cyclone of aspiration systems of grain cleaning machines. *Technical systems and technologies of livestock breeding: Bulletin of the KhNTU of agriculture.* - H., 2015. - Issue 157. - P. 203 - 208.

8. Hayek E.A. A method of increasing the efficiency of the process of cleaning the dusty air stream by cyclone aspiration systems of grain separators / Gaek E.A., Beketova I.S. // *Engineering of nature management.* - Kh., 2015. - №2 (4). - P.101–105.

9. Hayek E.A. An algorithm for mathematical modeling of particles of a dispersed phase of a dusty air stream // *MOTROL "Commission of Motorization and Energetics in Agriculture"*. - Lublin-Rzeszow. - 2016. - Vol.18, №7. P. 79-83

10. Kharchenko S.A. Effective cleaning of dusty air stream by rotary cyclones at grain processing enterprises / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *International research and practice conference. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences.* - Radom, 2017. - P. 218 - 221.

11. Kharchenko S.A. Efficiency of dusty air stream cleaning by cyclones at grain processing enterprises / Kharchenko S.A., Hayek E.A. *Engineering of nature management.* - Kh., 2018. - № 1 (9). - P. 79 - 82.

12. Kharchenko S.A. Energy intensity and metal intensity of the process of purification of dusty air stream by the modernized SHS-25M separator / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Mechanization of agricultural production: Bulletin of KhNTU of agriculture.* - H., 2019. - Vy.199. - P.351 - 357.

Works which attest to the approbation of dissertation materials:

13. Kharchenko S.A. Improving the efficiency of cleaning of dusty air stream by the developed cyclone of aspiration systems of grain cleaning machines / Kharchenko S.A., Gayek E.A. // *Papers of the Scientific Conference of SNAU students* (1-8.11.2014). - Sumy, 2014. - In 3 vols. / Vol. - P. 62.
14. Kharchenko S.A. Intensification of the process of air stream purification by the developed cyclone of aspiration systems of grain cleaning machines / Kharchenko S.A., Gaek E.A. // *Papers of the KhNTU of agriculture International Conference: "Youth and Technological Progress in AIC"*. - Kharkiv: *KhNTU of agriculture*. - 2014. - P. 87.
15. Hayek E.A. Analysis of the ways of increasing the efficiency of the aspiration systems of grain cleaning machines / Gaek E.A., Sulamanidze E.A. // *Papers of scientific-practical conference of teachers, graduate students and students (dedicated to the 40th anniversary of Sumy NAU)*. - Sumy: SNAU, 2017. - In 3 vols. - P.64.
16. Hayek E.A. Cleaning of dusty air stream by rotary cyclones at grain processing enterprises // *Papers of the Ukrainian Student Scientific Conference* (13-17.11.2017). - Sumy, 2017. - P. 662.
17. Hayek E.A. Effective cleaning of dusty air stream by rotary cyclones at grain processing enterprises // *Papers of the XI International Scientific and Practical Conference: Problems of engineering, production and operation of agricultural machinery*. - Kropyvnytskyi: CNTU, 2017. P.218 – 220.

Works which additionally attest to the scientific results of the dissertation:

18. Cyclone: Pat. 103446 In Ukraine: IPC B04C 3/00. No. a 2012 14122; claimed 12.12.2012; publ. 10.102013, Bul. №19.
19. Cyclone rotary: Pat. 137443 In Ukraine: IPC B04C 3/06. 2019 02582; claimed 03.18.2019; publ. 25.10.2019, Bul. №20.

## ЗМІСТ

Вступ .....	19
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ .....</b>	<b>25</b>
1.1. Характеристики домішок зернового вороху і технологічні показники процесу його очищення .....	26
1.2. Аналіз досліджень процесів, способів очищення запиленого повітряного потоку від пилу, оцінка конструкцій пиловловлювачів.....	31
1.3. Аналіз математичних моделей процесу очищення запиленого повітряного потоку .....	51
1.4. Висновки за розділом, постановка мети та завдань дослідження .....	56
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В РОТАЦІЙНОМУ ЦИКЛОНІ.....</b>	<b>58</b>
2.1. Моделювання руху несучої фази запиленого повітряного потоку в розробленому ротаційному циклоні.....	59
2.2. Моделювання динаміки дисперсної фази запиленого повітряного потоку в розробленому ротаційному циклоні.....	70
2.3. Моделювання процесу очищення повітряного потоку в багатодисковому доочиснику розробленого ротаційного циклону.....	82
2.4. Розрахунок гідравлічного опору розробленого ротаційного циклону.....	86
2.5. Висновки за розділом.....	88
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>90</b>
3.1. Характеристика об'єктів дослідження.....	90
3.2. Дисперсна складова пилу запиленого повітряного потоку.....	102
3.3. Програма і методика експериментальних досліджень.....	105
3.4. Висновки за розділом.....	117
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>118</b>
4.1. Ефективність процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном.....	118

4.2. Визначення адекватності розроблених теоретичних положень.....	123
4.3. Закономірності руху компонентів запиленого повітряного потоку.....	125
4.4. Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів ротаційного циклону.....	126
4.5. Висновки за розділом .....	128
<b>РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО РОТАЦІЙНОГО ЦИКЛОНУ ТА ЙОГО ВИРОБНИЧА АПРОБАЦІЯ .....</b>	<b>129</b>
5.1. Виробнича апробація розробленого ротаційного циклону.....	129
5.2. Техніко-економічна ефективність використання розробленого ротаційного циклону.....	139
5.3. Висновки за розділом.....	144
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>145</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>148</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>172</b>
Додаток А. Програмне забезпечення для математичного моделювання процесу очищення запиленого повітряного потоку .....	173
Додаток Б. Оптимізація параметрів процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном.....	203
Додаток В. Програмне забезпечення для досліджень ефективності очищення запиленого повітряного потоку.....	223
Додаток Д. Акти випробування та впровадження результатів досліджень..	225
Додаток Е. Відомості про апробацію результатів дисертації.....	235

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Заплановане сталє виробництво зернових культур в Україні до 50 млн. т., потребує вчасної та продуктивної післязбиральної обробки зерна. Недостатня фактична наявність зерноочисних машин близько 50 %, більшість яких відпрацювала амортизаційні строки потребує високопродуктивних пересувних зернових сепараторів з ефективним технологічним процесами.

Аспіраційні системи пересувних повітряно-решітних зернових сепараторів повинні забезпечують роботу пневмосепараційних каналів та очищення запиленого повітряного потоку (ПП) від легких домішок та пилу за допомогою пиловловлювачів. Пиловловлювачі не в змозі задовільнити зростаючі вимоги виробництва: забезпечити нормовану запиленість робочої зони зі збільшенням продуктивності пересувних зернових сепараторів, та потребують істотного удосконалення.

Проведеним аналізом досліджень вчених встановлено, що перспективним напрямком підвищення ефективності очищення запиленого ПП є комбінування пристроїв різного принципу дії, застосування розробленого ротаційного циклону (РЦ) з багатодисковим доочисником. Використання етапного очищення з проміжним відведенням дисперсних частинок в розробленому РЦ дозволяє підвищити ефективність очищення запиленого ПП та збільшити продуктивність пересувних зернових сепараторів. Обґрунтування параметрів процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ з доочисником за наведених вище умов потребує проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення запиленого ПП і розробка нової конструкції РЦ із застосуванням доочисника є перспективним завданням для розвитку агропромислового комплексу України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до НДР: що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологічнобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насінневих матеріалів»

(ДР 0116 U 004624, 2016 – 2017 р.р.); комплексної державної цільової програми «Зерно України –2008 – 2015»; регіональних програм «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2020 року», «Найважливіші проблеми АПК на період до 2015 р.»; комплексної теми наукових досліджень з СВТП «Механік» м. Житомир «Підвищення ефективності процесів зернових сепараторів» (договір №14/1 від 24.11.2015 р.); науково-дослідної роботи: «Обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку циклоном зернових сепараторів» (ДР № 0115 U 002723, 2015 –2016 р.р.).

**Мета дослідження:** Метою роботи є підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів шляхом обґрунтування параметрів розробленого РЦ з доочисником.

**Завдання дослідження:**

- провести оцінку і аналіз існуючих підходів до розв’язання проблеми підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП;
- виконати моделювання руху дисперсної та несучої фаз в робочих зонах розробленого РЦ з урахуванням його конструктивно-технологічних параметрів, етапного очищення ПП та проміжного відведення дисперсних частинок;
- обґрунтувати підхід і розробити метод оцінки залежностей складових швидкості ПП з конструктивно-кінематичними параметрами розробленого РЦ, що визначають ефективне очищення запиленого ПП;
- обґрунтувати критерії оптимізації процесу очищення запиленого ПП, побудувати цільову функцію та визначити раціональні конструктивні параметри запропонованого РЦ пересувних зернових сепараторів;
- виконати оцінку впливу конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ на поле швидкості частинок дисперсної фази в робочих зонах;
- провести ідентифікацію швидкості ПП та дисперсних частинок, виконати оцінку адекватності та ефективності отриманих залежностей процесу очищення запиленого ПП експериментальними дослідженнями та виробничою апробацією РЦ.



**Об'єкт дослідження:** процес очищення запиленого ПП, його зв'язок з конструктивними параметрами розробленого РЦ.

**Предмет дослідження:** рух фаз запиленого ПП в основній робочій зоні та зоні доочисника, їх інтенсифікація та обґрунтування параметрів розробленого РЦ.

**Методи дослідження:** теоретичні дослідження процесу очищення запиленого ПП ґрунтуються на основних положеннях механіки гетерогенних середовищ, аеродинаміки. Розв'язок розроблених математичних моделей динаміки несучої і дисперсної фаз в робочих зонах розробленого РЦ виконано з використанням методів розв'язання диференціальних рівнянь та комп'ютерної техніки. Експерименти проведені на лабораторному обладнанні з використанням відеозйомки та розробленого програмного забезпечення. При обробці результатів експериментальних досліджень застосовані положення теорії ймовірності та математичної статистики з використанням пакетів програм "Mathcad", "MatLab", "Excel". Для визначення оптимальних співвідношень конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ застосована методика планування факторного експерименту. Виробнича апробація розробленого РЦ проведена у відповідності до діючих міжнародних і державних стандартів, методів натурних випробувань та імітаційного моделювання.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

*Вперше:*

- встановлено взаємозв'язок конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ з критеріями ефективності процесу очищення запиленого ПП, що враховує етапне моделювання основного очищення запиленого ПП та його доочистку;

- визначені закономірності зміни складових швидкостей дисперсних частинок і ПП в основній робочій зоні та зоні доочистки розробленого РЦ, за допомогою побудованих рівнянь руху двофазного запиленого ПП, які враховують його фізико-механічні властивості та конструктивно-технологічні параметри РЦ;

- виконане комплексне обґрунтування параметрів розробленого РЦ по відношенню до коефіцієнтів очищення та гідравлічного опору, технологічних

показників і фізико-механічних властивостей дисперсних частинок запиленого ПП.

*Отримали подальший розвиток:* науково-методичні засади моделювання динаміки запиленого ПП, що ґрунтуються на русі гетерогенного середовища з властивостями в'язких рідин, із врахуванням параметрів розробленого РЦ, при яких забезпечується нормована запиленість обслуговуючої зони та збільшення продуктивності пересувних зернових сепараторів.

*Удосконалено:* технологічний процес очищення запиленого ПП в пересувних зернових сепараторах, який доповнено до існуючих урахуванням проміжного відведення дисперсних частинок та доочистки запиленого ПП.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами досліджень комплексно обґрунтовано раціональні параметри розробленого РЦ, використання якого підвищує технологічні показники продуктивності та якості очищення запиленого ПП в пересувних зернових сепараторах.

Запропонована науково-обґрунтована конструкція РЦ зернових сепараторів, яка підвищує ефективність процесу очищення запиленого ПП від легких домішок та пилу на 30...35 % і забезпечує нормовану запиленість робочої зони пересувних зернових сепараторів 3,1...3,7 мг/м<sup>3</sup>. Інтенсифікація процесу очищення ПП сприяє збільшенню продуктивності пересувних зернових сепараторів типу ОВС та СВС на 20-23,2 %, порівняно з існуючими.

Розроблена документація нової конструкції РЦ аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів, виготовлено дослідні зразки. Виробнича апробація модернізованих пересувних сепараторів успішно проведена в 2017-2018 рр. в умовах ТОВ «Маковій» м. Первомайськ Харківської обл., навчально-дослідного поля ХНТУСГ ім. П. Василенка при очищенні зернових сумішей озимої пшениці, соняшнику, гороху, сої. Загальний річний економічний ефект експлуатації одного сепаратора склав 132 тис. грн. Виробнича перевірка розробленого РЦ та обробка результатів випробувань проведені спільно з фахівцями УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого.

За результатами досліджень розроблено технічну документацію на РЦ, яка передана та використовується при серійному виробництві зернових сепараторів та зерноочисних комплексів на СВПТ «Механік» м. Житомир.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: огляд і аналіз досліджень, визначення перспектив підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП; виконання математичного моделювання руху несучої та дисперсних фаз, обґрунтування граничних умов, проведення аналізу результатів моделювання; розробка методики, проведення та обробка результатів експериментів, наведення рекомендації щодо подальшого застосування розробки. Запропонована конструкція РЦ з доочисником захищена патентами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних конференціях (МНПК): на XII МНПК «Вібрації в техніці та технологіях» (ХНТУСГ, Харків, 21.10.2013 р.); на XVII МНПК «Сучасні проблеми землеробської механіки» СНАУ присвячена 116-річчю з дня народження П.М. Василенка, (СНАУ, Суми, 17.10.2016 р.); на МНПК «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, 28.12.2017); на XI МНПК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (ЦНТУ, Кропивницький, 1.11.2017 р.); на МНПК «Технічний прогрес в АПК», «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин», «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (ХНТУСГ, Харків, 20.03.2014 р., 19.03.2015 р., 24.03.2016 р., 23.03.2017 р., 21.03.2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 19 наукових працях, у тому числі: 9 статтях у спеціалізованих наукових виданнях України і 3 статті у закордонних виданнях (з них 2 у виданнях, що індексуються

міжнародними наукометричними базами); 5 тез у збірниках доповідей наукових конференцій. Отримано 2 патенти.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків на 50 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 130 сторінок, містить 69 рисунків, 14 таблиць. Список використаних джерел нараховує 205 найменувань на 24 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

Дослідженням взаємодії сипучих середовищ з робочими органами сільськогосподарських машин, у тому числі зернових сепараторів, інтенсифікацією технологічних процесів займалися: В.П. Горячкін [51], П.М. Василенко [106], В.В. Адамчук [1, 2], Г.Є. Листопад [89], П.М. Заїка [63,64], А.Н. Прилуцький [127], П.С. Берник [18], Б.І. Котов [75–79, 193], В.С. Ловейкін [90], О.І. Завгородній [62], Л.М. Тіщенко [151–155], В.М. Дринча [57], Я.Д. Ярош [181] М.В. Бакум [8–12], С.П. Степаненко [138], В.П. Ольшанський [111], І.В. Твердохліб [149], С.О. Харченко [158–165] та інші.

Зменшення засміченості зернового матеріалу і підвищення продуктивності зерноочисних машин пов'язано з необхідністю поліпшення процесу очищення ПП пиловловлювачами від частинок легких домішок і пилу.

Технологічні процеси роботи зернопереробних підприємств та пересувних сепараторів - ворохоочищувачів СВС-15, СВС-5, ОВП-20, ОВВ-20, ОВС-25 супроводжується виділенням пилу. Згідно стандартів [41] кількість дисперсних частинок на одиницю об'єму повітря обслуговуючої робочої зони обслуговування обмежена та нормована. Згідно ГОСТ 12.1.005 – 88 запиленість повітря обслуговуючої робочої зони зернових сепараторів не повинна перевищувати 4 мг/м<sup>3</sup>. Обслуговуючою зоною вважають простір заввишки до 2 м над рівнем підлоги або майданчика, на якій знаходяться місця постійного або тимчасового перебування працюючого персоналу [42–44].

Для підтримки нормованої запиленості обслуговуючої зони зерноочисні машини забезпечені пиловловлюючими пристроями. Згідно з ГОСТ 25199 – 82 [49], вони являють собою систему елементів, що складається з пиловловлювача (апарату для очищення газу від зважених дисперсних частинок), розвантажувального пристрою, регулювального обладнання та вентилятора.

У більшості випадків пиловловлюючі пристрої зернових сепараторів мають два ступені очищення: в першій - відокремлюються важкі і великі частинки домішок (пилоосаджувальні камери, жалюзійні інерційні пиловловлювачі, циклони), у другій – ПП доочищується від пилу (всмоктувальні і нагнітальні фільтри, більш досконалі циклони) [38, 62, 90, 91]. Недостатня ефективність роботи пиловловлювачів внаслідок обмеженої пилоємності фільтруючих елементів призводить до їх забивання останніх. Як наслідок, відбувається підвищення запиленості повітря робочої зони.

Недостатня ефективність існуючих конструкцій пиловловлювачів приводить до зменшення завантаження зернових сепараторів, яке визначає кількість частинок домішок та пилу в ПП аспіраційних систем. Значна кількість та дрібно-дисперсність частинок домішок та пилу спричиняють проблему при очищенні ПП. Подальше підвищення продуктивності пересувних зернових сепараторів неможливе без поліпшення ефективності процесу очищення ПП в аспіраційній системі, розробки ефективних пиловловлювачів.

Таким чином, визначення способів очищення ПП і конструкцій апаратів спрямованих на створення конкурентоспроможної зерноочисної техніки вітчизняного виробництва, є перспективним напрямком. Для дослідження процесу очищення ПП пиловловлювачами необхідно провести аналіз характеристик частинок домішок та пилу при очищенні зернових сумішей.

### 1.1. Характеристики домішок зернового вороху і технологічні показники процесу його очищення

За агротехнічними вимогами до зернозбиральних комбайнів чистота зернового вороху становить: при прямому комбайнуванні не нижче 95 %, при роздільному не нижче 96 %. Тобто, вміст легких домішок у зернових сумішах не перевищує  $\delta = 5 \%$  [106, 111]. Однак ці вимоги не завжди виконуються і на післязбиральну обробку надходить зерновий ворох чистота якого становить 74...99 % [50].

Машини попереднього очищення (сепаратори-ворохоочисники) виконують очищення зібраного зернового матеріалу вологістю до 40 % з вмістом смітної домішки до 20 %, в тому числі фракції соломистих домішок - до 5 % [44, 72].

Згідно ДСТУ 4138-2002 [55, 116] до домішок відносять залишки насіння, які втратили половину або більше свого розміру, порожні колоски, колосові і квіткові оболонки, плівки, уламки стебел, листя, гниле і проросле зерно, грибкові утворення, ґрунт, каміння, пісок і т.д. При пневмосепарації є можливість виділити частину вищевказаних домішок, які відрізняються від зерен основної культури аеродинамічними характеристиками.

Концентрацію частинок домішок та пилу ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) на вході в пиловловлювач визначають за виразом [55, 112, 113]:

$$\mu_k = \frac{P}{Q \cdot 100} \delta, \quad (1.1)$$

де  $P$  – продуктивність сепаратора,  $\text{кг}/\text{год}$ ;  $Q$  – витрати повітря,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;  $\delta$  – вміст домішок в зерновій суміші, %.

Запилений ПП являє собою багатодисперсну систему, що складається з газоподібної несучої (повітряної) і дисперсної фази (частинки пилу і домішок).

До складу зернової маси входять, як зерна основної культури, так і різноманітні домішки. Домішки та пил - це неоднорідна система частинок, що мають відмінну геометричну форму та розміри, щільність яких варіюється. У багатьох випадках частинки домішок є ізомерами, тобто речовинами, які, маючи практично однаковий хімічний склад, володіють різними фізичними і хімічними властивостями через відмінну будову.

Домішки та пил за основними геометричними ознаками поділяються за: дисперсним складом, формою, макро- і мікрорельєфом поверхні. Частинки мають фізико-механічні властивості: масові (щільність однієї і сукупності частинок); аеродинамічні (обумовлені в'язкими і динамічним зіткненням повітряного середовища); електрофізичні; теплофізичні та ін.

За даними ВНДІЗ в зерні міститься до 0,3 % пилу до його загальної маси [75, 95, 158].

Частина зернового пилу знаходиться в зв'язаному стані, тобто, в звичайних умовах не відділяється від поверхні зерна і залягає в борозенках насіння і оболонках. В процесі очищення зерна відбувається відділення від поверхні мінеральних (в основному ґрунтового походження) і органічних частинок (оболонки і частинки зерна, частки колоса і т.п.). Інтервал дисперсності частинок подібного пилу варіюється від  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  см [112, 113, 124].

З вищевикладеного випливає, що для пересувних зернових сепараторів-ворохоочисників СВС-20(ОВС-25) при продуктивності 15000...25000 кг/год вміст смітної домішки складе 3000...5000 кг/год, соломистих частин 750...1250 кг/год, частинок пилу близько 45...75 кг/год. Причому частинок пилу розмірами до 1 мкм до 3,735 кг/год, понад 1...5 мкм до 7,47 кг/год, понад 5 до 10 мкм до 11,16 кг/год, понад 10 мкм до 22,635 кг/год.

Пил є одним з поширених несприятливих факторів, що створюють негативний вплив на здоров'я працюючих. Технологічні процеси зернопереробних підприємств супроводжуються утворенням дрібних частинок твердої речовини - пилу, які потрапляють в повітря виробничих приміщень і певний час знаходяться в ньому в підвішеному стані [19, 37, 131, 132].

Пилом називають зважені в повітрі тверді частинки розмірами в мікронах, які повільно осідають. Багато видів виробничого пилу являють собою аерозоль [156, 178].

За розміром частинок (дисперсності) розрізняють: видимий пил розміром більше 10 мкм: мікроскопічний – 0,25...10 мкм; ультрамікроскопічний – менше 0,25 мкм.

Відповідно до загальноприйнятої класифікації всі види виробничого пилу поділяються на органічні, неорганічні і змішані.

Частинки пилу розміром 5 мкм і менше здатні проникати глибоко в легені, аж до альвеол.

Частинки пилу розміром 5...10 мкм переважно затримуються у верхніх дихальних шляхах, в бронхах і в легені потрапляють в невеликій кількості. Частинки розміром більше 10 мкм в організм людини майже не проникають.



Пил створює негативний вплив як на організм людини, так і на обладнання [7, 110]. Безпосередній вплив на обладнання відбувається при виконанні технологічного процесу, що призводить до зміни технічного стану обладнання та погіршення якості продукції.

Здатність утворювати з повітрям вибухонебезпечну суміш є негативними властивостями багатьох видів пилу. Для пилу харчових виробництв питання пожежо- та вибухонебезпечності мають особливо важливе значення. Цей пил є органічним пилом рослинного походження.

Однією з різновидів реакції горіння є вибух. Для вибуху характерно виключно швидке, практично миттєве протікання реакції в об'ємі. При вибухах пилу на підприємствах можливі вельми важкі наслідки – нещасні випадки з людьми, руйнування та пошкодження обладнання, конструкцій і т.п. [27, 28].

Перераховані вище вимоги до запиленості регламентовані ГОСТ 12.1.005-88 [41], в якому встановлені гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин в повітрі обслуговуючої робочої зони виробничих приміщень, а також клас небезпеки зазначених речовин, в тому числі для пилу, який є характерним для харчових виробництв (табл.1.1).

Необхідні параметри повітряного середовища на постійних і непостійних робочих місцях виробничих приміщень встановлюються залежно від категорії тяжкості робіт. Більшість робіт на підприємствах галузі відноситься до категорій Па і Пб. До категорії Па відносяться роботи, пов'язані з постійним пересуванням, що виконуються стоячи або сидячи, які не потребують переміщення важких предметів. До категорії Пб належать роботи, пов'язані з пересуванням і перенесенням невеликих (до 10 кг) предметів. До I категорії відноситься праця службовців, операторів, диспетчерів; до III категорії – праця робітників зерносушарок.

Детальний поділ виробничих процесів за категоріями тяжкості виконуваних робіт і технологічні вимоги до параметрів мікроклімату виробничих приміщень передбачаються галузевими нормативами.

Таблиця 1.1

## Характеристики пилу зернопереробних підприємств

Вид пилу (фракція подрібненого продукту з розміром частинок менше 70 мкм)	Дані аналізу, %		Параметри пилоповітряного вибуху	
	Вологість	Зольність	Температура вибухового запалення, °С	НКМРП, г/м <sup>3</sup>
Млинова пил сіра	8,1	16,5	800	17,6
Пшениця подрібнена	10,4	2,3	875	15,1
Борошно пшеничне	11,1	1,5	825	35,3
Висівки пшеничні дрібні	9,4	4,3	825	17,6
Борошно житнє з цілого зерна	10,3	1,9	875	27,7
Вівсяне борошно з цілого зерна	10,9	3,3	775	30,2
Вівсяна мучка	9,7	3,0	800	25,2
Вівсяна лузга	-	-	666	22,7
Висівки житні	10,2	5,7	800	52,9
Елеваторний пил (зерно жита - фракція близько 800 мкм)	5,5	10,5	800	227,0
Млинова пил сіра	8,1	16,5	800	17,6

Гігієнічні вимоги до повітряного середовища виробничих приміщень висуваються відповідно до технологічних вимог, які обумовлені технікою безпеки і профілактикою пожеж і вибухів. Дотримання ГДК, НКМРП (нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я), гігієнічних вимог, поряд з іншими заходами, гарантує пожежо-вибухобезпечність виробництва.

Недотримання цих вимог, наприклад значне перевищення температур повітря, призводить до зниження відносної вологості і, відповідно, до зниження значень НКМРП пилу [54,176, 203].

Пил зернопереробних підприємств створює пожежо- та вибухонебезпечність. Пил яка вітає в повітрі є вибухонебезпечною, а осіла на будівельні конструкції та обладнання – пожежонебезпечною.

Вибухонебезпечні концентрації можуть утворюватися в технологічному та транспортному устаткуванні, в силосах та бункерах, в трактах аспіраційних систем і пневмотранспорту, в пиловловлюючому обладнанні тощо. Вибухонебезпечність пилу залежить від вмісту в ній органічних і мінеральних речовин, дисперсності і вологості [136]. При збільшенні вмісту мінеральних

домішок та зольності пилу підвищується значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Так мінеральний пил, який введений у вибухонебезпечну пилоповітряну суміш, діє як флегматизуюча добавка на процеси запалення й горіння.

За ступенем впливу на організм людини шкідливі речовини поділяють на 4 класи: речовини надзвичайно небезпечні (4-й), високо небезпечні (3-й), помірно (2-й) і малонебезпечні (1-й).

За пожежо- і вибухонебезпечністю пил класифікується на групи і класи:

група А – НКМРП 65 г/м<sup>3</sup>: I клас – НКМРП до 15 г/м<sup>3</sup> (пил кормової мучки, пшеничних висівок); II клас – вибухонебезпечний пил з НКМРП 16...65 г/м<sup>3</sup> (пил комбікормів, пшеничного, ячмінного, вівсяного, горохової муки);

група Б – НКМРП понад 65 г/м<sup>3</sup>: III клас – найбільш пожежонебезпечний пил з температурою самозаймання до 250 С (елеваторна пил); IV клас – пожежонебезпечний пил з температурою самозаймання більше 250° С (вугільний та дерев'яний пил).

Таким чином, підвищення ефективності очищення запиленого ПП розробленим РЦ дозволить забезпечити нормовану концентрацію зернового пилу в повітрі обслуговуючої зони, створити умови для роботи персоналу та забезпечити працездатність обладнання протягом строку його експлуатації.

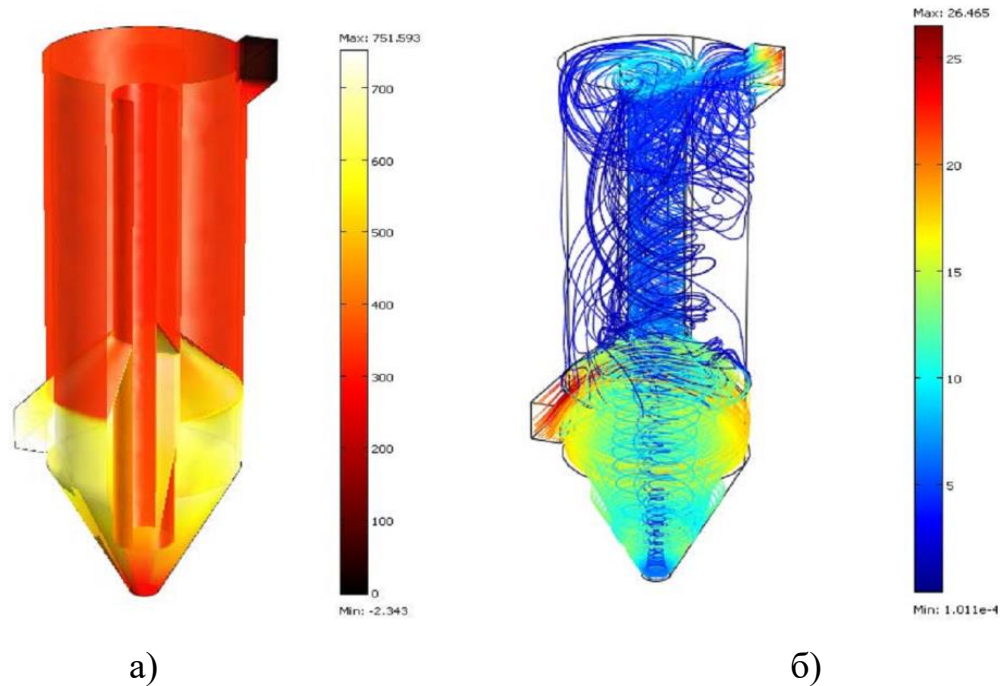
1.2. Аналіз досліджень процесів, способів очищення запиленого повітряного потоку від пилу, оцінка конструкцій пиловловлювачів

Отримання якісного зернового матеріалу в необхідних обсягах з дотриманням нормованої запиленості повітря робочої зони визначаються ефективністю процесів, способів очищення ПП, конструкціями пиловловлювачів зернових сепараторів.

Дослідженням процесів, способів очищення ПП і підвищення ефективності пиловловлюючих пристроїв присвячені роботи Ю.Р. Дадака [46, 47], Є.І. Ідельчика [115], Н.П. Сичугова [134], А.І. Буркова [22], Г.А. Васильєвої [27], В.П. Куца [85], В.В. Майструка [95], О.В. Шушлякова [179], В.І. Мулявко [99], С.О. Харченка

[158–165], В.С. Асламової [5, 183], Б.І. Котова [75–79, 193], Твердохліба І.В. [99] та ін.

Вловлювання пилу за допомогою ротаційних пиловловлювачів є одним з перспективних способів очищення ПП. Дослідження процесів, що відбуваються всередині пиловловлювачів, траєкторії ПП в робочих зонах наведені в роботах [26, 105, 119]. Характерні схеми руху запиленних потоків в ротаційних пиловловлювачах представлені на рис.1.1.



а – розподіл тиску;

б – розподіл тиску і лінії потоку газу при швидкості 20 м/с

Рисунок 1.1 – Схема руху розподілу тиску та руху запиленого ПП в циклоні

Запилений ПП подається через нижній отвір, де набуває вихровий рух – класичний для циклону. Подальший рух ПП ускладнюється за рахунок обертання лопатевого колеса, за допомогою якого утворюються додаткові відцентрові зусилля, які створюють умови для ефективної очистки пилогазової суміші. Далі проходить складна за характером зміна напрямку обертання за рахунок обертання крильчатки. Ефективність даного циклону складає  $\eta = 95\%$  при розрахунковому надлишковому тиску на вхідному патрубку близько 750 Па.

Обертові дискові системи (рис.1.2) широко зустрічаються в газових і парових турбінах, теплоенергетиці, енергетиці, апаратах хімічної технології, промислових масообмінних пристроях і т.п [173, 118]. Запилений ПП подається в дисковий

очишувач за рахунок тиску, що утворився між дисками, дисперсні частинки відкидаються у бік від осі дискової системи. До переваг даних апаратів відноситься можливість відділити дрібнодисперсні частинки від ПП. Недоліком є те що, система не має отворів або каналів для відведення очищеного ПП, що утворює значний гідравлічний опір.

Відомі конструкції прямоточних пиловловлювачів (рис.1.3, 1.4) циклоного типу для сухого механічного очищення газів. Ефективність вловлювання від пилу в представлених циклонах становить 70 % для часток діаметром 10 мкм і більше при гідравлічному опорі, що не перевищує 1400 Па [57, 120].

Для підвищення ефективності очищення ПП в [82, 84, 130] використано циклон з поперечно-поточною зоною поділення (рис.1.3, 1.5). Запилений ПП поступає через тангенціальний патрубок 1 у завихрювач 2 гвинтового типу, де набуває обертального руху. Під дією відцентрової сили дисперсні частинки отримують радіальний рух в напрямку від осі до стінки циклона 3, поблизу якої збільшується їх концентрація. Концентрований потік дисперсних частинок при русі вздовж стінки попадає в тангенціальну щілину 5 і через неї в пилозбірник 6. Очищений ПП через канал 7 відсмоктується вентилятором 8 і відводиться з апарату.

Недоліком даних апаратів (рис.1.3–1.5) є використання стаціонарних елементів, дія яких обмежена швидкістю ПП на вході. Це утворює недостатній імпульс, який надається дрібно-дисперсним частинкам пилу та сприяє перерозподілу їх до периферії робочої зони. Наслідком цього є недостатня ефективність очищення ПП. Часткове вирішення подібного негативного ефекту приведене в конструкції (рис. 1.5), де передбачений вентилятор що всмоктує дрібнодисперсні частинки пилу та виносить їх через вихідний патрубок.

Вихрові пиловловлювачі подібно до циклонів та ротаційних пиловловлювачів, відносяться до апаратів відцентрової дії. Їх відмінною особливістю є висока ефективність очищення ПП від дрібнодисперсних фракцій менше 5 мкм.

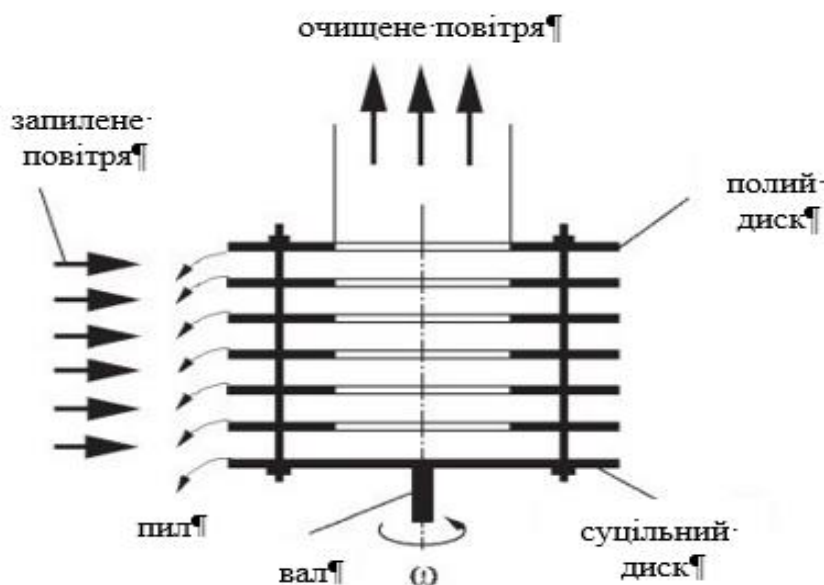
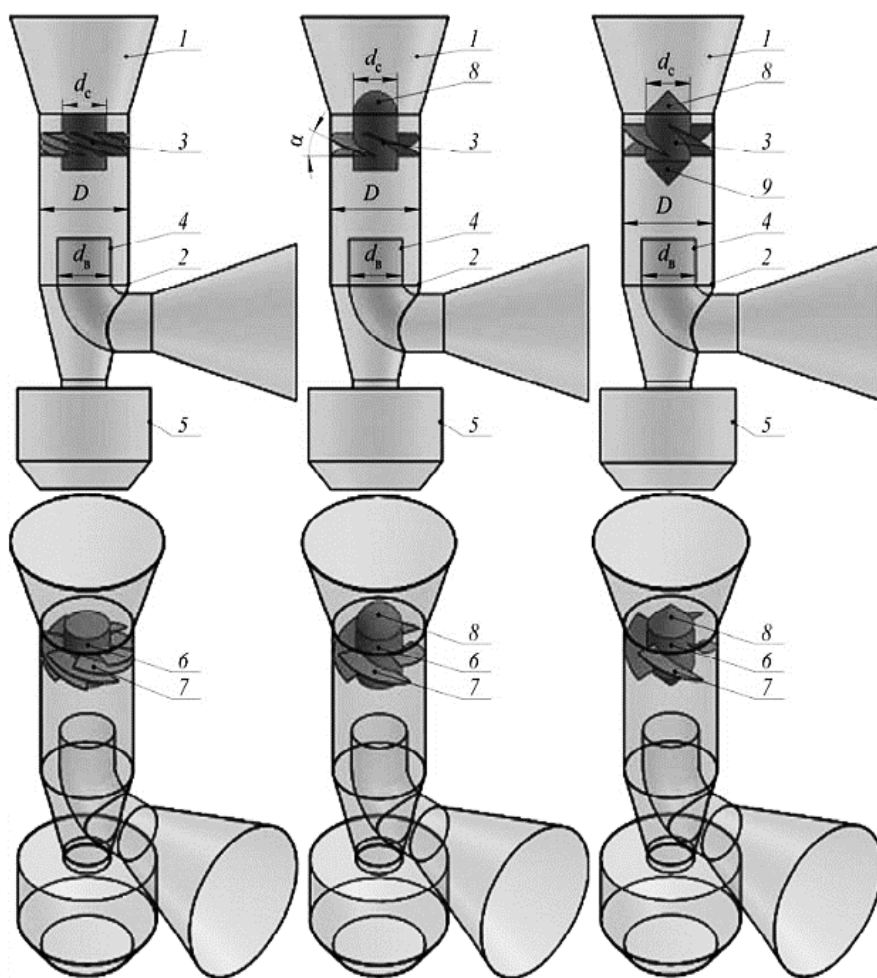
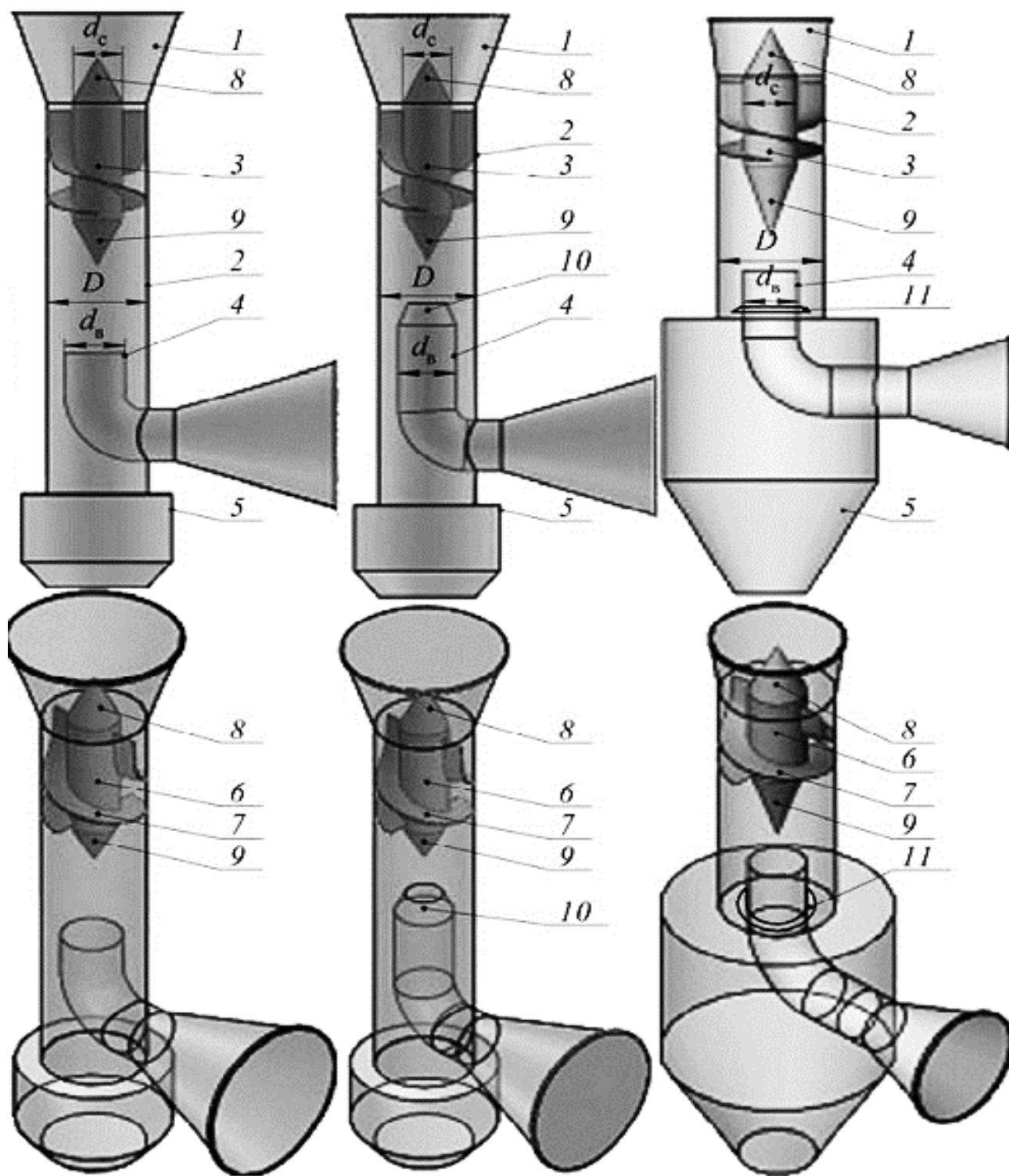


Рисунок 1.2 – Пиловловлювач з обертовими дисковими очисниками



1 – патрубок вхідний; 2 – корпус апарату; 3 – завихрювач; 4 – патрубок виведення очищеного газу; 5 – бункер; 6 – циліндрична частина завихрювача; 7 – лопаті завихрювача; 8 – обтікач верхній; 9 – нижній обтікач; 10 – дифузор;

11 – відбійне кільце;  $d_b$ ,  $d_c$  – діаметр вихлопної труби і сердечника  
Рисунок 1.3 – Конструкції циклонів з завихрювачем типу «розетка» і різними типами обтікачів

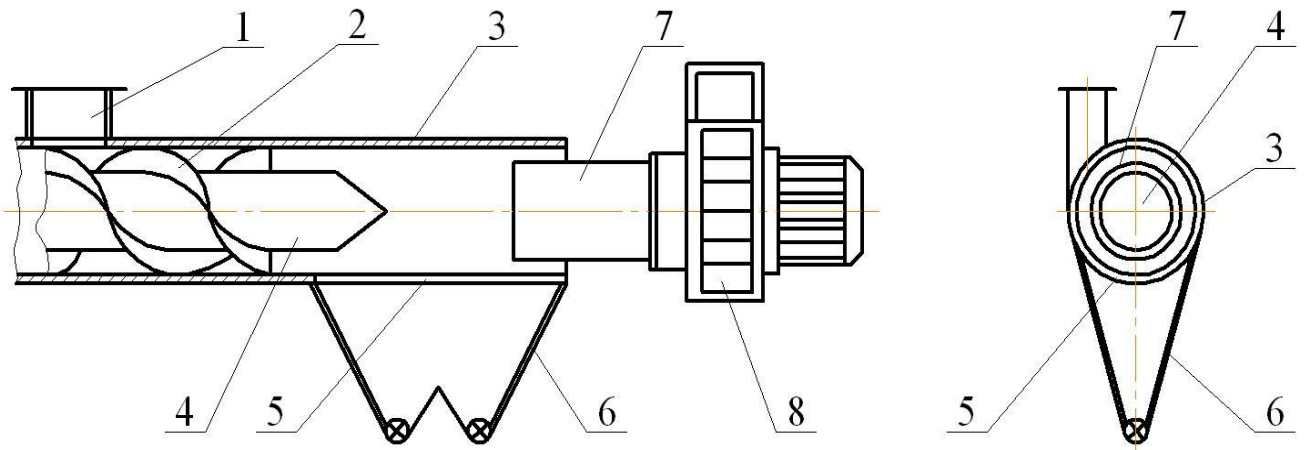


а – з завихрювачем типу «гвинт» і циліндричним корпусом апарату; б – з дифузором на вихлопній трубі; в – з патрубком через бункер і відбійним кільцем

1 – патрубок вхідний; 2 – корпус апарату; 3 – завихрювач; 4 – патрубок виведення очищеного газу; 5 – бункер; 6 – циліндрична частина завихрювача; 7 – лопаті завихрювача; 8 – верхній обтікач; 9 – обтікач нижній; 10 – дифузор;

11 – кільце відбійне;  $d_b$ ,  $d_c$  – діаметр вихлопної труби і сердечника,

Рисунок 1.4 – Конструкції циклонів



1 – патрубок тангенціальний; 2 – завихрювач гвинтовий; 3 – корпус циліндричний; 4 – вставка; 5 – тангенціальна щілина; 6 – пилоосаджувальна камера; 7 – відвідний повітряний канал; 8 – відсмоктуючий вентилятор

Рисунок 1.5 – Конструктивна схема циклонного пилоочисника

Таким чином, використання вхідних завихрювачів потоку в циклонах сприяє перерозподілу дисперсних частинок та підвищенню ефективності очищення ПП.

Циклони з розділенням робочої зони на ділянки, з відведенням очищеного ПП або дисперсних частинок довели свою спроможність на практиці (рис. 1.6–1.8).

Так для розмеження робочої зони в [75–77] авторами в циклонах запропоновано використовувати жалюзі (рис.1.6). Встановлені жалюзійні відокремлювачі відводять з робочої зони циклона чисте повітря, при цьому підвищують концентрацію дисперсної фази та збільшують ефективність очищення ПП.

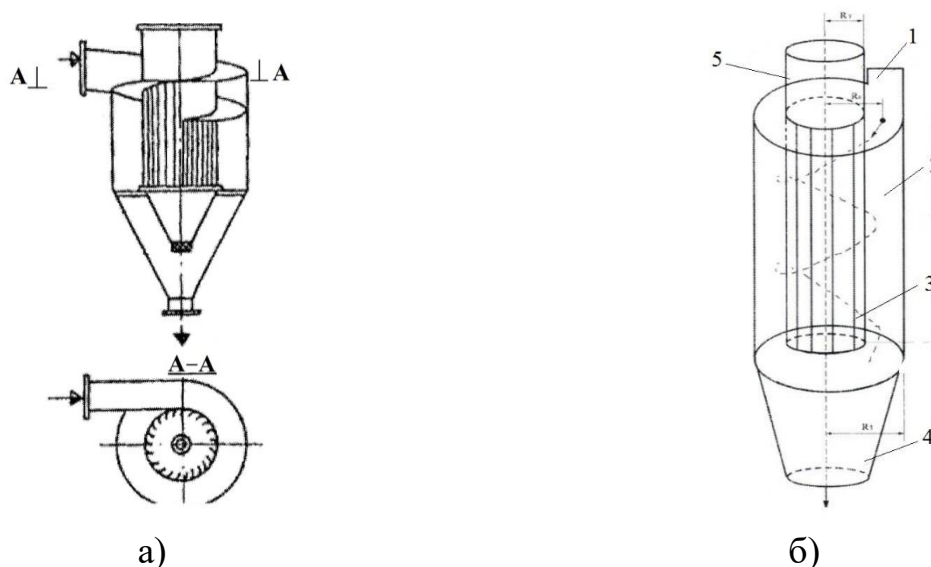
На рис.1.7, а представлений пиловловлювач В.В. Майструка [95], який включає конструкцію циклона і розташовані по зовнішній стінці циклона елементи додаткового відведення дисперсних частинок – поперечними щілинами. Завдяки ним відбувається проміжне відведення дисперсних частинок, які концентруються біля зовнішньої стінки циклону та осаджуються у відповідній зоні. Згідно з дослідженнями дана конструкція на 12 % збільшує ефективність очищення ПП в порівнянні зі стандартним циклоном ЦН-15.

В.С. Асламова [5] розробила конструкцію прямого циклону з використанням завихрювача та проміжним відведенням уловлених дисперсних

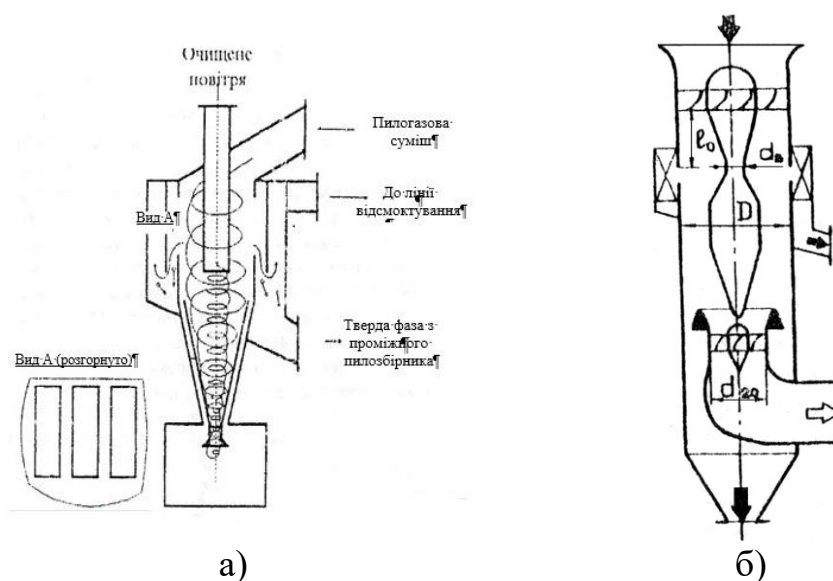


частинок (рис.1.7, б). Подібна конструкція дозволила комплексно діяти на дисперсні частинки та отримати значну ефективність очищення ПП 97...98 %, при гідравлічному опорі 1,43 кПа.

Аналізом рис. 1.6, 1.7 встановлено, що проміжне відведення дисперсних частинок або чистого повітря з робочої зони апаратів за допомогою щілин або жалюзі покращує ефективність очищення ПП.

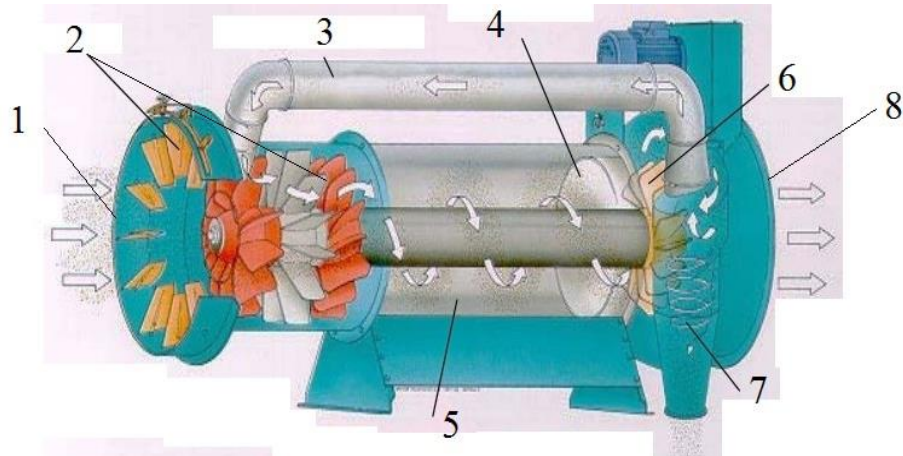


а – відцентрово-інерційний пиловловлювач конструкції В.П. Куца;  
 б – пиловловлювач з жалюзійним відділювачем конструкції Ю.Р. Дадака  
 1 – патрубок вхідний; 2 – корпус циклона; 3 – відокремлювач жалюзійний;  
 4 – конічна частина циклона; 5 – патрубок виходу очищеного повітря  
 Рисунок 1.6 – Конструкції циклонів з жалюзійними елементами для відведення чистого повітря



а – конструкції В.В. Майструка; б – конструкції В.С. Асламовой  
 Рисунок 1.7 – Циклони з проміжним відбором дисперсних частинок

Машинобудівними компаніями Cimbria [69,187] і Akron [204] для очищення запиленого ПП запропоновані апарати ротаційного принципу дії – циклофени (рис.1.8). Технічні характеристики розглянутих апаратів представлені в таблиці 1.2.



1 – патрубков вхідний; 2 – завихрювач стаціонарний; –3 труба повернення повітря на доочищення; 4 – пиловідокремлювач; 5 – основна робоча зона; 6 – завихрювач; 7 – циклон; 8 – вихідний патрубок

Рисунок – 1.8 Конструктивна схема циклофена компанії Cimbria

Таблиця 1.2

#### Технічні характеристики циклофенів

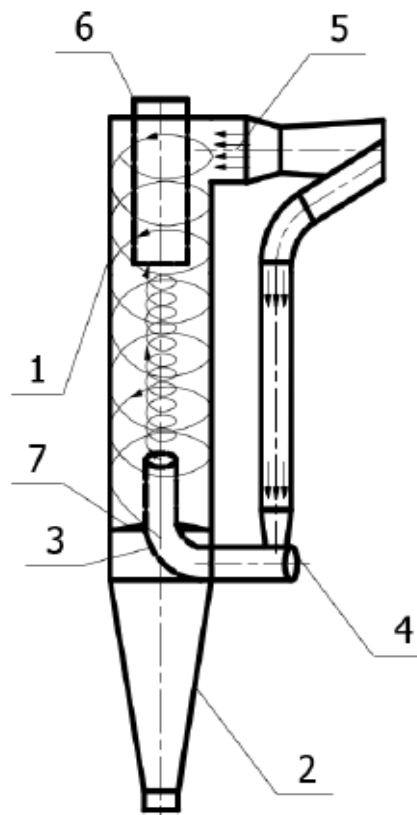
Найменування показників	AKRON				CIMBRIA			
	CF 610	CF 615	CF 920	CF 930	CF10	CF15	CF20	CF30
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	12,500	15,500	30,500	36,500	13,000	16,000	23,000	30,000
Тиск, Па	735	735	735	735	735	735	735	735
Ефективність пиловловлення, %	99	99	99	99	98	98	98	98
Потужність, кВт/год	7,5	11,0	15,0	22,0	7,5	11,0	15,0	22,0
Вага, кг	390	425	610	660	346	373	530	590

У циклофенах для створення сил що діють на дисперсні частинки використовується крильчатка, за рахунок якої запилений ПП обертається навколо вісі. За рахунок посиленого обертання повітря дисперсні частинки пилу концентруються в невеликій ділянці всього об'єму повітря у периферійній зоні біля зовнішньої стінки апарату.

Концентрований пилом запилений ПП, відділяється від чистого повітря в спеціальному відділенні циклофена за допомогою мініциклона. Пил видаляється з потоку в циклони, а повітря прямує назад в циклофен зі сторони всмоктування для рециркуляції та доочищення. Циклофен має високий коефіцієнт очищення запиленого ПП 98...99 % від домішок та пилу.

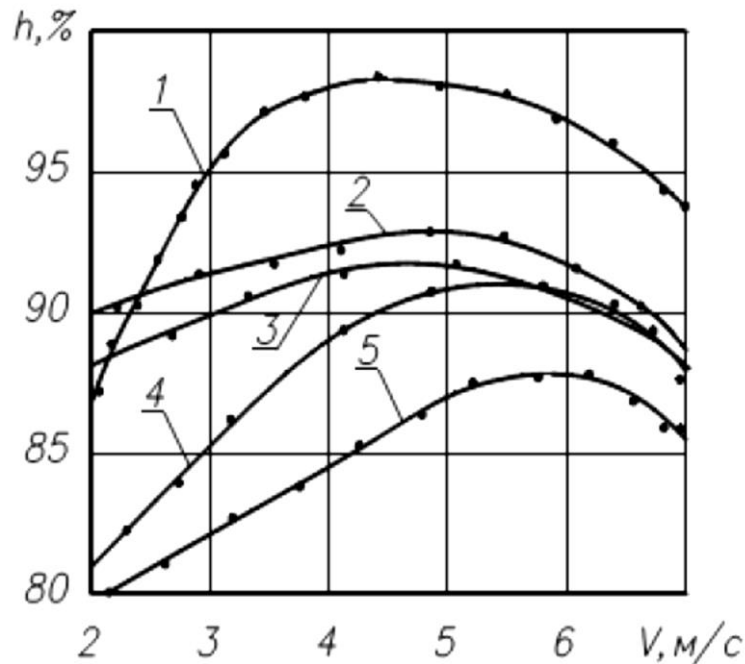
Недоліком представлених моделей є високі метало- та енергоємність конструкції, що унеможлиблює їх застосування на пересувних зернових сепараторах.

Вихрові пиловловлювачі очищують запилений ПП від частинок пилу за допомогою відцентрових сил [122, 123]. Основною їх відмінністю від циклонів є наявність допоміжного закручувального елемента газового потоку (рис.1.9). Використання додаткового впливу на дисперсні частинки за рахунок їх багатократного обертання навколо вісі сприяє збільшенню ефективності пиловловлювачів.



1 – корпус; 2 – мішок; 3 – патрубок осьовий; 4 – завихрювач;  
5 – патрубок тангенціальний; 6 – вихідний патрубок очищеного потоку  
Рисунок 1.9 – Вихровий пиловловлювач із зустрічними закрученими потоками

Очищене повітря по коаксіальному повітропроводу у верхній частині апарату відводиться з пиловловлювача. Обертання потоків всередині апарату має один напрямок. Залежності ефективності вловлювання дисперсних частинок з розмірами 2...10 мкм від швидкості газового потоку для різних конструкцій інерційних пиловловлювачів наведені на рис 1.10.



1 – ПВ ВЗП-400; 2 – СДК-ЦН-34; 3 – СДК-ЦН-33; 4 – ЦН-11; 5 – ЦН-15

Рисунок 1.10 – Залежності ефективності пиловловлювання інерційних пиловловлювачів від умовної швидкості потоку в поперечному перерізі апарату

Отримані авторами залежності (рис. 1.10) підтверджують високу ефективність вловлювання частинок понад 97 % за допомогою пиловловлювачів із зустрічно-закрученими потоками в порівнянні з класичними конструкціями інерційних пиловловлювачів, ефективність яких не перевищує 93 %. Слід відмітити, що ефективність їх використання обумовлена однаковістю розмірів дисперсних частинок, які для зернового пилу є полідисперсними (п.1.1).

А.І. Пірумов [188] розділяє пиловловлювачі на гравітаційні, інерційні, прямоточні, вихрові, тканинні, волокнисті і електричні. В [102, 205] приведені деякі параметри сухих механічних пиловловлювачів, що дозволяють провести порівняльний аналіз конструкцій і оцінити можливості при використанні в промисловій практиці (табл. 1.3).

Параметри сухих механічних пиловловлювачів

Тип пиловловлювача	Максимальна продуктивність, м <sup>3</sup> /год	Ефективність Пиловловлення % (розмір частинок), (мкм)	Гідравлічний опір, Па
осаджувальна камера	Визначається можливою площею	80-90% (>50мкм)	50-130
циклон	85000	50-80% (10мкм)	250-1500
батарейний циклон	170000	90% (5мкм)	750-1500
інерційний пиловловлювач	127500	90% (2мкм)	750-1500
прямоточний циклон	300-5500	>90% (>50мкм)	250-1200
рукавний фільтр	800-4000	до 99%	1000-1200
вихровий пиловловлювач	500-1500	2,5 мкм-92% 5 мкм-95% 10 мкм-98%	750-1000
циклофен	12500	99%	735

З таблиці 1.3 видно, що пиловловлювачі інерційної та відцентрової дії мають високу ефективність пиловловлення при досить малих розмірах дисперсних частинок домішок і однаковому гідравлічному опорі конструкцій.

Проведений аналіз конструкцій пиловловлювачів [53, 94, 100, 109], дозволив визначити наступну класифікацію (рис.1.11).

1. Механічні апарати.
2. Апарати з хімічною реакцією.
3. Апарати з використанням фільтрів.
4. Комбіновані апарати.
5. Апарати з електричною дією.

При виборі пиловловлювачів необхідно враховувати конструктивні особливості. Так, сухі механічні апарати характеризуються обмеженою сферою застосування по фракційності пилу, мають значні габарити, але прості в обслуговуванні та виключають періодичну експлуатацію, що є характерним для мокрих апаратів.

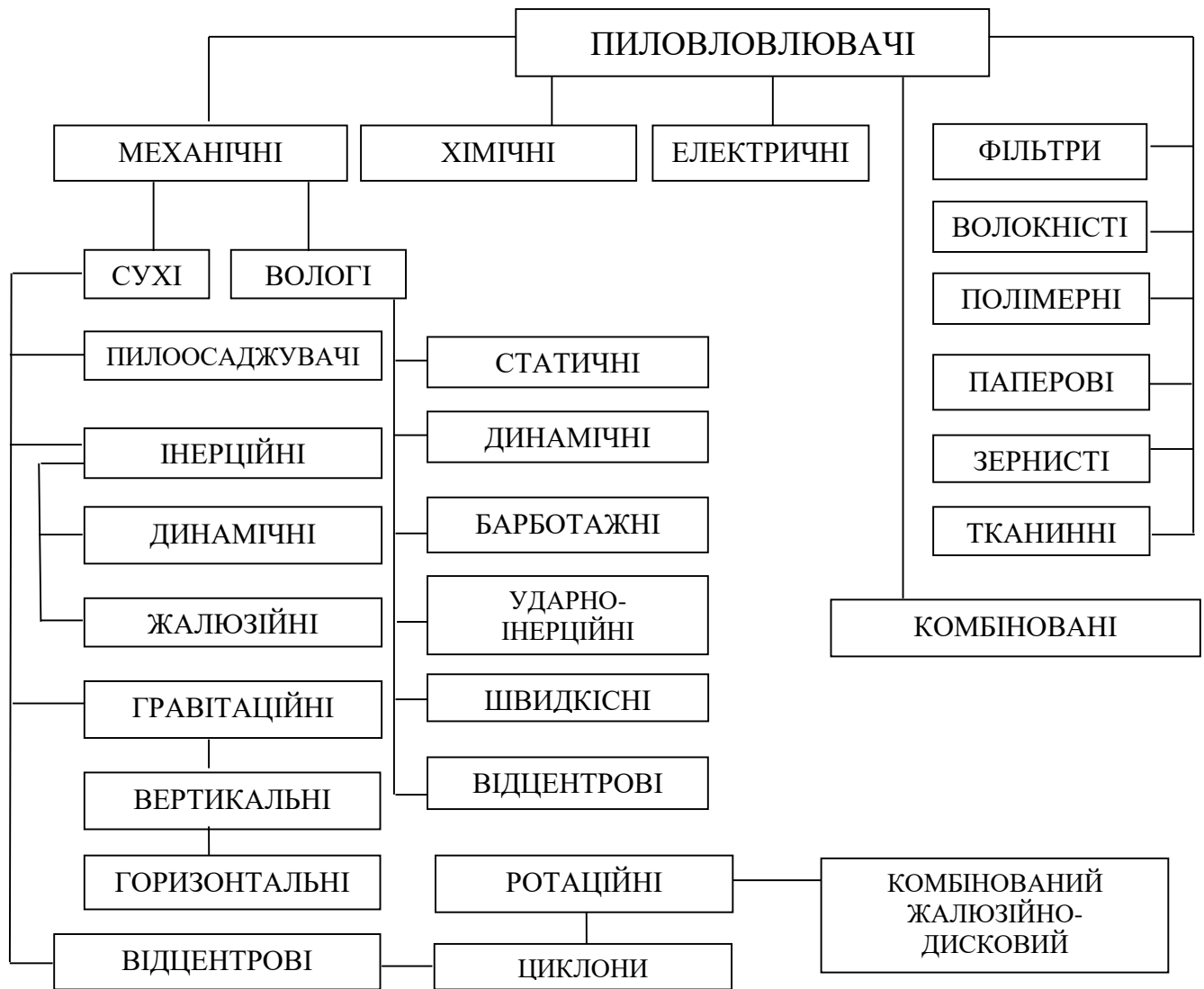


Рисунок 1.11 – Класифікація пиловловлювачів

Циклони є інерційними пиловловлювачами, у яких очищення газоподібного середовища виникає в обертовому потоці, під дією відцентрових сил. Відповідно до ДСТУ 12.2.043-80 циклони відносяться до 4 і 5 класу пиловловлювачів по ефективності, і вловлюють частинки розміром від 8 мкм.

Кожен із апаратів має відповідну область застосування і використання. Принцип дії апаратів базується на одному або декількох процесах обезпилювання осадження, відділення, коагуляції тощо.

В основі роботи пиловловлювачів можна виділити основні механізми:

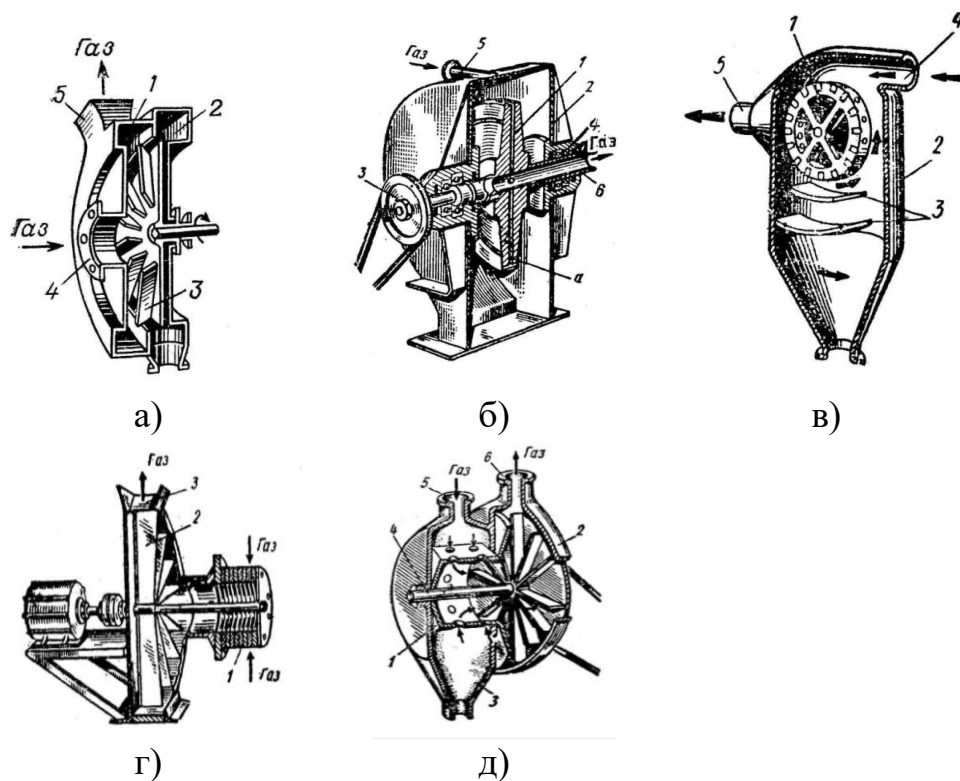
– гравітаційне осадження, коли вертикальний рух дисперсних частинок обумовлений силою тяжіння;

- інерційне відділення, коли вихід дисперсних частинок з криволінійних ліній руху ПП відбувається за рахунок сил інерції;
- відділення під дією відцентрових сил, коли на дисперсні частинки впливають відцентрові сили та відбувається їх перерозподіл до периферійних стінок апарату;
- ефект налипання, коагуляція коли частинки пилу з'єднуються одна з одною та відбувається зміна їх властивостей;
- фільтрування коли дисперсні частинки вловлюються;
- магнітне регулювання елементами осадження, коли зміна траєкторії руху заряджених дисперсних частинок відбувається в магнітному полі апарату.

Таким чином, з вищесказаного очевидно, що найбільш перспективним напрямком підвищення ефективності очищення ПП є використання відцентрових пиловловлювачів. Вони мають високу ефективність очищення при низькому гідравлічному опорі, не вимагають періодичного технічного обслуговування, додаткових витрат енергії, прості у виготовленні і монтажі.

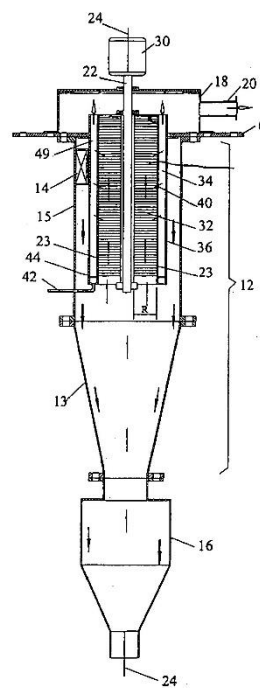
Найпростіші відцентрові пиловловлювачі ротаційної дії представляють собою механізм, що складається з робочого колеса і кожуха (пилоприймача) (рис.1.12) [67, 107]. Для підвищення ефективності процесу очищення відцентрові пиловловлювачі обладнані елементами: для направлення потоку (диски, лопаті тощо) (рис.1.12, а, б, д), для відведення дисперсних частинок з робочої зони (перегородки, камери тощо) (рис.1.12, в, г).

Встановлення додаткових елементів в циклони, які інтенсифікують перерозподіл дисперсних частинок знайшло відображення в [84] (рис.1.13). Циклон має подвійні канали фільтрації, які забезпечують завихрення потоку та відділення дрібних дисперсних частинок розміром до 1 мкм [147].



а – відцентровий пиловловлювач (сепаратор); б – відцентровий пиловловлювач ЦРП; в – відцентровий пиловловлювач конструкції Якімова; г – пиловловлювач конструкції Грищенко; д – відцентровий пиловловлювач конструкції Розенкранц і Пречистенського

Рисунок 1.12 – Відцентрові пиловловлювачі



а) б)  
а – вихровий сепаратор газу; б – роторний циклон  
Рисунок 1.13 – Конструкції циклонів виробництва США



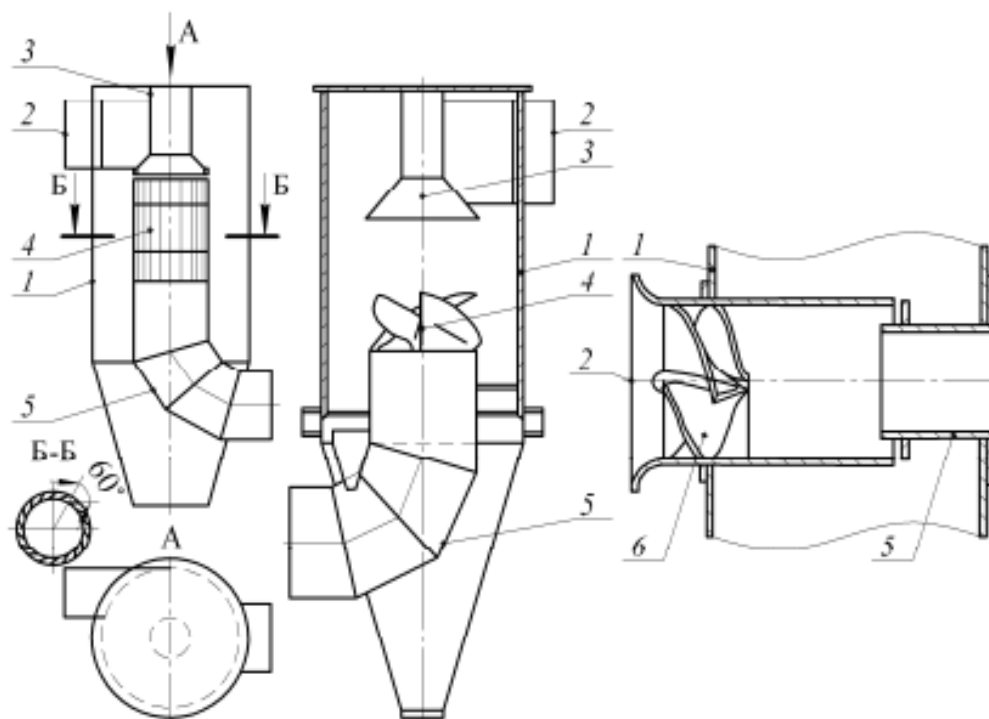
Ефективність очищення ПП за допомогою класичних циклонів визначається діаметром їх робочої частини, що значно утруднює практичне використання на пересувних зернових сепараторах. Одним з рішень є поєднання циклонів в групу з загальним підведенням запиленого та відведенням очищеного ПП, обладнаний бункером, так званий батарейний циклон. Однак ефективність роботи батарейних циклонів на 20...25% нижче окремих елементів внаслідок перетоків ПП викликаних різницею опору в різних ділянках апарату.

Перспективними з точки зору високої ефективності очищення ПП, низького гідравлічного опору, незначних габаритних розмірів показали прямоточні циклони (рис.1.14). Циклони ЦКТІ [86, 146] призначені для попереднього очищення димових газів перед електрофільтрами в системах золовловлення, а також в якості першого етапу очищення ПП з високою початковою запиленістю. Ефективність забезпечується за допомогою розкручувача потоку та обраного розміру вихідного патрубку.

Горизонтальний циклон (циклофен) ZEO-FC-10000 (рис. 1.15) є спільною розробкою Одеської національної академії харчових технологій і ДП «Зернова столиця» [89, 150]. Він комплектується інерційним пиловловлювачем 5, який закріплений на виході з периферійної частини горизонтального циклону 1. Горизонтальний циклон також комплектується спіралью-вихровим апаратом 10, закріпленим в кінцевій його частині і представляє собою закручену спіраль з пристроєм вивантаження продукту. Спіралью-вихровий апарат призначений для спрямування частини повітря в інерційний вловлювач.

При вході в горизонтальний циклон запилений ПП потік закручується за допомогою спеціальної дросильної заслінки 2 і пропускається через жалюзі 3. Проходячи через жалюзі потік частково очищається від дисперсних частинок пилу.

Також проводиться відсмоктування 10...15 % ПП через пилевипускний отвір 4, що надходить в циклон (інерційний пиловловлювач) 5, через спеціальний спіралью-вихровий апарат 10.



а)

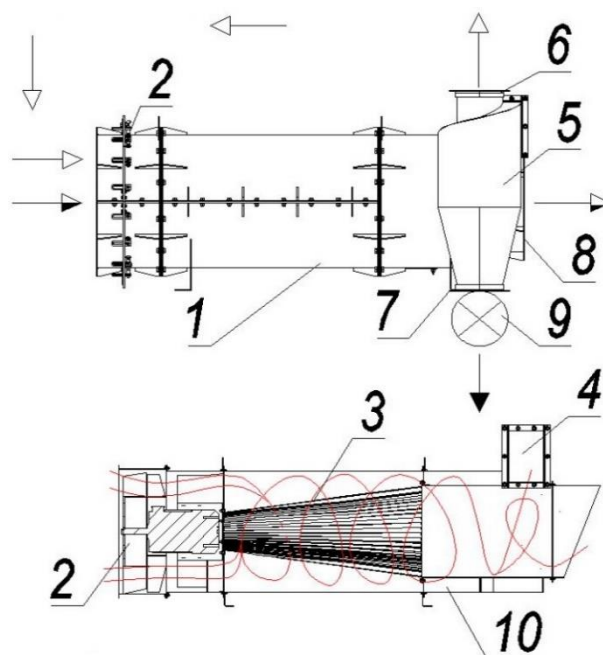
б)

а – ЦКТІ; б – циклонний елемент ЦКТІ;

1 – корпус; 2 – патрубок вхідний; 3 – обтікач; 4 – розкручувач;

5 – вихлопний патрубок; 6 – направлявач осьовий

Рисунок 1.14 – Прямоточні циклони



—▶ — концентрований пил; —▶ — запилений ПП;  
 —▶ —▶ — частково очищений ПП; —▶ — очищений ПП

1 – корпус; 2 – заслінка дросельна; 3 – жалюзі; 4, 6 – отвори впускний та випускний; 5 – циклон; 7 – отвір для вловленої пилу; 8 – отвір вихідний;

9 – затвор; 10 – апарат спіральньо-вихровий

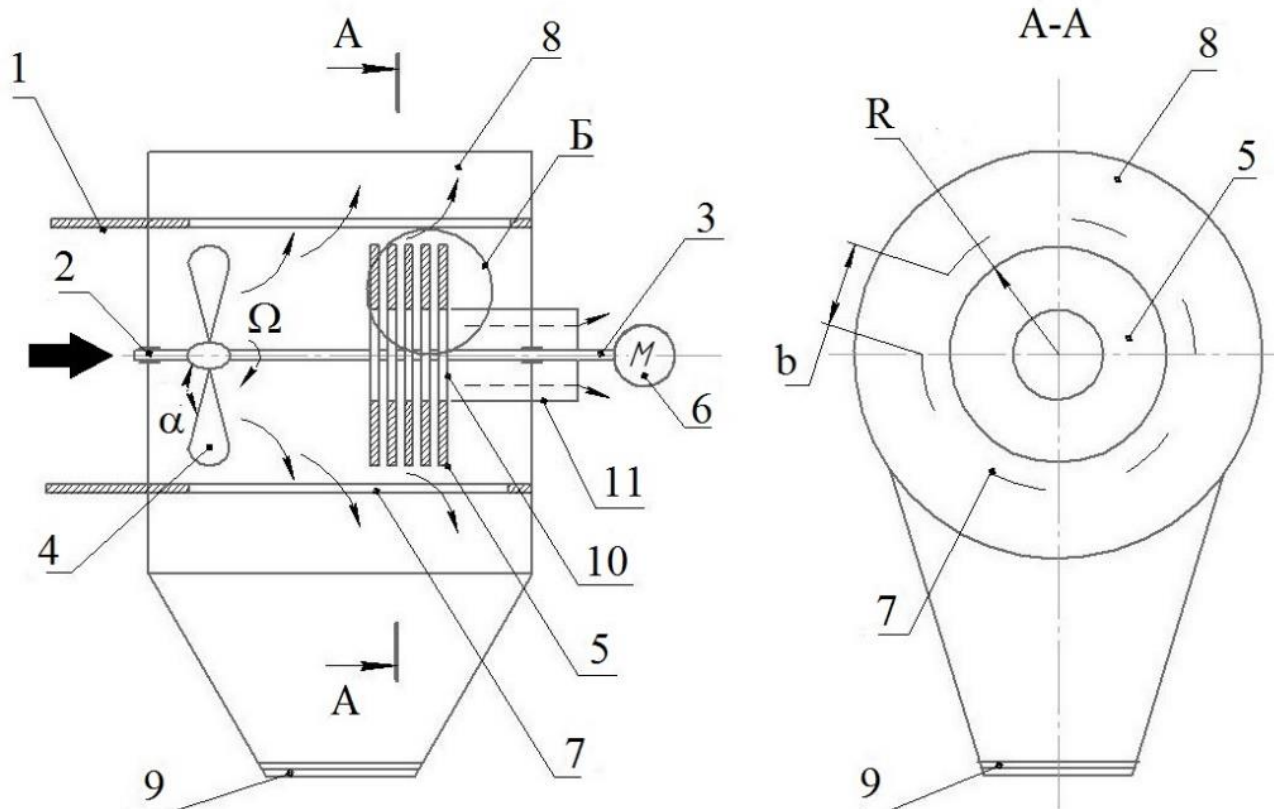
Рисунок 1.15 – Горизонтальний циклон ZEO-CF-10000

Частина потоку очищається від пилу в інерційному пиловловлювачі 5 і очищене повітря повертається на вхід горизонтального циклону 1. Інерційний пиловловлювач 5 також має впускний 4 і випускний 6 отвори, а вловлена пил виводиться через отвір 7. В результаті такої компоновки апарату концентрація пилу в ПП знижується в кілька разів. Пил з циклону виводиться за допомогою спеціального шлюзового затвору 9, а очищений ПП через вихідний отвір 8 надходить далі в магістраль. Горизонтальний циклон вловлює частинки пилу розміром більше 15...20 мкм, що нижче за ефективність вловлення РЦ.

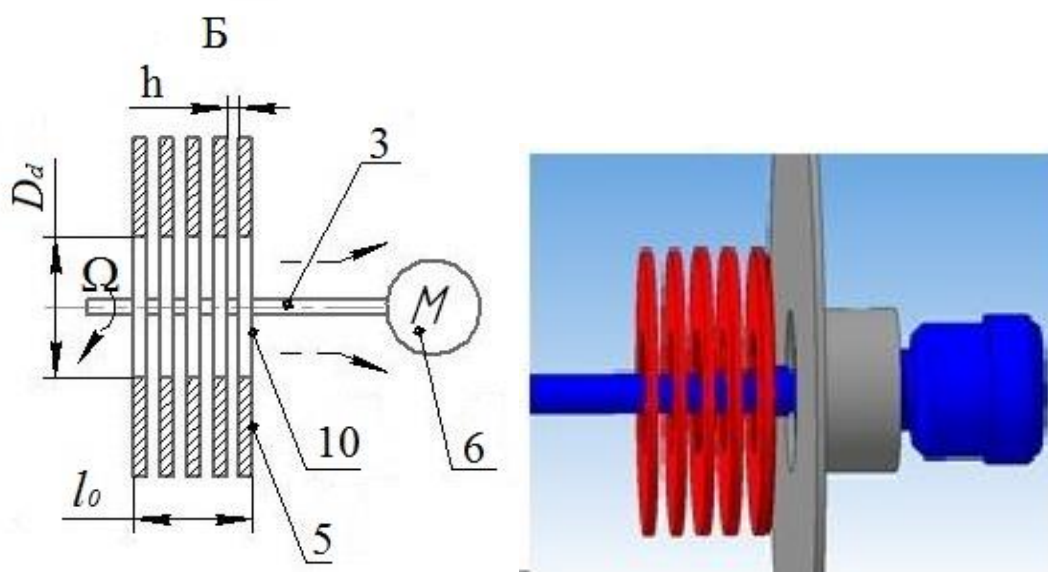
Для підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП пропонується використати перспективний спосіб комбінуванням пристроїв різного принципу дії з етапним очищенням та проміжним відведенням дисперсних частинок (рис.1.16) [35, 165, 168, 169]. Для цього використано активний вентилятор-завихрювач 4, проміжний відбір частинок через жалюзі 7 та багатодисковий доочисник 5.

Запропонована конструкція пиловловлювача включає в себе циліндричний корпус 1 з отворами 7 (рис. 1.16, а), в якому на опорах 2 встановлений вал 3 з завихрювачем 4 та дисковим доочисником 5. Вал обертається за допомогою електродвигуна 6. Отвори 7 корпусу 1 встановлені під кутом до осі обертання валу 3 і відділяють основну робочу зону і осаджувальну камеру 8, яка встановлена навколо корпусу 1. В нижній частині осаджувальної камери 8 встановлено шлюзовий затвор 9.

Багатодисковий доочисник 5 (рис. 1.16, б) складається із набору дисків однакового діаметра, в центральній частині яких виконані отвори 10. ПП через вихідний патрубок 11 виводиться із циклону. Для ефективного видалення дрібнодисперсних частинок з ПП між дисками, що обертаються, при певному зазору формується шар із якого за рахунок відцентрової сили частинки відокремлюються та направляються в пилоосаджувальну камеру 8.



а)



б)

а – загальна схема; б – багатодисковий доочищувач

1 – корпус; 2 – опори; 3 – вал; 4 – завихрювач; 5 – доочишник дисковий;  
 6 – електродвигун; 7 – жалюзі; 8 – камера осаджувальна; 9 – затвор шлюзовий;  
 10 – отвори дисків доочишника; 11 – патрубок вихідний

Рисунок 1.16 – Конструктивна схема розробленого ротаційного циклону з багатодисковим доочишником

Запилений ПП надходить в циклон на лопаті вентилятора-завихрювача, який обертається. Відцентрові сили спрямовують дисперсні частинки до стінок корпусу і через отвори в осаджувальну камеру. Очищений ПП виходить з пиловловлювача через центральні отвори дисків доочисника, які також обертаються. Дисперсні частинки, що залишилися в потоці, за рахунок тиску, що утворився між дисками, відкидаються через отвори в осаджувальну камеру.

Робочий процес очищення ПП в запропонованій конструкції ротаційного циклону з доочисником складається з двох етапів: основне очищення з проміжним відведенням дисперсних частинок та доочищення.

Перший етап: рухомий запилений ПП очищується від крупно дисперсних частинок домішок за рахунок сил інерції і гравітації, виходить через жалюзі в осаджувальну камеру. Другий етап: дрібнодисперсні частинки пилу які залишилися рухаються в запиленому ПП потрапляють на багатодисковий доочисник. Диски встановлені на відстані один від одного, і не дають частинкам пилу пройти, відкидаючи їх через жалюзі в зону осадження. Очищений ПП проходить між дисками і через центральний отвір всередині дисків до вихідного патрубку.

Проведений огляд способів підвищення ефективності очищення ПП дозволив їх класифікувати (рис.1.17): інтенсифікацією розподілу частинок в потоці з оптимізацією технологічних параметрів (швидкості і запиленості потоку); з поділом потоку; зі зміною форми елементів конструкції (вхідного патрубку, стінок і т.п.); з застосуванням додаткових конструктивних елементів, що змінюють траєкторію руху потоку; з застосуванням додаткового ПП, рідин, звукового або електромагнітного полів; циркуляцією запиленого потоку; застосуванням проміжного відбору за допомогою перегородок, криволінійних поверхонь, жалюзі і отворів; регулюванням відбору і з подальшим відведенням уловлених частинок; застосуванням багатоступеневих пиловловлювачів, які розташовані послідовно, паралельно або з'єднані в батарею; комбінуванням пристроїв різного принципу дії, з системами доочищення.



Рисунок 1.17 – Класифікація способів підвищення ефективності процесів очищення ПП

З аналізу способів витікає, що найбільш перспективним напрямком підвищення ефективності очищення ПП пересувних зернових сепараторів є розроблений автором роботи спосіб з комбінуванням пристроїв різного принципу дії з системами доочищення.

Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення запиленого ПП РЦ з розробкою нового способу, що забезпечує основне очищення і доочистку ПП, веде до створення конкурентоспроможних зернових сепараторів, і є актуальним завданням для розвитку зернопереробної галузі України.

### 1.3. Аналіз математичних моделей процесу очищення запиленого повітряного потоку

Незважаючи на достатній теоретичний і експериментальний матеріал по дослідженню процесів очищення в апаратах з закрученими запиленими потоками, значна частина явищ не може бути пояснена в рамках сформованих уявлень, а завдання з підвищення ефективності очищення запилених ПП від дисперсної фази особливо на пересувних зернових сепараторах залишаються невирішеними. Існуючі методи розрахунку не враховують складність загальної гідродинамічної картини розділення багатозфазних запилених ПП, а також взаємодія цих потоків між собою. Цим обґрунтовується необхідність в дослідженнях основних технологічних параметрів процесу очищення ПП для створення високопродуктивних, економічних та екологічноощадних інерційних пиловловлювачів з подальшим прогнозуванням їх ефективності.

На відміну від експериментальних досліджень, чисельне моделювання дозволяє варіювати ряд значущих факторів (швидкість обертання, в'язкість ПП, існуючі властивості), які мають істотний вплив на формування і поведінку закручених течій. Зміни в математичному моделюванні, які пов'язані із застосуванням обчислювальних технологій і програм, дають можливість реалізовувати конструктивні рішення окремих вузлів апаратів і виявляти

оптимальні гідродинамічні умови процесу відцентрового очищення запилених ПП.

Аналітичний підхід більшості дослідників [16, 17, 29] до опису гідродинаміки інерційних апаратів ґрунтується на системі рівнянь Нав'є-Стокса, доповнених рівняннями нерозривності сталого вісісиметричного дисперсного ПП, що обертається.

Рішення системи рівнянь Нав'є-Стокса математично утруднено, що обумовлює необхідність прийняття цілого ряду не зовсім коректних припущень. Це знижує адекватність запропонованих аналітичних описів реальної гідродинамічної картини в інерційних апаратах і, в кінцевому результаті, призводить до значних розбіжностей результатів розрахунків з експериментальними даними. У зв'язку з цим фізичний експеримент, як зазначається в роботі [52], є до цього часу основним способом отримання достовірної інформації про структуру і характеристики потоків, що обертаються. У свою чергу, найбільш істотним недоліком експериментальних досліджень швидкісного поля є їх невисока точність, яка обумовлена використанням зондових методів вимірювань [143]. Цим пояснюється отримання окремими авторами суперечливих результатів і висновків, що є стримуючим фактором розвитку аналітичних, узагальнюючих підходів до опису гідродинаміки дисперсного ПП в пиловловлювачах. Застосування методів чисельного моделювання є особливо актуальним в задачах механіки багатофазних течій з дослідженням суміжних завдань запилених ПП. Також необхідно розглядати статистичні підходи для прямого чисельного моделювання дисперсних течій і завдань турбулентності.

Ефективним чисельним методом є розв'язання багатовимірних чисто гіперболічних рівнянь, або рівнянь параболічного типу, що містять гіперболічні частини. Для опису просторово - нестационарних задач течії багатофазних середовищ застосовуються наступні математичні моделі. Проблема побудови обчислювального алгоритму рішення подібного типу завдань досить складна і, як правило, вирішується поетапно [73].



Одним з ефективних способів математичного моделювання руху ПП є використання рівнянь гідродинаміки: рівняння нерозривності руху і динамічне рівняння руху нестискаємої рідини (рівняння Нав'є-Стокса) [144].

Рівняння Нав'є-Стокса визначає систему сил, яка діє в газі (рідині) у напрямку осей координат [145]. Це рівняння урахує дію чотирьох сил: тяжіння, тиску, внутрішнього тертя (в'язкості) і інерції. Сила тяжіння являє собою зовнішній фактор, а інші сили – результат дії навколишнього середовища на виділений елементарний об'єм. Рівняння не ураховують зовнішніх дій на систему, і тому повинні бути доповнені граничними умовами. Поряд з граничними умовами для характеристики стану системи в початковий момент процесу приводяться початкові умови.

В.П. Куц для опису процесу сепарації, який протікає у відцентрово-інерційних пиловловлювачах з жалюзійним відводом повітря, визначає рівняння руху дисперсних частинок у криволінійному потоці [85]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d\vec{V}_c}{dt} &= 3\pi\mu_n (w - V) d \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{\tau} (w - V) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Якщо розглядати рух частинок у рухомій системі координат, коли швидкість частинки дорівнює  $V = W + V_c$ , а її прискорення визначається теоремою Коріоліса, то у векторній формі це рівняння має вигляд:

$$m \frac{d\vec{V}_c}{dt} + m\vec{\omega}(\vec{\omega}\vec{R}) + m \left( \frac{d\vec{\omega}}{dt} \vec{R} \right) + 2m(\vec{\omega}\vec{V}_c) = -3\pi\mu_n \vec{V}_c d, \quad (1.3)$$

де:  $m$  – маса дисперсної частинки пилу, кг;  $V_c$  – швидкість дисперсної частинки, м/с;  $t$  – час, с;  $\omega$  – кутова швидкість обертання,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – радіус, м;  $W$  – швидкість ПП, м/с;  $\mu_n$  – динамічна в'язкість ПП, Па.с;  $d$  – діаметр кулеподібної дисперсної частинки, м.

За результатами проведених досліджень руху частинок пилоповітряної суміші Батлук В.А. [14, 15] виділив безперервний рух частинок до стінки циклону, які переносяться. Модель руху описується в стоксовському наближенні, для

випадку вільного руху частинок в криволінійному турбулентному потоці газу по радіусу  $R$  з кутовою швидкістю  $\omega$  з урахуванням відцентрової сили: де  $\varphi$  – кут зсуву фази руху частинки і середовища, який пояснюється інертністю частинки, що визначається виразом:  $\varphi = \text{arctg } \bar{\omega} \tau$ , град.

У робочих режимах циклонно-ротаційного пиловловлювача зустрічаються турбулентний рух ПП, тому для адекватного проведення чисельних розрахунків можна використовувати замкнені моделі турбулентності. Однією із простих моделей турбулентності першого рівня замкнутості є  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності [5], яка зарекомендувала себе в задачах зі значною кривизною ліній току:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial x} (v v) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} p + \frac{\partial}{\partial x} (v \tau) + f, \\ p^* &= p + \frac{2}{3} \rho k, \tau_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, v_e = v + v_t. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Тут маємо:  $k$  – питома кінетична енергія турбулентності,  $v$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини,  $v_t$  – турбулентна в'язкість,  $p$  – осереднений тиск,  $v_i$  – осереднені компоненти вектору швидкості в декартовій системі координат,  $f_i$  – вектор масових сил.

Подібна модель була використана в роботі [146] з чисельною реалізацією методом скінчених елементів.

Диференціальне рівняння руху дисперсної частинки в радіальному напрямку має вигляд:

$$\rho_T \frac{\pi d_c^3}{6} \frac{d^2 r_1(t)}{dt^2} = \rho_T \frac{\pi d_c^3}{6} \omega^2 r_1(t) - C_1 \pi \frac{\rho_0 d_c^2}{8} \left( \frac{dr_1(t)}{dt} \right)^2 - 3\pi \rho_0 v d_c \frac{dr_1(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

де  $\rho_T$  – щільність домішок, кг/м<sup>3</sup>;  $d_c$  – діаметр частинки, м;  $r$  – радіус обертання частинки, м;  $\omega$  – кутова швидкість обертання частинки, об/с;  $C_1$  – коефіцієнт, що залежить від форми тіла, для кулі  $C_1 = 0,1 \dots 0,4$ ;  $\rho_0$  – щільність середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с.

Відповідно до подібних рівнянь видно, що характер руху має три варіанти [146]:

- якщо відцентрова сила більша за модулем суми сил опору середовища й гідравлічного опору, то частинка рухається до стінок апарата і видаляється з нього;
- якщо сума сил опору середовища й гідравлічного опору більша за модулем відцентрової сили, то частинка рухатиметься до осі апарата і далі, разом з висхідним потоком повітря до відокремлювача й випускного патрубку очищеного повітря;
- якщо відцентрова сила дорівнює за модулем сумі сил опору середовища й гідравлічного опору, то частинка рухається в рівноважному стані на певній орбіті і випадає в малий бункер, а її розмір визначає граничний діаметр частинок, які вловлюються в апараті.

Для визначення довжини робочої зони  $l$  необхідної для вловлювання частинок дисперсної фази мінімального розміру  $d_{min}$ , отримане рівняння:

$$l = \frac{S^2 \cdot 18 \cdot \mu}{a \cdot \rho_r \cdot d_{min}^2} \ln \frac{a R_u (b r_0 + a)}{b r_0 (b r_0 + a)}, \quad (1.6)$$

де  $R_u$  – радіус корпусу циклона  $R_u = 0,5 D_u$ ;  $D_u$  – діаметр циклона;  $a = 0,47 \frac{\bar{u}}{0,5 D_u}$ ;

$b = 1,05 \frac{u}{0,5 D_u}$ ;  $d$  – діаметр частинки;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря;

$r$  – поточна координата в радіальному напрямку;  $S$  – крок гвинта завихрювача.

Принципи раціонального чисельного моделювання дозволяють істотно просунути в області побудови систем, що імітують такі явища, що дає основу для розвитку засобів моделювання і створення методик розрахунку течій багатофазних середовищ.

Для опису динаміки несучої фази ПП, частинок велико-та дрібнодисперсних фаз в робочих зонах аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів найбільш прийнятним є використання гідродинамічних аналогій, наприклад за рівняннями Нав'є-Стокса.

#### 1.4. Висновки за розділом, постановка мета та завдання дослідження

1. На підставі аналізу результатів досліджень підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП обґрунтовано актуальність проблеми підвищення продуктивності пересувних зернових сепараторів внаслідок недостатньої ефективності роботи їх аспіраційних систем при очищенні ЗС.

2. Аналіз стану проблеми підвищення продуктивності пересувних зерноочисних машин та огляд їх існуючих конструкцій аспіраційних систем виявили наступні недоліки: обмеження технологічних показників роботи (завантаження ЗС в зерноочисні сепаратори); більшість досліджень проведена для окремих параметрів пиловловлювачів, які підлягали оптимізації; експериментальна апробація приводиться частково або відсутня зовсім; отримані математичні вирази ускладнені або не мають подальшого практичного використання; відсутність проміжного відведення вловлених дисперсних частинок та додаткового доочищення запиленого ПП. Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП від легких домішок та пилу є створення РЦ з багатодисковим доочищувачем, який дозволяє не змінюючи базові габарити серійних пересувних сепараторів типу ОВС-25 і СВС-25 підвищити ефективність очищення запиленого ПП.

3. В літературі не знайдено теоретичних досліджень процесу очищення ПП від частинок легких домішок та пилу за допомогою рівнянь динаміки багатофазних середовищ, закономірностей зміни ефективності очищення запиленого ПП, швидкостей їх компонентів.

В результаті аналізу стану поставленого завдання підвищення продуктивності пересувних зернових сепараторів розроблено РЦ, використання якого забезпечить очищення ПП до нормованої запиленості обслуговуючої робочої зони. Визначена тема роботи і сформульована її мета. Метою роботи є підвищення ефективності процесу очищення запиленого ПП аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів шляхом обґрунтування параметрів розробленого РЦ з доочисником.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: проведеним аналізом виконаних досліджень встановлено, що перспективним напрямком підвищення ефективності очищення запиленого ПП є комбінування пристроїв різного принципу дії, застосування розробленого ротаційного циклону (РЦ) з багатодисковим доочисником. Використання етапного очищення з проміжним відведенням дисперсних частинок в розробленому РЦ дозволяє підвищити ефективність очищення запиленого ПП та збільшити продуктивність пересувних зернових сепараторів, потребує проведення відповідних теоретичних та експериментальних досліджень.

Розв'язок завдань дозволить створити наукові положення та методи досліджень процесу очищення запиленого ПП, та сумісно з підприємствами с.г. машинобудування виготовити, випробувати і впровадити в серійне виробництво розроблений РЦ з високою ефективністю очищення.

## РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯНОГО  
ПОТОКУ В РОТАЦІЙНОМУ ЦИКЛОНІ

Моделювання процесу очищення запиленого ПП на розробленому РЦ (рис. 1.16) проводилося з використанням гідродинамічної аналогії та з метою вирішення наступних теоретичних завдань: моделювання динаміки несучої та дисперсної фаз запиленого ПП в основному каналі, моделювання динаміки дисперсної фази запиленого ПП в зоні доочищення ПП в багатодисковому доочиснику.

Підвищення продуктивності пересувних зернових сепараторів пов'язано, як зазначено вище, з необхідністю поліпшення ефективності процесу очищення ПП від частинок легких домішок і пилу. Проблему становлять дрібнодисперсні частинки, які рухаються в потоці, відділення яких в осаджувальних камерах утруднене та неможливе внаслідок їх розмірів та щільності.

Як зазначалося вище, процес очищення ПП в розробленому РЦ складається з двох етапів: основний відбір і доочищення (п. 1.2).

Перший етап процесу характеризується швидкістю ПП на вході в циклон, яка визначається режимом роботи вентилятора або стаціонарної аспіраційної системи. Ефективність роботи першого етапу процесу характеризується коефіцієнтом  $\eta_1$  очищення основного каналу розробленого РЦ, який є відношенням кількості вловлених дисперсних частинок до кількості тих що поступили.

Основною характеристикою другого етапу процесу є коефіцієнт доочищення  $\eta_2$ , який визначає ефективність додаткового елемента – багатодискового доочисника розробленого РЦ.

Сума коефіцієнтів очищення основного каналу і багатодискового доочисника складають загальний коефіцієнт очищення  $\eta_{\Sigma}$  циклону.

На розподіл частинок дисперсної фази в розробленому РЦ впливають наступні фактори:

- кут нахилу лопатей вентилятора-завихрювача ( $\alpha$ , град), від якого залежать осьова і радіальна складові швидкості дисперсних частинок у ПП;
- діаметр основної камери циклону  $D_0$ , мм;
- частота обертання ротора  $\Omega$ , об/хв;
- швидкість ПП на вході до основного каналу  $U_0$ , м/с;
- ширина відкриття жалюзі осаджувальної камери  $b$ , мм.

На ефективність РЦ також впливають такі фактори, як конструктивні параметри багатодискового доочисника: кількість дисків ( $n$ , шт.); розмір внутрішнього отвору в дисках ( $D_d$ , мм) і відстань між ними ( $h$ , мм).

Конструктивна особливість РЦ з багатодисковим доочисником (рис. 1.16) призводить до виникнення просторового руху запиленого потоку в циклоні, і дослідження його динаміки являє собою складну теоретичну задачу.

Для отримання залежностей, які дозволяють визначити вплив на закономірності процесу вищезгаданого поділу потоку на дві фази, проведемо поетапне моделювання наявних динамічних процесів. Досліджуємо спочатку динаміку фаз в основній робочій зоні РЦ, в якій здійснюється основний відбір та проміжне відведення дисперсних частинок. Для цього спочатку проведемо дослідження динаміки несучої фази запиленого ПП в розробленому РЦ.

## 2.1. Моделювання руху несучої фази запиленого повітряного потоку в розробленому ротаційному циклоні

Для наближених розрахунків подібних пристроїв приймаємо, що профіль осової складової швидкості потоку не змінюється по довжині основної камери розробленого РЦ [167]. При цьому радіальна складова швидкості ПП незначна, а тангенціальна підкоряється закону обертання твердого тіла в осовій зоні і потенціальному закону в периферійній зоні.

Ці припущення відповідають осаджувальним камерам і підтверджуються експериментальними дослідженнями [144, 145].

Як відомо, моделі динаміки ПП засновані на рівнянні нерозривності (2.1), згідно з яким зміна маси об'єму повітря компенсується відповідною зміною його щільності [166] і рівнянні руху Нав'є-Стокса (2.2), що враховує дію сили ваги, тиску, сили внутрішнього тертя (в'язкості) і сили інерції [148]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{U}) = 0, \quad (2.1)$$

де  $\rho$  – щільність потоку;  $U$  – швидкість потоку.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\bar{U}, \nabla) \bar{U} - \nu \Delta \bar{U} + \frac{1}{\rho} \nabla P = \bar{g}, \quad (2.2)$$

де  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості середовища;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища;  $P$  – тиск;  $\bar{g}$  – зовнішня масова сила, що діє на одиницю об'єму середовища.

Як відомо, число Маха [170] дорівнює  $M = \frac{U}{c}$ , де,  $c$  – швидкість звуку, яка є мірою впливу стиснення середовища в потоці даної швидкості на його поведінку. Течії газового середовища можна розглядати як нестиснуті, якщо число Маха мале в порівнянні з одиницею, тобто  $M \ll 1$ , або, при умові, що швидкість течії незначна в порівнянні зі швидкістю звуку. Це є очевидним та прийнятним для розглянутого пиловловлювача.

Крім того, так як об'ємна частка дисперсної фази в потоці невелика, то в першому наближенні можна знехтувати силою, з якою вони діють на ПП.

З (2.1) та (2.2) отримаємо рівняння для визначення осьової складової швидкості  $U_z = U_z(r)$  для сталого потоку в циліндричній системі координат. В якості масштабів при обезрозмірюванні приймемо діаметр  $D_0$  основної камери РЦ, а швидкість потоку повітря на вході  $U_0$  (рис. 2.1).



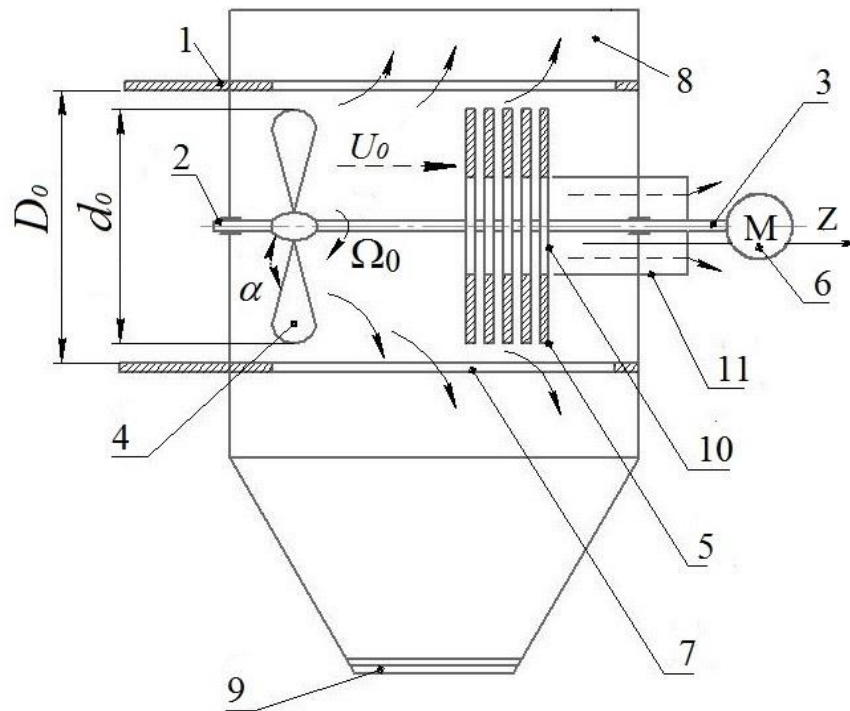


Рисунок 2.1 – Схема основної робочої камери розробленого циклону

Відповідно до [172] маємо:

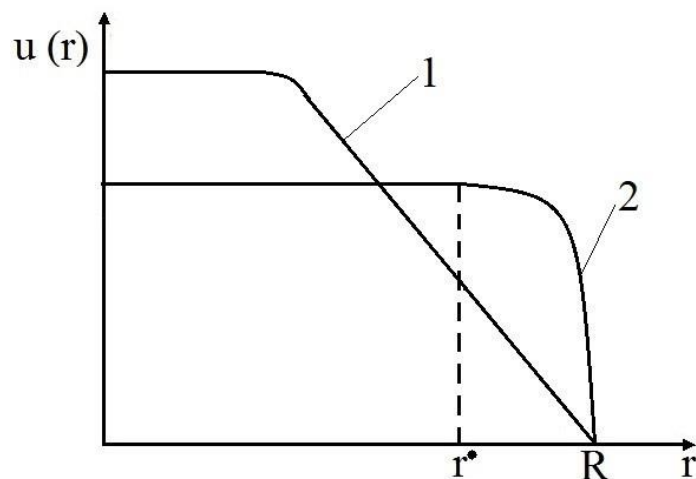
$$\begin{cases} \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \\ \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \end{cases}, \quad (2.3)$$

де тиск віднесено до  $\rho U_0^2$ , а  $\text{Re} = \frac{U_0 D_0}{\nu}$  – число Рейнольдса, яке характеризує відношення нелінійного і дисипативного членів у рівняннях Нав'є-Стокса.

Як відомо, при перевищенні числа Рейнольдса вище критичного числа точне аналітичне рішення системи (2.3) утруднене внаслідок хаотичного вигляду та виникнення турбулентності середовища. При зменшенні числа Рейнольдса нижче критичного приведені рішення має розв'язок, а середовище переходить до ламінарного режиму руху. Зауважимо, що при турбулентному режимі має місце висока чутливість до зміни коефіцієнтів рівняння. Навіть при незначній зміні числа Рейнольдса рішення абсолютно відрізняються один від одного [52]. Для кожного виду течії існує критичне число Рейнольдса, яке визначає перехід від ламінарної до турбулентної течії середовища.

Критичне значення числа Рейнольдса залежить від конкретного виду течії (течія в круглій трубі, обтікання кулі тощо) і типу збурень потоку, зокрема, шорсткості стінок каналу. Значення числа Рейнольдса вище критичного і до певної межі відносяться до перехідного (змішаного) режиму течії. Зокрема, при течії в круглій камері критичне число Рейнольдса дорівнює  $Re_{кр} \approx 2300$ , але розвинена турбулентність середовища спостерігається при  $Re \geq 10^4$  [93, 128].

Рух ПП в камері прямооточного РЦ характеризується високим значенням числа Рейнольдса,  $Re \approx (0,5...1) \times 10^5$ . Тобто реалізується режим розвиненої турбулентності середовища. При цьому швидкість потоку в кожній точці випадковим чином змінюється в часі. Проте середня швидкість потоку залишається постійною по перерізу камери і тільки в дуже тонкому, прикордонному до стінок каналу шарі, спадає до нуля (рис. 2.2) [68].



1 – ламінарна течія; 2 – турбулентна течія

Рисунок 2.2 – Залежність радіального розподілу швидкості при різних режимах руху середовища

Параметром, що характеризує інтенсивність обертання потоку, є кут закручення. Він визначається як кут між дотичною до траєкторії частинки і віссю потоку, та вказує на ступінь відхилення ліній струму від осьового напрямку. Зауважимо, що для невеликих кутів закручення потоку  $\alpha < 45...60^\circ$  [73] осьова складова швидкості змінюється практично так само, як і для не закрученого потоку.

У даний момент створено значну кількість різноманітних моделей для розрахунку турбулентних течій [121]. Вони відрізняються один від одного складністю розв'язання і точністю опису течії. Основна ідея моделей зводиться до припущення про існування середньої швидкості потоку і середнього відхилення від нього. До подібних моделей можна віднести модель Буссінеска [177], модель Спаларта-Альмараса [172],  $k - \varepsilon$  модель,  $k - \omega$  модель, модель напружень Рейнольдса, метод великих вихорів та інші. Всі моделі мають переваги, недоліки та галузі застосування, для яких отримані постійні рівняння на основі порівняння результатів моделювання з даними експериментів. Тим не менш, завдання визначення поля швидкостей в закрученому турбулентному потоці в циліндричному каналі в загальному вигляді для багатофазного середовища не вирішена [189].

Доповнимо систему (2.3) умовою "прилипання" на стінці і умовою обмеженості швидкості на осі [192]. Формально останні два рівняння системи (2.3) дозволяють мати єдине безперервне рішення Стокса, яке задає профіль осьової складової швидкості (так званий профіль Пуазейля):

$$U_z = -\frac{R_e}{4} \frac{dP}{dz} (1 - r^2). \quad (2.4)$$

Але як показано в [24] цей профіль реалізується тільки при малих числах Рейнольдса і відповідає ламінарному характеру руху середовища. Для сталої турбулентної течії рівняння (2.3) зберігають свій вигляд, але з двома істотними змінами. По-перше, коефіцієнт в'язкості середовища в них замінюється або на коефіцієнт турбулентної в'язкості, або на ефективний коефіцієнт, який є сумою ламінарної і турбулентної в'язкості. По-друге, система рівнянь (2.3) описує поведінку середніх швидкостей, а не локальних, як в ламінарному випадку [30].

Для системи рівнянь (2.3) з граничними умовами "прилипання" і обмеженості рішення Стокса (2.4) є єдиним рішенням в класі неперервних функцій. Разом з тим, можна вказати кілька рішень в класі розривних функцій.

Тоді загальне рішення для осьової компоненти швидкості потоку має вигляд:

$$U_z = \frac{\text{Re}}{4} \frac{dP}{dz} r^2 + C_1 \ln r + C_2, \quad (2.5)$$

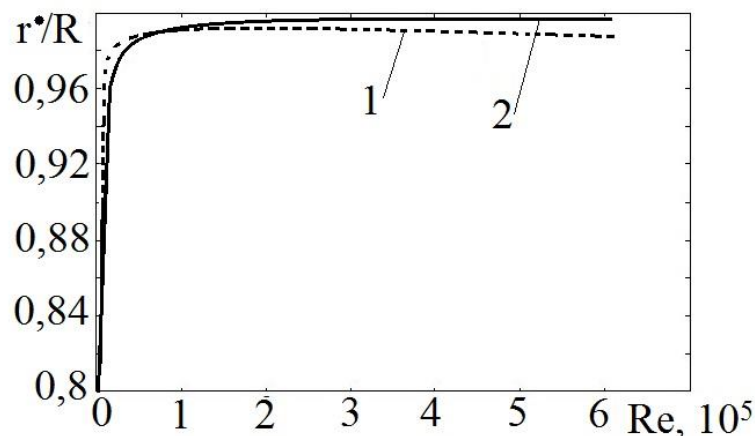
де  $C_1, C_2$  – довільні сталі.

З (2.5) випливає, що розривні рішення можуть бути складені з зон: параболи, логарифмічної кривої і постійної. Різні профілі можуть відрізнятися способами зрощування зазначених рішень на кордонах розривів.

Зокрема, розглянемо рішення [34] (рис. 2.1):

$$\begin{cases} \frac{1}{\text{Re}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \\ \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Рішення (2.6) описує перепад тиску, обумовлений тільки динамічним напором на вході та в'язким гальмуванням потоку по стінці каналу. З (2.6) видно, що в точці  $r=r^*$  відбувається розривання першої та другої похідних швидкості. Ця поверхня представляє собою поверхню незначного розриву швидкості, а також сили тертя і її першої похідної. При цьому сила тертя з боку приосьової області розривання дорівнює нулю. На рис.2.3 наведена залежність  $r^*$  від числа  $\text{Re}$ , яка отримана за умови, що в трубі з профілем швидкості (2.6) при обраному  $r^*$  задовольняло закону опору Блазіуса (поз. 1, рис.2.3) або універсальному закону Прандтля (поз. 2, рис.2.3) [58].



1 – за законом опору Блазіуса; 2 – за універсальним законом Прандтля

Рисунок 2.3 – Залежності  $r^*$  від числа Рейнольдса  $\text{Re}$

Таким чином, для значень числа Рейнольдса, характерних для ПП в основному каналі РЦ величина  $r^* \geq 0,98$ . Тобто, практично за перетином камери осьова складова швидкості потоку зберігає постійне значення.

Турбулентні пульсації потоку практично ізотропні за напрямками, а їх кінетична енергія залежить від швидкості потоку і може бути оцінена за виразом [60]:

$$k = \frac{3}{2}(U_0 I)^2, \quad (2.7)$$

де  $k$  – кінетична енергія пульсацій;  $I \approx 0,16 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{8}}$  – рівень пульсацій.

Зауважимо, що з більшою точністю профіль осрової складової швидкості потоку апроксимується в рамках, так званої, "тришарової моделі" [61]. Подібна модель виділяє ламінарний пристінковий шар, буферний шар і турбулентне ядро. Радіус турбулентного ядра відповідно до цієї моделі, визначається виразом:

$$r^* = 1 - \frac{30}{w^* \cdot \text{Re}}, \quad (2.8)$$

де  $w^*$  - динамічна швидкість потоку, яка дорівнює [150]:

$$w^* = \frac{0,2}{\text{Re}^{\frac{1}{8}}}. \quad (2.9)$$

При цьому градієнт осрової швидкості не перевищує:

$$\frac{dU_z}{dz} < 0,08 \cdot w^* \quad (2.10)$$

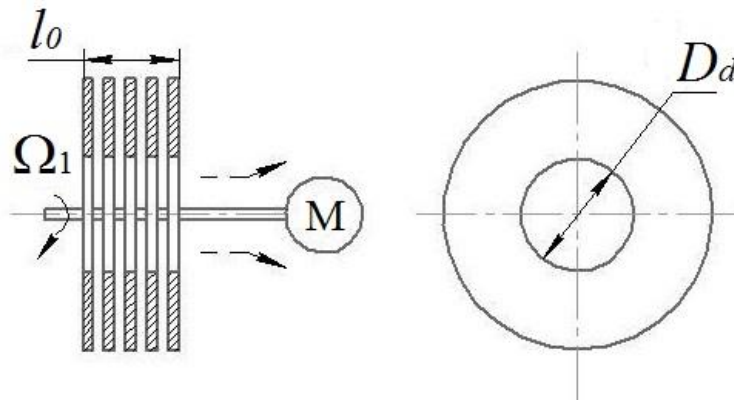
Рівняння (2.8) – (2.10) підтверджують зроблений раніше висновок про те, що для значень числа Рейнольдса,  $\text{Re} > 5 \times 10^4$ , які характерні для даного запиленого ПП, турбулентне ядро потоку займає практично весь переріз основного каналу і осьова складова швидкості потоку зберігає в ньому практично постійне значення.

У зоні доочисника осьова складова швидкості потоку зменшується до нуля на торцевій стінці камери через те, що потік проходить між дисками доочисника. При цьому, очевидно, з'являється радіальна складова швидкості  $U_r = U_z(r)$ , спрямована до осі камери.

Середня величина радіальної складової швидкості в першому наближенні отримуємо з умови балансу маси повітря, що проходить через РЦ:

$$U_r(r) = \frac{(D_0^2 - D_d^2)U_0}{8rl_0}, \quad (2.11)$$

де  $l_0$  – ширина доочисника;  $D_d$  – діаметр центрального отвору дисків доочисника (рис.2.4).



-->– рух очищеного повітря

Рисунок 2.4 – Схема елементів доочисника розробленого РЦ

Для ефективного відділення частинок дисперсної фази доцільно застосовувати більш закручені потоки. Це обумовлено зростанням відцентрових сил, що діють на дисперсні частинки. Однак, при великих кутах закручення запиленого ПП ( $\alpha > 45...60^\circ$ ) спостерігаються нерівномірності осьової складової швидкості і поява зворотних течій в приосьовій зоні [4]. Тому кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha$  повинен бути обмежений і не перевищувати  $\gamma \leq 45^\circ$ .

В даному РЦ закручування запиленого ПП здійснюється за допомогою активного (не стаціонарного) обертального ротору завихрювача. Визначено, що кут нахилу лопатей і швидкість обертання лопатей завихрювача пов'язані співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \frac{\Omega_0 d_0}{2\sqrt{2}U_0}, \quad (2.12)$$

де  $\Omega_0$  – кутова швидкість обертання завихрювача;  $d_0$  – діаметр лопатей завихрювача.

При зниженні швидкості обертання завихрювач створює додатковий гідравлічний опір потоку повітря. При збільшенні швидкості запиленого ПП підвищується нерівномірність осьової складової швидкості потоку.

На рис. 2.5, 2.6 наведені закономірності зміни кута закрутки лопатей завихрювача від швидкості ПП і обертів ротора. Аналізом залежностей встановлено, що оптимальний кут закручення потоку, за типових технологічних параметрів пиловловлювачів зернових сепараторів, знаходиться в межах 30...40°.

Незалежно від особливостей закручувальних пристроїв через певну відстань від входу, внаслідок в'язкої дифузії і турбулентної дисипації енергії, в закрученому потоці формується "природний" профіль швидкості. Тангенціальна складова швидкості закрученого потоку поблизу осі обертання відповідає закону обертання твердого тіла (так зване "квazitверде обертання"), а в периферійній - до закону постійності циркуляції (так зване "квazіпотенціальне обертання") [3].

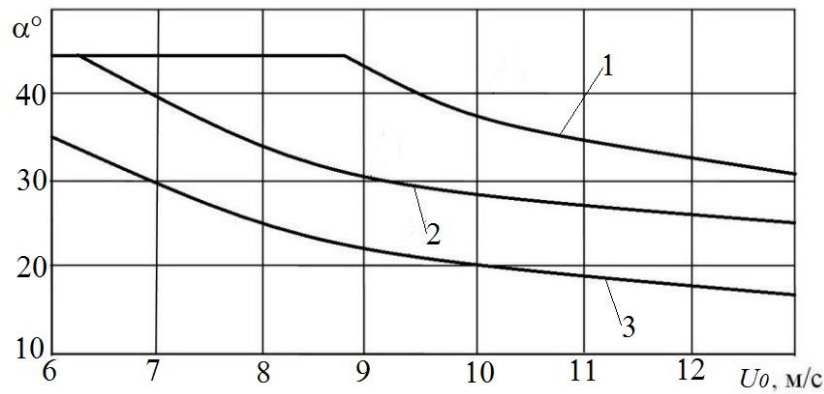
Тоді з (2.1), (2.2) нехтуючи загасанням обертання уздовж осі камери для визначення тангенціальної складової швидкості  $U_\varphi = U_\varphi(r)$  для сталого потоку в циліндричній системі координат [99] отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi^2}{r^2} = 0. \quad (2.13)$$

Його рішення відоме, як вихор Ранкіна [13]:

$$U_{\varphi(r)} \cdot \Omega_0 r \begin{cases} 1, & r \leq \frac{d_0}{2} \\ \left(\frac{D_0}{2r}\right)^{-1}, & r \geq \frac{d_0}{2} \\ \left(\frac{D_0}{d_0}\right)^{-1}, & \end{cases}. \quad (2.14)$$

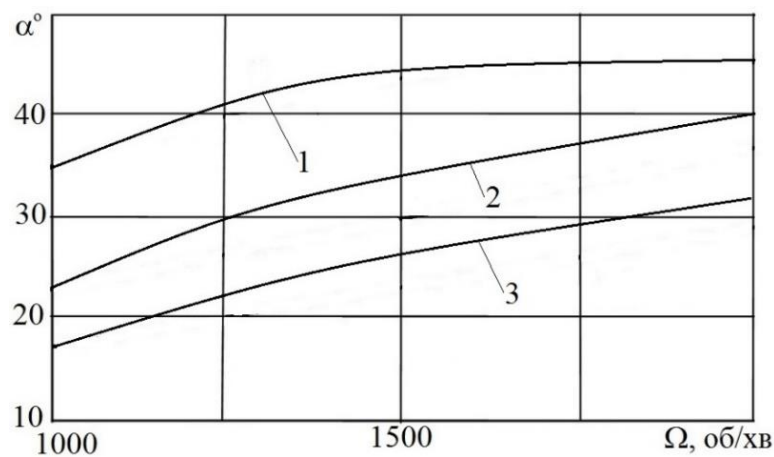
Розташування границі  $r^*$  між зонами визначається по максимуму тангенціальної швидкості, тобто відповідає радіусу завихрювача.



1 –  $\Omega = 1000$  об/хв; 2 –  $\Omega = 1500$  об/хв; 3 –  $\Omega = 2000$  об/хв

Рисунок 2.5 – Залежності зміни кута нахилу лопатей завихрювача від швидкості запиленого ПП

Аналізом залежностей встановлено, що при збільшенні швидкості ПП на вході в основний канал  $U_0=9\ldots 13$  м/с, кут нахилу лопатей завихрювача, який забезпечить необхідний режим руху та знаходиться в діапазоні  $\alpha=18\ldots 32^\circ$ .



1 –  $U_0 = 14$  м/с; 2 –  $U_0 = 10$  м/с; 3 –  $U_0 = 6$  м/с

Рисунок 2.6 – Залежності зміни кута нахилу лопатей завихрювача від обертів ротора

Аналізом залежностей встановлено, що при збільшенні частоти обертів ротора необхідний кут нахилу лопатей вентилятора-завихрювача збільшується і складає  $\alpha = 18^\circ\ldots 45^\circ$ .

Рівняння (2.14) не враховує зниження кутової швидкості за довжиною основного каналу розробленого РЦ. Якщо врахувати це зниження, то рівняння (2.13) необхідно записати у вигляді [148]:

$$\frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi^2}{r^2} = 0. \quad (2.15)$$



Це рівняння може бути записано відносно локальної кутової швидкості обертання потоку  $\Omega = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_\phi)$  та має вид:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right). \quad (2.16)$$

Звідси, відповідно до [23], маємо:

$$\Omega = \Omega_0 \left( 1 - e^{-\frac{r^2}{r_0^2(z)}} \right), \quad (2.17)$$

де  $r_0(z) = \sqrt{\frac{4z}{R_e}}$ .

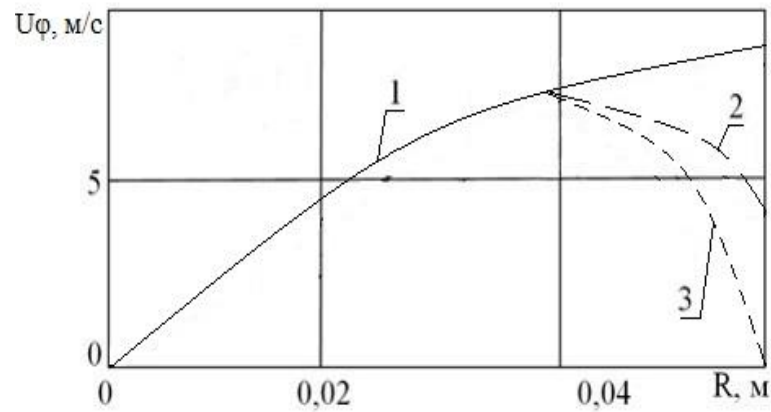
З рівняння (2.17) видно, що для розглянутого РЦ, його параметрів, загасання обертання потоку незначним і їм можна знехтувати.

В даному РЦ стінки основного каналу мають прямокутні отвори, через які проходять дисперсні частинки до осаджувальної камери. Тому на стінці камери слід замість типової умови прилипання [176] задати умову ковзання, яка дозволяє уточнити рівняння (2.14) для тангенціальної швидкості ПП:

$$U_{\phi}(r) = \Omega_0 r \begin{cases} 1 & r \leq \frac{d_0}{2} \\ \frac{\left(\frac{D_0}{2r}\right)^2 \left(1 - \gamma \frac{d_0}{D_0}\right) - \left(1 - \gamma \frac{D_0}{d_0}\right)}{\left(\frac{D_0}{d_0}\right)^{-1}}, & r \geq \frac{d_0}{2} \end{cases}. \quad (2.18)$$

У виразі (2.18) присутній коефіцієнт  $\gamma$ , який характеризує вплив конструкції стінок камери на затухання швидкості поза зоною "кваситвердого обертання".

При  $\gamma=0$  маємо умову прилипання на стінці, а  $\gamma=1$  – відповідає "ідеальному ковзанню". Типовий розподіл тангенціальної швидкості потоку за перетином основного каналу РЦ показано на рис. 2.7.



1 – конструкція базового циклону; 2 – умови прилипання дисперсних частинок до жалюзі; 3 – ідеальне ковзання дисперсних частинок в жалюзійному відокремлювачі

Рисунок 2.7 – Залежності тангенціальної швидкості ПП в основній робочій зоні від ступеню проникності корпусу основного каналу розробленого РЦ

З аналізу залежності (рис. 2.7) доведено про необхідність максимально наблизити радіус завихрювача до радіусу камери циклону. В цьому випадку можна вважати, що в циклоні обертання потоку відповідає закону "кваситвердого обертання".

Наступним етапом моделювання, після встановлення динаміки несучої фази в основному каналі, є визначення поля швидкостей дисперсної фази в залежності від конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ.

## 2.2. Моделювання динаміки дисперсної фази запиленого повітряного потоку в розробленому ротаційному циклоні

Процес очищення запиленого ПП відноситься до динаміки багатофазних середовищ [25, 31, 34]. Притому, тверді дисперсні частинки, що захоплюються ПП в аспіраційних системах зернових сепараторах, не змінюють свою форму та в процесі руху не відбувається їх подрібнення або коагуляція.

На дисперсні частинки діють: сили аеродинамічного опору; сила Архімеда; сила тяжіння; сила, що викликана нерівномірністю поля тиску; відцентрові сили.

Сила тяжіння, а тим більше сила Архімеда, істотно (на кілька порядків) менше сили аеродинамічного опору. Сила, що пов'язана з нерівномірністю поля тиску також значно мала. Також, присутні сили взаємодії між частинками: сили, що виникають при зіткненнях частинок, електростатичні сили тощо. Величина подібних сил незначна через відносно низьку концентрацію дисперсних частинок в запилених ПП зернових сепараторів. Сила термофорезу, також має несуттєві значення. У підсумку, при розгляді процесу очищення запиленого ПП можна обмежитися тільки урахуванням відцентрової сили і силою аеродинамічного опору [40]. При цьому зауважимо, що характер поверхні дисперсних частинок також незначно впливає на величину вказаних сил [71].

Якщо тверді частинки мають близькі розміри, їх динаміка може бути описана в рамках так званої "двофазної моделі". Однак аналіз дисперсного складу зернового пилу показує наявність полідисперсних частинок різних фракцій [65]. Отже, для опису їх динаміки в розробленому РЦ знадобиться "багатофазна модель" [80].

Запишемо силу, з якою ПП діє на частинки дисперсної фази. Її складовими є сили Магнуса, приєднаних мас і сила Стокса, яка є основною [87].

Опір середовища (сила Стокса) визначається рівнянням [90]:

$$\overline{F}_s = \xi \frac{\pi r_s^2 \rho |\overline{U} - \overline{W}|}{2} (\overline{U} - \overline{W}), \quad (2.19)$$

де  $\xi = \xi(\text{Re}_s)$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $r_s$  – еквівалентний радіус частинок дисперсної фази;  $\overline{W}$  – швидкість частинок дисперсної фази;  $\overline{U}$  – швидкість ПП;

$\text{Re}_s = \frac{2r_s |\overline{U} - \overline{W}|}{\nu}$  – критерій Рейнольдса для дисперсної фази.

Еквівалентний радіус дисперсної частинки визначається як радіус кулі, об'єм якої дорівнює об'єму реальної частинки, помноженому на коефіцієнт форми.

Останній показує, наскільки реальна площа поверхні частинки більше площі поверхні кулі. При цьому усереднений еквівалентний радіус частинок

виділеної фракції слід визначати, як середнє гармонійне еквівалентних радіусів, частинок які входять до фракції [108].

При малих швидкостях обтікання дисперсної частинки ПП опір середовища обумовлено переважно силами тертя. Зі збільшенням швидкості в опорі починають переважати сили тиску, а в'язкість середовища відіграє меншу роль. При цьому переважно стає її щільність і швидкість [108].

Аналізом залежності (рис.2.8) встановлено, коефіцієнт гідравлічного опору залежить від режиму руху дисперсних частинок. Якщо частинки обтікаються при малих числах Рейнольдса  $Re_s \leq 2$  (в ламінарному режимі), то коефіцієнт опору дорівнює  $\xi \approx \frac{24}{Re}$ . При значеннях  $2 > Re \leq 500$  (перехідний режим) можна

використовувати формулу Аллена і  $\xi \approx \frac{18.5}{Re^{0.6}}$  [148]. При значеннях  $Re > 500$  (турбулентний режим) маємо  $\xi \approx 0,44$  [148].

Зауважимо, що так як щільність дисперсних частинок значно більше щільності повітря, то з достатньою точністю можна використовувати формулу Стокса для розрахунку коефіцієнта опору при  $Re_s \leq 10$ . При великих значеннях числа Рейнольдса слід застосувати формулу Ньютона [174] (рис.2.8).

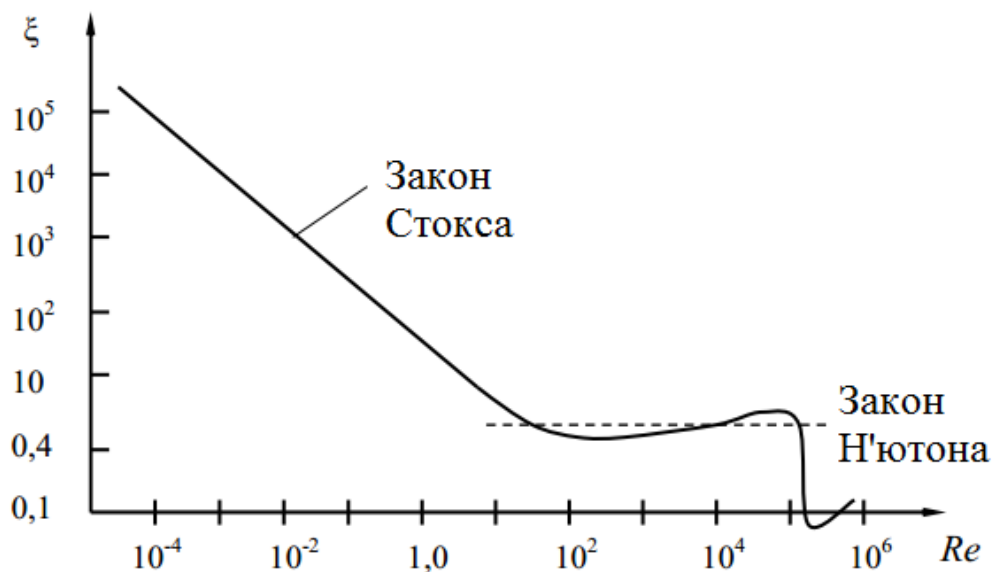


Рисунок 2.8 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса

Для опису руху дисперсних частинок зазвичай використовують підхід Лагранжа з імітаційним моделюванням руху окремих частинок [191]. Також застосовують підхід Ейлера, при використанні якого дисперсна фаза описується рівняннями суцільного середовища.

Запишемо рівняння руху для частинок виділеної фракції дисперсної фази нехтуючи їх взаємодією одну з одною [133]:

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + (\bar{W}, \nabla) \bar{W} = \frac{\bar{F}}{m_s}, \quad (2.20)$$

де  $\bar{F}$  – сила, що діє на частинку (яка дорівнює сумі відцентрової сили і сили опору середовища);  $m_s = \frac{4\pi r_s^3 \rho_s}{3}$  – маса дисперсної частинки,  $\rho_s$  – щільність дисперсних частинок в потоці;  $r_s$  – еквівалентний радіус дисперсної частинки.

Припустимо, що осьова і тангенціальна складові швидкості частинок дисперсної фази практично збігаються з осьовою і тангенціальною складовими швидкості ПП [128].

У радіальному напрямку на дисперсну частинку крім сил опору діє відцентрова сила. Запишемо рівняння для радіальної складовою швидкості дисперсної частинки [143]:

$$\frac{dW_r}{dt} = -\xi \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s r_s} W_r^2 + \frac{W_\varphi^2}{r}, \quad (2.21)$$

де  $W_\varphi$  – відцентрова сила,  $W_r$  – радіальна складова швидкості дисперсної частинки. Звідки рівняння для радіальної координати частинки дисперсної фази має вигляд:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\xi \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s r_s} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + r \cdot \Omega_0^2. \quad (2.22)$$

Рівняння (2.22) може бути розв'язано чисельними методами, наприклад, методом Рунге-Кутта з корекцією коефіцієнта опору на кожному часовому кроці. Однак на початковій ділянці руху, поки швидкість дисперсної частинки відносно потоку невелика, вона обтікається в ламінарному режимі.

Тоді з рівняння (2.22) отримаємо:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} - \Omega_0^2 r = 0, \quad (2.23)$$

де  $\tau = \frac{2 \rho_s r_s^2}{9 \rho \nu}$  – час релаксації.

Час релаксації це час, протягом якого дисперсна частинка, що потрапила в ПП, рухається разом з ним. Сила інерції визначена як швидкість відносного руху, помножена на масу частинки і поділена на час релаксації. Прирівнявши цю силу до сили опору, що діє на частинку з боку потоку, отримаємо вираз для часу релаксації.

Рішення рівняння (2.23) має вигляд:

$$r = \frac{r_0}{2} \left\{ \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) e^{(\beta-1)\frac{t}{2\tau}} + \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) e^{-(\beta+1)\frac{t}{2\tau}} \right\}, \beta = \sqrt{1 + 4\tau^2 \Omega_0^2}, \quad (2.24)$$

де  $r_0$  – радіус, на якому знаходиться дисперсна частинка в початковий момент часу.

При цьому швидкість дисперсної частинки дорівнює:

$$W_r = \frac{r_0}{2} \frac{\beta^2 - 1}{\beta} \left\{ e^{(\beta-1)\frac{t}{2\tau}} - e^{-(\beta+1)\frac{t}{2\tau}} \right\}. \quad (2.25)$$

Якщо знехтувати розгінною ділянкою траєкторії, то з рівняння (2.23) отримаємо рівняння:

$$\frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} - \Omega_0^2 r = 0. \quad (2.26)$$

Його розв'язок в [167] визначиться виразом:

$$r = r_0 e^{\tau \cdot \Omega_0^2 t}, \quad (2.27)$$

а радіальна складова швидкості руху дисперсної частинки тоді дорівнює:

$$W_r(r) = r \cdot \tau \cdot \Omega_0^2. \quad (2.28)$$

Очевидно, похибка наближених рівнянь (2.27), (2.28) незначна для частинок малого розміру і зростає для великих дисперсних частинок, так як для них збільшується траєкторія розгінної ділянки.

Використавши (2.28) для швидкості руху неважко оцінити і характерні розміри дисперсних частинок, які обтікаються в ламінарному режимі:

$$r_s < \left( 9 \operatorname{Re}_s \frac{\rho v'}{\rho \Omega D} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.29)$$

де  $\operatorname{Re}_s$  – критичне значення числа Рейнольдса, що відповідає переходу до турбулентного обтікання.

З огляду на той факт, що щільність дисперсних частинок значно перевершує щільність повітря з (2.29) випливає, що з достатньою для практики точністю можна вважати, що в ламінарному режимі обтікаються частинки з характерними діаметрами до  $d_s < 50$  мкм (рис.2.9).

Такий інтервал дисперсності спостерігається, наприклад, для борошняного пилу, який є полідисперсною фракцією, що утворюється в результаті помелу борошна.

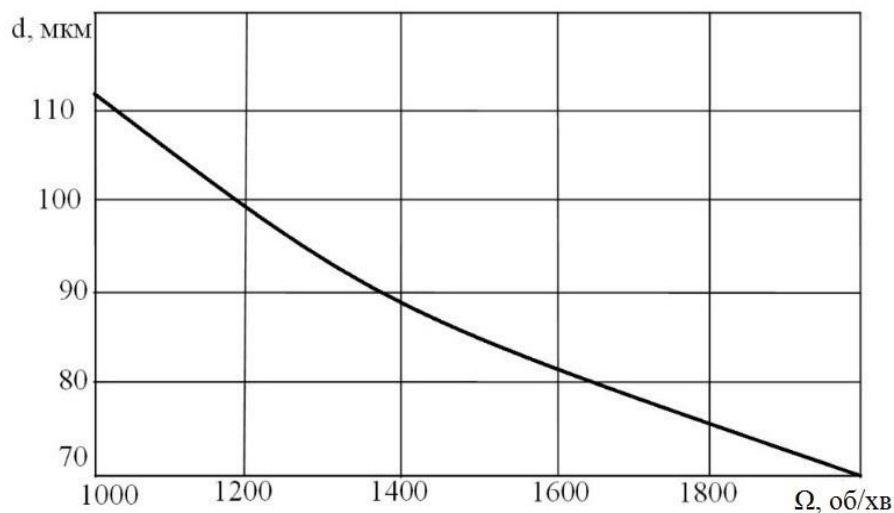


Рисунок 2.9 – Залежність обтікання в ламінарному режимі дисперсних частинок від обертів активного ротора-завихрювача розробленого РЦ

Для пилу зерна характерний широкий інтервал дисперсності частинок. Подібні дисперсні частинки можуть обтікатися в перехідному і турбулентному режимах, але кількість таких частинок незначна. Тому для розрахунків можна користуватися рівнянням (2.24).

Урахування впливу турбулентних пульсацій, які впливають на рух дрібнодисперсних частинок, проводимо на підставі рівняння [93]:

$$\frac{1}{\tau} \frac{dr}{dt} - \Omega_0^2 r + \frac{C(t)}{m_s} = 0 \quad (2.30)$$

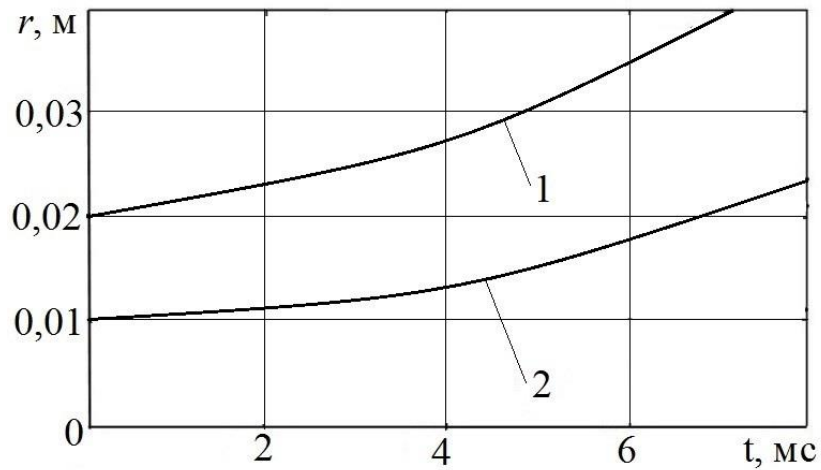
де  $C(t)$  – коефіцієнт випадкового впливу, який є дельта кореляційної функції часу з нульовим середнім значенням.

На рис. 2.10, 2.11 показані закономірності зміни радіальної координати і радіальної складової швидкості дисперсних частинок в основній робочій зоні розробленого РЦ.

Аналізом залежностей встановлено, що турбулентні пульсації впливають тільки на рух дрібнодисперсних частинок [141]  $d_s < 5$  мкм, для відділення яких необхідно застосувати додатковий пристрій – доочисник. Встановлено, що дисперсні частинки розміром  $d_s=200$  мкм значно відхиляються і частина з них потрапляє на жалюзі основного каналу і далі в осаджувальну камеру.

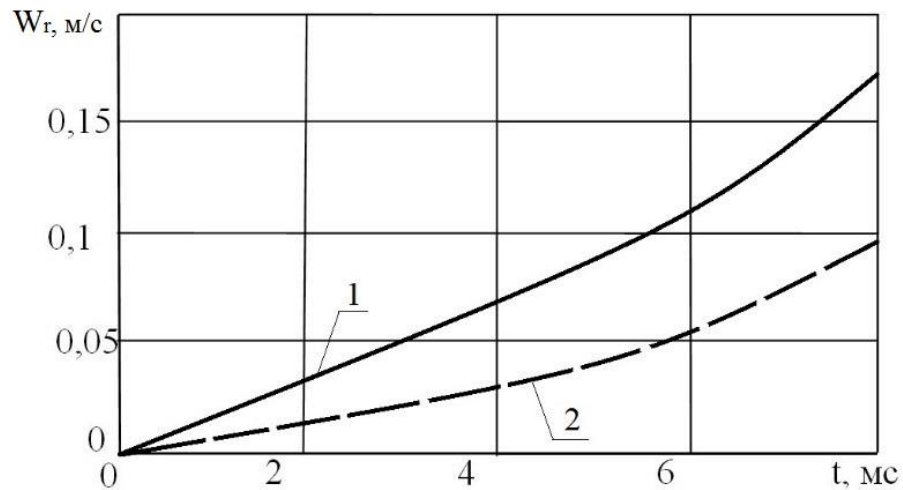
На рис. 2.12 показані результати визначення числа Рейнольдса для дисперсних частинок різних розмірів за різних їх початкових координатах входу. Встановлено, що дрібнодисперсні частинки практично не встигають відхилитися до стінок основного каналу. В той же час траєкторії більших за розміром дисперсних частинок значно відхиляються, а частина з них потрапляє через жалюзі каналу до осаджувальної камери, де і відбувається їх осадження. При цьому великодисперсні частинки не встигають в динаміці розігнатися до швидкостей, при яких турбулентний характер обтікання стає істотним. Тобто аж до зони доочисника розрахунки можна проводити, використовуючи формулу Стокса практично для частинок зернового пилу будь-яких розмірів.





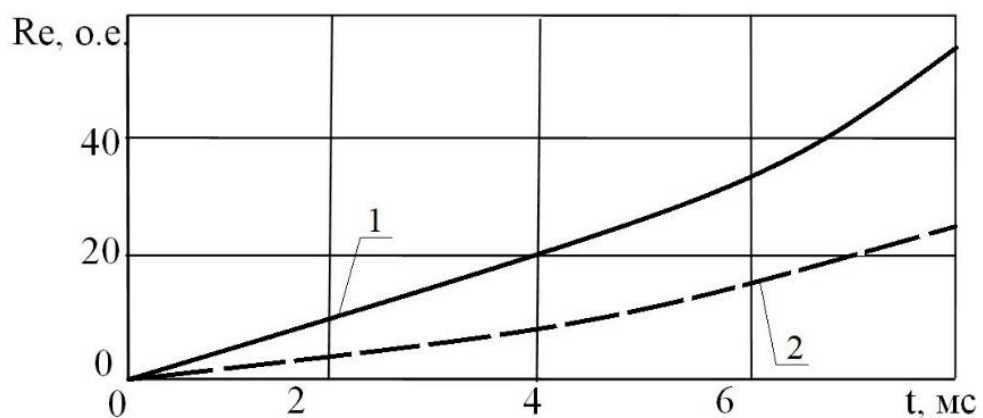
1 –  $d_s = 50$  мкм; 2 –  $d_s = 5$  мкм

Рисунок 2.10 – Закономірності радіальної координати дисперсної частинки в основному каналі розробленого РЦ



1 –  $r_0 = 0,01$  м; 2 –  $r_0 = 0,02$  м;

Рисунок 2.11 – Закономірності зміни радіальної складової швидкості дисперсних частинок ( $d_s = 50$  мкм)



1 –  $r_0 = 0,01$  м; 2 –  $r_0 = 0,02$  м;

Рисунок 2.12 – Залежності зміни числа Рейнольдса уздовж траєкторій руху дисперсних частинок ( $d_s = 200$  мкм)

Деякі дисперсні частинки, очевидно, при перерозподілі досягнуть стінок основного каналу до їх входу в зону доочисника. Для цього потрібно, щоб їх радіус входу відповідав умові:

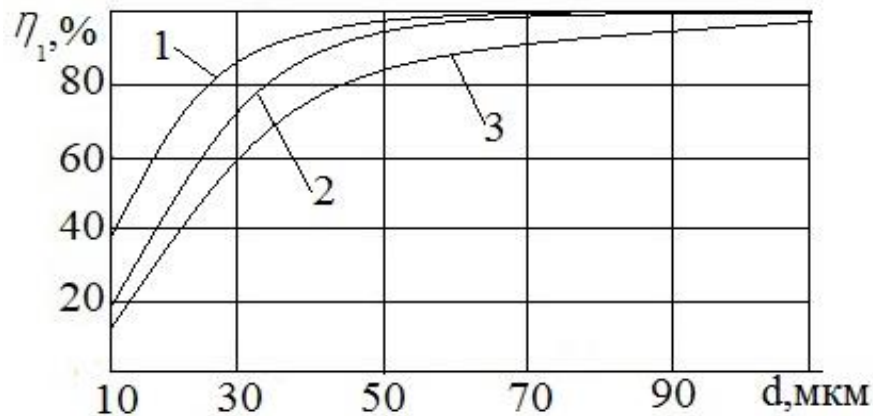
$$r_0 > \frac{\frac{D_0}{\Omega_0} \sqrt{\frac{U_0}{8l_0\tau}}}{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) e^{(\beta-1)\frac{L_0}{2\tau U_0}} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) e^{-(\beta-1)\frac{L_0}{2\tau U_0}}}, \quad (2.31)$$

де  $l_0$  – ширина доочисника;  $L_0$  – довжина основної робочої зони розробленого РЦ.

Крім цього приймаємо рівномірний за перетином потоку розподіл дисперсних частинок на вході в РЦ.

Тоді ефективність відділення дисперсних частинок з запиленого ПП в основній робочій зоні розробленого РЦ визначаємо за виразом, (рис.2.13):

$$\eta_1 = 1 - \frac{2 \frac{1}{\Omega_0^2} \frac{U_0}{l_0\tau}}{\left[ \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) e^{(\beta-1)\frac{L_0}{2\tau U_0}} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) e^{-(\beta-1)\frac{L_0}{2\tau U_0}} \right]^2}. \quad (2.32)$$



1 –  $U_0 = 5$  м/с; 2 –  $U_0 = 10$  м/с; 3 –  $U_0 = 15$  м/с

Рисунок 2.13 – Залежності ефективності очищення запиленого ПП в основному каналі розробленого РЦ від швидкості ПП ( $\Omega = 1000$  об/хв;  $D_0 = 0,1$  м;  $l_0 = 0,3$  м)

Аналізом (рис.2.13) встановлено, що ефективність відділення дисперсних частинок розміром 50...120 мкм в основному каналі розробленого РЦ знаходиться

в діапазоні 85...100 %. Недостатня ефективність відділення дрібнодисперсних частинок розміром до 50 мкм, що пояснюється обмеженням габаритів основного каналу РЦ та незначною вагою самих частинок. Це обумовлює використання додаткового пиловідділювача. Зменшення швидкості ПП, в діапазоні що досліджується, сприяє підвищенню коефіцієнта очищення основного каналу розробленого РЦ на 35...45 %.

Після того, як дисперсні частинки досягнуть зони доочисника, на них починає діяти сила ПП, яка спрямована радіально до осі. Додатково продовжує діяти радіально спрямована від осі відцентрова сила.

Запишемо рівняння для радіальної складової швидкості дисперсної частинки [135]:

$$\frac{dW_r}{dt} = -\xi \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s r_s} (W_r - U_r)^2 + \frac{W_\varphi^2}{r}, \quad (2.33)$$

де  $U_r = \frac{(D_0^2 - D_d^2)U_0}{8rl_0}$  – швидкість ПП;  $l_0$  – ширина доочисника;  $D_d$  – діаметр центрального отвору дисків доочисника.

Рівняння для радіальної координати дисперсної частинки має вигляд:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\xi \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_s r_s} \left( \frac{dr}{dt} - U_r \right)^2 + r \cdot \Omega_0^2. \quad (2.34)$$

Для дрібнодисперсних частинок, обтічних в ламінарному режимі, рівняння (2.34) запишеться у вигляді:

$$\frac{dr}{dt} = \tau \cdot \Omega_1^2 \cdot r - \frac{(D_0^2 - D_d^2)U_0}{8rl_0}, \quad (2.35)$$

де  $\Omega_1$  – частота обертання доочисника, приймаємо  $\Omega_1 = \Omega_0$ .

Тоді виходить, якщо дисперсна частинка потрапила в зону доочисника на радіусі, що задовольняє нерівності:

$$r > \frac{\sqrt{D_0^2 - D_d^2}}{\Omega_1} \sqrt{\frac{U_0}{8l_0\tau}}, \quad (2.36)$$

то за рахунок відцентрових сил вона буде відкинута до стінок основного каналу і потрапить в камеру.

Дисперсні частинки, які будуть перебувати ближче до вісі каналу, можуть бути втягнуті в доочисник. Їх подальша динаміка буде визначатися параметрами доочисника. При цьому більша за розміром дисперсна частинка, яка обтікається в турбулентному режимі, при виконанні нерівності (2.36) також за рахунок відцентрових сил буде відкинута до стінок каналу і потрапить до камери.

Тоді, тільки дисперсні частинки, радіус входу яких при попаданні в зону доочисника:

$$r_1 > \frac{2 \sqrt{D_0^2 - D_d^2} \sqrt{U_0}}{\Omega_1 \sqrt{8l_0\tau}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) e^{(\beta-1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) e^{-(\beta+1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}}}, \quad (2.37)$$

досягнуть радіуса, що задовільняє умові (2.36).

З іншого боку, очевидно, що дисперсні частинки радіус входу яких становить:

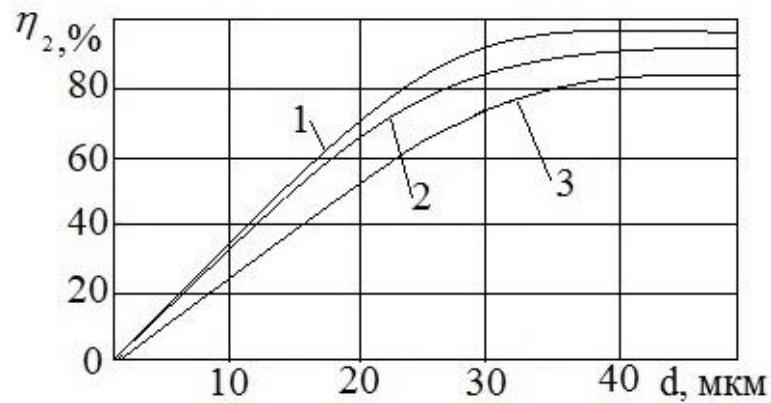
$$r_2 > \frac{D_d}{\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) e^{(\beta-1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) e^{-(\beta+1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}}}, \quad (2.38)$$

не потраплять в центральний отвір дисків доочисника.

Якщо вважати, що дисперсні частинки рівномірно розподілені на вході за перетином потоку, то ефективність відділення дисперсних частинок (без урахування частинок, які відокремлені до досягнення ними зони доочисника) дорівнює:

$$\eta_2 = 1 - \frac{\max\left(2 \frac{1 - (D_d/D_0)^2 U_0}{\Omega_0^2 l_0 \tau}, 4 \left(\frac{D_d}{D_0}\right)^2\right)}{\left[\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) e^{(\beta-1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) e^{-(\beta+1)\frac{L_0-l_0}{2\tau U_0}}\right]^2}. \quad (2.39)$$

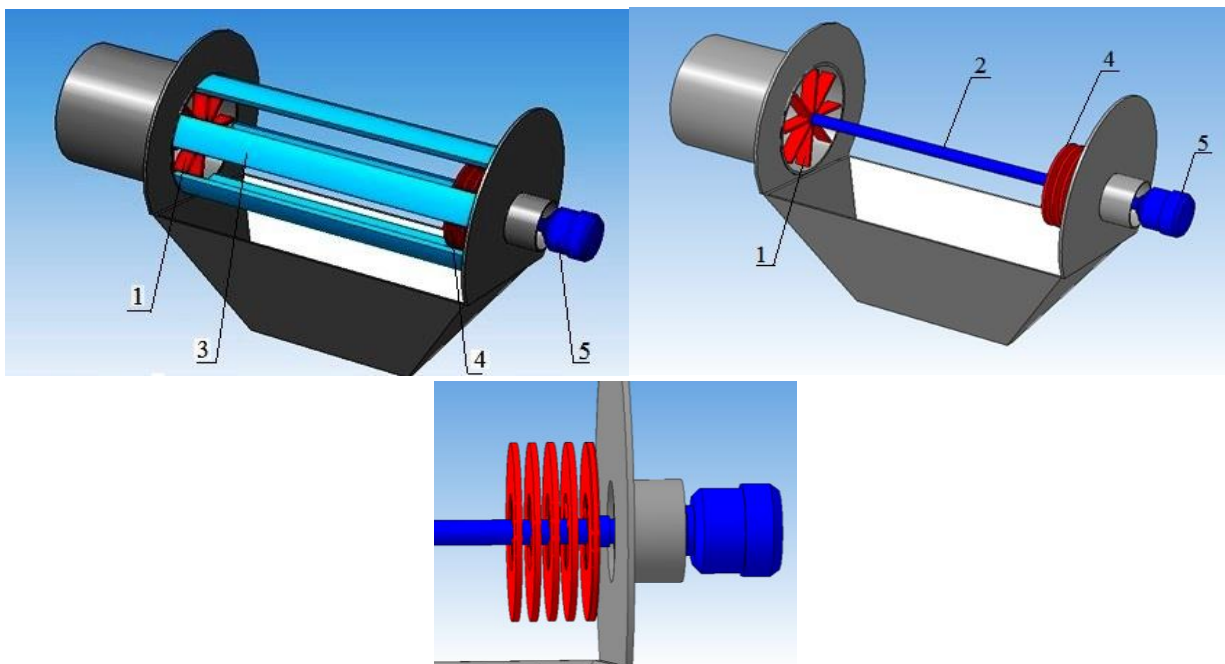
На рис. 2.14 представлені залежності фракційної ефективності відділення частинок дисперсної фази різних розмірів від параметрів доочисник розробленого РЦ.



1 –  $n=9$  шт.,  $l_0=0,0315$  м; 2 –  $n=6$  шт.,  $l_0=0,021$  м; 3 –  $n=3$  шт.,  $l_0=0,0105$  м

Рисунок 2.14 – Залежності коефіцієнта очищення запиленого ПП від кількості дисків доочисника розробленого РЦ ( $U_0 = 10$  м/с;  $D_0 = 0,1$  м;  $D_d = 0,01$  м)

Дисперсні частинки, діаметри яких знаходяться до характерного зламу рис. 2.14, частково відокремлюються в процесі їх руху до доочисника (рис. 2.15). Далі дисперсні частинки направляються між пластинами жалюзійного відокремлювача 3 до осаджувальної камери (рис. 2.15).



1 – завихрювач; 2 – вал; 3 – пластини жалюзійного відокремлювача;  
4 – багатодисковий доочисник; 5 – електродвигун

Рисунок. 2.15 – Схема елементів конструкції розробленого ротаційного циклону

Частинки з діаметром 20...100 мкм також частково відокремлюються в процесі їх руху до доочисника. Потім частинки, що залишаються відділяються при їх обертанні в зоні доочисника.

Проведеним аналізом досліджень по вивченню дисперсного складу зернового пилу [48] встановлено фракційний склад (табл. 2.1):

- частинки з розмірами до 1 мкм складають 8,3 %;
- частинки з розмірами від 1...5 мкм складають 16,6 %;
- частинки з розмірами від 5...10 мкм складають 24,8 %;
- частинки з розмірами більше 10 мкм – 50,3 %.

Чисельним прорахунком оптимальних математичних виразів встановлено, що дрібнодисперсна фракція до 1 мкм майже не відділяється. Ефективність видалення великодисперсних частинок (понад 1 мкм) досягає 67,9...79,2 %.

Таблиця 2.1

## Фракційний склад дисперсної фази

	Розмір частинок, мкм					Оберти вентилятора- завихрювача, $\Omega$ , об/хв
	<1	1-5	5-10	>10	Всього, %	
Перед початком досліджень	8,3	16,6	24,8	50,3	100	
Після основного очищення	8,3	16,1	22,0	50,1	100	2000
	8,3	16,5	24,1	51,1	100	1000

Ефективність очищення в основній робочій зоні розробленого РЦ  $\eta = 50...79,2$  %.

### 2.3. Моделювання процесу очищення повітряного потоку в багатодисковому доочиснику розробленого ротаційного циклону

Рух потоку в зазорах між дисками доочисника (рис. 2.15) залежить від ряду факторів [140]. Зокрема, одним із значущих факторів є відстань між дисками і швидкість їх обертання. При малому зазорі між дисками епіюра швидкостей ПП в міждисковому просторі незначно відрізняється від параболічної.

Зі збільшенням зазору геометрія потоку стає складною, весь потік розподіляється на два пристінних підшари. При цьому швидкість цих підшарів з

підвищенням обертів дисків збільшується, а їх товщина зменшується. Потік між ними є або нерухомим щодо поверхні дисків, або повільно рухається в протилежну обертанню сторону. При цьому колова складова швидкості частинок потоку збільшується від стінки до середини міждискowego зазору (рис. 2.16).

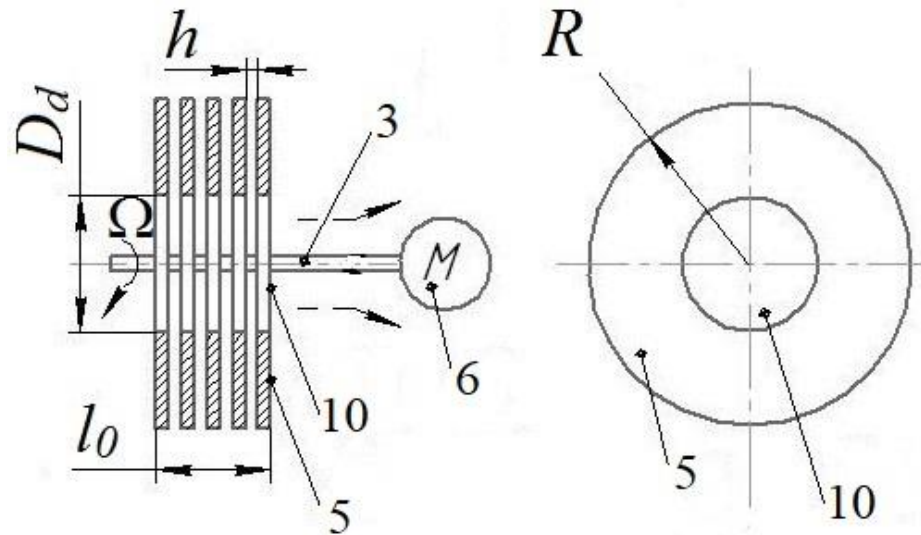


Рисунок 2.16 – Схема багатодискowego доочисника

Зменшення колової швидкості дисперсних частинок при русі потоку уздовж дисків обумовлено дією Коріолісових сил [93]. Чим далі дисперсні частинки знаходяться від поверхні дисків, тим в меншій мірі захоплюються внаслідок зменшення сил тертя. Отже, вони повинні відставати від обертання дисків більшою мірою, ніж частинки, які розташовані ближче до поверхні дисків. Коли потік відстає від обертового диска, дія відцентрової сили зменшується, внаслідок її залежності від квадрата колової швидкості.

Таким чином, частини потоку, які в меншій мірі відстають від дисків, відчувають більший вплив відцентрової сили і рухаються уздовж твірної швидше середніх шарів потоку.

Прийmemo, що останні значно відстають від обертання дисків і втрачають в більшій мірі колову швидкість. Зменшення колової швидкості ПП мале в порівнянні з абсолютними швидкостями обертання дисків в нерухомому просторі. Динаміка ПП в зазорах між дисками визначається компонентами відносної швидкості, які цілком можна порівняти один з одним.

Режим течії визначається за значенням критерія Рейнольдса. При  $Re_w > 3 \times 10^5$  течія є турбулентною. Комбінація числа Рейнольдса і відносного осьового зазору визначає існування чотирьох можливих режимів течії: ламінарна або турбулентна течія з роздільними або злитими пристінковими підшарами. Зауважимо, що в розробленому доочиснику, як показують попередні дослідження, встановлюється ламінарний режим течії з  $Re_w \approx (0,7 \dots 1,5) \times 10^3$ .

На підставі теоретичних розрахунків приймаємо наступну товщину пограничного підшару:

$$\delta \approx \frac{R}{\sqrt{Re_w}}, \quad (2.40)$$

де:  $R$  – радіус диска доочисника.

Для оптимальної роботи доочисника необхідно, щоб зазор між дисками був таким, при якому пристінкові підшари зливалися. Якщо між ними утворюється зазор, то в ньому радіальна складова швидкості потоку буде вище. Тоді, дисперсні частинки будуть втягуватися, а колова швидкість знизиться через відставання потоку від поверхні диска, що обертається. При цьому зменшиться відцентрова сила, яка виштовхує дисперсні частинки з зазору. Якщо ж зазор між дисками буде занадто малий, то зросте гідравлічний опір. Це призведе до підвищення енергоємності процесу очищення ПП.

Оптимальна товщина зазору між дисками доочисника визначається виразом:

$$h_{opt} \approx \left( 2 \frac{R^2 \nu}{U_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.41)$$

де:  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості потоку.

Для ламінарного потоку товщина пограничного підшару не залежить від радіуса і дорівнює:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\nu}{\Omega_1}}, \quad (2.42)$$

де:  $\Omega_1$  – кутова швидкість обертання дисків [88].



Тоді, зазор між дисками не повинен бути більше, ніж подвоєна товщина пограничного підшару, а саме:

$$h < 2 \sqrt{\frac{\nu}{\Omega_1}} \text{ м.} \quad (2.43)$$

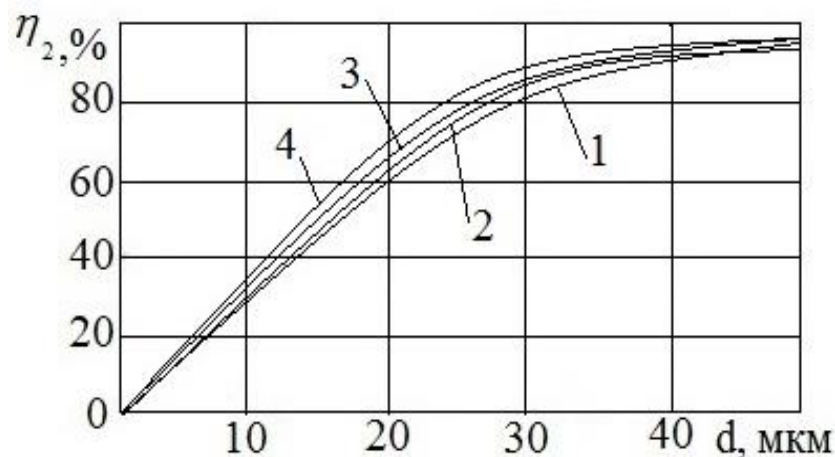
В іншому випадку кутова швидкість потоку в міждисковому просторі буде відставати від кутової швидкості обертання дисків доочисника.

З іншого боку, радіальна складова швидкості потоку між дисками визначається кількістю дисків в доочиснику та їх діаметром. Це пояснюється необхідністю проходження всього об'єму повітря, що поступає, який повинен пройти через доочисник (через зазори між дисками і центральний отвір доочисника).

Тоді радіальна складова швидкості між дисками визначається рівнянням [34]:

$$U = \frac{(D_0^2 - D_d^2)U_0}{8R(n-1)h}, \quad (2.44)$$

де:  $n$  – число дисків доочисника,  $h$  – зазор між дисками (обраний за рівнянням (2.43));  $D_d$  – діаметр центрального отвору дисків доочисника.



1 –  $h=0,0015$  м; 2 –  $h=0,0018$  м; 3 –  $h=0,0021$  м; 4 –  $h=0,0024$  м

Рисунок 2.15 – Залежності коефіцієнта очищення запиленого ПП від відстані між дисками доочисника розробленого РЦ ( $U_0 = 10$  м/с;  $D_0 = 0,1$  м;  $D_d = 0,01$  м)

Для того, щоб ПП залишився ламінарним потрібно обмежити швидкість обертання дисків, збільшуючи їх кількість відповідно до виразу (рис.2.15):

$$n = 1 + \frac{(D_0^2 - D_d^2) U_0}{8R \nu} \frac{1}{\text{Re}}, \quad (2.45)$$

де:  $\text{Re} < 2300$  відповідає ламінарному режиму руху (рис.2.15).

В оптимальній конструкції доочисника діаметр центрального отвору дисків повинен бути обраний так, щоб з одного боку зменшити швидкість потоку через зазори між дисками, а з іншого боку виключити потрапляння частинок в центральний отвір:

$$2 \frac{(D_d^2 / D_0) U_0}{\Omega_1^2 l_0^r} = 4 \left( \frac{D_d}{D_0} \right)^2. \quad (2.46)$$

Звідки:

$$D_d = D_0 \sqrt{\frac{U_0 / (\Omega_1^2 l_0^r)}{2 + (U_0 / \Omega_1^2 l_0^r)}}, \quad (2.47)$$

де:  $D_0$  – діаметр основного каналу,  $l_0$  – ширина доочисника.

Діаметр центрального отвору дисків доочисника забезпечує зменшення швидкості потоку між дисками та обмежує проходження дисперсних частинок, компенсує створений гідравлічний опір.

#### 2.4. Розрахунок гідравлічного опору розробленого ротаційного циклона

Гідравлічний опір розробленого циклону є одним з основних факторів, що впливають на енергоємність і економічність роботи аспіраційної системи. Циклон заплановано, відповідно до технологічних схем пересувних зернових сепараторів ОВС та СВС використовувати як 2-ий ступінь очищення після жалюзійного пиловловлювача.

Значний гідравлічний опір пиловловлювачів не дозволить ефективно використовувати жалюзійний пиловловлювач так як дисперсні частинки будуть виноситися з нього разом з ПП. Ротаційні циклони характеризуються незначним

гідрравлічним опором. Розроблений РЦ має активний завихрювач і відносно невелику довжину основного каналу.

Тому для повної технічної оцінки розробеного РЦ потрібно провести визначення діапазону варіювання гідрравлічного опору.

Гідрравлічний опір визначається переважно опором каналів доочисника. Втрати тиску в подібних каналах можна визначити за рівнянням Вейсбаха [83]:

$$\Delta P = \xi \frac{u^2}{2} \rho, \quad (2.48)$$

де  $\rho$ ,  $u$  – щільність та швидкість потоку, відповідно;  $\xi$  – коефіцієнт опору, який при ламінарному режимі дорівнює:

$$\xi = \frac{64 R_d}{Re h}, \quad (2.49)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса,  $R_d$  – радіус дисків доочисника;  $h$  – ширина міждисків каналу або відстань між дисками.

З рівняння (2.48) та (2.49) отримаємо:

$$\Delta P = 32\mu \frac{R_d}{h^2} u, \quad (2.50)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості потоку.

Швидкість потоку в каналах між дисками доочисника істотно змінюється за його радіусом:

$$u(r) = U_0 \frac{R_d^2}{2hnr_c}, \quad (2.51)$$

де  $U_0$  – швидкість потоку на вході у циклон,  $n$  – кількість паралельно з'єднаних каналів (дисків) доочисника.

Тому, підставивши в (2.50) середню швидкість потоку, отримаємо:

$$\Delta P = 16\eta \frac{R_d^2}{h^3 n} U_0 \ln \frac{R_d}{r_c}, \quad (2.52)$$

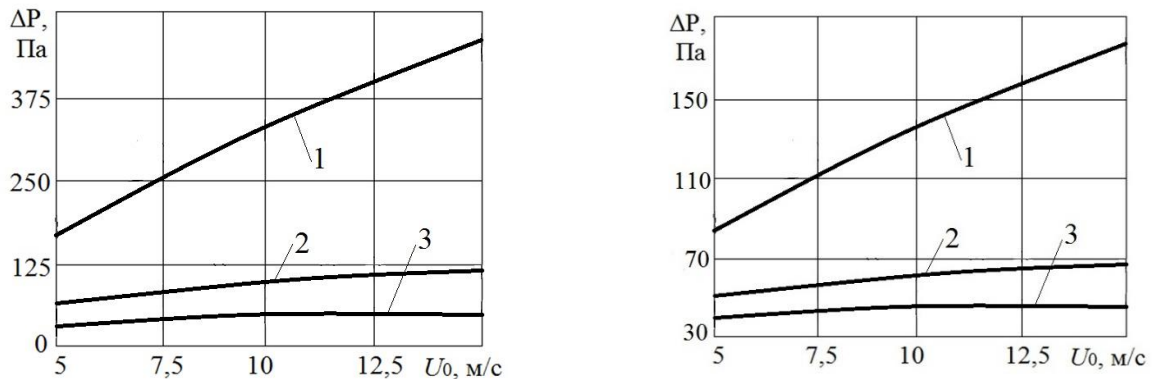
де  $r_c$  – внутрішній радіус.

Так як в доочиснику декілька паралельних каналів, то сумарний гідрравлічний опір розробленого РЦ становить:

$$\Delta P = 16\mu \frac{R_d^2}{n^2 h^3} U_0 \ln \frac{R_d}{r_c} \quad (2.53)$$

Зауважимо, що у виразі (2.53) не враховані локальні гідравлічні опори, які незначно впливають на відповідний діапазон варіювання.

Встановлено залежності гідравлічного опору розробленого РЦ від його параметрів та швидкості ПП на вході (рис.2.16).



а)  
1 –  $n = 3$  шт.; 2 –  $n = 6$  шт.;  
3 –  $n = 9$  шт.

б)  
1 –  $D_d = 0,01$  м; 2 –  $D_d = 0,02$  м;  
3 –  $D_d = 0,03$  м

Рисунок 2.16 – Залежності гідравлічного опору розробленого РЦ від параметрів доочисника а швидкості ПП

Підвищення швидкості ПП та значень параметрів розробленого РЦ (рис. 2.16), в діапазонах що досліджували, збільшує гідравлічний опір в 1,91...9 разів. За умови максимальної ефективності та мінімального гідравлічного опору встановлені діапазони кількості дисків та діаметру їх центрального отвору: 6...9 шт. та 0,02...0,03 мм, відповідно.

Діапазон варіювання гідравлічного опору розробленого РЦ з доочисником, за визначених його раціональних параметрів, склав 130...180 Па.

## 2.5. Висновки за розділом

1. Теоретичні дослідження динамічних процесів ПП проведено ґрунтуючись на аналогії руху багатофазних середовищ та в'язких рідин. Використано наступний алгоритм: моделювання динаміки несучої та дисперсної фаз запиленого ПП в основному каналі, моделювання динаміки дисперсної фази в

багатодисковому доочиснику розробленого РЦ при цьому враховано проміжне відведення дисперсних частинок та доочищення ПП.

2. Побудовані динамічні моделі процесу очищення запиленого ПП, дозволили встановити функціональні залежності складових швидкості ПП і дисперсних частинок з конструктивно-кінематичними параметрами розробленого РЦ і властивостями запиленого ПП.

3. Встановлено, що складові швидкості багатофазного середовища залежать на 15...35 % від конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ, що підтверджує можливість перерозподілу дисперсних частинок та інтенсифікації процесу очищення запиленого ПП. Розв'язком отриманих математичних моделей визначені діапазони складових швидкостей несучої і дисперсної фаз. Встановлено, що ефективність процесу очищення запиленого ПП на розробленому РЦ становить 85...92 %.

4. Проведеним аналізом результатів математичного моделювання розділення двофазного запиленого потоку ПП «велико – дрібно дисперсний пил» в робочій зоні розробленого РЦ встановлено: що для оптимальної роботи багатодискового доочисника зазор між дисками повинен бути таким, щоб пристінкові шари зливалися. Для розробленого РЦ отримані раціональні діапазони варіювання конструктивних параметрів: відстань між дисками  $h = 0,9...1,0$  мм; діаметр внутрішнього отвору дисків  $D_d = 30...40$  мм; ширина доочисника  $l_0 = 0,4...0,6$  м.

5. Теоретично визначено гідравлічний опір в розробленому РЦ з доочисником, за визначених його раціональних параметрів, який склав  $\Delta P = 130...180$  Па. Встановлені залежності гідравлічного опору розробленого РЦ від швидкості ПП та параметрів доочисника, аналізом яких за умови енергозбереження визначені діапазони варіювання кількості дисків та діаметру їх центрального отвору:  $n = 6...9$  шт. та  $D_d = 0,02...0,03$  м, відповідно.

6. У результаті проведених теоретичних досліджень встановлені закономірності керування якістю та продуктивністю, виявлена і доведена можливість істотної інтенсифікації процесу очищення ПП від легких домішок та пилу розробленим РЦ з багатодисковим доочисником.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті проведених теоретичних досліджень створено математичні моделі динаміки несучої та дисперсної фаз в робочих зонах розробленого РЦ, які враховують його конструктивно-технологічні параметри та властивості запиленого ПП. Математичні вирази отримані при певних допусках, припущеннях, тому підлягають уточненню діапазонів варіювання та експериментальній ідентифікації невідомих величин.

#### 3.1. Характеристика об'єктів дослідження

3.1.1. Експериментальна установка для дослідження процесу очищення запиленого повітряного потоку.

Вимоги до експериментальної установки:

- регулювання ступеню запиленості ПП шляхом варіювання концентрації дисперсних частинок (величина повинна змінюватися до максимальної, яка зустрічається при роботі пересувних зернових сепараторів);
- відносна похибка приладів та обладнання не повинна перевищувати 5 % від вимірюваної величини;
- режими роботи повинні максимально відповідати стаціонарним умовам роботи на пересувних зернових сепараторах;
- при дослідженнях швидкості ПП повинна бути регульованою відповідно до технологічного процесу аспіраційних систем зерноочисних машин.

Дотримання цих вимог дозволить вважати, що експерименти проведені в рівнозначних умовах, а їх результати можна використовувати для оцінки характеристик досліджуваного пиловловлювача.

Дослідження процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ і визначення раціональних значень його параметрів виконані на експериментальній установці, схема і загальний вид якої представлені на рис. 3.1.

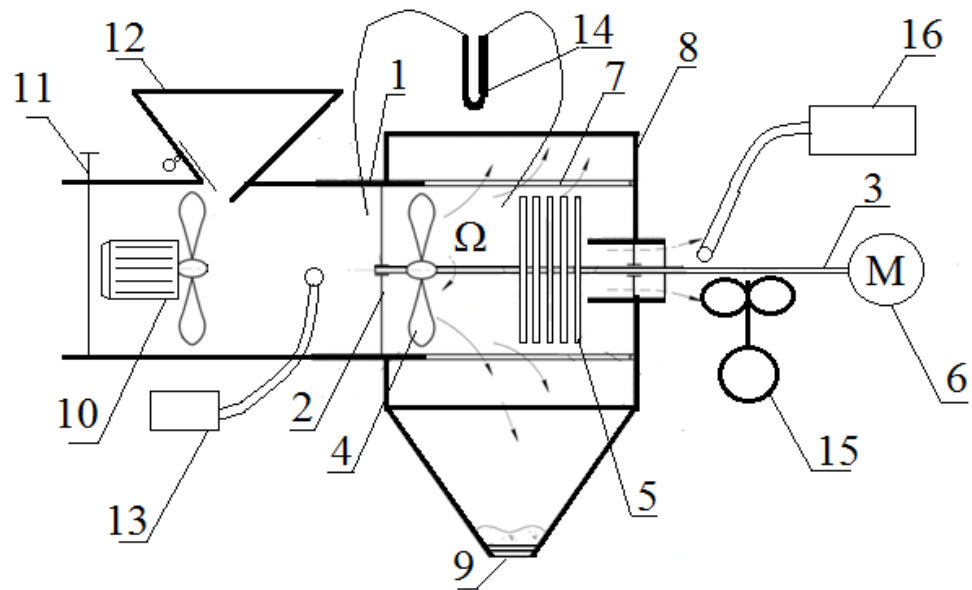
Установка складається з циліндричного корпусу 1 (рис. 3.1), в якому на опорах 2 встановлений вал 3 з завихрювачем 4 і багатодисковим доочисником 5. Вал 3 обертається за допомогою електродвигуна 6. Отвори 7 встановлені під кутом і відокремлюють робочу зону і пилоосаджувальну камеру 8. У нижній частині осаджувальної камери встановлено шлюзовий затвор 9. ПП створюється за допомогою вентилятора 10 і регулюється за допомогою діафрагм різних розмірів 11.

На експериментальній установці здійснювали незалежне варіювання наступних параметрів:

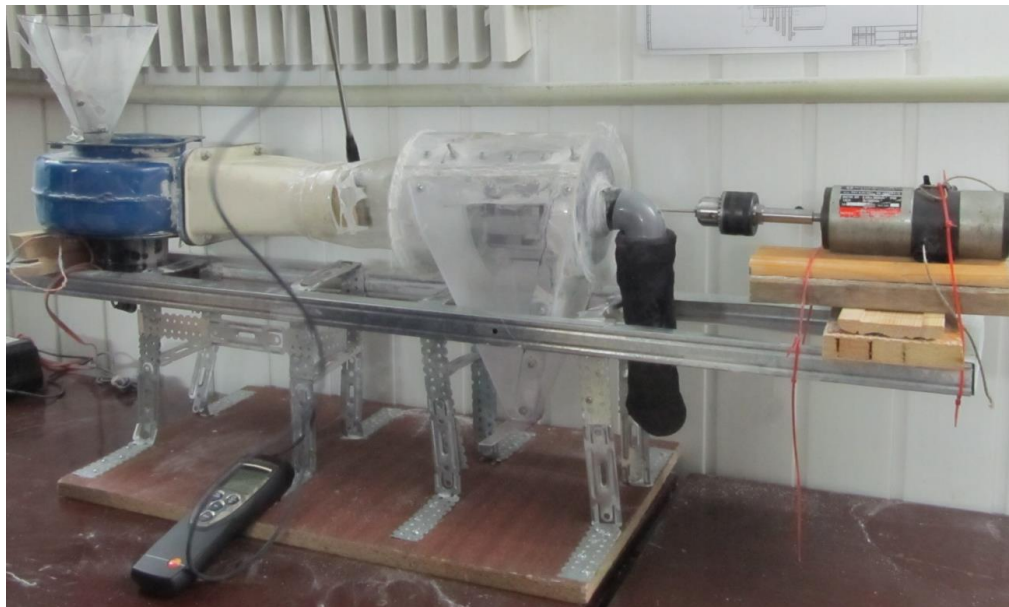
- а) запиленості ПП (концентрацією частинок пилу на вході) – відкриттям заслінки пилодозатора;
- б) витрати повітря і швидкості ПП зміною діафрагм різних розмірів у вхідному патрубку вентилятора;
- в) ширини відкриття жалюзі – перекриттям двох циліндрів;
- г) кута нахилу лопатей завихрювача – зміною кута атаки лопатей їх вигинанням;
- д) кількість дисків доочисник – монтажем/демонтажем дисків;
- е) відстань між дисками – зміною перемичок різної товщини між дисками доочисника.

Встановити оптимальне співвідношення значень конструктивних параметрів розробленого РЦ утруднено, зважаючи на складні траєкторії руху запиленого ПП в подібних апаратах. Для цього прийнято рішення про незалежне варіювання значень конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ при проведенні експериментів за допомогою елементів та пристосувань.

Дані про елементи і пристосування, які використані на експериментальній установці наведені в табл.3.1.



а)



б)

а – схема; б – загальний вигляд;

1 – корпус; 2 – опори; 3 – вал; 4 – завихрювач; 5 – доочисник багатодисковий;  
 6 – двигун; 7 – жалюзі; 8 – камера осаджувальна; 9 – затвор шлюзовий;  
 10 – вентилятор; 11 – діафрагма; 12 – пилодозатор; 13 – мікроманометр багатограничний з похилою трубкою ММН-240(5)-1,0; 14 – мікроманометр водяний; 15 – анемометр чашковий; 16 – анемометр Testo 416

Рисунок 3.1 – Конструктивна схема експериментальної установки для дослідження розробленого РЦ



## Регулювання елементів розробленого ротаційного циклона

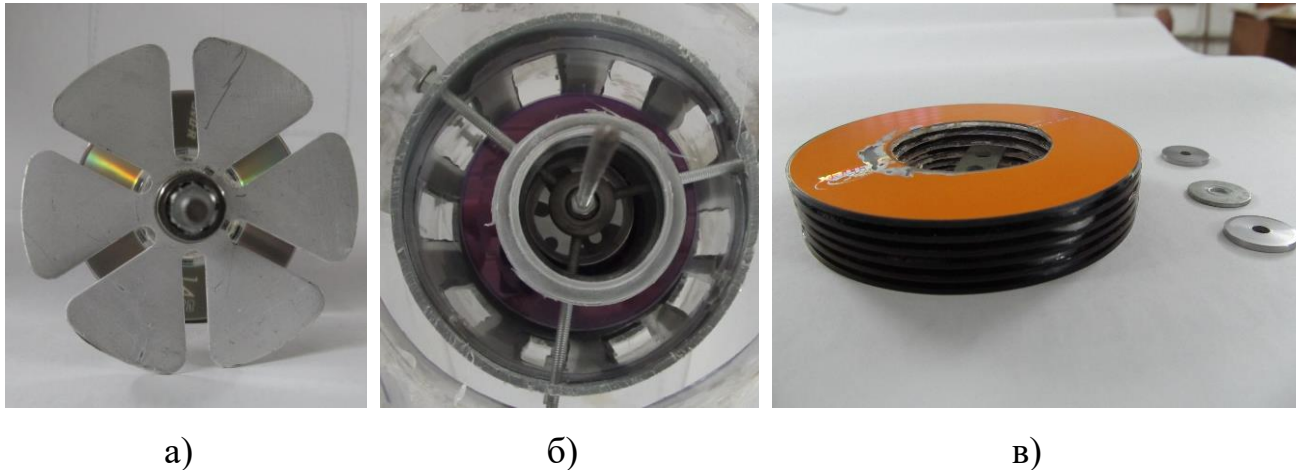
№ п/п	Параметри	Позначення	Конструктивна реалізація	Діапазон варіювання
1	Швидкість ПП	$U_0$	Діафрагма на вході в циклон	6...13 м/с
2	Кут нахилу лопатей завихрювача	$\alpha$	Нахил лопатей завихрювача	10...30°
3	Ширина відкриття жалюзі	$b$	Перекриттям отворів двох циліндрів	5-20 мм
4	Частота обертання ротора	$\Omega$	Двигун постійного струму	250...2000 об/хв
5	Відстань між дисками доочисника	$h$	Заміна перемичок різної товщини	0,5...1,5 мм

Попередніми експериментальними та теоретичними дослідженнями впливу кута нахилу лопатей завихрювача (рис.3.2, а) на ефективність процесу очищення ПП встановлено, що діапазон варіювання кутів нахилу лопатей завихрювача становить 10...30°.

Найменше значення відстані між дисками доочисника 0,5 мм (рис.3.2, в) прийнято з розрахунку вільного проходження запиленого ПП, відповідно до результатів теоретичних досліджень. Слід також зазначити, що надмірне збільшення відстані веде до зменшення коефіцієнта очищення, і, як наслідок, до потрапляння частинок пилу в обслуговуючу зону зернових сепараторів.

Найбільше значення ширини відкриття жалюзі 20 мм (рис.3.2, б) прийнято з розрахунку вільного проходження дисперсних частинок легких домішок та пилу, які зустрічаються при очищенні зернового вороху на пересувних зернових сепараторах. Слід також зазначити, що надмірне зменшення ширини відкриття жалюзі (рис.3.2, б) веде до збільшення гідравлічного опору та сприяє налипанню на стінках жалюзі.

Для забезпечення необхідної концентрації запиленого ПП, відповідно до плану експериментів, виготовлено бункер з регульованою заслінкою (рис.3.3).



а)

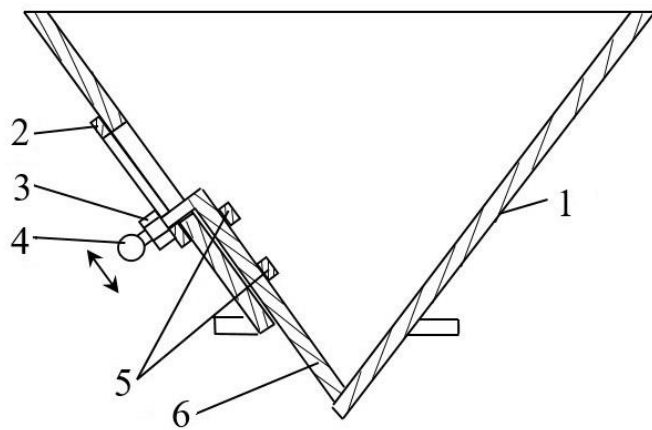
б)

в)

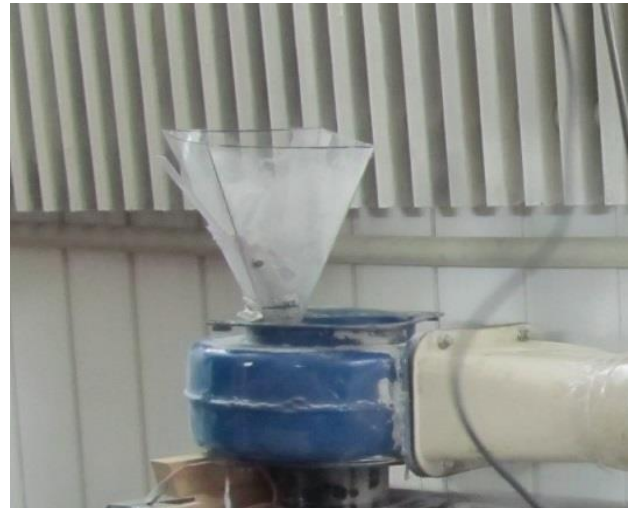
а) – завихрувач лопатевий; б) – жалюзі;

в) – багатодисковий доочисника з перемичками різної товщини

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд основних елементів конструкції розробленого РЦ



а)



б)

а) – схема; б) – загальний вигляд

1 – бункер; 2 – пластина з розмірної шкалою; 3 – фіксатор; 4 – рукоятка;

5 – напрямні; 6 – заслінка

Рисунок 3.3 – Конструктивна схема пилодозатора

Для зважування лотків і пилодозатора, а також їх вмісту, застосовували ваги типу ВК 300.1 (рис.3.4) з максимальною вагою – 300 г та похибкою  $\pm 0,01\%$  [21, 39].

Гідравлічний опір розробленого РЦ визначали за перепадом статичного тиску у вхідному вихлопному патрубку циклона за допомогою U-подібного водяного манометра (рис.3.5) з межами виміру до 500 Па з кроком вимірювання 1 мм.

Двотрубчасті U-подібні манометри (рис.3.5) мають дві вертикальні поєднані між собою скляні трубки, які закріплені на шкалі з нульовою позначкою посередині. Рідинні манометри мають просту конструкцію та забезпечують достатню точність вимірювання. В подібних манометрах тиск або різниця тисків, які вимірюються, урівноважується тиском стовпа рідини. При цьому використовується принцип поєднаних судин. Рівні рідини в них співпадають при відповідності тисків над ними, а при нерівності – тиск в одному з судин урівноважується гідростатичним тиском надлишкового стовпа рідини в іншому судині (рис.3.5). При вимірах фіксували різницю тисків між трубками за зміщенням рідини від нульового рівня.

Для визначення швидкості ПП в різних точках робочої зони розробленого РЦ використовували трубку Прандтля та блок мікроманометрів (рис.3.6).

Швидкості, які підлягають виміру в різних точках основної робочої зони розробленого РЦ, дають уявлення про перерозподіл дисперсних частинок в запиленому ПП за перетином каналу.

Вимірювання динамічних тисків і швидкостей в круглому циліндричному каналі проводили через задані відстані по одному або двох взаємно перпендикулярних діаметрам з подальшим визначенням середніх швидкостей в п'яти рівновеликих майданчиках (рис.3.6, г). Відповідно до рекомендацій стандарту [21] газопроводи круглого перетину розбивали на ряд концентричних рівновеликих кілець і вимірювання проводили по двох взаємно-перпендикулярних діаметрах. Для цього в стінці циліндричного каналу розробленого РЦ на відстані, яка дорівнює чверті кола його перетину, просвердлювали отвори діаметром 0,03...0,05 м і встановлювали короткі штуцери [48, 157].



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд ваг типу ВК 300.1

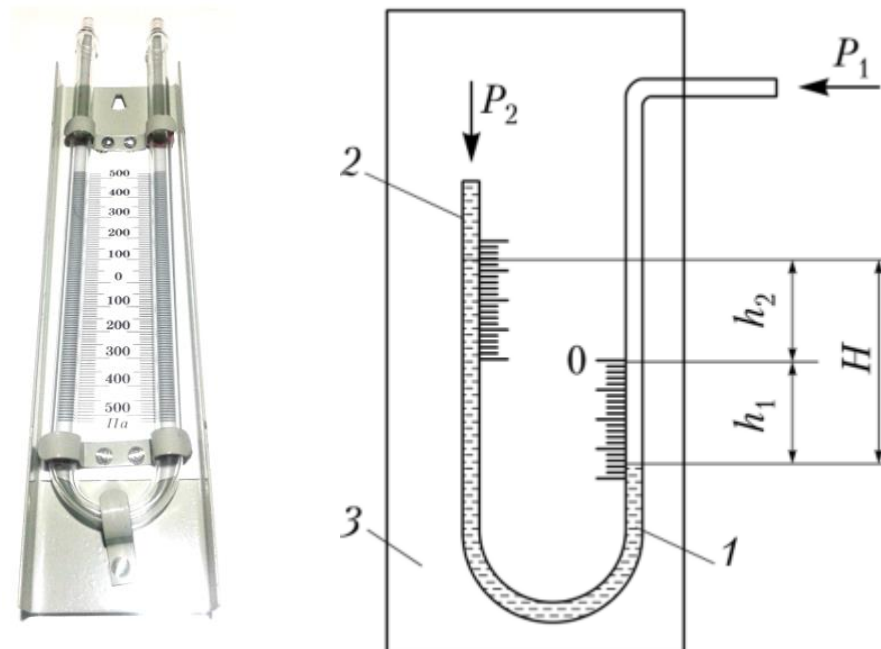
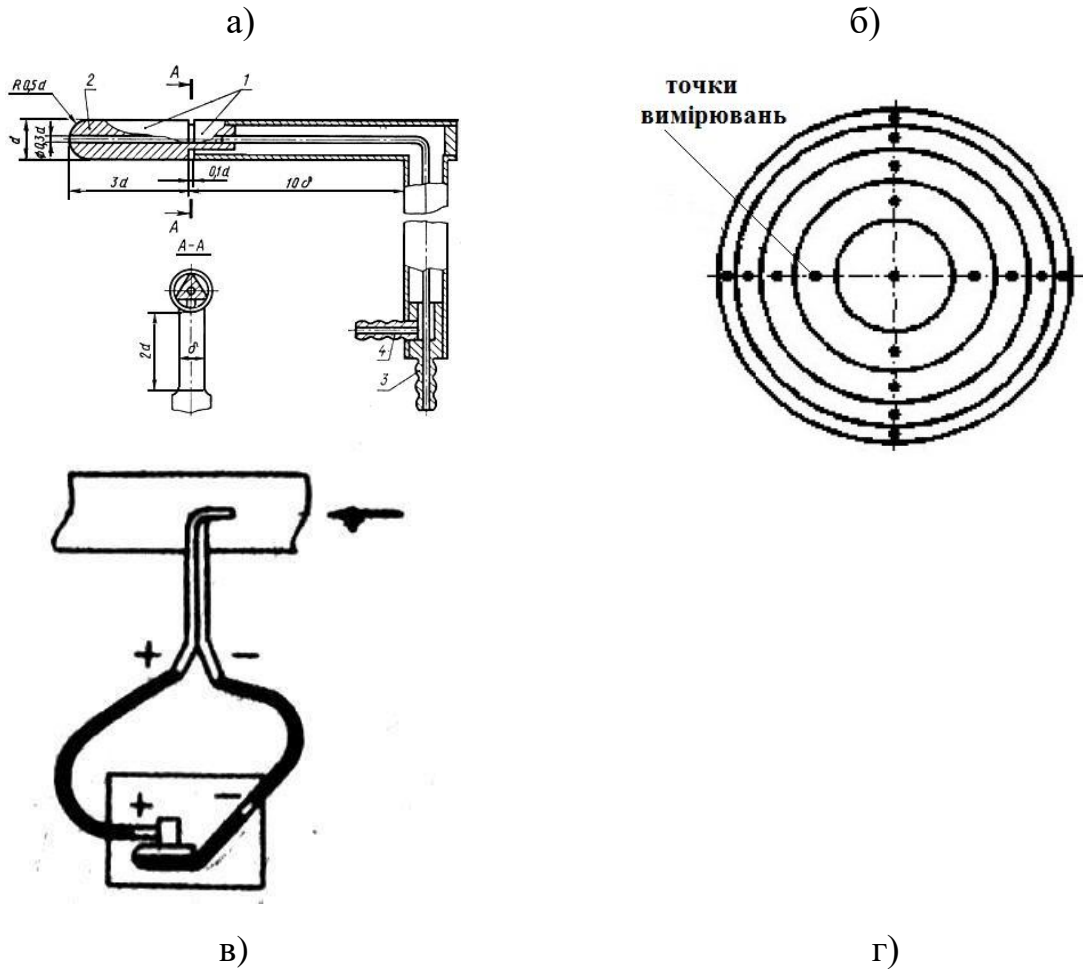
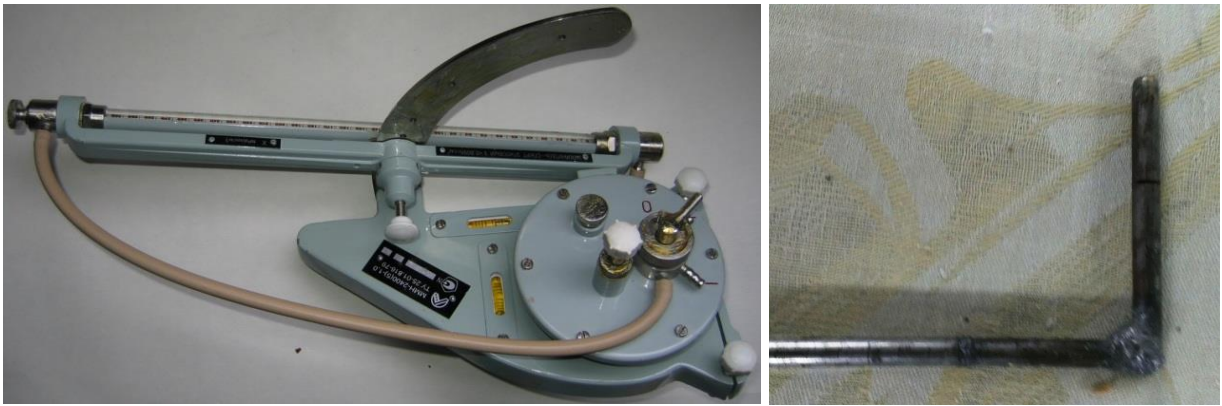


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд та схема  $U$ -подібного манометра



а – загальний вигляд мікроманометра ММН-240 (5)-0,1; б – загальний вигляд трубки Прандтля; в – схема трубки Прандтля при вимірюванні; г – схема вимірювання динамічних тисків і швидкостей

Рисунок 3.6 – Обладнання та схема вимірювання швидкості повітряного потоку в циліндричному каналі розробленого РЦ

Канали круглого перетину розробленого РЦ для дослідження розбиті кільця в залежності від розмірів (табл.3.2.)

Канали круглого перетину розробленого РЦ

Діаметр трубопроводу, м	0,2	0,2...0,4	0,4...0,6
Число кілець	3	4	5

Відстань від центру каналу до точки вимірів визначали за виразом:

$$l_i = R_r \sqrt{(2i-1)/2n_k}, \quad (3.1)$$

де  $R_r$  – радіус каналу, м.;  $n_k$  – число кілець, на які поділено перетин каналу;  $i$  – порядковий номер кільця, рахуючи від центру каналу.

Для зручності користуватися величиною відстані від внутрішньої стінки каналу в місці введення забірної трубки до точки виміру визначили за рівнянням:

$$l'_i = R \left(1 - \sqrt{(2i-1)/2n_k}\right); \quad l''_i = R \left(1 + \sqrt{(2i-1)/2n_k}\right), \quad (3.2)$$

де  $l'_i$  та  $l''_i$  – відстані від внутрішньої стінки каналу відповідно до ближніх і дальніх точок вимірів, що розташовані в даному кільці, м.

Виконавши виміри і визначивши швидкість в ряді точок досліджуваного перерізу, розрахували середню за перерізом потоку швидкість  $u_{cp}$ .

Об'ємну витрату ПП визначили як добуток номінальної середньої вихідної швидкості на площу поперечного перетину каналу:  $Q_B = u_{cp} \cdot F_k$ , де  $F_k$  – площа перетину каналу.

Заміривши також швидкість ПП на осі потоку  $u_0$ , визначали коефіцієнт розподілу швидкостей за перетином каналу:

$$a_{cp} = \frac{u_{cp}}{u_0}. \quad (3.3)$$

Розподіл швидкостей за перетином каналу істотно не змінюється з часом, не дивлячись на зміну абсолютної величини швидкості ПП.

Для визначення  $a_{cp}$  одночасно проводили виміри в заданій точці перетину каналу і на його осі. Визначивши чисельне відношення  $\alpha = \frac{u_i}{u_0}$  для всіх точок

вимірів, розраховують коефіцієнт розподілу швидкостей потоку за перетином круглого каналу:

$$a_{cp} = \frac{a_1 + \dots + a_{8n}}{8n_k}, \quad (3.4)$$

де  $8n$  - загальне число вимірів в  $n_k$  точках при прямому і зворотньому ходах пневмотрубки уздовж двох взаємно перпендикулярних діаметрів.

Об'ємна витрата потоку, яка проходить по каналу, з урахуванням коефіцієнта розподілу швидкостей за перетином, визначається виразом:

$$Q_B = u_0 \cdot a_{cp} \cdot F_k, \quad (3.5)$$

де  $u_0$  – усереднена за часом швидкість потоку на осі каналу, м/с.

Показання вимірів мікроманометра ММН-240 (5) -0,1, відповідно паспорту, знаходяться в межах 2400 Па або 240 кг/с<sup>2</sup>. Для визначення швидкості ПП дані вимірів шкали мікроманометру переводили за допомогою рівняння:

$$u = \frac{\sqrt{2gK_m Kh\rho_p}}{\rho_c}, \quad (3.6)$$

де  $\rho_p$  – щільність рідини в манометрі;  $\rho_c$  – щільність ПП в каналі;  $h$  – показник значення на шкалі мікроманометра;  $K_m$  – коефіцієнт що характеризує кут нахилу вимірювальної трубки;  $K = 1$  – поправочний коефіцієнт для трубки Прандтля;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння.

Середню швидкість ПП в робочій зоні розробленого РЦ визначали як середнє арифметичне з швидкостей в різних точках перетину:

$$u_{cp} = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_n}{n_k}, \quad (3.7)$$

де:  $n_k$  – кількість точок вимірювання.

Частоту обертання ротора розробленого РЦ, що утворювалась за допомогою електродвигуна, визначали годинниковим тахометром СК типу 751 (рис. 3.7).





Рисунок 3.7 – Визначення частоти обертів годинниковим тахометром СК 751

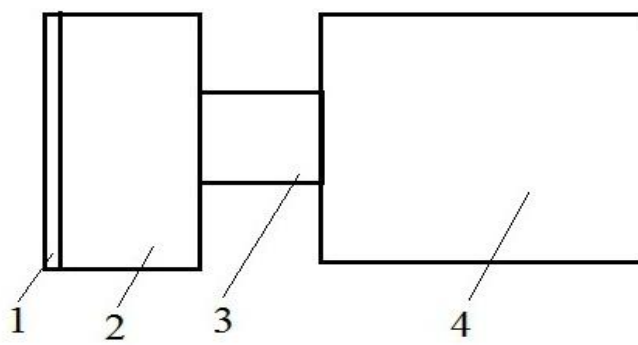
Даний тип тахометру СК-751 призначений для контрольного вимірювання числа обертів валів і для визначення лінійних (колових) швидкостей.

Тахометр має годинниковий механізм, що працює близько 4-х секунд, з яких 3 секунди припадає на фактичний проміжок вимірювання, а решту часу на пуск і зупинку механізму.

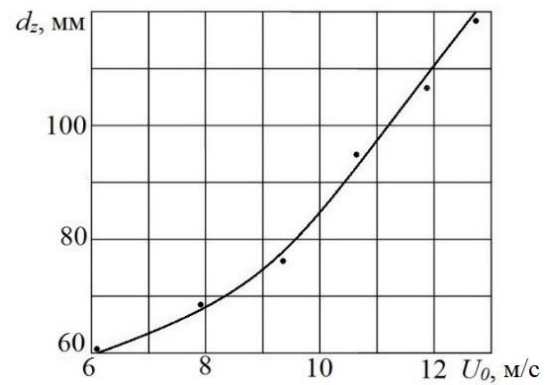
Технічні характеристики годинникового тахометру СК-751 наступні. Межі вимірювання: частоти обертання - 50...1000 та 1000...10000 об/хв.; лінійних швидкостей - 10...100 і 100...1000 м/хв. Допустима основна похибка вимірювання від верхньої межі вимірювань: частота обертання, +/- 1 %; лінійних швидкостей, за допомогою дискового наконечника  $\phi$  31,62, +/- 2 %. Тахометр стійкий до впливу вібрації в діапазоні частот: 10...25 Гц з прискоренням 5 м/с<sup>2</sup>. Номінальне значення одного поділу великої шкали: для частоти обертання - 10 об/хв.; для лінійних швидкостей - 1 м/хв. Номінальне значення одного поділу малої шкали: для частоти обертання - 1000 об/хв.; для лінійних швидкостей - 100 м/хв.

Для варіювання швидкості ПП виготовлена установка з діафрагмою (рис.3.8). Схема установки для зняття тарувальної кривої діафрагми представлена на (рис.3.8, б). Установка включає в діафрагму 1, вентилятор 2, точка заміру мікроманометром 3, циклон 4.





а)



б)

а) – схема установки; б) – тарувальна крива

1 – діафрагма, 2 – вентилятор, 3 – точка заміру мікроманометром, 4 – циклон

Рисунок 3.8 – Тарувальна крива діафрагми

Діафрагми включали в себе набір пластин з отворами різного діаметру всередині, які встановлювалися на вхідному патрубку вентилятора.

Характеристики вентилятора відтворення ПП для експериментальної установки: продуктивність – 1200 м<sup>3</sup>/год; електродвигун постійного струму типу МЕ 226-Б.

Регулювання продуктивності (витрати повітря) проводили зміною частоти обертання ротора електродвигуна, використовуючи автотрансформатор типу МЕ 226-Б ГОСТ 9443-67 і блок випрямлювачів.

Для визначення кількості і складу суміші, яка пропущена розробленим РЦ, потік на виході пропускали через абсолютний фільтр, який представляє собою два рукави, включених послідовно і виконаних з фланелі (артикул 509). Установка другого фільтра, що охоплює перший, викликана тим, що один фланелевий рукав пропускає частину дрібнодисперсних частинок пилу. Попередніми експериментами з чотирма фільтрами, поставленими послідовно, встановлено, що в першому (внутрішньому) затримується близько 86 % частинок, у другому близько 12 %, в третьому 1,5 % і в четвертому 0,5 %. Цим обумовлено використання двох фільтруючих рукавів.

### 3.2. Дисперсна складова пилу запиленого повітряного потоку

Залежно від властивостей частинок і обраного методу визначення дисперсного складу пилу, аналіз виконується або з безпосереднім відбором твердої фази у відповідний прилад, або з використанням заздалегідь відібраного пилу [74, 175, 199]. В останньому випадку її необхідно правильно підготувати до аналізу. Якщо вага первинної проби більше, ніж необхідно для аналізу, проба підлягає перемішуванню і скороченню.

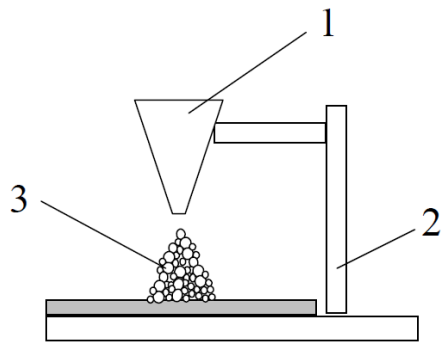
Для утворення проб попередньо проводили перемішування за способом «Конус» (рис. 3.9). Для цього застосовується воронка, яка встановлена на штативі, через яку на плоску поверхню насипається первісна проба частинок. Після цього воронка переставляється на іншу плоску поверхню і процес повторюється. Дана операція проводиться не менше 3...4 разів.

Зменшення проби здійснюється методом квартування за допомогою хрестовини (рис. 3.10). Частина проби в одній парі протилежних секторів відбирається, інша знову перемішується до тих пір, поки не буде отримана необхідна для аналізу маса частинок.

Також використано ситовий аналіз, який заснований на механічному поділі частинок по крупності шляхом просівання через сита різними розмірами отворів. Насівка пилу при ситовому аналізі поділяється на фракції відповідно розмірів отворів сита (рис. 3.11).

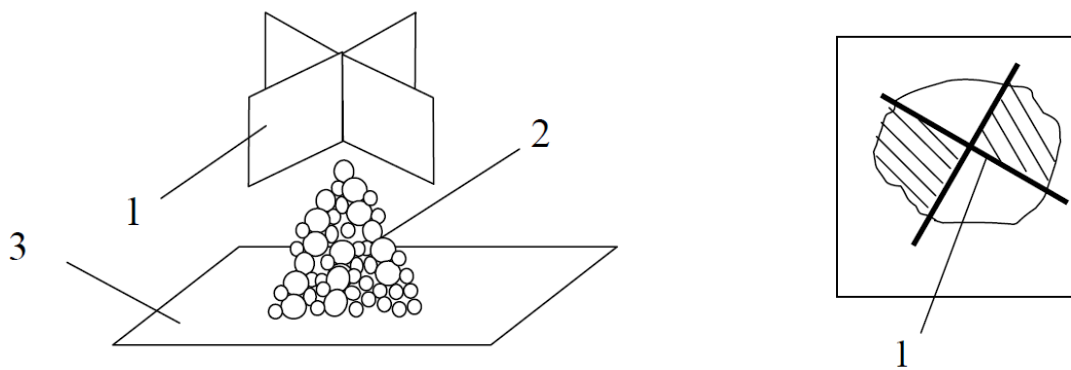
Навіску пилу з дисперними частинками розміром до 200 мкм, поміщали на сито із самими великими отворами. Попередні при просіві частинки надходять на сито з отворами менших розмірів і т.д. Після самого дрібного сита встановлюють суцільне дно, на якому збирається найдрібніша фракція. Зважуючи залишки пилу на кожному ситі, отримували дані про розподіл проби пилу по фракціям.

Контрольні сита випускаються промислово розміром від 40...250 мкм. Для частинок менше 40 мкм ситовий аналіз не проводився, а використовували заздалегідь підготовлені фракції.



1 – воронка, 2 – штатив, 3 – проба частинок

Рисунок 3.9 – Перемішування дисперсних частинок за допомогою конуса



1 – хрестовина, 2 – проба частинок, 3 – плоска поверхня

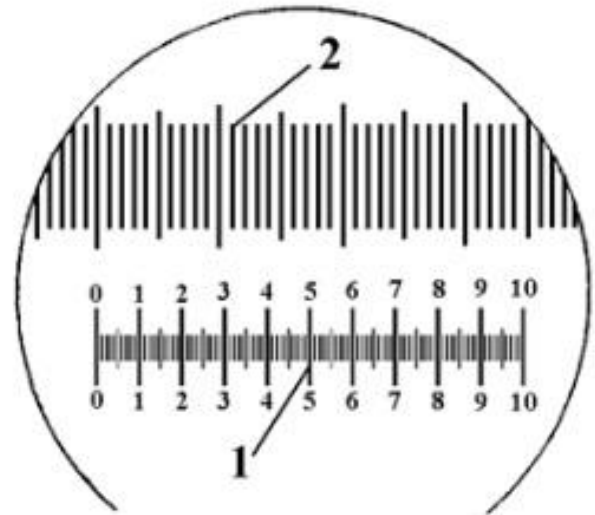
Рисунок 3.10 – Квартування проби



Рисунок 3.11 – Визначення дисперсності пилу за допомогою сит з отворами різного розміру

Мікроскопічний аналіз застосовується для визначення форми і розміру частинок до 50 мкм. При визначенні дисперсного складу підраховали в полі зору мікроскопа число частинок кожної обраної фракції.

Визначення дисперсності методом мікроскопії проводився за допомогою окулярного мікрометра (рис.3.12). Він являє собою лінійку, нанесену на склі округлої форми, діаметр якого відповідає внутрішньому діаметру трубки окуляра мікроскопа [180, 201].



1 – окулярна мікроскопічна лінійка; 2 – об'єктив-мікрометр

Рисунок 3.12 – Вимірювання дисперсності частинок пилу мікроскопом моделі МБС-9

Перед визначенням розмірів частинок пилу попередньо визначають крок поділки лінійки за допомогою об'єктива-мікрометра (2). Він являє собою закріплений в металевій пластинці скляний круг, на поверхні якого нанесені лінії з інтервалом в 10 мкм (всього на відстані 1 мм нанесено 100 ліній). Об'єктив-мікрометр встановлюють на оптичний стіл мікроскопа і знаходять зазначені лінії під малим збільшенням, центрують в полі зору, після чого переводять під велике збільшення. Далі витягають окуляр мікроскопа, знімають верхню кришку, встановлюють в нього окулярну мікрометричну лінійку, закривають кришку окуляра і встановлюють його в мікроскоп. Після чого поєднують лінії об'єктива-мікрометра з краєм окулярної мікрометричної лінійки так, як це показано на (рис. 3.12), і визначають ціну поділки лінійки.

Далі дисперсну частинку встановлюють на столик мікроскопа разом з об'єктивом-мікрометром і проводять виміри при тих оптичних умовах, при яких

визначена ціна поділок окулярного мікрометра. Для цього підводять по черзі кожен дисперсний частинку поспіль без вибору під шкалу, визначаючи розмір у 25...30 частинок за їх діаметром.

### 3.3. Програма і методика експериментальних досліджень

Мета проведення експериментальних досліджень полягає в встановленні закономірностей процесу очищення запиленого ПП від легких домішок і пилу в розробленому РЦ пересувних зернових сепараторів. Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- в ході проведення експериментальних досліджень дослідного зразка розробленого РЦ перевірити адекватність математичних моделей дисперсної та несучої фаз в робочих зонах;

- оптимізувати конструктивні параметри розробленого РЦ.

Так як при експлуатації РЦ головним критерієм є коефіцієнт очищення  $\eta$ , то він і обраний в якості оціночного показника ефективності процесу очищення ПП.

Відповідно до мети та завдань, програмою досліджень передбачено:

1. Визначення раціональних конструктивно-кінематичних параметрів РЦ.
2. Дослідження впливу конструктивних параметрів розробленого РЦ, запиленості ПП на коефіцієнт очищення (ефективність процесу очищення ПП) та гідравлічний опір циклону.

3. Визначення траєкторій і швидкостей руху компонентів запиленого ПП в робочих зонах розробленого РЦ.

4. Визначення сепараційних коефіцієнтів очищення розробленого РЦ.

5. Визначення фракційної ефективності очищення запиленого ПП в розробленому РЦ.

Приймаємо наступну програму досліджень:

- дослідження сепараційної та фракційної ефективності процесу очищення запиленого ПП;

- визначення гідравлічного опору розробленого РЦ;

- встановлення закономірностей траєкторій і швидкостей руху дисперсних частинок і ПП в робочих зонах розробленого РЦ;
- визначення оптимальних конструктивно-кінематичних параметрів розробленого РЦ.

Експериментальні дослідження процесу очищення запиленого ПП проведено в три етапи. На першому етапі визначали достовірність результатів теоретичного дослідження процесу очищення запиленого ПП шляхом порівняння їх з експериментальними даними. На другому етапі для знаходження оптимальних значень параметрів процесу очищення запиленого ПП застосована методика планування багатofакторного експерименту. На третьому етапі вивчалася робота розробленого РЦ відповідно «Методи визначення умов випробування» і ОСТ 70.10.2.-83 «Програма і методи випробувань».

Експериментальні дослідження виконували відповідно до загальноприйнятих і рекомендованих ГОСТ методик [45], а також з використанням окремих методик, [48, 74] та розроблених в процесі досліджень. Методика проведення однотипних дослідів однакова. При дослідженні впливу окремих факторів створювалися сталі значення інших.

Обробку результатів експериментальних досліджень здійснювали з застосуванням методів математичної статистики [129, 202]. Аналіз експериментальних даних виконувався при дотриманні умови однорідності дисперсій, що зумовлені помилками дослідів, для всіх вимірювань. Умова однорідності означає однаковий вплив помилок і випадкових перешкод для кожної серії вимірювань.

Дослідження впливу різних факторів на кінцевий результат процесу - коефіцієнт очищення запиленого ПП виконували в наступній послідовності.

Зважували за допомогою вагів (рис.3.4) суміш дисперсних частинок різних фракцій, відповідно до плану експериментів. Окремо зважували тару. Дану навіску (кількість суміші дисперсних частинок) засипали в бункер пилодозатора (рис.3.3). Встановлювалося одне з поєднань досліджуваних параметрів (ступінь відкриття пилодозатора, кут нахилу лопатей завихрювача, відстань між дисками

доочисника, ширина відкриття жалюзі, частота обертання ротора, швидкість ПП і т.д.). Вмикали вентилятор, який утворював за допомогою діафрагми задану швидкість повітряного потоку в робочих зонах РЦ. Відкриттям заслінки пилодозатора подавали задану суміш дисперсних частинок до розробленого РЦ. Після кожного досліду вміст рукавного фільтру досліджували на предмет наявності не відібраних частинок суміші на вихідному патрубку. Вловлені дисперсні частинки зважували.

При проведенні дослідів крім ефективності процесу очищення запиленого ПП також визначали такі величини: а) гідравлічний опір; б) запиленість ПП; в) тривалість дослідження; г) вагу пилодозатора і фільтра у вихідному патрубку; д) траєкторії і швидкості частинок ПП; е) траєкторії і швидкості руху дисперсних частинок.

3.3.1. Визначення траєкторій і швидкостей руху дисперсних частинок і ПП в робочих зонах розробленого ротаційного циклону. Найбільш поширений метод дослідження поля швидкостей ПП полягає в використанні трубки Прандтля з блоком мікроманометрів. Крім цього для тарування та вимірювань в складних місцях використано термоанемометр Testo 416 з телескопічною крильчаткою [126, 142] (рис.3.13).

Для визначення складових швидкості ПП в робочій зоні розробленого РЦ застосована система рекомендацій стандарту ГОСТ 12.3.018-79 «Системи вентиляції. Методи аеродинамічних випробувань».

Перед початком досліду також встановлювали значення конструктивних параметрів циклону (табл.3.1) і витрати повітря.





Рисунок 3.13 – Визначення швидкості ПП термоанемометром Testo 416

Для визначення швидкості руху дисперсних частинок в робочих зонах розробленого РЦ проаналізовані відомі методи.

Один із відомих методів дослідження траєкторій руху твердих частинок обумовлений використанням радіоактивних ізотопів [127]. Це вимагає для вивчення процесу складної апаратури і не забезпечує при цьому достатньої надійності отриманих результатів. Внаслідок неоднакової радіоактивності мічених частинок знижується точність вимірювань.

Найбільш прийнятним методом є фотографічний [20], сутність якого полягає у визначенні траєкторій руху частинок по їх фотографічному зображенню. Для отримання фотографічного зображення проводили відеозйомку процесу через прозору стінку розробленого РЦ (рис. 3.14) з нанесеною координатною сіткою [83, 186].



Рисунок 3.14 – Відеозйомка процесу очищення запиленого ПП в розробленому РЦ



Перед початком дослідження встановлювали задані значення конструктивних параметрів РЦ (табл. 3.1).

Обробку відеозйомки процесу проводили, простежуючи шляхи видимих через прозорий корпус частинок, щодо координатної сітки. Відстані, які пройшли частинки, і їх швидкості ставали відомими в результаті визначення їх координат на кадрах відеозйомки і частоти зміни кадрів в одиницю часу.

3.3.2. Визначення гідравлічного опору розробленого ротаційного циклону. Гідравлічний опір є результатом безпосереднього виміру, фіксується водяним мікроманометром (поз.13, рис.3.1) під час проведення дослідів.

Згідно з методикою [190, 197] визначення гідродинамічних характеристик ротаційного РЦ проводили на не запиленому ПП.

Кожен експеримент починали з установки заданих конструктивних параметрів РЦ, використовуючи відповідні налаштування (табл. 3.1).

Далі вмикали вентилятор і секундомір. Тривалість досліду – 30 с.

При дослідженнях варіювали витрати повітря за допомогою діафрагм різного розміру (рис. 3.8): 100, 80 і 60% від номінального.

Гідравлічний опір розробленого РЦ експериментально визначали за перепадом тиску до та після апарату з варіюванням значущих параметрів розробленого РЦ.

Замірний гідравлічний опір приводили до нормальних умов.

3.3.3. Визначення запиленості обслуговуючої зони пересувних зернових сепараторів. Існує комплекс методів визначення запиленості ПП. Перша група методів пов'язана з виділенням частинок пилу з ПП, до якої входить ваговий (гравіметричний), рахунковий (коніметричний) і радіоізотопний методи. Друга група методів реалізується без виділення дисперсних частинок з ПП, а саме: фотометричний, електрофотометричний, оптичний, акустичний і електричний методи [74, 198].

Використання більшості методів ускладнене внаслідок значної кількості налаштувань обладнання, що визначають точність вимірювань. Так Радіоізотопний метод передбачає використання приладів, через фільтр яких проходить запилений ПП, розташований між джерелом радіоактивного випромінювання і детектором цього випромінювання. Підвищення концентрації вловлення пилу на фільтрі скорочує число частинок, що досліджуються джерелом і досягають детектора. Виходячи із зменшення числа реєстрованих детектором частинок, і за відповідними калібрувальними графіками, визначають концентрацію пилу на фільтрі. Відомі радіоізотопні концентратори пилу («Прима-01», «Прима-03», РЕП-С-1), що дозволяють проводити аналіз при утриманні пилу в повітрі в інтервалі  $0,05 \dots 2500 \text{ мг/м}^3$  [167]. Однак даний метод не дозволяє провести кінцевий аналіз дисперсності – розмір наявних частинок.

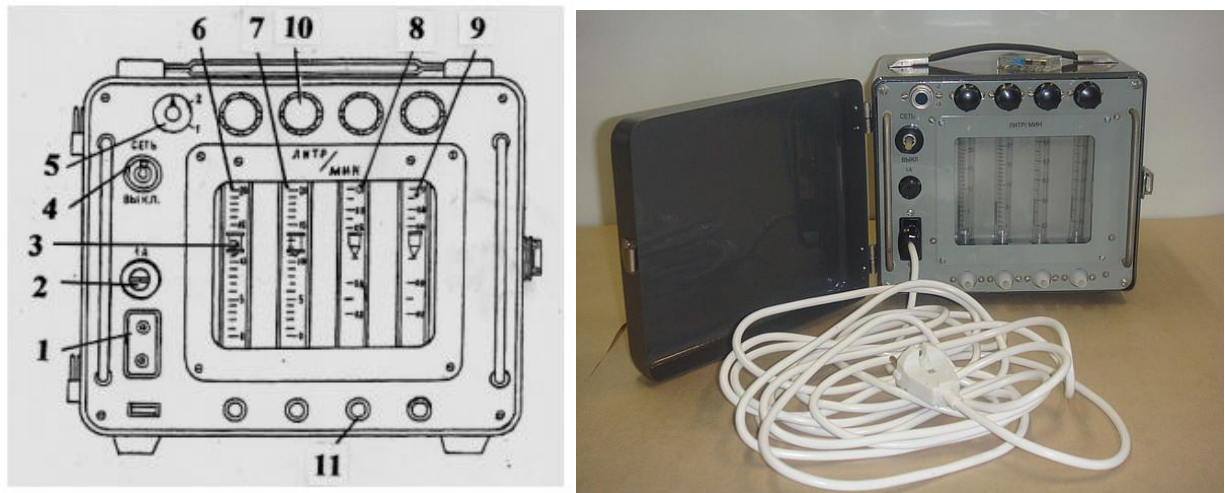
Практика експериментальних досліджень зводиться до використання аспіраторів, які утворюють ПП та пропускають через фільтруючий елемент або поглинач запилений ПП [171, 194]. Дані про запиленість та дисперсний склад визначаються шляхом зважування та аналізу вмісту фільтру.

Для визначення концентрації дисперсного пилу робочої зони використана методика ГОСТ 12.1.005-88 [41], яка передбачає використання аспіратора моделі 822 (рис.3.15) з аналітичними фільтрами АФА-ВП-10 [66] (рис.3.16).

До вхідного штуцера аспіратора за допомогою шлангу приєднується фільтр в фільтротримачі (рис.3.16). Повітря проходить через фільтр та залишає при цьому дисперсні частинки пилу. За відомими швидкістю проходження ПП та часом відбору проби, визначають об'єм повітря, який пройшов через фільтр. Кількість вловленої на фільтру пилу визначали ваговим методом. Запиленість повітря розраховували за врахуванням кількості пилу та об'єму проведеного повітря.

Необхідна швидкість проходження ПП регулюється шляхом обертання ручок вентилів ротаметрів, які представляють собою градуйовані скляні трубки з поплавками (рис.3.15). Перші два ротаметра аспіратора призначені для відбору

проб повітря на запиленість (від 0 до 20 л/хв), інші – на загазованість (від 0 до 1 л/хв) [6].



а)

б)

а – схема; б – загальний вигляд

1 – колодка входна; 2 – запобіжник; 3 – поплавков ротаметра; 4 – тумблер вмикання та вимикання аспірації; 5 – клапан розвантажувальний; 6, 7 – ротаметри для визначення запиленості; 8, 9 – ротаметри для визначення загазованості; 10 – ручка вентиля ротаметра; 11 – входний штуцер

Рисунок 3.15 – Аспіратор для відбору проб моделі 822



1 – фільтротримач ІРА-10; 2 – фільтр АФА-ВП-10;

3 – фільтруючий елемент в зборі

Рисунок 3.16 – Фільтруючий елемент приладу

В якості фільтрувального матеріалу використано аналітичні аерозольні фільтри АФА, які мають високу ефективність фільтрації і незначний аеродинамічний опір. Дані фільтри вловлюють дисперсні частинки пилу розміром 0,1...0,2 мкм при об'ємній швидкості прокачування повітря до 6 м<sup>3</sup>/год [66, 196]. Для обраного вагового метода використано перхлорвінілові фільтри АФА-ВП-10 (рис.3.16) з наступними характеристиками: площа робочої поверхні – 10 см<sup>2</sup>; температура повітря при відборі проби -200...+60<sup>0</sup>С; опір фільтра потоку повітря при швидкості 1 см/с – 0,3 мм. вод. ст.; допустиме повітряне навантаження 7 л/(хв×см<sup>2</sup>).

Для поєднання фільтрів з аспіратором використані фільтротримачі (рис.3.16), які виготовлені з полістиролу ІРА-10.

Тривалість прокачування повітря через фільтр АФА-ВП-10 визначали за умовами, що забезпечують точність вагового метода: мінімальна кількість пилу на фільтрі складає 1...2 мг; максимальна кількість вловленого пилу не більше 25 мг.

Фільтри АФА-ВП-10 зважували разом з паперовими тримачами. Після дослідів фільтри витримували протягом 60 хв. в приміщенні, де проводили зважування.

Визначення масової концентрації пилу в повітрі робочої зони пересувних сепараторів проводили за формулою:

$$\mu_d = \frac{(m_1 - m_2)1000}{Q \times t}, \quad (3.8)$$

де  $m_1$  – маса чистого фільтра, мг;  $m_2$  – маса фільтра з пилом, мг;  $t$  – тривалість відбору проби, хв.;  $Q$  – витрата повітря, л/хв.

Час відбору проби визначали за формулою:

$$t = \frac{1000B}{t_n \times Q}, \quad (3.9)$$

де  $B$  – мінімальна необхідна навіска пилу на фільтрі – 1 мг;  $t_n$  – передбачувана концентрація пилу на фільтрі, мг/м<sup>3</sup>.

3.3.4. Визначення сепараційної та фракційної ефективності очищення запиленого ПП.

В якості оціночного показника ефективності прийняті коефіцієнти очищення.

Випробування проводили на домішках та пилу зернового вороху.

Досліджувані параметри РЦ вимірювали при витратах повітря, що становлять 100, 80 і 60 % від номінального.

Регулювання витрати повітря визначали, як зазначалося вище, використовуючи автотрансформатор типу АОСН-20-220-75У4 і блок випрямлячів.

Кожен експеримент починали з відповідної підготовки абсолютного фільтра, і дозатора.

Абсолютний фільтр складається з фільтрів, які виконані з фланелі і мають істотну гігроскопічність. Тому перед кожним дослідом вони доводилися до постійної ваги. З цією метою фільтри протягом 4 годин витримували в сушильній шафі СЕШ-3М при температурі 105°.

Після цього фільтри протягом години охолоджували в ексикаторі, далі зважували на аналітичних вагах АДВ-200М (кл.2) і потім встановлювали в корпус абсолютного фільтра.

Під підготовкою лотків розуміється зважування їх на вагах до досліду.

Підготовка пилодозатора складалась з підбору положення заслінки для здійснення заданої запиленості ПП і зважування конструкції до досліду.

Зважування лотків і пиледозатора виконували вагами ВЛКТ-5кг (ГОСТ 24104-88).

Перед початком досліду встановлювали задані конструктивні параметри пиловловлюючого пристрою, використовуючи табл.3.1.

Пилодозатор заповнювали з дисперсних частинок сумішшю, зважували і встановлювали на експериментальну установку.

Далі вмикали вентилятор, відкривали заслінку пилодозатора і вмикали секундомір. Тривалість досліду становила 20 с.

Після закінчення досліду перевіряли (відповідно до загальноприйнятих методик і ГОСТів):

- наявність не потраплених в ПП дисперсних частинок в робочу зону циклону (пилодозатор рис.3.1, поз.12);

Потім знімали абсолютний фільтр і в сушильній шафі доводили до постійної ваги. Після охолодження його зважували і знаходили величину приросту, яка визначає кількість пропущених РЦ частинок пилу.

Крім цього, зважували пилодозатор і абсолютний фільтр (див. рис.3.1, поз.12), і знаходили різницю їх зважування до і після досліду, що становить вагу дисперсних частинок, які подані до розробленого РЦ і вловлені, відповідно.

За отриманими даними визначали коефіцієнт очищення.

Сепараційна ефективність, яка визначається коефіцієнтом очищення, не є повною характеристикою, так як показує лише вагову (масову) частку вловлених дисперсних частинок та не свідчить про фракційний склад.

Для повного дослідження процесу очищення ПП розробленим РЦ необхідно знати його фракційну ефективність, яка показує частку вловленої суміші РЦ і абсолютним фільтром, по кожній фракції.

У зв'язку з полідисперсністю характерних частинок пилу, які відрізняються за розмірами і формою, умовно поділяємо їх на фракції.

Фракційна ефективність процесу очищення (фракційний коефіцієнт очищення) виражається відношенням [81, 200]:

$$\eta_{fn} = \frac{G_{влов}}{G_n}, \quad (3.10)$$

де  $G_n$  - маса дисперсних частинок  $n$ -ої фракції, які поступили в РЦ;

$G_{влов}$  – маса вловлених дисперсних частинок  $n$ -ої фракції.

Загальний коефіцієнт очищення розробленого РЦ визначали:

$$\eta_0 = \frac{\Sigma G_{\text{влов } i \text{ РЦ}}}{\Sigma G_{oi}}, \quad (3.11)$$

де  $G_{\text{влов РЦ}}$  – маса вловлених розробленим РЦ дисперсних частинок 1, 2, 3 фракції;  
 $G_{o1}, G_{o2}, G_{o3}$  – маса частинок які поступають на очищення 1, 2, 3 фракції.

Щільність частинок дисперсної фази знаходиться в межах  $0,8 \dots 1,3 \text{ г/см}^3$ .

Дослідження проводили на дисперсній фазі, яка складається з пилу органічного походження і домішок [97].

Кожне дослідження починали з відповідної підготовки абсолютного фільтра і дозатора (див. п.3.1).

Зважування пилодозатора також проводили вагами ВЛКТ-5кг (ГОСТ 24104-88) (див. п.3.1).

Перед початком досліду встановлювали значення конструктивних параметрів розробленого РЦ, використовуючи табл.3.1.

Пилодозатор заповнювали приготованими дисперсними частинками, зважували і встановлювали на експериментальну установку.

Далі вмикали вентилятор. Відкривали заслінку пилодозатора, і вмикали секундомір.

3.3.5. Планування факторного експерименту. Максимальна ефективність процесу очищення запиленого ПП забезпечується при оптимальному співвідношенні конструктивно-кінематичних параметрів розробленого РЦ між собою, що неможливо при розрізненому вивченні їх впливу. У зв'язку з цим, виникає необхідність в застосуванні методики планування багатфакторного експерименту.

Основним завданням планування експерименту є отримання статистичної моделі об'єкта дослідження у вигляді полінома (рівняння регресії) першого або другого ступеня [31, 139, 171].

Загальний хід побудови і подальшого дослідження математичної моделі зводився до наступного: 1) попереднє вивчення об'єкта; 2) вибір критерію оптимізації, виявлення значущих факторів і побудова моделі;

3) оцінка адекватності математичної моделі; 4) використання моделі для оптимізації досліджуваного процесу.

Критерієм оптимізації є параметр, за яким оцінюється досліджуваний об'єкт і який пов'язує фактори в математичну модель. Він повинен показувати сукупну і вичерпну характеристику об'єкта дослідження. Для розробленого РЦ такою характеристикою є коефіцієнт очищення.

На підставі апріорної інформації встановлено, що на процес очищення ПП в розробленому РЦ впливають такі фактори: кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha$ , град; частота обертів ротора  $\Omega$ , рад/с; ширина відкриття жалюзі  $b$ , мм; кількість дисків доочисника,  $n$  шт.; відстань між дисками доочисника  $h$ , мм.

Після фіксування значень факторів, які є базовими, на встановлених паспортних рівнях виділено п'ять, що визначають процес очищення запиленого ПП.

Попередніми дослідженнями виключені параметри, які неможливо контролювати або зміна яких неможливо внаслідок конструктивних особливостей розробленого РЦ.

Порядок проведення дослідів був наступним. Згідно матриці плану експериментів встановлювали одне з поєднань рівнів факторів. Проводили пуск вентилятора, і подавали пилову суміш в розроблений апарат. Вихідна маса пилу становила 60 г, що при будь-якому поєднанні факторів гарантувало роботу установки в сталому режимі. Після фіксування кількості уловлених частинок суміші визначали коефіцієнт очищення апарату. Результати проведення дослідів, побудова рівняння регресії, їх статистична обробка, оптимізація досліджуваного процесу викладені в додатку Б.



### 3.4. Висновки за розділом

1. Програма і методики проведення експериментальних досліджень, розроблені лабораторна установка, прилади та обладнання дозволили отримати з достатньою точністю діапазонів варіювання конструктивно-технологічних параметрів процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ.

2. Використано експериментальний метод визначення траєкторій і швидкостей частинок дисперсної фази по траєкторних вимірах із застосуванням відеозйомки. Для чого робоча зона розробленого циклону виконана з прозорого оргскла. Подальша обробка фотографічних зображень дозволяє визначати закономірності траєкторій і складових швидкості руху дисперсних частинок в різних ділянках робочої зони розробленого РЦ.

3. Для визначення оптимальних значень конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ використано методи математичного планування багатофакторного експерименту.

## РОЗДІЛ 4

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження процесу очищення запиленого ПП від легких домішок та пилу проведено відповідно до типових та розроблених методик. Дослідженнями передбачено встановлення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів, визначення і порівняння основних технічних характеристик конструкцій розробленого РЦ і базових пиловловлювачів.

Завданням аналізу експериментальних даних є: визначення закономірностей підвищення ефективності, ідентифікація та оптимізація параметрів процесу очищення запиленого ПП.

4.1. Ефективність процесу очищення запиленого ПП розробленим ротаційним циклоном

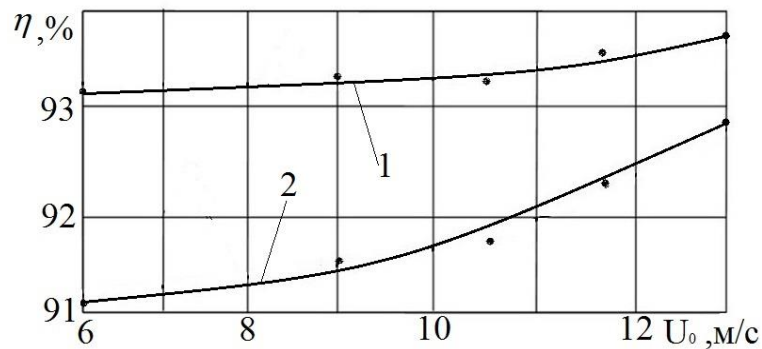
Дослідження ефективності роботи розробленого РЦ передбачали визначення коефіцієнту очищення запиленого ПП за варіювання значень наступних значущих факторів: швидкість ПП  $U_0$ , відстань між дисками  $h$ , кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha$ , ширина відкриття жалюзі  $b$ , частота обертання ротора електродвигуна  $\Omega$ ; кількість дисків доочисника  $n$ .

Дослідженнями встановлені залежності коефіцієнтів очищення розробленого РЦ від його конструктивно-технологічних параметрів (рис.4.1 – 4.4).

Аналізом залежностей (рис. 4.1) встановлено, що максимальна ефективність процесу очищення ПП становить  $\eta = 87...91\%$ , яка отримана при частоті обертання валу  $\Omega = 1000...2000$  об/хв.

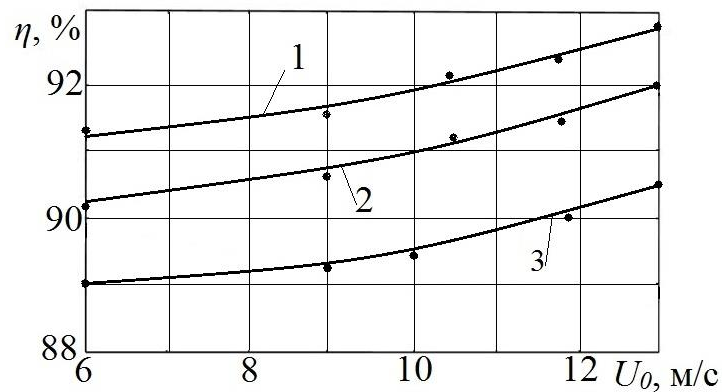
Аналізом (рис. 4.2) встановлено, що подальше збільшення частоти обертання валу завихрювача до 2000 об/хв підвищує коефіцієнт очищення незначно: на 0,8...2,2 %.

Зі зменшенням ширини відкриття жалюзі до 15 мм (рис.4.2) спостерігається зміна тенденції в залежності "швидкість ПП – коефіцієнт очищення".



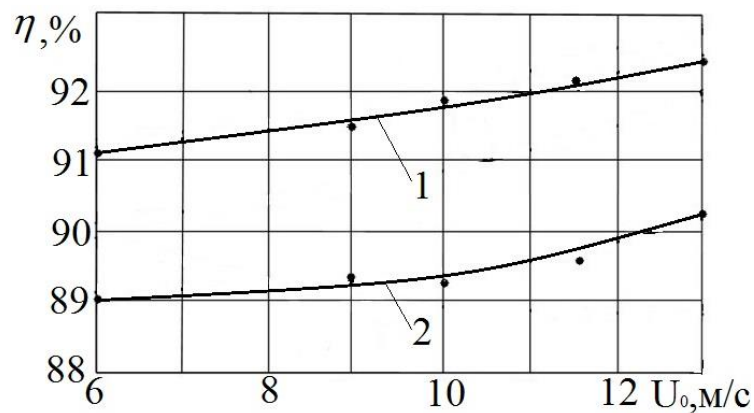
1 –  $\Omega=1000$  об/хв, 2 –  $\Omega=2000$  об/хв ( $n=6$ шт;  $h=1$  мм;  $\alpha=20^\circ$ ;  $b=20$  мм)

Рисунок 4.1 – Залежності коефіцієнта очищення розробленого РЦ від швидкості ПП



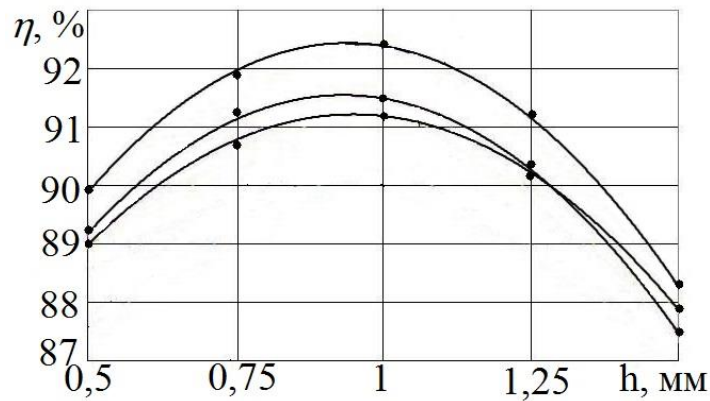
1 –  $\alpha=20^\circ$ ; 2 –  $\alpha=10^\circ$ ; 3 –  $\alpha=30^\circ$  ( $n=6$ шт;  $b=20$  мм;  $h=1$  мм;  $\Omega=1000$  об/хв)

Рисунок 4.2 – Залежності коефіцієнта очищення розробленого РЦ від швидкості ПП



1 –  $b=15$  мм; 2 –  $b=20$  мм ( $n=6$ шт;  $\alpha=30^\circ$ ;  $h=1$  мм;  $\Omega=1000$  об/хв)

Рисунок 4.3 – Залежності коефіцієнта очищення розробленого РЦ від швидкості ПП



1 –  $U_0 = 6$  м/с; 2 –  $U_0 = 10$  м/с; 3 –  $U_0 = 13$  м/с

( $n = 6$  шт.;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $b = 15$  мм;  $\Omega = 1000$  об/хв;  $l_0 = 0,02$  м;  $D_d = 0,02$  м)

Рисунок 4.4 – Залежності коефіцієнта очищення розробленого РЦ від відстані між дисками доочисника

Так, в рамках діапазону досліджуваної швидкості ПП  $U_0 = 6...13$  м/с, при  $b = 20$  мм і  $\Omega = 1000$  об/хв (рис.4.2), максимальний коефіцієнт очищення становить 91,3...92,8 %, що на 2,3...2,5 % більше ніж при  $\alpha = 30^\circ$  (рис.4.3). Подальше зменшення ширини відкриття жалюзі  $b$ , як показали досліди, веде до накопичення дисперсних частинок на їх стінках. Прийнятий діапазон ширини відкриття склав  $b = 15...20$  мм.

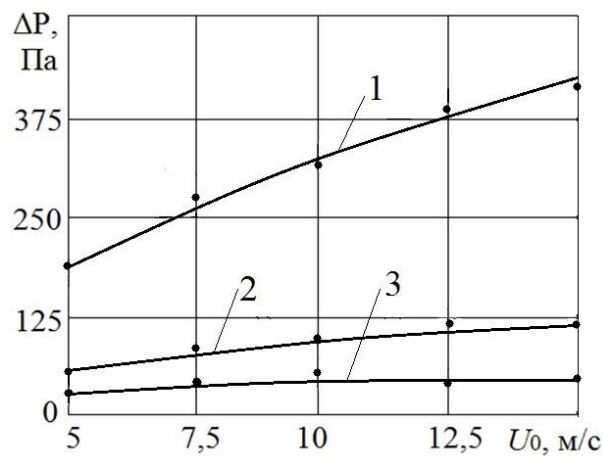
Раціональний діапазон частоти обертання валу при цьому склав  $\Omega = 1000...2000$  об/хв.

Результатом досліджень впливу кута нахилу лопатей завихрювача на ефективність процесу очищення ПП в розробленому РЦ є отримані залежності (рис.4.2). Аналізом існуючих досліджень [5, 183, 184] було встановлено, що оптимальні кути нахилу лопатей завихрювача в аналогічних пиловловлювачах становить  $10^\circ...30^\circ$ . Аналізом отриманих залежностей (рис.4.3) встановлено, що максимальний коефіцієнт очищення розробленого РЦ становить 90,2...92,8 % отримано при куті нахилу лопатей  $10...20^\circ$ .

Аналізом залежностей (рис. 4.4) встановлено, що відстань між дисками доочищувача, при якому забезпечується максимальна ефективність розробленого РЦ  $\eta = 90,2...92,4$  %, становить  $h = 0,75...1,25$  мм.

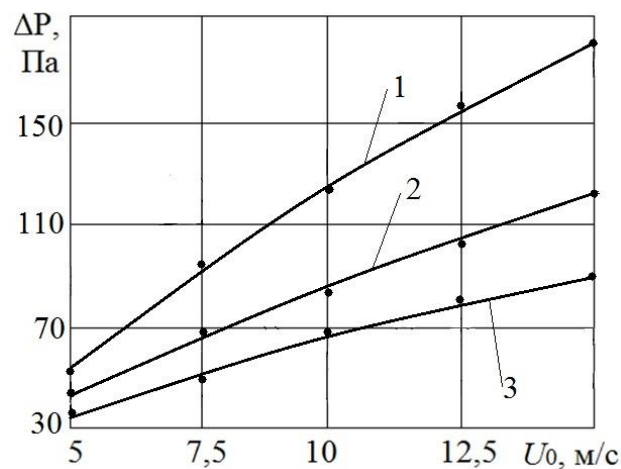
Аналізом експериментальних досліджень встановлено, що збільшення швидкості ПП, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт очищення розробленого РЦ на 4...4,8 % до 89...93,8 %. Діапазони варіювання отриманих параметрів РЦ склали: кута нахилу лопатей  $\alpha = 10...20^\circ$ , частоти обертання ротора  $\Omega = 1000...2000$  об/хв, відстані між дисками доочисника  $h = 0,75...1,25$  мм.

Гідрравлічний опір розробленого РЦ експериментально визначали відповідно за методикою (п.3.3.2) за перепадом тиску до та після апарату з варіюванням значущих параметрів розробленого РЦ (рис.4.5 – 4.6).



1 –  $n=3$  шт.; 2 –  $n=6$  шт.; 3 –  $n=9$  шт.;  
( $n = 6$  шт;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $h=1$  мм;  $\Omega = 1000$  об/хв)

Рисунок 4.5 – Залежності гідрравлічного опору розробленого РЦ від швидкості ПП

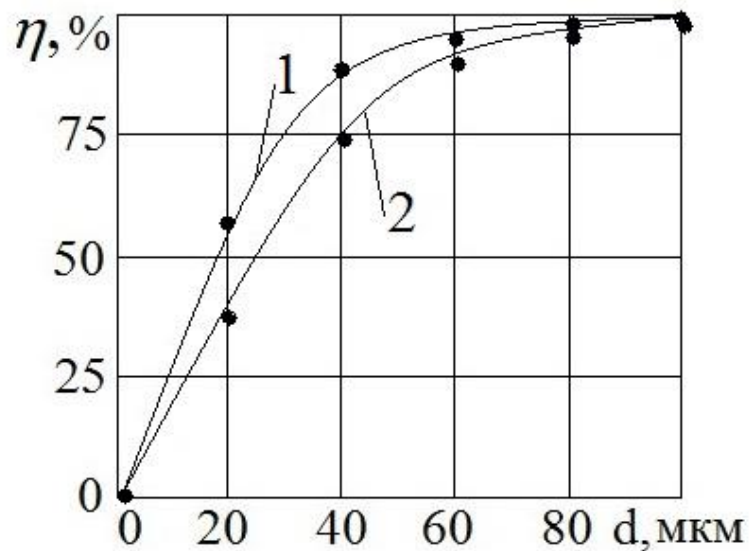


1 –  $D_d=0,01$  м; 2 –  $D_d=0,02$  м; 3 –  $D_d=0,03$  м;  
( $n = 6$  шт;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $h=1$  мм;  $\Omega = 1000$  об/хв)

Рисунок 4.6 – Залежності гідрравлічного опору розробленого РЦ від швидкості ПП

Аналізом залежностей (рис. 4.5, 4.6) встановлено, що підвищення швидкості ПП та значень параметрів розробленого РЦ, в діапазонах що досліджували, збільшує гідравлічний опір в діапазоні 40...380 Па. За умови максимальної ефективності та мінімального гідравлічного опору встановлені діапазони кількості дисків та діаметру їх центрального отвору доочисника розробленого РЦ, які склали  $n=6...9$  шт. та  $h=0,02...0,03$  м, відповідно.

Для отримання повної картини, щодо ступеню ефективності очищення запиленого потоку проведено визначення фракційного коефіцієнта очищення (рис.4.7) для фракцій дисперсних частинок, які досліджувались.



1 –  $U_0 = 10$  м/с; 2 –  $U_0 = 15$  м/с  
 ( $\Omega = 1000$  об/хв;  $n = 6$  шт;  $b = 15$  м;  $h = 1$  мм)

Рисунок 4.7 – Залежності коефіцієнта очищення розробленого РЦ від розміру дисперсних частинок

Аналізом залежностей (рис.4.7) встановлено, що при швидкості ПП в розробленому РЦ  $U_0 = 10...15$  м/с, коефіцієнт очищення складає  $\eta = 5...98$  % для дисперсних частинок розміром до 90 мкм. Зауважимо, що розроблений РЦ вловлює дисперсні частинки  $d_s = 1...40$  мкм з ефективністю  $\eta = 5...87$  %, що істотно впливає на інтенсифікацію процесу очищення ПП в пересувних зернових сепараторах.

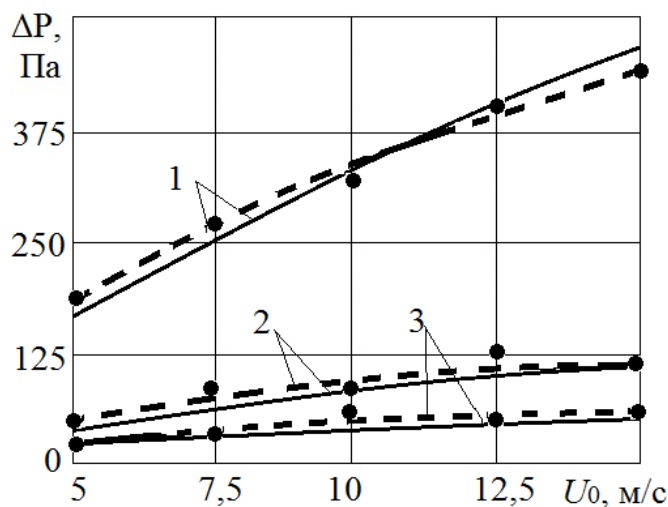
#### 4.2. Визначення адекватності розроблених теоретичних положень

Одним з завдань експериментальних досліджень була перевірка розроблених теоретичних положень щодо визначення основних критеріїв ефективності розробленого РЦ, а саме коефіцієнтів очищення та гідравлічного опору.

Величина гідравлічного опору розробленого РЦ характеризує енергоємність і економічність роботи аспіраційної системи пересувних зернових сепараторів. Підвищення гідравлічного опору РЦ призводить до зниження швидкості ПП в пневмосепарувальних каналах, що викликає зниження продуктивності та якості пневмосепарування зернових сумішей.

Перевірка розроблених теоретичних виразів визначення гідравлічного опору (п.2.4) проведена з експериментальною ідентифікацією за методикою (п.3.3.2), шляхом накладення відповідних залежностей. На (рис. 4.8) представлено результати розрахункових і експериментальних досліджень гідравлічного опору розробленого РЦ.

Далі визначали розбіжність результатів даних теоретичних та експериментальних досліджень.



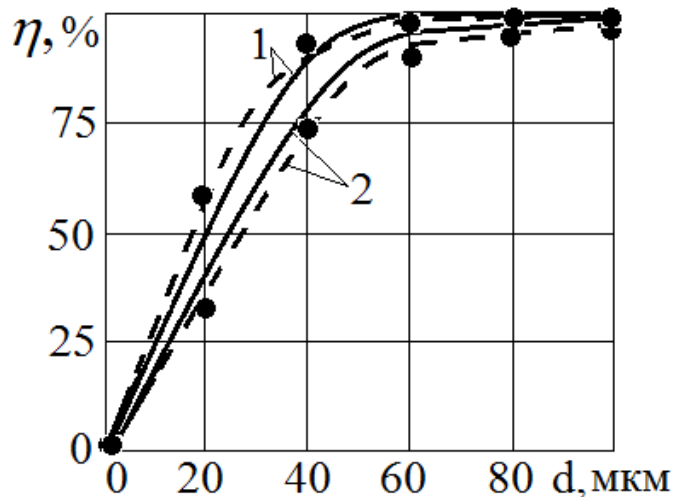
1 –  $n = 3$  шт.; 2 –  $n = 6$  шт.; 3 –  $n = 9$  шт.

— — теоретичні дослідження; - - - - експериментальні

Рисунок 4.8 – Залежності гідравлічного опору розробленого РЦ від швидкості ПП ( $\Omega = 1000$  об/хв;  $b=15$  м;  $\alpha = 20^\circ$ )

Максимальна розбіжність даних при визначенні гідравлічного опору розробленого РЦ склала 3,8...4,3 %, що не перевищує 5 % та підтверджує результати теоретичного обґрунтування.

Отримані експериментальні залежності загального коефіцієнту очищення розробленого РЦ від дисперсних частинок при швидкості ПП характерної для аспіраційних систем пересувних зернових сепараторів (рис.4.9, табл.4.1).



1 –  $U_0 = 10$  м/с; 2 –  $U_0 = 15$  м/с;

— - теоретичні дослідження; - - - експериментальні;

Рисунок 4.9 – Залежності коефіцієнту очищення розробленого РЦ від розміру дисперсних частинок ( $\Omega = 1000$  об/хв;  $n = 6$  шт;  $b = 15$  м;  $h = 1$  мм)

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень розробленого ротаційного циклона

Етапи очищення	30-50 мкм	100-150 мкм	Всього, %	Експериментальні, %,	Теоретично нові значення, %	Оберти завихрювача, об/хв	Швидкість потoku, м/с	Похибка, %
До очищення	50	50	100					
Після очищення	13,1	2,6	15,7	85,3	85	1000	10	0,4%
	18,2	3,0	21,2	78,8	78,2	500	10	0,8%
	4,8	2,0	6,8	93,2	92	1000	6	1,3%
	9,5	2,8	12,3	87,7	87,2	500	6	0,6%

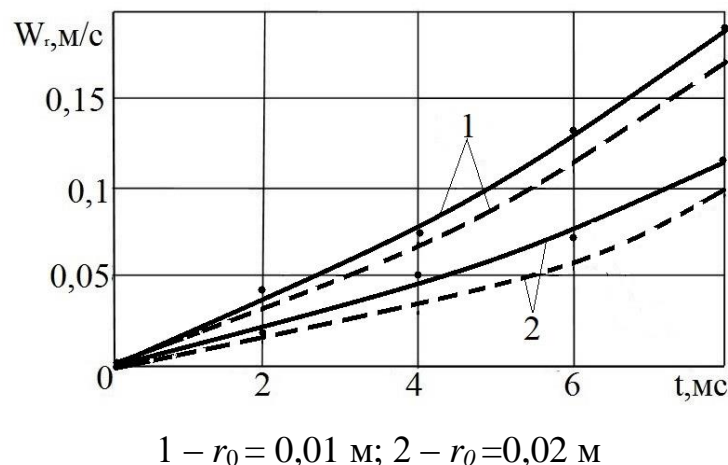


Розбіжність результатів експериментів з даними теоретичних досліджень, щодо визначення ефективності процесу очищення запиленого ПП (рис.4.9), не перевищує 3,8...4,3 %, що підтверджує адекватність розробленого математичного моделювання.

Визначення розбіжності результатів дослідження ефективності процесу очищення запиленого ПП також проведено з варіюванням значущих параметрів: частоти обертів ротора та швидкості ПП на вході. Встановлено, що варіювання параметрів розробленого РЦ, в рамках встановлених діапазонів, надає розбіжність результатів досліджень ефективності процесу очищення запиленого ПП в межах 0,4...1,3 %. Це також підтверджує адекватність розробленого математичного моделювання процесу очищення запиленого ПП.

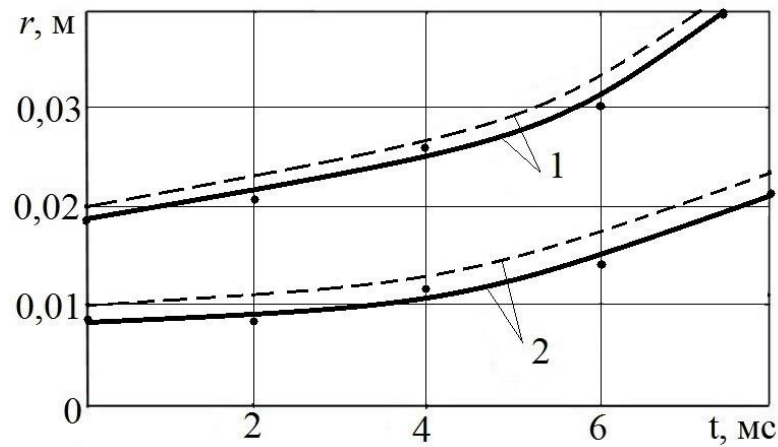
#### 4.3. Закономірності руху компонентів запиленого повітряного потоку

В результаті проведення експериментальних досліджень одержано залежності швидкості зміни радіальної складової швидкості дисперсних частинок (рис.4.10) та радіальної координати дисперсної частинки (рис.4.11) в основному каналі розробленого РЦ.



— — теоретичні дослідження; - - - експериментальні

Рисунок 4.10 – Закономірності зміни радіальної складової швидкості дисперсних частинок ( $d_s = 50$  мкм)



1 –  $d_s = 50 \text{ мкм}$ ; 2 –  $d_s = 5 \text{ мкм}$

— — теоретичні дослідження; - - - - експериментальні

Рисунок 4.11 – Закономірності зміни радіальної координати дисперсної частинки в основному каналі розробленого РЦ

Аналізом залежностей (рис.4.10, 4.11) встановлено, що радіальна складова швидкості для крупних дисперсних частинок  $d_s=50 \text{ мкм}$  має початкове відхилення від осі РЦ на відстань  $r_0=0,008\dots0,02 \text{ м}$ . Радіальні координати крупнодисперсних частинок розміром  $d_s = 50 \text{ мкм}$  мають відхилення в межах  $r = 0,031\dots0,04 \text{ м}$  за  $6\dots7 \text{ мс}$ . Дрібнодисперсні частинки  $d_s=5 \text{ мкм}$  мають відхилення в межах  $r = 0,015\dots0,023 \text{ м}$  за  $6\dots7 \text{ мс}$ . Це свідчить про факт перерозподілу дисперсних частинок до периферії основного каналу РЦ та його довжині, остаточне відділення до пилоосаджувальної камери.

Результати експериментів (рис.4.10, 4.11) також узгоджуються з результатами теоретичних досліджень з максимальною розбіжністю  $3,2\dots3,6 \%$ .

#### 4.4. Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів ротаційного циклону

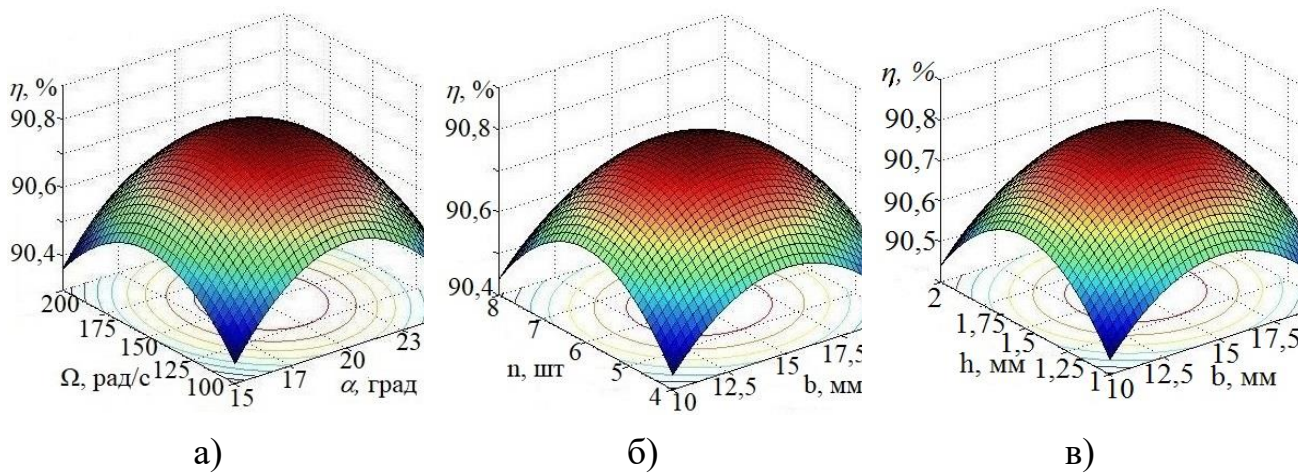
Для визначення раціональних параметрів процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ проведено факторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна [129].

На підставі проведених попередніх експериментів визначені значущі фактори, які впливають на критерії оптимізації – коефіцієнти очищення запиленого ПП. За планом проведені експерименти, оброблені результати (додаток Б).

В розкодованому вигляді модель процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ має вигляд:

$$Y = 79,663 + 0,515\alpha + 0,026\Omega + 0,246b + 0,685n + 3,463h - 0,000025\alpha\Omega - 0,00035ab - 0,00038an - 0,298ah - 0,00016n\Omega - 0,00017\omega h - 0,0014nb - 0,0025bh - 0,0341nh - 0,01002\alpha^2 - 0,000077\Omega^2 - 0,0068b^2 - 0,0474n^2 - 0,754h^2. \quad (4.1)$$

Побудова двомірних перетинів функцій відгука (рис.4.12) виконували у наступній послідовності. В отриману модель (4.1) підставили закодовані значення всіх факторів, окрім двох що досліджували. Далі, в отриманому виразі визначали центр поверхні відгуку, і проводили канонічне перетворення моделі другого порядку. Після канонічного перетворення, визначено тип поверхні відгуку в перетині, виконано графоаналітичний аналіз отриманого виразу.



а – коефіцієнта очищення від кута нахилу лопаті завихрювача та частоти обертання ротору; б – коефіцієнта очищення від кількості дисків доочисника та ширини відкриття жалюзі основного каналу; в – коефіцієнта очищення від відстані між дисками та ширини відкриття жалюзі основного каналу  
Рисунок 4.12 – Залежності ефективності очищення запиленого ПП розробленим РЦ

Плануванням багатофакторного експерименту з критерієм оптимізації - коефіцієнт очищення запиленого ПП, встановлено оптимальні конструктивно-

технологічні параметри розробленого РЦ: кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha = 17...22^\circ$  град; частота обертів ротора  $\Omega = 125...175$  рад/с; ширина відкриття жалюзі  $b = 12,5...17,5$  мм; кількість дисків доочисника  $n = 5...7$  шт; відстань між дисками в доочисника  $h = 1,25...1,75$  мм.

Використання розробленого РЦ дозволило отримати ефективність очищення запиленого ПП обслуговуючої робочої зони  $\eta = 90,75...90,8$  %.

#### 4.5. Висновки за розділом

1. Експериментально встановлені залежності коефіцієнту очищення від швидкості ПП. Збільшення швидкості ПП, в діапазоні що досліджується, підвищує коефіцієнт очищення розробленого РЦ на  $4...4,8$  % до  $\eta = 89...93,8$  %. Діапазони варіювання отриманих параметрів РЦ склали: кута нахилу лопатей  $\alpha = 10...20^\circ$ , частоти обертання ротора  $\Omega = 1000...2000$  об/хв, відстані між дисками доочисника  $h = 0,75...1,25$  мм.

2. Проведена експериментальна ідентифікація гідравлічного опору розробленого РЦ з встановленням впливу конструктивно-технологічних параметрів. За умови максимальної ефективності та мінімального гідравлічного опору встановлені діапазони кількості дисків та діаметру їх центрального отвору:  $6...9$  шт. та  $0,02...0,003$  мм, відповідно. Діапазон варіювання гідравлічного опору розробленого РЦ з доочисником, за визначених його раціональних параметрів, склав  $130...180$  Па.

3. В результаті проведення багатofакторного експерименту процесу очищення запиленого ПП рекомендовані наступні раціональні значення конструктивних параметрів розробленого РЦ: кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha = 17...22$  град; частота обертів ротора  $\Omega = 125...175$  рад/с; ширина відкриття жалюзі  $b = 12,5...17,5$  мм; кількість дисків доочисника  $n = 5...7$  шт.; відстань між дисками в доочиснику  $h = 1,25...1,75$  мм. Встановлено, що за визначеними параметрами ефективність очищення запиленого ПП розробленого РЦ складає  $90,7...90,8$  %.

## РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО РОТАЦІЙНОГО ЦИКЛОНУ ТА  
ЙОГО ВИРОБНИЧА АПРОБАЦІЯ

Виробничі випробування розробленого РЦ виконані шляхом модернізації аспіраційних систем пересувних сепараторів-ворохоочисників СВС-25 та ОВС-25. Завданням апробації розробленого РЦ стала його експлуатація в тривалих виробничих умовах. При цьому визначали ефективність роботи, як розробленого РЦ, так і показники зернового сепаратора в цілому при післязбиральній обробці поширених с.г. культур.

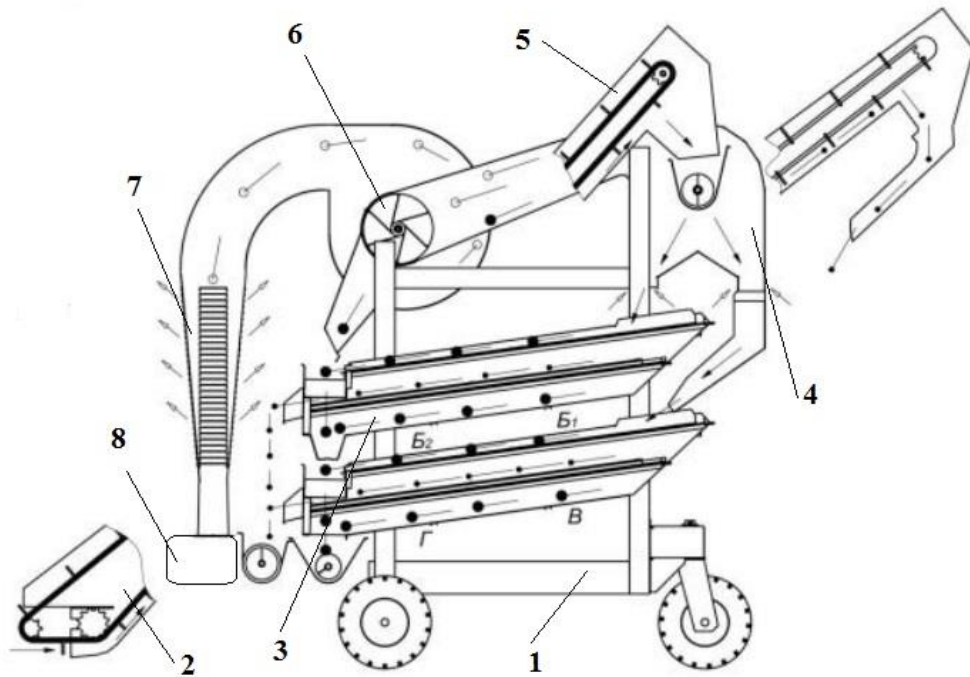
## 5.1. Виробнича апробація розробленого ротаційного циклону

5.1.1. Виробнича ефективність процесу очищення запиленого ПП від легких частинок, домішок і пилу проводилась при експлуатації пересувних зерноочисних машин ОВС-25 та СВС-25.

Випробування модернізованого сепаратора ворохоочисника ОВС-25 з розробленим РЦ проведені у виробничих умовах ТОВ "Маковій" (м. Первомайський Первомайського р-ну Харківської обл.) на протязі 2017-2018 рр. Сепаратором очищено 450 т зернових сумішей пшениці, 560 т кукурудзи та 630 т соняшнику.

Випробування модернізованого сепаратора СВС-25 проведені в умовах навчально-дослідного поля ХНТУСГ ім. П. Василенка. Випробування проведені у 2017-2018 рр. на модернізованому сепараторі при очищенні зернових сумішей: озимої пшениці сорту Василіна 2 репродукції в обсязі 270 т.; гороху сорту Аудит в обсязі 30 т.; сої сорту Максус в обсязі 28 т.; соняшнику гібриду Ясон в обсязі 144 т.

Конструктивна схема і загальний вигляд модернізованих зернових сепараторів ОВС-25М та СВС-25 на виробничих випробуваннях представлені на рис. 5.1-5.4.



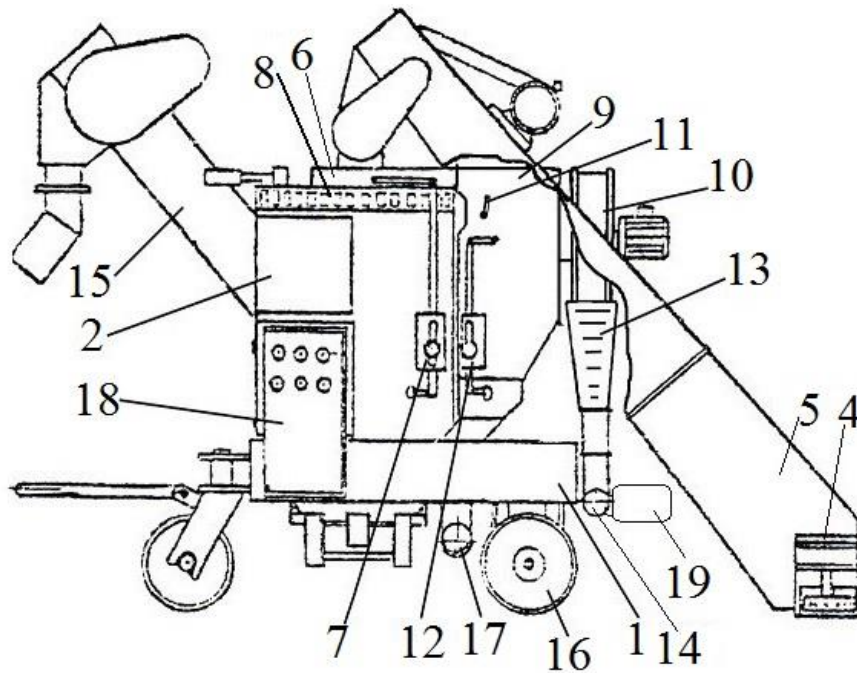
1 – рама; 2 – живильник скребковий; 3 – блок решітний; 4 – канал пневмосепарувальний; 5 – конвеєр скребковий похилий; 6 – пилоосаджувальна камера з вентилятором; 7 – пиловідділювач інерційно-жалюзійний; 8 – циклон ротаційний

Рисунок 5.1 – Конструктивна схема модернізованого сепаратора ОВС-25



Рисунок 5.2 – Виробничі випробування модернізованого сепаратора ОВС-25М з розробленим РЦ





- 1 – рама; 2 – блок вібровідцентровий; 3, 4 – скребкові живильники;  
 5 – скребковий конвеєр похилий; 6 – конвеєр гвинтовий; 7 – дозатор;  
 8 – канал пневмосепарувальний; 9 – камера пиловлоосаджувальна;  
 10 – вентилятор; 11, 12 – клапани додатковий і основний;  
 13 – пиловідокремлювач інерційно-жалюзійний; 14 – пневмотранспортер;  
 15 – транспортер чистого зерна; 16 – транспортер відходів; 17 – колісний хід;  
 18 – пульт керування; 19 – ротаційний циклон розроблений

Рисунок 5.3 – Конструктивна схема модернізованого сепаратора СВС-25М



Рисунок 5.4 – Конструктивна схема модернізованого сепаратора СВС-25М

Технологічний процес очищення запиленого ПП на сепараторі ОВС-25 М (рис.5.1, 5.2) відбувається наступним чином.

Після проходження зернової сумішшю пневмосепарувального каналу 4, відділені легкі домішки та частинки пилу надходять на очищення в пилоосаджувальну камеру 6.

Очищення запиленого ПП поділяється на два етапи. Першим етапом є відділення в осаджувальній камері великодисперсних частинок розміром 200 мкм і вище. Уловлення легких домішок відбувається за рахунок сил інерції та тяжіння.

Запилений ПП з дрібнодисперсним пилом надходить до інерційного жалюзійного пиловідділювача 7. За рахунок зменшення площі перетину та встановлених жалюзі чисте повітря виходить з пиловідділювача 7, а залишається потік з концентрованим вмістом дисперсних частинок.

Для підвищення ефективності очищення запиленого ПП встановлений розроблений РЦ 8, який забезпечує нормовану запиленість повітря робочої зони.

Другим етапом є використання жалюзійно–інерційного пиловідділювача та ротаційного циклону для відділення дрібнодисперсної фази розміром 1...150 мкм. Виділені фракції легких домішок та пилу накопичуються в бункерах та видаляються з осаджувальної камери та РЦ.

Технологічний процес очищення запиленого ПП на сепараторі СВС-25 (рис.5.3, 5.4) відбувається аналогічним чином. Спочатку запилений ПП надходить до пилоосаджувальної камери 9, де відбувається уловлення легких домішок та великодисперсних частинок пилу. Далі після інерційного пиловловлювача 13 ПП з дрібнодисперсним пилом направляється до розробленого РЦ 19.

Конструктивні параметри розробленого РЦ прийняті відповідно до результатів теоретичних та експериментальних досліджень (п 5): частоті обертання ротора  $\Omega = 150$  рад/с, кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha = 20^\circ$ , кількості дисків доочисника  $n = 6$  шт., ширина відкриття жалюзі  $b = 15$  мм та відстанню між дисками доочисника  $h = 1,5$  мм.



Залежно від властивостей вихідного зернового матеріалу здійснювалися наступні регулювання:

- а) швидкість ПП та витрата повітря;
- б) завантаження сепаратора.

Кінематичні параметри модернізованих сепараторів ОВС-25 (СВС-25) не варіювали, прийняті паспортними з наступними технічними характеристики: потужність встановлених електродвигунів – 9,37 (9,5) кВт·год; питома витрата електроенергії – до 0,38 кВт·год/т для сепараторів [114, 137, 185].

Елементи розробленого РЦ, які змонтовані на модернізовані пересувні зернові сепаратори ОВС-25 та СВС-25, показані на рис. 5.5 - 5.7.

Запуск (зупинку) модернізованого сепаратора здійснювали відповідно до рекомендацій інструкції з експлуатації [104, 114, 137].

Випробування сепаратора-ворохоочисника проводили відповідно до: ОСТ 70.10.2.-83 "Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини і агрегати, зерноочисно-сушильні комплекси. Програма і методи випробувань"; РТМ 8.53.00-64-84 "Сепаратори зерноочисні. Програма і методика випробувань"; СОУ 74.3-37-147:2004 "Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисні-сушильні комплекси" [36, 39, 59, 70, 103].

Склад зернових сумішей, легких домішок та пилу визначено згідно ДСТУ 4138–2002 [55] і ГОСТ 28419–97.

Випробування проводили за наступною методикою. Для випробувань сепаратор під'їжджав до зернового насипу, об'єм якої забезпечує необхідне та стабільне завантаження. Проводили аналіз початкового стану зернової суміші та проводили її. Час роботи сепаратора на кожному режимі становив 5...10 хвилин. З очищеної зернової суміші відбирали пробу, в якій визначали кількість легких домішок і отриману чистоту.

При роботі зернових сепараторів фіксували запиленність обслугової зони, вміст бункерів пилоосаджувальних камер та РЦ.



а)



б)



в)

а – ротор активний; б – доочисник багатодисковий; в – жалюзі відділення  
робочої зони від пилоосаджувальної камери

Рисунок 5.5 – Основні деталі робочої зони розробленого РЦ



а)



б)



в)

а – вихідний патрубок; б – підшипник валу; в – конус активного ротора

Рисунок 5.6 - Елементи конструкції циклону



Рисунок 5.7 – Електродвигун розробленого РЦ

Результатами спільних з фахівцями Харківської філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого виробничих випробувань модернізованих сепараторів ОВС-25М та СВС-25 встановлено (табл.5.1):

- ефективність очищення запиленого ПП за рахунок використання розробленого РЦ підвищилась на 30...35 % до 88...90,8 %;
- продуктивність сепараторів СВС25/ОВС-25 збільшено на 20...23,2 % до 28,4...28,6 т/год.

Таблиця 5.1

Результати виробничої ефективності процесів модернізованих сепараторів

Сепаратор	Зернова суміш	Ефективність очищення ПП, %		Продуктивність, т/год	
		базовий	модернізований	базовий	модернізований
ОВС-25М	оз. пшениця	68,7	90,5	23,1	28,4
	кукурудза	67,3	90,7	16,7	20,6
	соняшник	67,6	88	11,5	13,8
СВС-25М	оз. пшениця	67	89,8	23,2	28,6
	соя	67,2	90,8	17,5	21,6
	соняшник	67,8	88,1	11,8	14,2
	горох	68,1	90,5	18,4	22,7

Результати виробничих випробувань підтверджені відповідними актами (Додаток В).

#### 5.1.2. Енергоємність і металоємність процесу очищення.

Енергоспоживання є однією з важливих характеристик при виборі та ефективній експлуатації сепаратора, тому були проведені дослідження з виміру споживаної модернізованим сепаратором потужності.

Споживану сепаратором потужність доцільно розділити на наступні складові частини:

А. Витрати потужності, що витрачаються при відсутності в сепараторі зернового матеріалу (холостий хід);

Б. Витрати потужності, що витрачаються на робочий режим серійної конструкції;

В. Витрати потужності, що витрачаються на робочий режим з розробленим циклоном.

Визначення витрат потужності дозволяє визначити витрату енергії на роботу розробленого РЦ.

Для вимірювання споживаної потужності використовували прилади, зображені на рис.5.8.

Струмозамірні кліщі (рис.5.8, а) є аналоговим приладом, а мультиметр DT9208A (рис. 5.8, б) є цифровим. Цифрові прилади мають меншу ціну поділки і зручніше у використанні. Приладами вимірювали напругу і силу струму на холостому ході, та при паспортних загрузках сепаратора.

Розрахунок проводили за рівнянням [92, 101, 195]:

$$P = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi, \quad (5.1)$$

де  $I_{\phi}$  – фазний струм, А;  $U_{\phi}$  – фазна напруга, В;  $\varphi$  – кут зсуву фаз між струмом і напругою.

Дані вимірювань представлені в табл. 5.2.

При випробуваннях для приводу вентилятора використовували електродвигун АІР 112М4У3 (50 Гц; Y;  $I_n$  11,4 А; 380 В; 1430 об/хв; 5,50 кВт; КПД 85,5%;  $\cos \varphi$  0,86; S1; кл. ізол. F; IP 54).

Як видно з табл. 5.2, різниця в споживаній потужності сепараторів на холостому ході і при паспортному завантаженні становить 1/1,5 кВт, а вентилятора – 0,5/0,5 кВт. При досягнутій максимальній продуктивності сепаратора СВС-25/ОВС-25М у розмірі 28,6 (28,4) т/год питоме споживання електроенергії становить 0,174 (0,176) кВт·год/т.



а)



б)

а – кліщі струмознімальні Ц4505М; б – мультиметр цифровий DT9208А

Рисунок 5.8 - Електровимірювальні прилади для вимірів споживаної потужності зернових сепараторів

Таблиця 5.2

Показання приладів і розрахована споживана потужність

Режим роботи	Напруга, В	Сила струму, А	Використана потужність, кВт
Електродвигун вентилятора на холостому ходу	221/220	6,3/6,5	3,59/3,61
Електродвигун вентилятора	217/221	7,3/7,5	4,09/4,15
Сепаратор на холостому ходу	221/219	15/15	8,4/8,5
Сепаратор в цілому	217/220	16,7/17	9,37/9,42

В табл. 5.3 представлені дані по споживанню витрат потужності на процес очищення запиленого ПП від легких домішок та пилу базовою аспіраційною системою та модернізованою системою з РЦ, розраховані питомі метало– та енергоємності.

Розподіл витрат потужності на процес очищення запиленого ПП від частинок пилу та легких домішок

Продуктивність сепаратора, т/год	Ефективність процесу очищення повітряного потоку, %	Питома		Споживана потужність, кВт	
		Металоємність, кг/т год	Енергоємність, кВт год/т	на холостий хід	на робочий режим
СВС-25					
25	68	4,40	0,174	3,63	4,34
СВС-25М					
28,6	90,8	4,19	0,165	3,95	4,73
ОВС-25					
25	68	4,40	0,176	3,64	4,38
ОВС-25М					
28,4	90,2	4,21	0,168	4,05	4,87

Застосування розробленого РЦ в конструкції СВС-25 знизило питомі енерго- і металоємність, відповідно: з 0,174 кВт год/т до 0,165 кВт год/т (на 5,17%); з 4,4 кг/т·год до 4,19 кг/т·год, тобто на 4,77 %. Застосування розробленого РЦ в конструкції ОВС-25М знизило питомі енерго- і металоємність, відповідно: з 0,176 кВт год/т до 0,168 кВт год/т (на 4,76 %); з 4,4 кг/т·год до 4,21 кг/т·год, тобто на 4,32 %. Це підтверджує можливість інтенсифікації процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим РЦ в пересувних зернових сепараторах.

### 5.1.3. Виробнича ідентифікація запиленості робочої зони модернізованих зернових сепараторів

Методика визначення концентрації дисперсних частинок в повітрі обслуговуючої зони пересувних зернових сепараторів наведена в п.3.3.3. Відповідно до методики за допомогою аспіратуру 822 та фільтрів АФА-ВП-10 проводили визначення кількості дисперсних частинок в м<sup>3</sup> повітря.

Результати зведено до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Результати визначення запиленості обслуговуючої зони модернізованих зернових сепараторів

Сепаратор	Продуктивність, т/год	№ фільтра	Час відбору проби хв	Швидкість повітря, л /хв.	Об'єм повітря V, л	Вага фільтру кінцева $M_k$ , мг	Вага фільтру початкова $M_n$ , мг	Вага пилу, мг	Запиленість повітря C, мг/м <sup>3</sup>
СВС-25	12	1	10	7	70	160,335	160,14	0,195	2,78
	20	2				160,17	159,96	0,21	3
	28	3				160,94	160,69	0,25	3,57
ОВС-25М	12	4				161,34	161,14	0,2	2,85
	20	5				160,02	159,8	0,22	3,14
	28	6				160,66	160,4	0,26	3,71

Кінцеву запиленість обслуговуючої зони пересувних зернових сепараторів визначали за виразом:

$$C = \frac{M_{\text{пилу}} \cdot 10^3}{V}, \quad (5.2)$$

де  $C$  – запиленість повітря, мг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{пилу}}$  – вага пилу, яка вловлена фільтром, г;  $V$  – об'єм повітря, який пройшов через фільтр, л.

5.2. Техніко-економічна ефективність використання розробленого ротаційного циклону

Річний економічний ефект від застосування СВС-25М (ОВС-25М) визначаємо як різниця наведених витрат:

$$E_z = (I_0 - I_1)W_{z1} = [(S_0 + E_H K_{\text{num}0}) - (S_1 + E_H K_{\text{num}1})]W_{z1} \quad (5.3)$$

де  $I_0$  і  $I_1$  – наведені витрати базового та модернізованого сепараторів при розрахунку на одиницю роботи, грн;

$K_{num0}$  і  $K_{num1}$  – капітальні витрати базового та модернізованого сепараторів розраховуючи на одиницю роботи, грн.

Вихідні дані приводимо по двох варіантах, для базових та модернізованих сепараторів зведені до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

## Вихідні данні до техніко-економічного розрахунку

Показники	Значення			
	ОВС-25	ОВС-25М	СВС-25	СВС-25М
1. Установлена потужність електродвигунів, кВт	9,5	10,0	10,0	10,5
2. Коефіцієнт використання робітника часу зміни	0,7			
3. Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	1			
4. Тарифний розряд роботи	4			
5. Тарифна ставка, грн/год	26,4			
6. Вартість сепаратора, грн.	260000	261200	170000	171200
7. Норма амортизаційних відрахувань, %	11,1			
8. Норма відрахувань на ТР і ТО, %	6			
9. Річне завантаження сепаратора, годин	300			

## 5.2.1 Розрахунок економічної ефективності.

## 1) Визначення продуктивності сепаратора.

Найбільший вплив на показник економічної ефективності призводить зміна продуктивності сепаратора (табл.5.1) [56, 59, 98]. Продуктивність модернізованих сепараторів СВС-25М/ОВС-25М за рахунок використання розробленого РЦ збільшена на 20...23,2%.

При визначенні економічної ефективності продуктивність сепараторів за одну годину змінного часу розраховується по формулі:

$$W_{зм} = W \cdot k_{up} \quad (5.4)$$

де  $k_{up}$  - коефіцієнт використання часу зміни (табл.5.5).

Річний наробіток сепараторів розраховується по формулі

$$W_2 = W \cdot T, \quad (5.5)$$

де  $W$  - годинна продуктивність сепараторів, т/год.;  $T$  - річне завантаження, годин.



## 2) Експлуатаційні витрати

Прямі експлуатаційні витрати, які розраховуючи на одну тонну оброблюваного матеріалу визначаються за формулою:

$$S = Z + E + T_p + A \quad (5.6)$$

де  $Z$  – заробітна плата обслуговуючого персоналу;  $E$  – вартість електроенергії;  $T_p$  – витрати на поточний ремонт і ТЕ;  $A$  – амортизаційні відрахування.

Заробітна плата обслуговуючому персоналу визначається:

$$Z = \frac{N_M \cdot Z_M \cdot k_e}{W_{cm}}, \quad (5.7)$$

де  $N_M$  – кількість обслуговуючого персоналу, чол;  $Z_M$  – годинна тарифна ставка, грн;  $k_e$  – коефіцієнт підвищення розцінок за виконання плану ( $k_e = 1,2$ )

Вартість електроенергії визначається по формулі

$$E = \frac{N_e \cdot C_e}{W_{cm}}, \quad (5.8)$$

де  $N_e$  – встановлена потужність електродвигунів, кВт;  $C_e$  – вартість 1 кВт година електроенергії, грн/кВт година.

## 3) Відрахування на поточний ремонт і ТЕ:

$$T_p = B \cdot H / (100 W_{cm} \cdot T), \quad (5.9)$$

де  $H$  – норма відрахувань на поточний ремонт і ТЕ, %;  $B$  – балансова вартість сепараторів, грн.;

## 4) Амортизаційні відрахування по сепараторам:

$$A = B \cdot a / (100 W_{cm} \cdot T), \quad (5.10)$$

де  $a$  – норма амортизаційних відрахувань, %.

Отриманий річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень підтверджено відповідними актами (додаток Д).

## 5) Річна економія експлуатаційних витрат

Річна економія експлуатаційних витрат визначається як різниця витрат, що доводяться на одну тонну обробленого матеріалу, помножена на річний обсяг робіт модернізованого сепаратора:

$$E_z = (S_0 - S_1) \cdot W_1 \cdot T_1, \quad (5.11)$$

де  $S_0, S_1$  – експлуатаційні витрати відповідно базового та модернізованого сепараторів;  $W_1, T_1$  – годинна продуктивність та річне завантаження модернізованих сепараторів, відповідно.

6) Собівартість виробленої продукції:

$$C = S + C_{cem}, \quad (5.12)$$

де  $C_{cem}$  – вартість 1-ой тони вихідної сировини, грн/т,

7) Прибуток. Прибуток являє собою різницю між виторгом від реалізації продукції й витратами на її виробництво:

$$P_p = (C - C) \cdot W \cdot T, \quad (5.13)$$

де  $C$  – вартість 1-ой тони очищеного зерна, грн/т,

8) Рівень рентабельності за собівартістю:

$$P_c = \frac{P_p}{C \cdot W \cdot T} \cdot 100\% . \quad (5.14)$$

9) Капітальні вкладення. Капіталовкладеннями в модернізований сепаратор є його змінена балансова вартість. При визначенні економічної ефективності важливе значення має різниця в капітальних витратах машин базового та модернізованого сепараторів. Якщо капітальні вкладення в проєктовану машину менше ніж у вихідну, то споживач має економію на капіталовкладеннях:

$$K = K_0 - K_1,$$

де  $K_1$  – капітальні вкладення в модернізовані сепаратори ( $K_1=B_1$ );  $K_0$  – капітальні вкладення в базові сепаратори ( $K_0=B_0$ ).

При визначенні економічної ефективності має значення величина капітальних витрат, що доводяться на одиницю виробітку. Ця величина являє собою питомі капіталовкладення, які визначаються:

$$K_{num} = K / W_2,$$

10) Строк окупності, років

$$\tau = \frac{K}{P_p} . \quad (5.15)$$

Річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів визначали за (5.3). Основні результати розрахунків наведені в таблицях 5.6 та 5.7.

Техніко-економічні показники для сепараторів типу СВС

Показники	Варіант		% проектної до базової
	СВС-25	СВС-25М	
1. Капіталовкладення, грн	312000	313440	100,5
2. Продуктивність, т/год.	25	28,6	114,4
3. Річний виробіток, т/год.	7500	8580	114,4
4. Експлуатаційні витрати, грн/т	12,708	11,198	88,1
5. Річна економія експлуатаційних витрат, грн.	-	12962,2	-
6. Рівень рентабельності, %	-	8,11	-
7. Строк окупності, рік	-	0,01	
8. Питомі капіталовкладення, грн/т	41,60	36,53	87,8
9. Річний економічний ефект, грн	-	41 000,00	

Таблиця 5.7

Техніко-економічні показники для сепараторів типу ОВС

Показники	Варіант		% проектної до базової
	ОВС-25	ОВС-25М	
1. Капіталовкладення, грн	204000	205440	100,7
2. Продуктивність, т/год.	25	28,4	113,6
3. Річний виробіток, т/год.	7500	8520	113,6
4. Експлуатаційні витрати, грн/т	9,741	8,676	89,1
5. Річна економія експлуатаційних витрат, грн.	-	9076,6	-
6. Рівень рентабельності, %	-	9,31	-
7. Строк окупності, рік	-	0,01	
8. Питомі капіталовкладення, грн/т	27,20	24,11	88,6
9. Річний економічний ефект, грн	-	91 000	

### 5.3. Висновки за розділом

1. На підставі результатів проведених досліджень розроблених, виготовлених та досліджених у виробничих умовах РЦ на пересувних зернових сепараторах

ОВС-25 та СВС-25. Його тривала безвідмовна експлуатація підтвердила високу ефективність процесу очищення запиленого ПП.

2. За результатами спільної, з фахівцями УНДІВПТ ім. Л. Погорілого, виробничої експлуатації модернізованих пересувних зернових сепараторів СВС-25 та ОВС-25 встановлено:

– високу ефективність процесу очищення запиленого ПП розробленим РЦ, яка склала 88...90,8 %;

– можливість підвищення продуктивності сепараторів на 20...23,2 %.

– зниження питомих енерго- і металоємностей, відповідно: на 4,76...5,17% та 4,32...4,77 %;

– забезпечення нормованої запиленості повітря обслуговуючої зони в межах 3,1...3,7 мг/м<sup>3</sup>.

3. Річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів ОВС-25М та СВС-25 за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав: на ТОВ «Маковій» – 91 тис.грн.; на навчально-дослідному полі ХНТУСГ – 41 тис.грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення науково-прикладного завдання інтенсифікації процесу очищення запиленого ПП циклоном, яке ґрунтується на динаміці багатофазних середовищ з етапним очищенням запилених ПП та проміжним відбором дисперсних частинок, що дозволяє визначити закономірності, розробити математичні методи оптимізації технологічних показників роботи ротаційних циклонів пересувних сепараторів, створити і обґрунтувати параметри ротаційного циклону з доочисником, впровадити його серійне виробництво.

Основні наукові й прикладні результати досліджень:

1. На підставі оцінки та аналізу існуючих підходів щодо підвищення ефективності очищення запиленого ПП встановлено: відсутність загального погляду на моделювання динаміки багатофазних середовищ в робочих зонах ротаційних циклонів; математичні моделі процесів очищення запилених ПП функціонують при певних параметрах, а прийняті спрощення не враховують багатофазність середовища, проміжного відведення дисперсної фази та етапність очищення, обмежують область застосування конструкцій. Розробка науково-обґрунтованих методів, визначення параметрів розробленого РЦ дозволить підвищити ефективність процесу очищення запиленого ПП, обумовити збільшення продуктивності та поліпшення безпеки праці пересувних зернових сепараторів.

2. Обґрунтовано спосіб підвищення ефективності процесу очищення ПП в РЦ на базі створених математичних моделей динаміки, які дозволили встановити поля швидкості ПП та дисперсних частинок в основній робочій зоні та зоні доочистки розробленого РЦ.

3. Побудовані динамічні моделі процесу очищення запиленого ПП, дозволили встановити функціональні залежності складових швидкості ПП і дисперсних частинок з конструктивно-кінематичними параметрами розробленого РЦ і властивостями запиленого ПП. Встановлено, що складові швидкості

багатофазного середовища залежать на 15...35 % від конструктивно-технологічних параметрів розробленого РЦ, що підтверджує можливість перерозподілу дисперсних частинок та інтенсифікації процесу очищення запиленого ПП. Розв'язком отриманих математичних моделей визначені кінцеві вирази та отримані діапазони складових швидкостей несучої і дисперсної фаз. Встановлено, що ефективність процесу очищення запиленого ПП на розробленому РЦ становить 85...92 %.

4. Експериментально отримано залежності складових швидкості дисперсних частинок домішок та пилу в робочих зонах розробленого РЦ з доочисником при використанні розроблених і діючих типових методів досліджень та випробувань. Встановлено, що збільшення кута нахилу лопатей завихрювача, в досліджуваному діапазоні, підвищує радіальні складові швидкості дисперсних частинок швидкості на 12...28%. Розбіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень, щодо визначення ефективності процесу очищення запиленого ПП та гідравлічного опору розробленого РЦ, з даними теоретичних досліджень не перевищує 4,3 %, що підтверджує адекватність розробленого математичного моделювання.

5. Проведене теоретичне визначення та експериментальна ідентифікація гідравлічного опору розробленого РЦ зі встановленням впливу конструктивно-технологічних параметрів. За умови максимальної ефективності та мінімального гідравлічного опору встановлені діапазони кількості дисків та діаметру їх центрального отвору: 6...9 шт. та 0,02...0,003 мм, відповідно. Діапазон варіювання гідравлічного опору розробленого РЦ з доочисником, за визначених його раціональних параметрів, склав 130...180 Па.

6. В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу очищення запиленого ПП рекомендовані наступні раціональні значення конструктивних параметрів розробленого РЦ: кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha = 17...22$  град; частота обертів ротора  $\Omega = 125...175$  рад/с; ширина відкриття жалюзі  $b = 12,5...17,5$  мм; кількість дисків доочисника  $n = 5...7$  шт; відстань між дисками в доочиснику  $h = 1,25...1,75$  мм. Встановлено, що за визначеними

параметрами ефективність очищення запиленого ПП розробленого РЦ складає 90,7... 90,8 %.

7. За результатами досліджень розроблено технічну документацію на РЦ, яка передана та використовується в серійному виробництві зернових сепараторів та зерноочисних комплексів на СВПТ «Механік» (м. Житомир).

Виробничими випробуваннями підтверджено високу ефективність розробленого циклону, яка склала 88...90,8 %. Визначено, що інтенсифікація процесу очищення ПП, за рахунок використання розробленого РЦ, обумовлює підвищення продуктивності пересувних зернових сепараторів на 20...23,2 %.

Використання модернізованих сепараторів з розробленим РЦ в умовах ТОВ «Маковій» та навчально-дослідного поля ХНТУСГ дозволило отримати загальний річний економічний ефект 132 тис. грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук В.В., Заришняк А.С., Прилуцький А.Н., Степаненко С.П. Концепція перспективи комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України. *Механізація і електрифікація сільського господарства: міжвідом. темат. наук. зб.* 2014. Вип. 99(1). С 40–56.
2. Адамчук В.В. Теория центробежных рабочих органов для внесения минеральных удобрений: монография. К.: Аграр. наука., 2010. – 178 с.
3. Азаров В. Н., Боровков Д. П. Применение закрутки потока в системах аспирации на предприятиях строительной индустрии. *Строительные материалы: сб. науч. тр.* 2012. № 5. С. 65-67.
4. Акулич А.А., Барсуков В.В., Хурсин М.В. Выбор режимно-конструктивных параметров для математического моделирования гидродинамики группового прямоточного пылеуловителя. *Материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, 25-26 октября 2018 г., г. Могилев.* Белорусско-Российский университет, С. 31
5. Асламова В.С. Интенсификация процесса сепарации в прямоточном циклоне и вентиляторе-пылеуловителе: автореф. дис. на соискание канд. техн. наук: 05.17.08. Москва., 1987. 16 с.
6. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М: ДеЛи-принт, 2005. 296 с.
7. Гусенцова Я.А. , Епифанова О.В. , Андрийчук Н.Д. , Кондауров Е.Н. , Вялых А.В. Аэродинамика вентиляции: учеб. пособие. Луганск. 2005. 142 с.
8. Бакум Н.В., Абдуєв М.М., Манчинський Ю.О. Розділення зернових сумішей у нахиленому повітряному каналі. *Праці Таврійської державної аграрної академії: зб. наук. пр.,* 2005. Вип.28. С.14 -22.
9. Бакум Н.В., Абдуєв М.М., Манчинський Ю.О., Сичов В.В., Леонов В.П. Теоретичні дослідження характеристик руху частинок у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епюри швидкості повітря по висоті



каналу *Вісник ХДТУСГ: зб. наук. пр. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2003. Вип.21. С.88-94.

10. Бакум Н.В., Абдуєв М.М., Бобрусь І.С., Манчинський Ю.О., Сергєєва А.В. Обґрунтування конструктивної схеми пневматичного ворохоочисника. *Вісник ХДТУСГ: зб. наук. пр. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2000. Вип.1. С.227-235.

11. Бакум Н.В., Манчинський Ю.О., Абдуєв М.М. Результати виробничих випробувань пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом на сортуванні зерна озимої пшениці. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка: зб. наук. пр. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2005. Вип. 41. С. 342-347.

12. Бакум Н.В., Манчинський Ю.О., Абдуєв М.М., Мироненко А.П. Результати дослідження очищення зернової суміші у нахиленому повітряному потоку *Вісник ХДТУСГ: зб. наук. пр. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2002. Вип.11. С.97-102.

13. Баранов С.А., Моралев И.А., Сбоев Д.С., Толкачев С.Н. Управление ламинарнотурбулентным переходом в трехмерном пограничном слое при помощи диэлектрического барьерного разряда при высокой степени турбулентности внешнего потока. *Материалы XXIII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»*. 25 февраля – 04 марта, 2018 г., г. Звенигород. С. 32

14. Батлук В.А., Азарський К.І. Математичне забезпечення вибору оптимального обладнання для очистки повітря від пилу за допомогою комп'ютерної техніки". *Український журнал медичної техніки і технології*. Київ. 2000. № 2. С. 92 – 94.

15. Батлук В. А., Проскуріна І. В., Сукач Р. Ю., Басов М. В. Принципово нові перспективні методи очистки повітря від дрібнодисперсного пилу. *Науковий журнал «Наукові записки (Українська академія друкарства)»*. 2008. №2. С. 115-119.

16. Белоусов А.С. Гидродинамика процессов с неоднородными структурами закрученных гетерогенных потоков в вихревых аппаратах: дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина. Москва, 2010. 372 с.
17. Белоусов А.С., Сажин Б.С., Миронов А.В. Интегральные параметры крутки потоков в вихревых пылеуловителях. *Научный журнал «Успехи в химии и химической технологии»*. 2004. №7 (47). С. 86–89.
18. Берник П.С., Чубик Р.В. Алгоритм функціонування адаптивної системи керування приводом вібраційних технологічних машин. *Вибрації в техніці і технологіях. Всеукраїнський наук.-тех. журнал*, 2006, №1 (43). С. 4–11.
19. Беспалов В.И., Лысова Е.П., Иванова А.С. Применение нового научного подхода к оценке свойств зерновой пыли. *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2018. №2(49) URL: <http://198.199.124.83/ru/magazine/archive/N2y2018/5076>
20. Богданович В.И., Гришанов В.Н., Докунина И.А., Савич Е.К. Высокоскоростная видеосъемка для контроля процессов и оборудования плазменного газотермического нанесения покрытий. *Проблемы машиностроения и автоматизации: Международный журнал*. 2011. №1. С. 113 – 118.
21. Боева А.А. Организация и планирование освоения новых изделий на промышленных предприятиях: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. эконом. наук: 05.02.22. Воронеж, 2003. 28 с.
22. Болтенков А.А., Селиверстов М.В. Вопрос обеспыливания в системах аспирации на элеваторных комплексах. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2019. №5-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vopros-obespylivaniya-v-sistemah-aspiratsii-na-elevatornyh-kompleksah> (дата обращения: 06.01.2017).
23. Бутенко О.Г., Смик С.Ю.. Гідравлічний розрахунок комбінованої системи очищення повітря. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2011. Вип. 1(35). С. 190–194.

24. Вараксин А.Ю. Вараксин А.Ю., Зайчик Л.И. Влияние частиц на интенсивность турбулентности несущего потока. *Теплофизика и аэромеханика*. 2000. Т. 7. № 2. С. 243-254.
25. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с
26. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. н-та., 2005. 210 с.
27. Виноградов С.С., Васильева И.А. Проблемы классификации газоочистного оборудования и его выбора. *Журнал «Экология промышленного производства»*. 2007. №. 2. С. 18-23.
28. Волченков А.С. Формирование системы заготовки, хранения и первичной переработки сельскохозяйственной продукции. *Журнал «Территория науки»*. № 6, 2016, С. 43-47.
29. Волынкина Т.В., Слободянюк В.С. К вопросу описания турбулентных потоков в трубе. *Вестник КРСУ*, т.2, №2, 2002. URL: <https://www.krsu.edu.kg/vestnik/2002/v2/a16.html> (дата звернення: 23.09.2012)
30. Гаврилів Р.І. Дослідження ефективності прямотечійних циклонів: автореф. дис. на соискание наук канд.техн.наук: 05.17.08: Львів, 2005. 19 с.
31. Гаврилів Р.І., Майструк В.В., Ковцуняк І.В., Іванів І.М. Чисельне моделювання впливу геометрії вхідного патрубку на гідродинамічну структуру потоку в робочій зоні прямотечійного циклону. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24(10). С. 116-124.
32. Гаек Е.А. Оптимизация конструктивно-кинематических параметров разработанного циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Журнал «Інженерія природокористування»*. 2015. № 1(3). С.123 – 127.
33. Гаек Е.А. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований в разработанном циклоне аспирационных систем зерноочистительных машин. *Вісник ХНТУСГ»: зб. наук. пр. Серія: Технічні системи і технології тваринництва*: 2015. Вип. 157. С. 203-208.

34. Гаек Е.А., Алгоритм математического моделирования частиц дисперсной фазы запылённого воздушного потока. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzeszow*, 2016. Vol. 18, №7. P. 79-83
35. Гаек Е.А., Бекетова И.С. Способ повышения эффективности процесса очистки запылённого воздушного потока циклоном аспирационных систем зерновых сепараторов. *Журнал ХНТУСГ»: зб. наук. пр. Серія: Інженерія природокористування* 2015. № 2(4). С.101-105.
36. Галкин В.Д. и др. Моделирование процессов послеуборочной обработки зерна и семян и технологии их подготовки. *Пермский аграрный вестник*. 2018. № 3 (23).
37. Гапонюк О.И., Джулинский Д.П. Энергоэффективные системы пылеподавления. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2011. № 40(1). С. 216-218.
38. Гиевский А.М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерно-очистительных машин: дис ... д-ра. техн. наук: 05.20.01 / Воронеж. Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2016. 345 с.
39. Гимадиев А.М. Методика экспериментального исследований критической скорости удара, начало структурных изменений в зернах. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2010. № 5. С. 152 – 154.
40. Гончарук А.А. Эффективное обеспыливание пылевоздушных смесей в циклофенах. *Науково-виробничий журнал «Зернові продукти і комбікорми»* № 2(58). 2015. С.48-50
41. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Дата введения 1989-01-01]. М.: Стандартинформ, 2006. 50 с.

42. ГОСТ 29143-91 (ИСО 712-85). *Зерно и зернопродукты. Определение влажности (рабочий контрольный метод). [дата введения 1992-10-01]*. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 7 с.
43. ГОСТ 29144-91 (ИСО 711-85). *Зерно и зернопродукты. Определение влажности (базовый контрольный метод). [дата введения 1992-10-01]*. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 8 с.
44. ГОСТ 33007-2014. *Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газовых потоков. Общие технические требования и методы контроля. [дата введения 2015-12-01]*. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
45. ГОСТ 6376-74. *Анемометр ручной индукционный. [срок действия с 1975-01-01]*. М.: Издательство стандартов, 1989. 8 с.
46. Дадак Ю.Р., Ляшеник А.В. Дослідження впливу бункера на аеродинаміку циклона шляхом моделювання процесів засобами Cosmos Floworks. *Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць*. 2012. № 1. С. 113-119.
47. Дадак Ю.Р. Числова реалізація математичної моделі руху частинки пилу у пиловловлювачі з жалюзійним відокремлювачем. *Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук. пр.*, 2007. Вип. 17.4 С. 254-259
48. Дацюк Т.А., Сауц А.В., Юрманов Б.Н., Таурит В.Р. Моделирование процессов вентиляции. *Журнал «Современные проблемы науки и образования»*, 2012. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6744> (дата обращения: 27.01.2016).
49. Денисенко Л.И. Определение скорости движения минеральных зерен в стесненных условиях. *Техника и технология обогащения руд.-Днепропетровский горн. ин-т*, 1975. С.112-117.
50. Денисенко С.А. Выбор и обоснование параметров воздухоочистителя малогабаритного с/х агрегата с разработкой технологии восстановления: дис. ...канд. техн. наук.: 05.20.03. Харьков, 1994. 182 с.

51. Деркач О.П., Горячкина В.П. Наукова спадщина академіка. *Електронне наукове фахове видання: Історія науки і бібліографістика*. 2007. № 3. URL: <http://inb.dnsgb.com.ua/2007-3/07dopsag.pdf>. (дата звернення: 12.10.2017)
52. Димитриенко Ю.И., Захаров А.А., Абакумов А.С., Коряков М.Н., Сыздыков Е.К. Численное моделирование газовых потоков в каналах воздухозаборников на основе уравнений Навье-Стокса. *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2011. №. 4. С. 44-52.
53. Дідур В.А., Чебанов А.Б. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів пневмосепаратора з пиловловлювальним пристроєм. *Техніка і технології АПК наук.-вироб. журн. Укр. н.-д. ін-т прогноз. та випробув. техн. і технол. для с.-г. вир-ва ім. Л. Погорілого*. 2013. № 11. С. 6-8.
54. Донодоков Ю.Ж., Аммосов И.Н., Дринча В.М. Обоснование процесса охлаждения зерна вертикальными аэрационными колонками. *Научно-производственный журнал «Кормопроизводство»*. 2019. №.1. С. 34-38.
55. ДСТУ 4138–2002.Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2003. 173 с. (Інформація та документація).
56. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Національний стандарт України. [Чинний від 2002-12-28].К.: Держспоживстандарт України, 2005. 23 с. (Інформація та документація).
57. Дубинін А.І., Майструк В.В., Гаврилів Р.Б., Майструк І.В. Зменшення енерговитрат на пилоочищення шляхом використання пиловловлювачів з прямою зоною розділення. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2004. № 4. С. 128-130.
58. Дударь О.И. Модель влияния шероховатости на турбулентное течение в трубе, основанная на аналитическом описании экспериментов Никурадзе. *Материалы XXIII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»* 25 февраля – 04 марта, 2018 г., г. Звенигород. С. 127–133

59. Дьяков А.М., Миненко А.В., Стрикунов Н.И. Технические и экономические аспекты оценки эффективности инвестиций в машины и оборудование в сельском хозяйстве. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. №8 (130). 2015. С. 129-134.

60. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Возможности уменьшения уровня турбулентных пульсаций скорости под влиянием модуляции скорости вращения. *Материалы XXIII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»* 25 февраля – 04 марта, 2018 г., г. Звенигород. С. 158.

61. Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. Изменение свойств турбулентных течений в сферическом слое под действием модуляции скорости вращения. *Журнал «Письма в Журнал технической физики»*, 2017., т.43, № 10, с. 87–94.

62. Завгородний А.И. Научные основы процессов очистки отверстий решет зерноочистительных машин: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.11. Харьков, 2001. 304 с.

63. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К.: УСХА, 1998. 625 с.

64. Заика П.М., Слоновский Н.В. Исследование траектории движения семян при пневмосепарировании семенных материалов. *Технология производства и конструирования сельскохозяйственных машин: сб. науч. тр. ХГАУ*. – Харьков, 1997. С. 142–147.

65. Зинуров В. Э. и др. Исследование изменения эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц прямоугольным сепаратором при разной степени забивки дугообразных элементов пылью. *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22. №. 8. С. 42-46.

66. Злочевский В.А., Борисов А.П. Разработка циклона-сепаратора с автоматическим контролем процесса очистки воздуха. *Научно-теоретический журнал «Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК–продукты здорового питания»*. 2016. №. 6(14). С. 75-82.

67. Иванов В.С. Суслов Д.Ю. Тенденции развития обеспыливающих аппаратов циклонного типа. *Научный журнал «Современные наукоемкие технологии»*. 2014. № 7(2). С. 68–70

68. Ильина Т.Н., Гольцов А.Б., Емельянов Д.А. Анализ аэродинамики двухфазных потоков в аспирационной системе технологического комплекса. *Научно-технический журнал «Региональная архитектура и строительство»*. 2019. № 3. С. 181-186.

69. Информационный лист 74.2а. Циклофен Cimbria. URL: [http://www.cimbria.ru/files/filer/solutions\\_ru/drying/fans/74.2a\\_Циклофан%20cf\\_тех\\_данные.pdf](http://www.cimbria.ru/files/filer/solutions_ru/drying/fans/74.2a_Циклофан%20cf_тех_данные.pdf) (дата обращения: 27.01.2016).

70. Казаков К.В., Макаренко А.Н., Мартынова И.В., Мачкарин А.В., Путиенко К.Н., Рыжков А.В., Чехунов О.А. Зарубежная сельскохозяйственная техника: монография. Москва 2016. 200 с.

71. Казанский В.Б., Хардигов В.В. Статистическая физика и термодинамика: учебное пособие. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2013. 292 с

72. Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В. Исследование процесса очистки воздушных потоков от мелкодисперсной пыли в центробежно-инерционном аппарате пылеулавливания. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле: сб. науч. тр.* 2017. №. 3.

73. Киселев А.Ф, Сбоев Д.С., Чернышев С.Л. Особенности ламинарно-турбулентного перехода в трехмерном пограничном слое при повышенной внешней турбулентности. *Журнал «Доклады Академии наук»*. 2014. № 454(6). С. 665-668.

74. Клименко А.П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. Москва: Химия, 1978. - 208 с

75. Котов Б.І. Аналіз процесу знепилювання повітряних потоків в прямоточному циклоні з поперечно-поточною зоною сепарації. *Проблеми надійності машин: Вісник ХНТУСГ*. Вип. 205. С. 275-279.



76. Котов Б.І. Моделювання процесу очистки повітряних потоків зерносепараторів в прямоточних циклонах. *Проблеми надійності машин: Вісник ХНТУСГ*. Вип. 205. С. 116-122.

77. Котов Б.І. та ін. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки зерна: монографія Ніжин: Лисенко М.М. 2017. 552 с.

78. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. *Науковий журнал «Вибрації в техніці та технологіях»* 2004. №3 (35). С.61–63.

79. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів. *Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету*. 2003. Вип.33. С. 53–59.

80. Кошкарев С.А., Роцин П.А. К применению функции отклика скорости седисентации в комплексном дисперсионном анализе пыли систем обеспыливания выбросов аспирации агропромышленного комплекса. *Журнал «Успехи современной науки»*. 2016. Т.5. № 11. С. 32-35.

81. Кудашев С.В., Желтобрюхов В.Ф. Исследования запылённости воздушной среды *Методические указания к лабораторной работе по курсу «Безопасность жизнедеятельности»*. Волгоград 2013. 31 с.

82. Кузнецов С.И. Исследование характеристик циклонно-ротационного пылеуловителя. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2006. №3(26). С.85-94.

83. Кузнецов С.І. Комплексне очищення газових викидів теплоенергетичних підприємств від пилу, двооксиду сульфуру і монооксиду карбону: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 21.06.01: Харків, 2015. 25 с.

84. Кузнецов С.І., Михайлик В.Д., Русанов С.А. Кузнецов С.І., Михайлик В.Д., Русанов С.А. Моделювання роботи вискоефективного циклонно-

ротаційного пиловловлювача. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 3(36), 2009. С.30-35.

85. Куц В.П. Повышение эффективности пылеулавливания в центробежно-инерционных пылеотделителях с жалюзийным отводом воздуха: автореф. дис. на соискание наук степени канд. техн. наук: 05.17.08. Москва, 1986. 24 с.

86. Лазарев В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справочник Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.,

87. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика: Издание 4-е, стереотипное. М.: Наука, 1988. — 736 с.

88. Лиошенко С.В. Совершенствование рабочего процесса циклонного пылеуловителя. *Материалы Международной научно-практической конференции «Дорожно-транспортный комплекс, экономика, экология, строительство и архитектура»*. 2003. С. 243-244.

89. Лисин П.А., Мартемьянов Д.Б., Чернопольская Н.Л. Методика расчета фракционного коэффициента очистки циклонного аппарата. *Вестник ОмГАУ сб. науч. тр.* 2013. №4 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-fraktsionnogo-koeffitsienta-ochistki-tsiklonnogo-apparata>) (дата обращения: 07.01.2020).

90. Ловейкин В.С., Кулик В.П. Динамічний аналіз робочих органів зерноочисних машин з рекупераційним приводом. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків, 2009. Вип. 77. С. 316 – 323.

91. Ловчиков А.П., Саляхов Р.А., Кузнецов Н.А. Зерноочистительные машины. Челябинск: ЧГАА, 2010. 159 с.

92. Логачёв И.Н., Логачёв К.И., Аверкова О.А. Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов. Научно-технический и производственный журнал «Новые огнеупоры». 2016. №. 6. С. 66-70.

93. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учебник для вузов. Москва: Дрофа, 2003. 840 с.

94. Ляшеник А.В., Тисовський Л.О., Дорундяк Л.М., Дадак Ю.Р. Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. № 21(9). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obgruntuvannya-konstruktsiyi-tsyklona-dlya-ochischennya-povitrya-na-pidpriemstvah-derevoobrobnoyi-galuzi> (дата звернення: 12.10.2017)
95. Майструк В.В. Розділення запиленних газів у циклонах з проміжним відведенням твердої фази: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.17.08. Львів, 2000. 18 с.
96. Макарова М.С., Лущик В.Г., Решмин А.И. Сравнительный анализ турбулентного течения в плоском и круглом каналах с диффузором. *Материалы XXIII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность»* 25 февраля – 04 марта, 2018 г., г. Звенигород. С. 182–187.
97. Матвеевко В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем. *Вестник МГУ. сер.2, Химия*. Т.52, №4. 2011. С.243 – 275.
98. Методичні рекомендації з оплати праці робітників сільськогосподарських підприємств на збиранні зернових культур урожаю 2018 р. / Демчак І.М. та ін. К.: НДІ «Укראгропромпродуктивність», 2018. 40 с.
99. Миличева Н.Н., Саблина А.М. Наилучшие доступные технологии снижения выбросов пыли в атмосферный воздух, применимые в различных отраслях промышленности. *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2018. № 4(51). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5300> (дата обращения: 07.01.2020).
100. Мисюля Д.И., Кузьмин В.В., Марков В.А. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей. *Научный журнал «Труды БГТУ»*. Серия: Химия и технология неорганических веществ. 2012. № 3. URL: <https://www.belstu.by/booklibrary/list/science-publication/sravnitelnyi-analiz-texnicheskix-karakteristik-ciklonnyx-pyleulovitelei.html> (дата обращения: 05.06.2014).

101. Мисюля Д.И. Новые конструкции устройств для снижения энергопотребления циклонных пылеуловителей. *Научный рецензируемый журнал «Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия»*. 2012. № 1. С.57-61.

102. Мисюля Д.И., Вайтехович П.Е., Кузьмин В.В., Карпов К.А. Обеспыливание газов, выходящих из стекловаренной печи *Научный журнал «Труды БГТУ»*. Серия: Химическая техника, теплотехника и энергосбережение 2013. № 3. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/3026> (дата обращения: 10.06.2014).

103. Михайлов Є. В., Михайлов Е. В., Кольцов М. П., Білокопитов О. О. До питання класифікації зерноочисних машин та їх повітряних потоків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове вид.*; 2011. Вип. 11(5). С 181–191

104. Михайлов Є.В., Задосна Н.О., Білокопитов О.О. Удосконалення пневморешітного сепаратору зернового вороху. Журнал *«Інженерія природокористування»*. 2015. №. 1. С. 61-63.

105. Московский М.Н., Бойко А.А. Обоснование различных схем очистки зерноочистительного агрегата, при получении семенного материала в многоотраслевом сельхозпроизводстве. *Инженерный вестник Дона*, 2013, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1625](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1625) (дата обращения: 12.10.2015)

106. Наукова школа академіка Василенка Петра Мефодійовича: монографія / Войтюк Д.Г., Вергунов В.А., Мудрук О.С., Деркач О.П. К.: Аграрна освіта, 2005. 72 с.

107. Нестеренко О.В., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Богатирьов Д.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр.* 2012. Вип. 25(1). С.49-53.

108. Образ А.О., Федоров А.В. Гибридная LST-RANS модель для расчета ламинарнотурбулентных течений в пограничном слое. *Материалы XXIII Международной конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической*

*устойчивости и турбулентность»* 25 февраля – 04 марта, 2018 г., г. Звенигород.  
С. 204

109. Овсянников Ю.Г., Агарков А.М. Циклонные пылеуловители аспирационных систем. *Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений»*. 8-10 октября 2013 г., г. Орел. С. 161-165.

110. Овсянников Ю.Г., Агарков А.М. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик системы аспирации с принудительной рециркуляцией. *Материалы международной научно-практической конференции «Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений»*. 8-10 октября 2013 г., г. Орел. С. 166-169.

111. Ольшанський В.П., Ольшанський О.В. Про квадратичну апроксимацію розподілу питомої маси в шарі вібросепарованої зерноsumіші. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2016. № 1(2). С. 66-70.

112. ОСТ 70.10.2.-83. *Испытания сельскохозяйственной техники. Зерноочистительные машины и агрегаты, зерноочистительно-сушильные комплексы. Программа и методы испытаний. [дата введения 1984-06-01]*. Москва: Госкомсельхозтехника СССР, 1984. 159 с.

113. ОСТ 70.10.8–84. *Испытания сельскохозяйственной техники. Зерноочистительные машины, Программа и методы испытаний*. Москва: Союзсельхоз-техника, 1985. 23 с.

114. Очиститель вороха самопередвижной ОВС-25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации URL: [http://ukrteh.net.ua/instruction\\_for\\_ovs-25.pdf](http://ukrteh.net.ua/instruction_for_ovs-25.pdf) (дата обращения: 12.10.2019)

115. Павлюченко К.В. Экспериментальное исследование пневматического сепаратора зерна с наклонным воздушным потоком. *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2016. № 3(6). URL: <https://docplayer.ru/>

52830325-Eksperimentalnoe-issledovanie-pnevmaticheskogo-separatora-zerna-s-naklonnym-vozdushnym-potokom.html (дата обращения: 08.09.2018)

116. Петров В.И., Фатихов И.Ф., Сизов А.Г., Никитин А.С. Анализ эффективности работы циклонных пылеуловителей. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. № 16(23). С. 173-175.

117. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Стройиздат, 2008. 296 с.

118. Питак И.В., Моисеев В.Ф. Положительные аспекты работы роторного вихревого аппарата на промышленных предприятиях. *Вестник НТУ "ХПИ"* 2009. С. 9-13

119. Питак И.В., Трошин А.Г., Моисеев В.Ф.. Определение эффективности очистки газоздушного потока в роторном массообменном аппарате. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007, № 5/4(29). С. 9–12.

120. Питак И.В., Хусточкин П.П., Моисеев В.Ф., Шапорев В.П.. Аппарат для проведения процессов абсорбции и газоочистки. *Вісник НТУ «ХПИ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2005. № 9. С.3-6.

121. Платонов Д.В., Минаков А.В., Дектерев А.А., Сентябов А.В. Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока. *Журнал «Модели в физике и технологии»*, 2013. № 4(5), С.635–648

122. Пневмосепаратор: пат. 2387490 РФ, МПК: В07В4/02, А01F12/44. №2008151800/03; заявл. 25.12.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл.№6. 4 с.

123. Пономарев В.Б., Замураев А.Е. Аспирация и очистка промышленных выбросов и сбросов. Екатеринбург 2007. 188 с.

124. Програма «Зерно України – 2015». Київ: ДІА, 2011. 48 с.

125. Протасов М.В. Экспериментальное исследование поведения твердых частиц в сильнозапыленных потоках: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Объед. ин-т высок. температур РАН. Москва.2009. 191 с.

126. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Повышение эффективности работы вихревых пылеуловителей. *Научно-технический журнал «Градостроительство и архитектура»*. 2018. Т.8. № 3. С. 39-42.

127. Пустовой Д.С. Разработка аспирационной системы с высоким уровнем очистки воздуха от мелкодисперсной пыли. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2017. № 51. С. 209-218.

128. Пчелинцева О.Н. Математическая модель процесса взаимодействия конструктивных частей вибропневмосепаратора с зерновой массой. *Прогресивні технології і системи машинобудування: зб. науч. тр.* 2016. №. 2(53) С. 93-101.

129. Радченко С.Г. Анализ экспериментальных данных на основе использования многофакторных статистических математических моделей. *Науковий журнал «Математические машины и системы»*. 2005. № 3. С. 102-115.

130. Романюк Е.В., Каргашилов Д.В., Некрасов А.В. Модернизация циклонов для повышения эффективности пылеулавливания. *Научно-практический и учебно-методический журнал «Безопасность жизнедеятельности»*. 2016. № 5(185). С. 18-22

131. Рослинництво України. Статичний збірник. Київ: Державна служба статистики, 2018. 222 с.

132. Руднев С.Г. Технология послеуборочной обработки зерновых культур на этапе первичного семеноводства. *Материалы 72-й научно-практической конференции преподавателей «Итоги научно-исследовательской работы за 2016 год»* 29 марта 2017 года. г. Краснодар. С. 321-322.

133. Рудяк В.Я. Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред: монография. Новосибирск. 2005. 468 с.

134. Сабирзянова Л.Р., Уриев А.А., Харьков В.В., Николаев А.Н. Очистка промышленных газовых выбросов от пыли в полых вихревых аппаратах. *Вестник Казанского технологического университета*. 2017. №8. С. 81–85.

135. Самаркина Т.С., Глуховская М.Ю. Пылеочистное оборудование зерноперерабатывающего предприятия. Научно-практическая конференция

Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. 18–20 ноября 2019 г. г. Оренбург С. 309-313.

136. Сводная таблица физико-механических свойств зерновой смеси. *Хранение и переработка зерна*. 2004. №2(56). С. 30-32.

137. Сепаратор-ворохоочиститель самопередвижной СВС-25. <http://vibroseparator.ua/productions/grain-cleaning-equipment/samoperedvizhnoe-equipment/precleaning-separators-separator-propelled-shs-25.html> (дата обращения: 18.08.2018)

138. Смирнов Д.Е. Экотехника. Аппаратура процессов очистки промышленных газов и жидкостей: учебное пособие. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2013. 180 с

139. Спириин Н.А., Лавров В.В., Зайнуллин Л.А., Бондин А.Р., Бурькин А.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие. 2015. 289с.

140. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учебник для вузов М.: Металлургия, 1990. 396 с.

141. Степаненко С.П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. смт.Глеваха, 2008. 20 с.

142. Стрикунов Н.И., Леканов С.В., Вилков П.В. Исследование аспирационной системы зерноочистительной машины СВУ-60. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2018. № 1(159). С.159-162.

143. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных закрученных потоков. *Научный журнал «Современные проблемы науки и образования»*. 2013. № 1. С. 154-154.

144. Сугак А.В, Сугак Е.В Центробежные пылеуловители и классификаторы. Моделирование, расчет, проектирование: ИД. LAP Lambert Academic Publishing GmbH&Co., 2012. 226 с;



145. Сугак Е.В. Процессы очистки газов в турбулентных газодисперсных потоках. Моделирование и интенсификация. ИД «LAP Lambert Academic Publishing Gmb H&Co», 2011. 308 с.

146. Тарасенко А. П. и др. Обоснование принципиальной схемы воздушно-решетного сепаратора семян. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017. № 4. С. 95-102.

147. Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Шередекин В.В., Сундеев А.А., Королев А.И. Аспирационная система зерноочистительной машины. 2007. URL: <https://findpatent.ru/patent/229/2298441.html> (дата обращения: 18.03.2017)

148. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений: монография. М.: ГИТТЛ., 1951. 420 с.

149. Твердохліб І.В. Обґрунтування технології та конструктивно-режимних параметрів терково-сепаруючого блоку для обробки вороху трав: автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Вінниця, 2016. 24 с.

150. Терехова О.Н., Глебов А.А. Пути повышения эффективности систем обеспыливания воздуха на зерноперерабатывающих предприятиях. *Вестник алтайской науки*. 2015. № 1. С. 485-488.

151. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна: монография. Харьков: Основа, 2004. 224 с.

152. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей: монография. Харьков: Міськдрук, 2011. 280 с.

153. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в разработанном циклоне. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2014. Vol. 16, № 7. С. 42-46.

154. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харків: Міськдрук, 2010. 360 с.

155. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в

разработанном циклоне *MOTROL. Motorization and power industry in agriculture. Lublin-Rzeszow, 2014 Vol. 16, № 7. С. 42-46.*

156. Ужов В.Н. и др. Очистка промышленных газов от пыли. Москва: Химия, 1981. 392 с.

157. Хамуев В. Г. Интенсивность выделения легкой примеси в вертикально восходящем воздушном потоке. Научный журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии». 2016. № 5. С. 12-16.

158. Харченко С.А., Гаек Е.А. Ефективне очищення запиленого повітряного потоку ротаційними циклонами на зернопереробних підприємствах. *International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» 27-28 December 2019. Radom, P. 218-221.*

159. Харченко С.А., Гаек Е.А. Интенсификация процесса очистки воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ХНТУСГ: «Молодь і технічний прогрес в АПК» 20-21 березня 2014 р. м. Харків. С. 87.*

160. Харченко С.А., Гаек Е.А. Повышение эффективности очистки запылённого воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали наукової конференції студентів Сумського НАУ 1-8 листопада 2014 р. м. Суми. С. 62.*

161. Харченко С.О. Обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку пилоосаджувальною камерою вібровідцентрових зернових сепараторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11 / ХНТУСГ ім. П.Василенка. Харків, 2007. 20 с.

162. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей несущей фазы в рабочей зоне прямоточного циклона. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. 2014. Вип.152. С. 114-120.*

163. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в зоне доочистителя разработанного прямооточного циклона. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2015. Вип.156. С. 237-242.

164. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей дисперсной фазы в запылённом воздушном потоке. *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський журнал: ВНАУ*. Вінниця, 2014. Т.1, № 73. С. 44-49.

165. Харченко С.А., Гаек Е.А. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2013. Вип.135. С. 87-92.

166. Хмельник С.И. Уравнения Навье-Стокса. Существование и метод поиска глобального решения. Published by "MiC" - Mathematics in Computer Comp., printed in USA, Lulu Inc., 2010. С. 108.

167. Холпанов Л.П., Ибяттов Р.И. Математическое моделирование динамики дисперсной фазы: Теор. Основы хим. технол. Т. 39. № 2. С. 206-215.

168. Циклон Нав'є-Стокса: пат. 137443 U України: МПК В04С 3/00. № u 2019 02582; заявл. 18.03.2019; опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.

169. Циклон: пат. 103446 U України: МПК В04С 3/00. № а 2012 14122; заявл. 11.12.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. №19.

170. Черный С.Г., Грязин Ю.А., Шашкин П.А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей. *Журнал «Вычислительные технологии»*. 1999. Т. 4. № 2. С. 74-94.

171. Черняков А.В. и др. Исследование сепаратора зерна с наклонным воздушным каналом путем проведения планируемого эксперимента. *Омский научный вестник*. 2015. №. 2(140). С.95-97.

172. Шваб А.В., Попп М.Ю. Моделирование ламинарного закрученного течения в вихревой камере. *Математика и механика: Вестник Томского государственного университета*. 2014. №. 2 (28). С.90-97.

173. Шевчук И.В. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях массовых сил: обзор работ, выполненных в ИТТФ НАН Украины Часть 4. Вращающиеся системы Пром. теплотехника, 2012, т. 34, №4 С. 5-19

174. Шелюх Ю.Є. Зниження антропогенного навантаження на довкілля від пилових викидів деревообробної промисловості: дис... канд. техн. наук: 21.06.01 / Львівський держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2006. 203 с

175. Шелюх Ю.Є. Сучасні методи очищення повітря від промислових видів пилу. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2012. - № 6. С. 214-218.

176. Шелюх Ю.Є., Половко А.П. Ефективність впровадження вихрових пиловловлювачів для зниження концентрації пожежонебезпечного пилу при обробці деревини. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. 2010. № 16 URL: [https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/files/14\\_4.pdf](https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/files/14_4.pdf) (дата звернення: 22.05.2014).

177. Ширяева С. О., Григорьев А. И. Введение в теорию пограничного слоя: учебное пособие. Я.: ЯрГУ, 2009. 140 с.

178. Штокман Е.А. Очистка воздуха. Учебн. пособие. М.: изд-во АСВ, 1998. 320 с.

179. Шушляков О.В. Підвищення ефективності сухої очистки газів за допомогою інерційних апаратів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.03. Харків, 2004. 37 с.

180. Юдичева И. Н. Повышение эффективности очистки газов мукомольной промышленности в пылеулавливающих установках. ОГУ. 2017. <http://elib.osu.ru/handle/123456789/3322> (дата обращения 20.02.2019)

181. Ярош Я.Д. Підвищення ефективності пиловловлювання батарейних циклонів за рахунок застосування елементів з жалюзійними решітками: автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук: 05.17.08. Львів, 2003. 21 с.

182. Аспирационное устройство: пат. 2057468 РФ, МПК: A23N5/00, B07B4/08. №5033100/13; заявл. 09.03.1992; опубл. 10.04.1996, Бюл.№6. 4 с.

183. А.с. 1386309 СССР, МКИ В 04 С 3/00. Прямоточный циклон / А.Н. Шерстюк, В.С. Асламова, М.М. Карбачинский, О.А. Трошкин, С.Ф. Тесленко, С.К. Бугреев (СССР). - №4092229/31-26; заявл.1505.86; опубл. 07.04.88. Бюл. № 13.

184. А.с. 1386309 СССР, МКИ В 04 С 3/00. Прямоточный циклон / А.Н. Шерстюк, В.С. Асламова, М.М. Карбачинский, О.А. Трошкин, С.Ф. Тесленко, С.К. Бугреев (СССР). - №4092229/31-26; заявл.1505.86; опубл. 07.04.88. Бюл. № 13.

185. Nesterenko O.V., Leshchenko S.M., Vasylkovskyi O.M, Petrenko D.I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 53, №.3. Romania, Bucharest: INMA, 2017. P. 65–70.

186. Chebotarev V.P. et al. Classification of aspirating systems for grain cleaning and analysis of their devices. *Mechanization and Electrification of Agriculture: interdepartmental subject collection*. 2010. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BY2011000715> (reference date 02.03.2019)

187. Cimbria DELTA Combi Cleaner 157. URL: [https://www.nexeed.ca/wp-content/uploads/2016/09/157\\_Combi\\_cleaner\\_157.pdf](https://www.nexeed.ca/wp-content/uploads/2016/09/157_Combi_cleaner_157.pdf). (reference date 27.06.2017)

188. Dorman R.G. Dust Control and Air Cleaning: monographs in Heating. Elsevier, 2014. Vol. 9. 615 p.

189. Eckhoff R.K. Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards. Elsevier, 2003. 705 p.

190. Hutter K., Rajagopal K.R. On flows of granular materials. *Continuum Mech. Thermodyn.*, 1994. V.6. P. 81-139.

191. Jones C. Preventing grain dust explosions. Oklahoma Cooperative Extension Service – 2011. [https://shareok.org/bitstream/handle/11244/49594/oksd\\_bae\\_1737\\_2011-07.pdf?sequence=1](https://shareok.org/bitstream/handle/11244/49594/oksd_bae_1737_2011-07.pdf?sequence=1) (reference date 16.12.2012)

192. Kiselev A.Ph., Kuzminsky V.A., Sboev D.S. The laminar-turbulent transition zone in 2D and 3D boundary layers with emphasis on effect of free stream turbulence. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*

(*ICAS 2014*), 2014, URL: [https://www.researchgate.net/publication/289000411\\_The\\_laminarturbulent\\_transitionzone\\_in\\_2D\\_and\\_3D\\_boundary\\_layers\\_with\\_emphasis\\_on\\_effect\\_of\\_free\\_stream\\_turbulence](https://www.researchgate.net/publication/289000411_The_laminarturbulent_transitionzone_in_2D_and_3D_boundary_layers_with_emphasis_on_effect_of_free_stream_turbulence) (reference date 25.01.2015)

193. Kotov B., Spirin A., Kalinichenko R., Bandura V., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 65. № 1. P. 20-24.

194. Lukac, J. Bradley, et al. Rotary air screen for a work machine. U.S. Patent No. 6,514,303. 4 Feb. 2003.

195. Majocco V.G. Experimentelle Untersuchungen verschiedener Stoffsysteme zur Charakterisierung des Trennverhaltens eines nicht-konventionellen Windsichters zur Getreidereinigung : Dissertationarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.). Hochschule Anhalt, 2015. 67 s.

196. Mikhailov Y., Zadosnaia N., Kangalov P. Methodology for determining the parameters of the air flow in a pneumatic separator with a closed air system. *Journal of agriculture and environment*. Vol. 1, № 1. P. 35-40.

197. Misiulia D. Andersson A.G., Lundström T.S. Computational investigation of an industrial cyclone separator with helical-roof inlet. *Chemical engineering and technology*. 2015. Vol. 38, № 8. P.1425–1434.

198. Misiulia D. Andersson A.G., Lundström T.S. Effects of the inlet angle on the collection efficiency of a cyclone with helical-roof inlet. *Powder technology*. 2017. Vol. 305. P. 48–55.

199. Misiulia D. Andersson A.G., Lundström T.S. Effects of the inlet angle on the flow pattern and pressure drop of a cyclone with helical-roof inlet. *Chemical engineering research and design*. 2015. Vol. 102. P. 307–321.

200. Misiulia D. Elsayed K., Andersson A.G. Geometry optimization of a deswirler for cyclone separator in terms of pressure drop using CFD and artificial neural network. *Separation and purification technology*. 2017. Vol. 185. P. 10–23.

201. Misiulia D., Andersson A.G., Lundström T.S. Large Eddy Simulation investigation of an industrial cyclone separator fitted with a pressure recovery deswirler. *Chemical engineering and technology*. 2017. Vol. 40, No 4. P. 709-718.

202. Saitov V.E., Savinyh P., Golka W., Kamionka J. Increase of seed cleaning efficiency by better use of air stream properties. *Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 19, № 3 P. 89-99.

203. Saitov V., Savinych P., Golka W., Kamionka J. Increase of seed cleaning efficiency by better use of air stream properties. *Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 3 (155). P. 89 – 99.

204. Stepanenko S.P. Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in agriculture, conserving of the resources*. Bulgarian association of mechanization in agriculture. 2017. Vol.2. P.54 – 56.

205. Stepanenko S.P., Prilutsky A.N., Popadjuk I.S. Mechanics and technological justification of processes pneumatic vortex separating device. *Науковий вісник НУБІП України. Серія: техніка та енергетика АПК*. №258. 2017. С. 6 – 8.

Додатки



## Додаток А

Програмне забезпечення для математичного моделювання процесу очищення  
запиленого повітряного потоку

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<?validation-md5-digest f58319f76a91b1743013dc92f1783551?>
<worksheet version="3.0.3" xmlns="http://schemas.mathsoft.com/worksheet30"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:ws="http://schemas.mathsoft.com/worksheet30"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30"
xmlns:u="http://schemas.mathsoft.com/units10"
xmlns:p="http://schemas.mathsoft.com/provenance10">
  <pointReleaseData/>
  <metadata>
    <generator>Mathcad Professional 14.0</generator>
    <userData>
      <title/>
      <description/>
      <author>Yevhen</author>
      <company>Parametric Technology Corporation</company>
      <keywords/>
      <revisedBy>admin</revisedBy>
    </userData>
    <identityInfo>
      <revision>2</revision>
      <documentID>93DD2FD5-1707-4AC9-9F5C-
0512904CFC25</documentID>
      <versionID>5DF95A73-7058-45CE-8193-
7674DA953778</versionID>
      <parentVersionID>00000000-0000-0000-0000-
000000000000</parentVersionID>

```

```

    <branchID>00000000-0000-0000-0000-
000000000000</branchID>
    </identityInfo>
</metadata>
<settings>
    <presentation>
        <textRendering>
            <textStyles>
                <textStyle name="Normal">
                    <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="0" text-align="left" list-style-type="none" tabs="inherit"/>
                    <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="14" font-weight="bold" font-style="italic" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
                </textStyle>
                <textStyle name="Heading 1">
                    <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="left" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
                    <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="14" font-weight="bold" font-style="normal" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
                </textStyle>
                <textStyle name="Heading 2">
                    <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="left" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
                    <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="12" font-weight="bold" font-style="italic" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
                </textStyle>
                <textStyle name="Heading 3">
                    <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="left" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>

```

```

        <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="12" font-weight="normal" font-style="normal" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
    </textStyle>
    <textStyle name="Paragraph">
        <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="21" text-align="left" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
        <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
    </textStyle>
    <textStyle name="List">
        <blockAttr margin-left="14.25" margin-
right="0" text-indent="-14.25" text-align="left" list-style-type="inherit"
tabs="inherit"/>
        <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
    </textStyle>
    <textStyle name="Indent">
        <blockAttr margin-left="108" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="left" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
        <inlineAttr font-family="Arial" font-charset="0"
font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal" underline="false" line-
through="false" vertical-align="baseline"/>
    </textStyle>
    <textStyle name="Title">
        <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="center" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
        <inlineAttr font-family="Times New Roman"
font-charset="0" font-size="24" font-weight="bold" font-style="normal"
underline="false" line-through="false" vertical-align="baseline"/>
    </textStyle>

```

```

<textStyle name="Subtitle" base-style="Title">
  <blockAttr margin-left="0" margin-right="0"
text-indent="inherit" text-align="center" list-style-type="inherit" tabs="inherit"/>
  <inlineAttr font-family="Times New Roman"
font-charset="0" font-size="18" font-weight="normal" font-style="normal"
underline="false" line-through="false" vertical-align="baseline"/>
</textStyle>
</textStyles>
</textRendering>
<mathRendering equation-color="#000">
  <operators multiplication="narrow-dot"
derivative="derivative" literal-subscript="large" definition="colon-equal" global-
definition="triple-equal" local-definition="left-arrow" equality="bold-equal"
symbolic-evaluation="right-arrow"/>
  <mathStyles>
    <mathStyle name="Variables" font-family="Times
New Roman" font-charset="0" font-size="14" font-weight="bold" font-style="normal"
underline="false"/>
    <mathStyle name="Constants" font-family="Times
New Roman" font-charset="0" font-size="14" font-weight="bold" font-style="normal"
underline="false"/>
    <mathStyle name="User 1" font-family="Arial" font-
charset="0" font-size="14" font-weight="bold" font-style="italic" underline="false"/>
    <mathStyle name="User 2" font-family="Courier
New" font-charset="0" font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal"
underline="false"/>
    <mathStyle name="User 3" font-family="Arial" font-
charset="0" font-size="10" font-weight="bold" font-style="normal"
underline="false"/>
    <mathStyle name="User 4" font-family="Times New
Roman" font-charset="0" font-size="10" font-weight="normal" font-style="italic"
underline="false"/>
    <mathStyle name="User 5" font-family="Times New
Roman" font-charset="0" font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal"
underline="false"/>

```

```

    <mathStyle name="User 6" font-family="Arial" font-
charset="0" font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal"
underline="false"/>

    <mathStyle name="User 7" font-family="Times New
Roman" font-charset="0" font-size="10" font-weight="normal" font-style="normal"
underline="false"/>

    <mathStyle name="Math Text Font" font-
family="Times New Roman" font-charset="0" font-size="14" font-weight="bold"
font-style="italic" underline="false" color="#008000"/>

</mathStyles>

    <dimensionNames mass="mass" length="length"
time="time" current="current" thermodynamic-temperature="temperature" luminous-
intensity="luminosity" amount-of-substance="substance" display="false"/>

    <symbolics derivation-steps-style="vertical-insert" show-
comments="false" evaluate-in-place="false"/>

    <results numeric-only="true">

        <general precision="3" show-trailing-zeros="false"
radix="dec" complex-threshold="10" zero-threshold="15" imaginary-value="i"
exponential-threshold="3"/>

        <matrix display-style="auto" expand-nested-
arrays="false"/>

        <unit format-units="true" simplify-units="true"
fractional-unit-exponent="false"/>

    </results>

</mathRendering>

    <pageModel show-page-frame="false" show-header-frame="false"
show-footer-frame="false" header-footer-start-page="1" paper-code="9"
orientation="portrait" print-single-page-width="false" page-width="595.5" page-
height="841.5">

        <margins left="86.4" right="86.4" top="86.4"
bottom="86.4"/>

        <header use-full-page-width="false"/>

        <footer use-full-page-width="false"/>

</pageModel>

```

```

    <colorModel background-color="#fff" default-highlight-
color="#fff"/>
    <language math="ru" UI="ru"/>
  </presentation>
  <calculation>
    <builtInVariables array-origin="0" convergence-tolerance="0.001"
constraint-tolerance="0.001" random-seed="1" prn-precision="4" prn-col-width="8"/>
    <calculationBehavior automatic-recalculation="true" matrix-strict-
singularity-check="true" optimize-expressions="false" exact-boolean="true" strings-
use-origin="false" zero-over-zero="0">
      <compatibility multiple-assignment="MC12" local-
assignment="MC12"/>
    </calculationBehavior>
    <units>
      <currentUnitSystem name="si" customized="false"/>
    </units>
  </calculation>
  <editor view-annotations="false" view-regions="false">
    <ruler is-visible="false" ruler-unit="cm"/>
    <plotTemplate>
      <xy item-idref="1"/>
    </plotTemplate>
    <grid granularity-x="6" granularity-y="6"/>
  </editor>
  <fileFormat image-type="image/png" image-quality="75" save-numeric-
results="true" exclude-large-results="false" save-text-images="false" screen-
dpi="96"/>
  <miscellaneous>
    <handbook handbook-region-tag-ub="1316" can-delete-original-
handbook-regions="true" can-delete-user-regions="true" can-print="true" can-
copy="true" can-save="true" file-permission-mask="4294967295"/>

```

```

</miscellaneous>

</settings>

<regions>

  <region region-id="1233" left="90" top="18" width="37.5" height="16.5"
align-x="109.5" align-y="30" show-border="false" show-highlight="true" is-
protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80" tag="">

    <math optimize="false" disable-calc="false">

      <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">

        <ml:id xml:space="preserve">U</ml:id>

        <ml:real>6</ml:real>

      </ml:define>

    </math>

    <rendering item-idref="2"/>

  </region>

  <region region-id="1225" left="240" top="17.25" width="216.75"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="30" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">

    <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">

      <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Скорость воздуха на входе, м/с</p>

    </text>

  </region>

  <region region-id="1232" left="90" top="48" width="54.75"
height="16.5" align-x="109.5" align-y="60" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">

    <math optimize="false" disable-calc="false">

      <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">

```

```

        <ml:id xml:space="preserve">D</ml:id>
        <ml:real>0.08</ml:real>
    </ml:define>
</math>
<rendering item-idref="3"/>
</region>
<region region-id="1224" left="240" top="47.25" width="135"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="60" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
    <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
        <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Диаметр камеры, м</p>
    </text>
</region>
<region region-id="1231" left="90" top="84" width="54" height="16.5"
align-x="108.75" align-y="96" show-border="false" show-highlight="true" is-
protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80" tag="">
    <math optimize="false" disable-calc="false">
        <ml:define warning="WarnRedefinedBIUnit"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
            <ml:id xml:space="preserve">L</ml:id>
            <ml:real>0.08</ml:real>
        </ml:define>
    </math>
    <rendering item-idref="4"/>
</region>
<region region-id="1223" left="240" top="83.25" width="114"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="96" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">

```



```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Длина камеры, м</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1230" left="90" top="114" width="48.75"
height="16.5" align-x="103.5" align-y="126" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define warning="WarnRedefinedBIUnit"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id xml:space="preserve">1</ml:id>
```

```
<ml:real>0.04</ml:real>
```

```
</ml:define>
```

```
</math>
```

```
<rendering item-idref="5"/>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1222" left="240" top="113.25" width="430.5"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="126" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Ширина доочистителя, м</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1229" left="90" top="144" width="52.5"
height="16.5" align-x="107.25" align-y="156" show-border="false" show-
```

```
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define
```

```
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id xml:space="preserve">d</ml:id>
```

```
<ml:real>0.02</ml:real>
```

```
</ml:define>
```

```
</math>
```

```
<rendering item-idref="6"/>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1221" left="240" top="143.25" width="430.5"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="156" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Диаметр центрального отверстия доочистителя, м</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1228" left="90" top="174" width="57.75"
height="16.5" align-x="109.5" align-y="186" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define warning="WarnRedefinedBIUnit"
```

```
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>
```

```
<ml:real>2000</ml:real>
```

```
</ml:define>
```

```
</math>
```

```

        <rendering item-idref="7"/>
    </region>
    <region region-id="1220" left="240" top="173.25" width="269.25"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="186" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
        <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
            <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Число оборотов вентилятора, 1/МИН</p>
        </text>
    </region>
    <region region-id="1227" left="90" top="210" width="64.5"
height="16.5" align-x="116.25" align-y="222" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
        <math optimize="false" disable-calc="false">
            <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
                <ml:id xml:space="preserve">N1</ml:id>
                <ml:real>2000</ml:real>
            </ml:define>
        </math>
        <rendering item-idref="8"/>
    </region>
    <region region-id="1219" left="240" top="209.25" width="269.25"
height="15.75" align-x="258.75" align-y="222" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
        <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
            <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Число оборотов доочистителя, 1/МИН</p>

```

```

    </text>
  </region>
  <region region-id="1226" left="90" top="240" width="66" height="16.5"
align-x="117.75" align-y="252" show-border="false" show-highlight="true" is-
protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80" tag="">
    <math optimize="false" disable-calc="false">
      <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
        <ml:id xml:space="preserve">ros</ml:id>
        <ml:real>1200</ml:real>
      </ml:define>
    </math>
    <rendering item-idref="9"/>
  </region>
  <region region-id="1218" left="240" top="239.25" width="238.5"
height="15.75" align-x="273" align-y="252" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">
    <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
      <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Плотность частиц, кг/куб.м</p>
    </text>
  </region>
  <region region-id="670" left="0" top="261" width="6000" align-
x="6000" align-y="270" show-border="false" show-highlight="false" is-
protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="" height="86.25">
    <area is-collapsed="false" name="" show-name="false" show-
border="true" show-icon="true" show-timestamp="true" allow-expand="false" is-
locked="false" timestamp="" top-lock-id="670" bottom-lock-id="677" bottom-
tag="">
    <region region-id="1024" left="240" top="281.25"
width="242.25" height="15.75" align-x="290.25" align-y="294" show-border="false"

```

```
show-highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff"
tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit"
margin-right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-
type="inherit" tabs="inherit">Кинематическая вязкость воздуха</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1022" left="78" top="287.25"
width="87.75" height="23.25" align-x="102.75" align-y="306" show-border="false"
show-highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id xml:space="preserve">nu</ml:id>
```

```
<ml:apply>
```

```
<ml:mult/>
```

```
<ml:real>1.5</ml:real>
```

```
<ml:apply>
```

```
<ml:pow/>
```

```
<ml:real>10</ml:real>
```

```
<ml:real>-5</ml:real>
```

```
</ml:apply>
```

```
</ml:apply>
```

```
</ml:define>
```

```
</math>
```

```
<rendering item-idref="10"/>
```

```
</region>
```

```

<region region-id="1021" left="78" top="324" width="51"
height="16.5" align-x="100.5" align-y="336" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="false" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">

    <math optimize="false" disable-calc="false">

        <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">

            <ml:id xml:space="preserve">ro</ml:id>

            <ml:real>1.2</ml:real>

        </ml:define>

    </math>

    <rendering item-idref="11"/>

</region>

<region region-id="1023" left="240" top="323.25"
width="201" height="15.75" align-x="273" align-y="336" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff" tag="">

    <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">

        <p style="Normal" margin-left="inherit"
margin-right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-
type="inherit" tabs="inherit">Плотность воздуха, кг/куб.м</p>

    </text>

</region>

</area>

<rendering item-idref="12"/>

</region>

<region region-id="690" left="0" top="357" width="6000" align-
x="6000" align-y="366" show-border="false" show-highlight="false" is-
protected="false" z-order="0" background-color="inherit" tag="" height="68.25">

    <area is-collapsed="false" name="" show-name="false" show-
border="true" show-icon="true" show-timestamp="true" allow-expand="false" is-
locked="false" timestamp="" top-lock-id="690" bottom-lock-id="697" bottom-
tag="">

```

```
<region region-id="727" left="234" top="377.25"
width="155.25" height="15.75" align-x="264" align-y="390" show-border="false"
show-highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#fff"
tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit"
margin-right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-
type="inherit" tabs="inherit">Параметр Рейнольдса</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="726" left="78" top="374.25"
width="71.25" height="36" align-x="103.5" align-y="396" show-border="false"
show-highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#80ff80"
tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define
warning="WarnRedefinedBIFunction"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id xml:space="preserve">Re</ml:id>
```

```
<ml:apply>
```

```
<ml:mult/>
```

```
<ml:id
```

```
xml:space="preserve">U</ml:id>
```

```
<ml:apply>
```

```
<ml:div/>
```

```
<ml:id
```

```
xml:space="preserve">D</ml:id>
```

```
<ml:id
```

```
xml:space="preserve">nu</ml:id>
```

```
</ml:apply>
```

```
</ml:apply>
```

```
</ml:define>
```

```

        </math>
        <rendering item-idref="13"/>
    </region>
</area>
    <rendering item-idref="14"/>
</region>
    <region region-id="657" left="0" top="435" width="6000" align-
x="6000" align-y="444" show-border="false" show-highlight="false" is-
protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="" height="104.25">
        <area is-collapsed="false" name="" show-name="false" show-
border="true" show-icon="true" show-timestamp="true" allow-expand="false" is-
locked="false" timestamp="" top-lock-id="657" bottom-lock-id="658" bottom-
tag="">
            <region region-id="1240" left="78" top="446.25"
width="115.5" height="36" align-x="137.25" align-y="468" show-border="false"
show-highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit"
tag="">
                <math optimize="false" disable-calc="false">
                    <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
                        <ml:function>
                            <ml:id
xml:space="preserve">Omg</ml:id>
                                <ml:boundVars>
                                    <ml:id
xml:space="preserve">N</ml:id>
                                        </ml:boundVars>
                                </ml:function>
                            <ml:apply>
                                <ml:mult/>
                                <ml:apply>
                                    <ml:mult/>

```



```

<ml:real>2</ml:real>
<ml:id
xml:space="preserve">π</ml:id>
</ml:apply>
<ml:apply>
  <ml:div/>
  <ml:id
xml:space="preserve">N</ml:id>
  <ml:real>60</ml:real>
</ml:apply>
</ml:apply>
</ml:define>
</math>
<rendering item-idref="15"/>
</region>
<region region-id="1239" left="78" top="494.25"
width="125.25" height="36" align-x="144" align-y="516" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
  <math optimize="false" disable-calc="false">
    <ml:define
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
      <ml:function>
        <ml:id
xml:space="preserve">Omg1</ml:id>
        <ml:boundVars>
          <ml:id
xml:space="preserve">N</ml:id>
        </ml:boundVars>
      </ml:function>
      <ml:apply>
        <ml:mult/>

```



```

        </ml:eval>
    </math>
    <rendering item-idref="18"/>
</region>
    <region region-id="689" left="234" top="561" width="449.25"
height="15.75" align-x="264" align-y="573.75" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
    <text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
        <p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Параметр Рейнольдса должен быть больше 10000</p>
    </text>
</region>
    <region region-id="686" left="78" top="597.75" width="113.25"
height="16.5" align-x="135.75" align-y="609.75" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#f00" tag="">
    <math optimize="false" disable-calc="false">
        <ml:eval placeholderMultiplicationStyle="default"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
            <ml:apply>
                <ml:id xml:space="preserve">Omg</ml:id>
                <ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>
            </ml:apply>
            <result xmlns="http://schemas.mathsoft.com/math30">
                <ml:real>209.43951023931956</ml:real>
            </result>
        </ml:eval>
    </math>
    <rendering item-idref="19"/>
</region>

```

```
<region region-id="688" left="234" top="597" width="411.75"
height="15.75" align-x="259.5" align-y="609.75" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Угловая скорость вращения вентилятора, рад/с</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1243" left="78" top="633.75" width="126.75"
height="16.5" align-x="149.25" align-y="645.75" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#f00" tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:eval placeholderMultiplicationStyle="default"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:apply>
```

```
<ml:id xml:space="preserve">Omg1</ml:id>
```

```
<ml:id xml:space="preserve">N1</ml:id>
```

```
</ml:apply>
```

```
<result xmlns="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:real>209.43951023931956</ml:real>
```

```
</result>
```

```
</ml:eval>
```

```
</math>
```

```
<rendering item-idref="20"/>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1244" left="234" top="633" width="411.75"
height="15.75" align-x="259.5" align-y="645.75" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

`<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit" tabs="inherit">Угловая скорость вращения доочистителя, рад/с</p>`

`</text>`

`</region>`

`<region region-id="660" left="0" top="673.5" width="6000" align-x="6000" align-y="682.5" show-border="false" show-highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="" height="74.25">`

`<area is-collapsed="false" name="" show-name="false" show-border="true" show-icon="true" show-timestamp="true" allow-expand="false" is-locked="false" timestamp="" top-lock-id="660" bottom-lock-id="661" bottom-tag="">`

`<region region-id="733" left="72" top="690.75" width="522" height="42.75" align-x="145.5" align-y="712.5" show-border="false" show-highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">`

`<math optimize="false" disable-calc="false">`

`<ml:define warning="WarnRedefinedBIUnit" xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">`

`<ml:function>`

`<ml:id`

`xml:space="preserve">g</ml:id>`

`<ml:boundVars>`

`<ml:id`

`xml:space="preserve">N</ml:id>`

`<ml:id`

`xml:space="preserve">U</ml:id>`

`<ml:id`

`xml:space="preserve">D</ml:id>`

`</ml:boundVars>`

`</ml:function>`

`<ml:apply>`

`<ml:id`

`xml:space="preserve">if</ml:id>`

<ml:sequence>

<ml:apply>

<ml:greaterThan/>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:id

xml:space="preserve">atan</ml:id>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:real>2</ml:real>

<ml:id xml:space="preserve"> $\pi$ </ml:id>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:div/>

<ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>

$\langle \text{ml:real} \rangle 60 \langle / \text{ml:real} \rangle$

$\langle / \text{ml:apply} \rangle$

$\langle / \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:div} / \rangle$

$\langle \text{ml:id xml:space} = \text{"preserve"} \rangle D \langle / \text{ml:id} \rangle$

$\langle \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:mult} / \rangle$

$\langle \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:mult} / \rangle$

$\langle \text{ml:real} \rangle 2 \langle / \text{ml:real} \rangle$

$\langle \text{ml:id xml:space} = \text{"preserve"} \rangle U \langle / \text{ml:id} \rangle$

$\langle / \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:apply} \rangle$

$\langle \text{ml:pow} / \rangle$

$\langle \text{ml:real} \rangle 2 \langle / \text{ml:real} \rangle$

$\langle \text{ml:real} \rangle 0.5 \langle / \text{ml:real} \rangle$

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:div/>

<ml:real>180</ml:real>

<ml:id

xml:space="preserve"> $\pi$ </ml:id>

</ml:apply>

</ml:apply>

<ml:real>45</ml:real>

</ml:apply>

<ml:real>45</ml:real>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:id

xml:space="preserve">atan</ml:id>

</ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:mult/>



<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:real>2</ml:real>

<ml:id xml:space="preserve"> $\pi$ </ml:id>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:div/>

<ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>

<ml:real>60</ml:real>

</ml:apply>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:div/>

<ml:id xml:space="preserve">D</ml:id>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:apply>

<ml:mult/>

<ml:real>2</ml:real>

<ml:id xml:space="preserve">U</ml:id>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:pow/>

<ml:real>2</ml:real>

<ml:real>0.5</ml:real>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:apply>

<ml:apply>

<ml:div/>

<ml:real>180</ml:real>

<ml:id

xml:space="preserve"> $\pi$ </ml:id>

</ml:apply>

</ml:apply>

</ml:sequence>

```

        </ml:apply>
    </ml:define>
</math>
    <rendering item-idref="21"/>
</region>
</area>
    <rendering item-idref="22"/>
</region>
    <region region-id="649" left="78" top="783" width="127.5"
height="16.5" align-x="150" align-y="795" show-border="false" show-
highlight="true" is-protected="true" z-order="0" background-color="#f00" tag="">
    <math optimize="false" disable-calc="false">
        <ml:eval placeholderMultiplicationStyle="default"
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
            <ml:apply>
                <ml:id xml:space="preserve">g</ml:id>
                <ml:sequence>
                    <ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>
                    <ml:id xml:space="preserve">U</ml:id>
                    <ml:id xml:space="preserve">D</ml:id>
                </ml:sequence>
            </ml:apply>
            <result xmlns="http://schemas.mathsoft.com/math30">
                <ml:real>44.634064081226704</ml:real>
            </result>
        </ml:eval>
    </math>
    <rendering item-idref="23"/>
</region>

```

```
<region region-id="685" left="234" top="782.25" width="427.5"
height="15.75" align-x="249" align-y="795" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit" margin-
right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-type="inherit"
tabs="inherit">Рекомендуемый угол закрутки вентилятора, град</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="875" left="0" top="831" width="6000" align-
x="6000" align-y="840" show-border="false" show-highlight="false" is-
protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="" height="182.25">
```

```
<area is-collapsed="false" name="" show-name="false" show-
border="true" show-icon="true" show-timestamp="true" allow-expand="false" is-
locked="false" timestamp="" top-lock-id="875" bottom-lock-id="876" bottom-
tag="">
```

```
<region region-id="1037" left="18" top="864" width="55.5"
height="16.5" align-x="48.75" align-y="876" show-border="false" show-
highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit" tag="">
```

```
<math optimize="false" disable-calc="false">
```

```
<ml:define
```

```
xmlns:ml="http://schemas.mathsoft.com/math30">
```

```
<ml:id
```

```
xml:space="preserve">Res</ml:id>
```

```
<ml:real>66</ml:real>
```

```
</ml:define>
```

```
</math>
```

```
<rendering item-idref="24"/>
```

```
</region>
```

```
<region region-id="1040" left="318" top="863.25"
width="146.25" height="15.75" align-x="335.25" align-y="876" show-border="false"
show-highlight="false" is-protected="true" z-order="0" background-color="inherit"
tag="">
```

```
<text use-page-width="false" push-down="false" lock-
width="true">
```

```
<p style="Normal" margin-left="inherit"
margin-right="inherit" text-indent="inherit" text-align="inherit" list-style-
type="inherit" tabs="inherit">порог ламинарности</p>
```

```
</text>
```

```
</region>
```



```

<ml:apply>
  <ml:pow/>
  <ml:id xml:space="preserve">nu</ml:id>
  <ml:real>2</ml:real>
</ml:apply>
</ml:apply>
<ml:apply>
<ml:mult/>
<ml:apply>
  <ml:mult/>
  <ml:id xml:space="preserve">ros</ml:id>
  <ml:apply>
    <ml:pow/>
    <ml:apply>
      <ml:id xml:space="preserve">Omg</ml:id>
      <ml:id xml:space="preserve">N</ml:id>
    </ml:apply>
    <ml:real>2</ml:real>
  </ml:apply>
</ml:apply>
</ml:apply>
<ml:id xml:space="preserve">D</ml:id>
</ml:apply>

```

## Додаток Б

## Оптимізація параметрів інтенсифікації процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном

Б.1. Дослідження процесу очищення запиленого повітряного потоку розробленим циклоном

## Б.1.1. визначення факторів

На підставі апріорної інформації встановлено, що на процес очищення впливають такі чинники:

- швидкість повітряного потоку в робочій зоні циклона  $V$ , м/с;
- кут нахилу лопатей завихрювача  $\alpha$ , град;
- частота обертання ротора електродвигуна  $\Omega$ , рад/с;
- ширина відкриття жалюзі  $b$ , мм;
- засміченість  $n$  повітряного потоку на вході в циклон, мг/м<sup>3</sup>;
- кількість дисків доочищувача,  $N$  шт.;
- відстань між дисками доочищувача  $h$ , мм.

Підставою для вибору даних факторів послужили попередньо проведені традиційні експерименти, результати яких виключили необхідність в психологічному експерименті [139]. Разом з тим, конструктивні параметри розробленого циклону  $N$ ,  $h$ ,  $b$  та  $\alpha$  швидкість і засміченість повітряного потоку на вході встановлені з умови забезпечення максимальної ефективності процесу очищення повітряного потоку на вібровідцентрових сепараторах. Варіювання ними при проведенні дослідів не провадилося. Тому, очевидно, фіксування цих чинників на відомих рівнях при проведенні дослідів і виключення їх з подальшого розгляду буде правомірним. В якості критерію оптимізації обраний коефіцієнт очищення  $\eta$ , %.

Для визначення оптимального співвідношення між іншими факторами: відстанню між дисками доочищувача, шириною відкриття жалюзі і кутом нахилу лопатей завихрювача, шириною щілини і радіусом заокруглення перегородки застосована методика планування експерименту [139].

### Б.1.2. Планування першого порядку. Рух в область оптимуму

Перед проведенням експерименту були призначені рівні варіювання факторів (табл.Б.1) і проведено їх кодування за рівнянням:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}; \quad (\text{Б.1})$$

де  $x_i$  – кодоване значення фактора, верхній рівень якого позначений +1, а нижній –1;

$X_i$ – натуральне значення фактора;

$X_{0i}$ – натуральне значення фактора на нульовому рівні;

$\varepsilon_i$  – натуральне значення інтервалу варіювання фактора.

Таблиця Б.1

Кодування значення факторів

Рівень і інтервал варіювання факторів	Фактори				
	Кут нахилу лопатей завихрювача $\alpha$ , град.	Частота обертання ротора $\Omega$ , рад/с.	Ширина відкриття жалюзі $b$ , мм.	Кількість дисків доочищувача $N$ , шт.	Відстань між дисками доочищувача $h$ , мм.
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
+1	30	157,1	20	9	1,5
0	20	104,7	15	6	1
-1	10	52,4	10	3	0,5
$\varepsilon$	10	52,4	5	3	0,5

Для знаходження оптимального поєднання виділених факторів проведений експеримент, що включає 16 дослідів, складових напіврепліки повного факторного експерименту типу  $2^5$ . Матриця планування експерименту і обчислені середні значення критерію оптимізації після трьох повторюваностей представлені в табл. Б.2.

Після реалізації експерименту і отримання значень критерію оптимізації вироблялося побудова математичної моделі.

Відтворюваність дослідів визначали за критерієм Кохрена:



$$G_{расч} = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0,05; f_1; f_2)}, \quad (\text{Б.2})$$

де  $S_{u \max}^2$  – максимальна дисперсія досліджу;

$\sum_{u=1}^N S_u^2$  – дисперсія експерименту,

$f_1$  – число ступенів свободи в точці дослідження,

$f_2$  – число ступенів свободи дослідження.

$G_{розрах} = 0,186/0,596 = 0,312 \leq G(0,05; 2; 16) = 0,318$ , тобто досліді відтворювані.

Таблиця Б.2

## Матриця планування експерименту

(Напіврепліки повного факторного експерименту типу  $2^5$ )

№ досліджу	Чинник					Критерій оптимізації			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}$
1	+	–	–	–	–	83,88	83,91	83,93	83,91
2	–	+	–	–	–	81,05	81,08	81,37	81,17
3	–	–	+	–	–	85,36	85,58	85,32	85,42
4	+	+	+	–	–	90,13	90,63	90,58	90,45
5	–	–	–	+	–	86,48	86,7	86,63	86,6
6	+	+	–	+	–	85,63	85,71	85,83	85,72
7	+	–	+	+	–	91,92	91,71	91,84	91,82
8	–	+	+	+	–	90,22	90,18	90,31	90,24
9	–	–	–	–	+	86,72	86,48	86,54	86,58
10	+	+	–	–	+	83,61	83,73	83,79	83,71
11	+	–	+	–	+	84,26	84,12	84,61	84,33
12	–	+	+	–	+	85,31	85,27	85,45	85,34
13	+	–	–	+	+	87,42	87,71	87,56	87,56
14	–	+	–	+	+	88,07	88,23	88,14	88,15
15	–	–	+	+	+	88,11	88,18	88,04	88,11
16	+	+	+	+	+	91,03	91,14	91,07	91,08

Розрахунок коефіцієнтів регресії здійснювали за такими рівняннями:

– коефіцієнт при вільному члені рівняння регресії:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{N}, \quad (\text{Б.3})$$

де  $\bar{Y}_u$  – значення критерію оптимізації, отриманого в  $u$  – м досліді;

$N$  – кількість досліджень;

– коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u}{N}, \quad (\text{Б.4})$$

де  $x_{iu}$  – значення факторів в  $u$  – м досліді;

– коефіцієнт при взаємодіях факторів:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u}{N}, \quad (\text{Б.5})$$

де  $x_{iu}, x_{ju}$  – значення двох факторів  $u$  - м досліді, при їх взаємодії.

Після розрахунків коефіцієнтів регресії лінійна модель представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} Y = & 86,8869 + 0,436x_1 + 0,096x_2 + 1,462x_3 + 1,773x_4 - 0,029x_5 + 0,03219x_1x_2 + \\ & + 0,6356x_1x_3 - 0,051x_1x_4 + 0,623x_1x_5 - 0,833x_2x_3 - 0,042x_2x_4 + \\ & + 0,117x_2x_5 - 0,191x_3x_4 - 1,104x_3x_5 - 0,094x_4x_5. \end{aligned} \quad (\text{Б.6})$$

Адекватність лінійної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера за рівнянням:

$$F = \frac{S_{LF}^2}{S_Y^2}, \quad (\text{Б.7})$$

де  $S_{LF}^2$  – дисперсія неадекватності математичної моделі;

$S_Y^2$  – дисперсія помилки досліді.

Дисперсію неадекватності математичної моделі визначали за рівнянням:

$$S_{LF}^2 = \frac{m \sum_{u=1}^N (\bar{Y} - \hat{Y}_u)^2}{N - (k + 1)}, \quad (\text{Б.8})$$

де  $m$  – число повторностей одного досліді;

$k$  – число факторів;

$\hat{Y}_u$  – значення критерію оптимізації, обчисленого за рівнянням регресії.

Дисперсію, що характеризує похибку дослідів, визначали за рівнянням:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{Y}_u)^2}{N(m-1)}, \quad (\text{Б.9})$$

де  $Y_{iu}$  – значення критерію оптимізації в паралельних дослідів.

Для зручності всі обчислення за оцінкою адекватності наведені в допоміжній табл. Б.3.

Таблиця Б.3

Допоміжна таблиця для розрахунку значення критерію Фішера

№ дослідів	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}$	$\sum_{i=1}^m (y_{iu} - \bar{Y})^2$	$\hat{Y}_u$	$(\bar{Y} - \hat{Y}_u)^2$
1	83,88	83,91	83,93	83,91	0,0013	83,91	$1,6 \cdot 10^{-7}$
2	81,05	81,08	81,37	81,17	0,0625	81,17	$1,6 \cdot 10^{-7}$
3	85,36	85,58	85,32	85,42	0,0392	85,42	$3,24 \cdot 10^{-6}$
4	90,13	90,63	90,58	90,45	0,1517	90,45	$3,6 \cdot 10^{-7}$
5	86,48	86,7	86,63	86,6	0,0253	86,6	$3,6 \cdot 10^{-7}$
6	85,63	85,71	85,83	85,72	0,0203	85,72	$4 \cdot 10^{-8}$
7	91,92	91,71	91,84	91,82	0,0225	91,82	$1,6 \cdot 10^{-7}$
8	90,22	90,18	90,31	90,24	0,0089	90,24	$1,6 \cdot 10^{-7}$
9	86,72	86,48	86,54	86,58	0,0312	86,58	$3,6 \cdot 10^{-7}$
10	83,61	83,73	83,79	83,71	0,0168	83,71	$4,84 \cdot 10^{-6}$
11	84,26	84,12	84,61	84,33	0,1274	84,33	$2,25 \cdot 10^{-6}$
12	85,31	85,27	85,45	85,34	0,0179	85,34	$1,6 \cdot 10^{-7}$
13	87,42	87,71	87,56	87,56	0,0421	87,56	$2,56 \cdot 10^{-6}$
14	88,07	88,23	88,14	88,15	0,0129	88,15	$1,6 \cdot 10^{-7}$
15	88,11	88,18	88,04	88,11	0,0098	88,11	$4 \cdot 10^{-8}$
16	91,03	91,14	91,07	91,08	0,0062	91,08	$1,96 \cdot 10^{-6}$

Обчислені за даними табл. Б.3, значення склали для  $S_{LF}^2 = 0,0000017$ ;  $S_y^2 = 0,02$ ;  $F_{расч} = 0,000058$ . Табличне значення критерію Фішера з числом ступенів свободи  $f_1 = N - k - 1 = 10$  и  $f_2 = N(m - 1) = 32$   $F_{табл} = 2,18$ . Як видно,  $F_{расч} < F_{табл}$ , тому гіпотеза про адекватність лінійної моделі приймається.

Значимість коефіцієнтів регресії перевірялася за допомогою побудови довірчого інтервалу. Коефіцієнт вважається значущим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу, що визначається за рівнянням:

$$\pm \Delta b_i = b_i - \beta_i = \pm t \cdot S_{b_i}, \quad (\text{Б.10})$$

Де  $t$  – табличне значення  $t$ – критерію при числі ступенів свободи  $f_2 = N(m - 1)$ ;

$S_{b_i}$  – квадратична помилка коефіцієнта регресії:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_v^2}{N}}. \quad (\text{Б.11})$$

Довірчий інтервал коефіцієнта регресії з 95%-ою вірогідністю для ступеня свободи  $f=32$  становить:

$$\pm \Delta b_i = \pm \Delta b_{i,j} = \pm 0,0705.$$

Після порівняння абсолютних значень коефіцієнтів регресії з абсолютною величиною їх довірчого інтервалу приходимо до висновку, що істотний вплив на коефіцієнт очищення надають не тільки лінійні ефекти, але і більшість їх взаємодій. У зв'язку з цим, гіпотезу адекватності перевіряли за другим критерієм - рівність нулю коефіцієнтів при квадратичних членах регресії (нуль-гіпотеза). Для цього були поставлені додаткові досліди в центрі експерименту, визначено середнє значення  $\bar{Y}_0$  критерію оптимізації в центрі експерименту і обчислена різниця  $b_0 - \bar{Y}_0$ , що є деякою характеристикою кривизни поверхні відгуку. Нуль гіпотеза приймається, якщо різниця  $b_0 - \bar{Y}_0$  не перевищує помилки експерименту. Значимість цієї відмінності перевіряли за критерієм Стьюдента ( $t$  - критерієм):

$$t_{\text{расч}} = \frac{(b_0 - \bar{Y}_0)\sqrt{N}}{\sqrt{S_v^2}}. \quad (\text{Б.12})$$

Потім  $t_{\text{розрах}}$  порівнювали з табличним значенням  $t$ -критерію, з числом свободи  $f$ , при якому визначена дисперсія  $\sqrt{S_v^2}$ . У нашому випадку 0,0705. Звідси випливає, що коефіцієнти при квадратичних членах помітно відрізняються від нуля, а досліджувана залежність не є лінійною. Розрахункове значення  $t_{\text{розрах}} = 19$  більше табличного, яке для 5 % -ного рівня значимості при числі ступенів свободи  $f = 32$  становить  $t_{\text{табл}} = 2,036$ . Тому відмінність  $b_0 - \bar{Y}_0$  значимо з 95%-ою вірогідністю.

На підставі викладеного, приходимо до висновку, що для опису результатів

експерименту лінійна модель не може бути прийнята. Тому, в подальших дослідженнях при вивченні та описі області оптимуму необхідно використовувати планування другого порядку, що дозволяє отримати уявлення про функції відгуку за допомогою полінома другого ступеня.

Незважаючи на те, що лінійна модель для даної залежності виявилася неадекватною, було проведено круте сходження по поверхні відгуку. При цьому передбачалося, що при вдалому русі можна встановити більш сприятливі умови для проведення наступної стадії експерименту. Результати крутого сходження приведені в табл. Б.4., Б.5.

Таблиця Б.4

## Матриця крутого сходження

Показник	Фактори і їх розмірність					
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
Коефіцієнти регресії лінійних членів $b_i$	0,436	0,096	1,462	1,773	-0,029	$\max/b_i \varepsilon_i = 7,31$ $K_1=6,291$ $K_2=13,853$
Відтворення $b_i \varepsilon_i$	2,18	4,8	7,31	3,546	-0,0145	$K_3=21,234$ $K_4=10,234$
Крок (відповідний $x_3$ )	10	52,4	5	3	-0,5	$K_5=-0,042$

Таблиця Б.5

## Результат дослідження крутого сходження

Округлений крок		5	50	5	2	-0,5	Значення критерію оптимізації $Y, \%$	$Y_{\text{досліду}} = 93,58$ $X_1=20$ $X_2=100$ $X_3=15$ $X_4=6$ $X_5=1$
Номер досліджу	1	15	50	20	8	0,5	93,45	
	2	20	100	15	6	1	93,9	
	3	25	150	10	4	1,5	93,4	

Для фактора з найбільшою відтворенням  $|b_i E_i|$  був обраний інтервал варіювання для руху по градієнту. Інтервали всіх інших факторів отримували множенням величини обраного інтервалу на коефіцієнт пропорційності: був обраний інтервал варіювання для руху по градієнту. Інтервали всіх інших факторів отримували множенням величини обраного інтервалу на коефіцієнт пропорційності:

$$K_i = \frac{|b_i E_i|}{\max |b_i E_i|}. \quad (\text{Б.13})$$

Для другого чинника  $x_2$  був обраний одиничний крок рівний 50 рад/с. Для отримання кроків інших факторів, їхній колективний витвір  $b_i \varepsilon_i$  зменшували в стільки разів, у скільки зменшувалася  $b_i \varepsilon_i$  для другого фактора при розподілі його на одиничний крок. Для зручності проведення дослідів крутого сходження, значення кроків факторів округляли в сторону зменшення або збільшення.

Результати руху по градієнту дають підстави припустити, що обраний раніше центр експерименту знаходиться поблизу області оптимуму, оскільки найкращі результати ( $Y=93,58\%$  при  $X_1=10^\circ$ ;  $X_2=50$  рад/с;  $X_3=5$  мм;  $X_4=3$  шт;  $X_5=0,5$  мм) отримані вже після другого досліду.

Б.1.3. Опис області оптимуму рівнянням регресії другого порядку. Опис області оптимуму проводили виходячи з результатів крутого сходження. За центр експерименту прийняті рівні факторів, при яких отримані найкращі показники критерію оптимізації. Кодовані значення факторів і рівні їх варіювання наведені в табл. Б.6.

Для опису області оптимуму математичною моделлю застосований центральний композиційний уніформ – ротатабельний план другого порядку. При цьому дані для побудови матриці плану дорівнювали: ядро плану  $2^k=16$ ; число зіркових точок  $2k^*=10$ ; число нульових точок  $n_0=6$ ; загальне число дослідів  $N=32$ ; величина зіркового плеча  $L=2,000$ .

Після визначення загального числа точок побудована робоча матриця у вигляді напіврепліки від повного факторного експерименту типу  $2^5$ .

Умови і результати дослідів центрального композиційного ротатабельного плану другого порядку наведені в табл. Б.7.

Реалізація матриці плану другого порядку проводилася з триразовою повторністю і цифри в графіках  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  є показниками ефективності процесу очищення в паралельних дослідах.

Таблиця Б.6

Чинники, інтервали і рівні їх варіювання в експериментах по опису області оптимуму

Рівень і інтервал варіювання факторів	Чинники				
	Кут нахилу лопатей завихрювача $\alpha$ , град.	Частота обертання ротора $\Omega$ , рад/с.	Ширина відкриття жалюзі $b$ , мм.	кількість дисків доочищувача $N$ , шт.	Відстань між дисками доочищувача $h$ , мм.
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
+2	30	250	25	10	2,5
+1	25	200	20	8	2
0	20	150	15	6	1,5
-1	15	100	10	4	1
-2	5	50	5	2	0,5
$\varepsilon$	5	50	5	2	0,5

Таблиця Б.7

Матриця планування експериментів (центральний композиційний уніформ - ротатабельний план другого порядку)

№	Чинники і їх взаємодії																				Критерій оптимізації			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_1x_5$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_2x_5$	$x_3x_4$	$x_3x_5$	$x_4x_5$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_4^2$	$x_5^2$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	90,25	90,47	90,63	90,45
2	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	89,1	89,33	89,08	89,17
3	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	89,83	89,58	89,49	89,63
4	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	90,02	90,31	90,35	90,23
5	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	89,39	89,68	89,71	89,59
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	90,14	90,35	90,22	90,24
7	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	90,7	90,83	90,56	90,7
8	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	89,07	89,45	89,41	89,31
9	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	89,59	89,87	89,82	89,76
10	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	90,12	90,14	89,83	90,03
11	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	90,54	90,71	90,62	90,62
12	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	89,55	89,27	89,42	89,41
13	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	90,49	90,37	90,61	90,49
14	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	89,33	89,17	89,36	89,29
15	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	90,07	89,88	89,74	89,9
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	90,13	89,81	89,92	89,96



Продовження табл. Б.7

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
17	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	0	0	89,78	90,03	89,83	89,88
18	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	0	0	90,01	89,95	90,12	90,03
19	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	0	90,03	90,08	90,21	90,11
20	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	0	90,18	90,37	90,24	90,26
21	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	90,28	90,07	90,33	90,23
22	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	0	90,27	90,22	90,44	90,31
23	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	89,91	90,17	90,22	90,1
24	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	0	90,38	90,16	90,32	90,29
25	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	89,87	89,81	90,03	89,9
26	0	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2 <sup>2</sup>	90,48	90,67	90,36	90,5
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,51	90,66	90,38	90,52
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,74	90,33	90,61	90,56
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,31	90,64	90,57	90,51
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,4	90,62	90,56	90,53
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,43	90,57	90,52	90,52
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90,7	90,43	90,56	90,56

Обчислені середні значення критерію оптимізації наведені в графі  $\bar{Y}$ .

Після реалізації експерименту і отримання значень критерію оптимізації проводили обробку отриманих даних та побудова математичної моделі другого порядку.

Коефіцієнти регресії вираховували за такими формулами:

– коефіцієнт при вільному члені рівняння регресії:

$$b_0 = a_1 \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u - a_2 \sum_1^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u ; \quad (\text{Б.13})$$

– коефіцієнт при лінійних членах рівняння:

$$b_i = a_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u ; \quad (\text{Б.14})$$

– коефіцієнт регресії при взаємодіях факторів:

$$b_{ij} = a_4 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u ; \quad (\text{Б.15})$$

– коефіцієнт при квадратичних членах рівняння:

$$b_{ii} = a_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u + a_6 \sum_1^k x_{iu}^2 \bar{Y}_u - a_7 \sum_{u=1}^N \bar{Y}_u , \quad (\text{Б.16})$$

де  $a_1 = 0,1591$ ;  $a_2 = 0,0341$ ;  $a_3 = 0,0417$ ;  $a_4 = 0,0625$ ;  $a_5 = 0,0312$ ;  $a_6 = 0,0028$ ;  $a_7 = 0,0341$  [139].

Математична модель процесу очищення повітряного потоку циклоном, побудована за значеннями коефіцієнтів регресії, має вигляд:

$$\begin{aligned} Y = & 90,802 + 0,2902x_1 - 0,01334x_2 + 0,0375x_3 + 0,0234x_4 + 0,0559x_5 - 0,00632x_1x_2 - \\ & - 0,00885x_1x_3 - 0,038x_1x_4 - 0,07458x_1x_5 - 0,02402x_2x_3 - 0,0164x_2x_4 - \\ & - 0,0417x_2x_5 - 0,0139x_3x_4 - 0,0063x_3x_5 - 0,0341x_4x_5 - \\ & - 0,2504x_1^2 - 0,19226x_2^2 - 0,1708x_3^2 - 0,18973x_4^2 - 0,1885x_5^2. \end{aligned} \quad (\text{Б.17})$$

Для перевірки гіпотези про адекватність моделі другого порядку проведено статистичний аналіз рівняння регресії (Б.17).

Адекватність моделі другого порядку перевіряли за допомогою критерію Фішера. За експериментів в центрі плану визначали залишкову суму квадратів, пов'язану з дисперсією помилки досліду:

$$SS_E = \sum_{u=1}^{n_0} (Y_{0u} - \bar{Y}_u)^2, \quad (\text{Б.18})$$

при ступенях свободи  $f_E = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$ .

Розділення суми  $SS_E$  на  $f_E$  дає дисперсію дослідів.

Залишкова сума квадратів  $SS_R$ , пов'язана із залишковою дисперсією, дорівнює:

$$SS_R = \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2. \quad (\text{Б.19})$$

Сума квадратів, пов'язана з дисперсією неадекватності, дорівнює [16]:

$$SS_{LF} = SS_R - SS_E, \quad (\text{Б.20})$$

$$\text{з числом ступенів свободи } f_{LF} = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1) = 6. \quad (\text{Б.21})$$

При перевірці адекватності представлення результатів експерименту поліномом другого ступеня використовували F-критерій Фішера, який вираховували за формулою:

$$F = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}} : \frac{SS_E}{f_E}. \quad (\text{Б.22})$$

Для прийняття гіпотези адекватності необхідно, щоб розрахункове значення F-критерію було менше табличного з прийнятим рівнем імовірності.

За результатами табл.Б.7 сума квадратів  $SS_R=2,1066$ ; сума квадратів  $SS_E=1,3162$  при  $f_E=5$ ; сума квадратів  $SS_{LF}=0,081023$  при  $f_{LF}=6$ .

Табличне значення критерію Фішера при 5% -му рівні значущості одно 4,95. Так як,  $F_{расч}=0,24 < F_{табл}=4,95$ , гіпотезу про адекватність опису рівнянням (Б.17) результатів експерименту можна вважати вірною з 95%-ою вірогідністю.

Розрахунок довірчих інтервалів проводили по (Б.9). Розрахунок показав, що більшість коефіцієнтів рівняння можна вважати значущими з 95 %-ою вірогідністю.

Для використання (Б.17) в якості розрахункової формули і інтерпретації результатів дослідів вироблено його розкодування за формулами:

- при перетворенні лінійних членів рівняння:

$$b_i x_i = \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_i - \frac{b_i}{\varepsilon_i} X_{0i}, \quad (\text{Б.23})$$

- при перетворенні членів рівняння, що містять взаємодії:

$$b_{ij} x_i x_j = \frac{b_{ij}}{\varepsilon_i \varepsilon_j} (X_i X_j - X_i X_{0j} - X_j X_{0i} + X_{0i} X_{0j}), \quad (\text{Б.24})$$

- при перетворенні квадратних членів рівняння:

$$b_{ii} x_i^2 = \frac{b_{ii}}{\varepsilon_i^2} (X_i^2 - 2X_i X_{0i} + X_{0i}^2). \quad (\text{Б.25})$$

Після перетворення отримано наступне рівняння:

$$\begin{aligned} Y = & 79,663 + 0,515\alpha + 0,026\Omega + 0,246b + 0,685N + 3,463h - 0,000025 \alpha\Omega - \\ & - 0,00035ab - 0,00038\alpha N - 0,298ah - 0,00016N\Omega - 0,00017\Omega h - 0,0014Nb - \\ & 0,0025bh - 0,0341Nh - 0,01002\alpha^2 - 0,000077\Omega^2 - 0,0068b^2 - \\ & - 0,0474N^2 - 0,754h^2. \end{aligned} \quad (\text{Б.26})$$

Вираз (Б.26) в розкодованому вигляді дозволяє визначати розрахунковим шляхом ефективність процесу очищення при виборі значень розглянутих факторів, що лежать в області експерименту:  $\alpha$ , град.;  $\Omega$ , рад/с.;  $b$ , мм.;  $N$ , шт.;  $h$ , мм.

Розрахункові дані, отримані за допомогою (Б.26), добре узгоджуються з експериментальними. Так, наприклад, для досвіду, проведеного при  $\alpha = 20^\circ$  град.,  $\Omega = 100$  рад/с.,  $b = 15$  мм,  $N = 6$  шт.,  $h = 1$  мм по (Б.26) знайшли, що коефіцієнт очищення повинен бути 90,46%. В результаті експерименту при даному значенні факторів отриманий коефіцієнт очищення 90,457%.

Таблиця Б.8

Допоміжна таблиця для розрахунку значення критерію Фішера

№ досліду	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$\bar{Y}$	$\sum_{i=1}^m (Y_{iu} - \bar{Y})^2$	$\hat{Y}_u$	$(\bar{Y} - \hat{Y}_u)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	90,25	90,47	90,63	90,45	0,0728	90,07	0,144
2	89,1	89,33	89,08	89,17	0,0386	89,22	0,0025
3	89,83	90,08	89,49	89,63	0,0621	89,49	0,0196

4	90,02	90,37	90,35	90,23	0,0649	90,01	0,0484
5	89,39	89,68	89,71	89,59	0,0625	89,49	0,01
6	90,14	90,35	90,22	90,24	0,0225	90,06	0,0324
7	90,7	90,83	90,56	90,7	0,0365	90,33	0,1369
8	89,07	89,45	89,41	89,31	0,0872	89,36	0,0025
9	89,59	89,87	89,82	89,76	0,0446	89,73	0,0009
10	90,12	90,14	89,83	90,03	0,0602	89,92	0,0121
11	90,54	90,71	90,62	90,62	0,0145	90,32	0,09
12	89,55	89,27	89,42	89,41	0,0393	89,54	0,0169
13	90,49	90,37	90,61	90,49	0,0288	90,23	0,0676
14	89,33	89,17	89,36	89,29	0,0209	89,46	0,0289
15	90,07	89,88	89,74	89,9	0,0549	89,88	0,0004
16	90,13	89,81	89,92	89,96	0,0449	89,85	0,0121
17	89,78	90,03	89,83	89,88	0,035	89,22	0,4356
18	90,01	89,95	90,12	90,03	0,0149	90,38	0,1225
19	90,03	90,08	90,21	90,11	0,0173	90,3	0,0361
20	90,18	90,37	90,24	90,26	0,0189	89,77	0,2401
21	90,28	90,07	90,33	90,23	0,0381	90,04	0,0361
22	90,27	90,22	90,44	90,31	0,0266	90,19	0,0144
23	89,91	90,17	90,22	90,1	0,0554	90	0,01
24	90,38	90,16	90,32	90,29	0,0259	90,09	0,04
25	89,87	89,81	90,03	89,9	0,0259	89,94	0,016
26	90,48	90,67	90,36	90,5	0,489	90,16	0,1156
27	90,51	90,66	90,38	90,52	0,0393	90,8	0,0784
28	90,74	90,33	90,61	90,56	0,0878	90,8	0,0576
29	90,31	90,64	90,57	90,51	0,0605	90,8	0,0841
30	90,4	90,62	90,56	90,53	0,0259	90,8	0,0729
31	90,43	90,57	90,52	90,52	0,0041	90,8	0,0784
32	90,7	90,43	90,56	90,56	0,0365	90,8	0,0576

Б.1.4. Визначення оптимальних значень досліджуваних факторів

Аналіз отриманої математичної моделі і визначення оптимальних значень досліджуваних факторів проводили методом двовимірних перерізів поверхні відгуку, описуваної (Б.17). Для полегшення розрахунків аналіз проводили з закодованими значеннями факторів.

Побудова двовимірних перерізів функції відгуку виконували в такій послідовності. В отриману раніше модель (Б.17) підставили закодовані значення всіх факторів, крім досліджуваних двох. Далі, в отриманому виразі визначили центр поверхні відгуку, і провели канонічне перетворення моделі другого порядку. Після канонічного перетворення, визначивши тип поверхні відгуку в перерізі, переходили до графічно-аналітичного аналізу отриманого виразу.

Для отримання двовимірного перетину поверхні, що характеризує коефіцієнт очищення розробленого циклону в залежності від кута нахилу лопатей активного ротора ( $x_1$ ) і частоти обертів валу електродвигуна ( $x_2$ ), підставляємо значення  $x_3=0$ ;  $x_4=0$ ;  $x_5=0$  в (Б.17). В результаті маємо:

$$Y = 90,802 + 0,02902x_1 + 0,01334x_2 - 0,00632x_1x_2 - 0,2504x_1^2 - 0,19226x_2^2. \quad (4.3)$$

Визначаємо координати центру поверхні диференціюванням (4.3) і рішенням системи рівнянь:

$$\frac{dy}{dx_1} = 0,29902 - 0,00632 \cdot x_1 - 0,5008 = 0$$

$$\frac{dy}{dx_2} = 0,01334 - 0,00632 \cdot x_2 - 0,385 = 0$$

(4.4)

Після рішення системи (4.4) визначені координати центру поверхні відгуку:  $x_{1S} = 0,5792$ ;  $x_{2S} = 0,0252$ . Підставляючи їх в (4.3) отримали значення коефіцієнта процесу очищення в центрі поверхні –  $Y_s = 90,801\%$ .

Для канонічного перетворення (4.3) вирішуємо характеристичне рівняння:

$$B^2 + 0,37205B + 0,02327961 = 0. \quad (4.5)$$

Своїм коренем даного характеристичного рівняння будуть:  $B_{11} = -0,12051$ ,  $B_{22} = -0,0629$ , а саме рівняння в канонічній формі:

$$Y - 90,891 =$$

$$Y - 69,873 = -0,0884X_1^2 - 0,0384X_2^2. \quad (4.6)$$

Кут повороту осей координат в центрі поверхні відгуку для нашого випадку дорівнює:

$$\operatorname{tg} 2\alpha \frac{-0,0481268}{-0,2504 - (-0,1922)} = -0,109; \quad \alpha = 3^\circ 11'. \quad (Б.31)$$

Підставляючи різні значення коефіцієнта очищення в (Б.27), отримуємо рівняння відповідних контурних кривих – еліпсів, в сукупності становлять ціле сімейство пов'язаних еліпсів (ліній рівного значення коефіцієнта очищення). Результати розрахунків представлені на рис. Б.1.

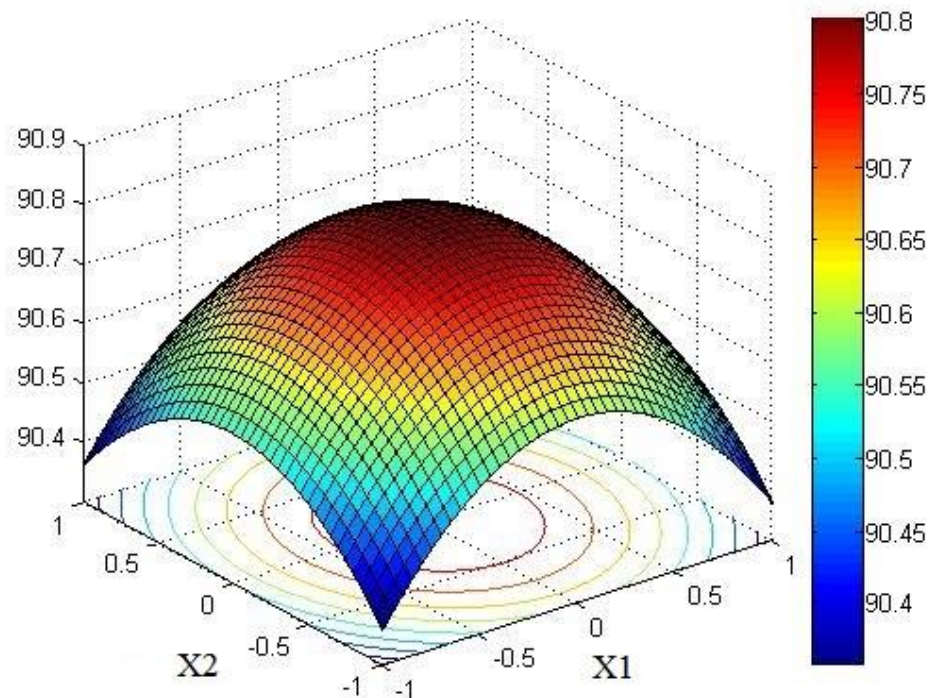


Рис. Б.1. Поверхня відгуку,  $x_3=0$ ;  $x_4=0$ ;  $x_5=0$

З рис. Б.1 слід, що максимальне значення коефіцієнта очищення в перерізі поверхні відгуку дорівнює 90,8 % і має місце при частоті обертання ротора  $\Omega=150$  рад/с і кутом нахилу лопатей завихрювача. На підставі рис. Б.1 можна зробити висновок, що область оптимуму знаходиться в межах:  $\alpha = 17\dots 23^\circ$  і  $\Omega=125\dots 175$  рад/с.

Аналогічно проводимо розрахунки для факторів: ширини відкриття жалюзі ( $x_3$ ) і кількості дисків доочищувача ( $x_5$ ).

Для рівняння регресії (Б.17) щодо факторів: ширини відкриття жалюзі ( $x_3$ ) і відстань між дисками доочищувача ( $x_5$ ), інші чинники фіксувалися на нульовому рівні. З аналогічних розрахунками отримали:  $X_{3S} = -0,1071$ ;  $X_{5S} = -0,1464$ ;  $Y_s = 90,796 \%$ ;  $\alpha = 9^{\circ}8'$ . Підрахунок коефіцієнтів канонічного рівняння показав, що  $B_{33} = 0,1708$ ;  $B_{55} = 0,1885$ . Рівняння в канонічному вигляді має вигляд:

$$Y - 90,796 = -0,1708 x_3^2 - 0,1885 x_5^2 \quad (\text{Б.32})$$

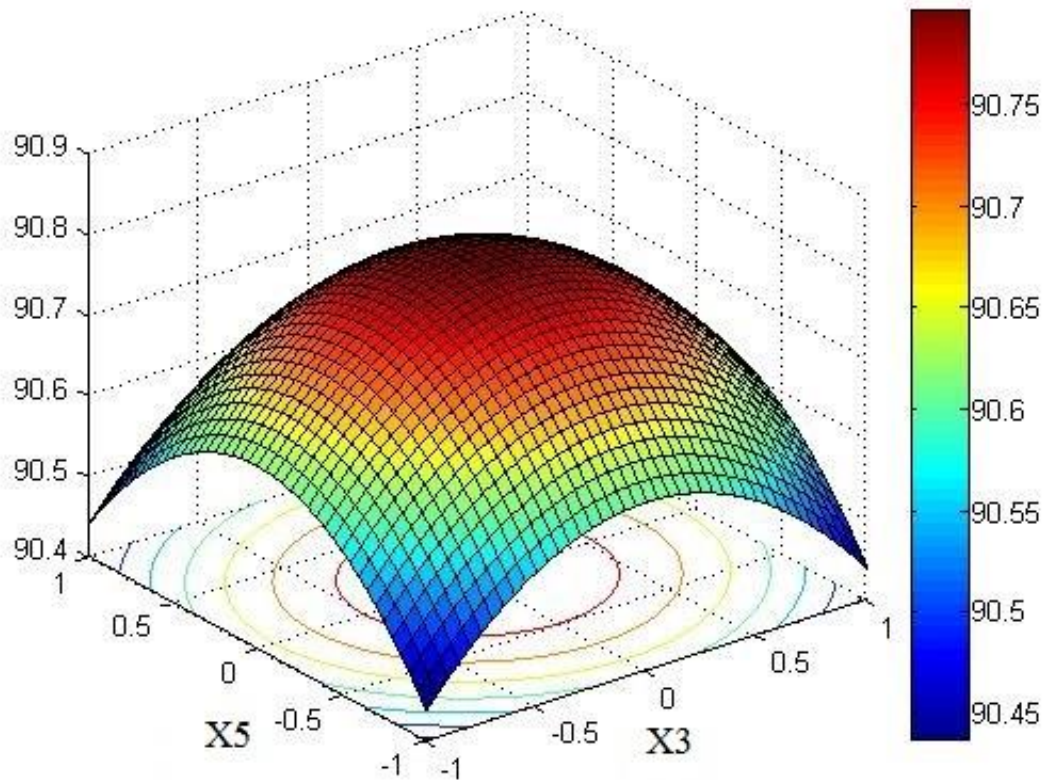


Рис. Б.2. Поверхня відгуку,  $x_1=0$ ;  $x_2=0$ ;  $x_4=0$

Після підстановки в (Б.17) різних значень критерію оптимізації отримали рівняння другого ступеня в стандартній формі, за допомогою яких побудована система контурних кривих, що характеризують коефіцієнт очищення при різних значеннях досліджуваних факторів: ширини відкриття жалюзі ( $x_3$ ) і кількістю дисків доочищувача ( $x_4$ ) (рис. Б.3).



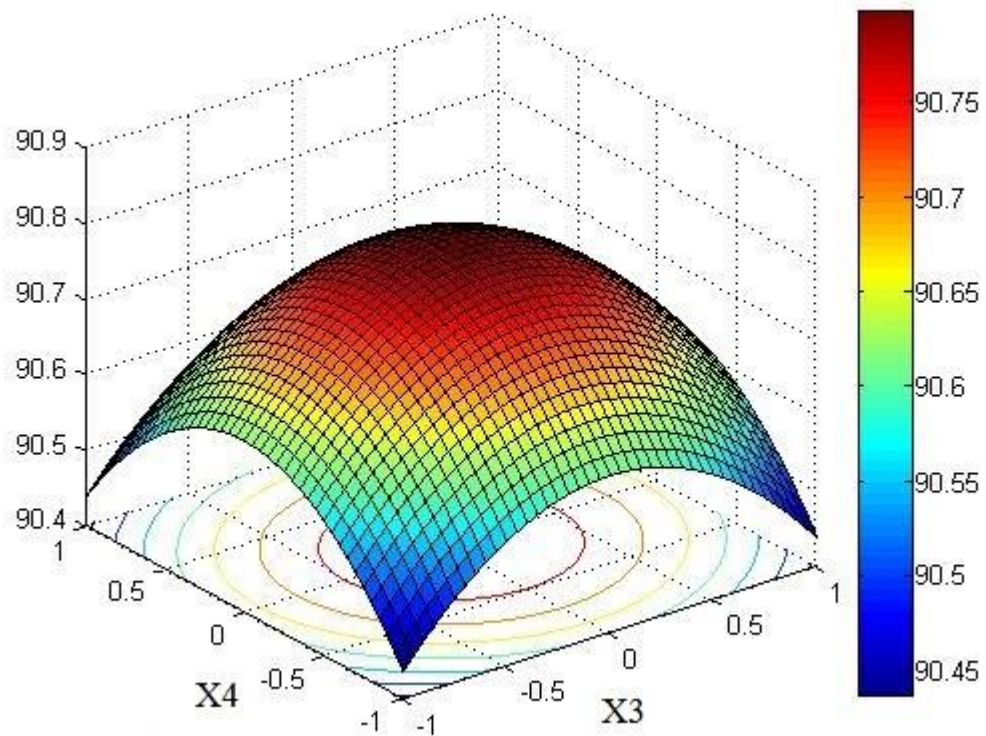


Рис. Б.3. Поверхня відгуку,  $x_1=0$ ;  $x_2=0$ ;  $x_5=0$

З аналогічних розрахунками отримали:  $X_{3s} = -0,1074$ ;  $X_{4s} = -0,0577$ ;  $Y_s = 90,799\%$ ;  $\alpha = -18^\circ 14'$ . Підрахунок коефіцієнтів канонічного рівняння показав, що  $B_{33} = 0,1708$ ;  $B_{44} = 0,18973$ . Рівняння в канонічному вигляді має вигляд:

$$Y - 90,799 = -0,1708 x_3^2 - 0,18973 x_4^2 \quad (\text{Б.33})$$

При розгляді перетину відгуку видно, що спільне взаємодія факторів  $x_3$  і  $x_4$  в області експерименту має екстремум в точці  $Y - 90,799\%$  при значенні факторів відповідно:  $N=6$  шт. і  $b=5$  мм. Причому оптимальні значення описуваних факторів знаходяться в межах: при ширині відкриття жалюзі  $b=12\dots 18$  мм. і кількості дисків доочишувача  $N=5\dots 7$  шт.

## Дослідження на екстремум за загальним рівнянням регресії в Mathcad

$\alpha := 20$      $\Omega := 150$      $b := 15$      $h := 1.5$      $n := 6$     <= початкові умови

Given

$$\eta(\alpha, \Omega, b, h, n) := \left[ \begin{array}{l} 79.663 + 0.515 \cdot \alpha + 0.026 \cdot \Omega + 0.246 \cdot b + 0.685 \cdot n + 3.463 \cdot h \dots \\ + (-1) \cdot \left( \begin{array}{l} 0.000025 \cdot \alpha \cdot b + 0.00038 \cdot \alpha \cdot n + 0.298 \cdot \alpha \cdot h + 0.00016 \cdot n \cdot \Omega \dots \\ + 0.00017 \cdot \Omega \cdot h + 0.0014 \cdot n \cdot b + 0.0025 \cdot b \cdot h + 0.0341 \cdot n \cdot h \dots \\ + 0.01002 \cdot \alpha^2 + 0.000077 \cdot \Omega^2 + 0.0068 \cdot b^2 + 0.047 \cdot n^2 + 0.754 \cdot h^2 \end{array} \right) \end{array} \right]$$

$$17 \leq \alpha \leq 22$$

$$125 \leq \Omega \leq 175$$

$$13 \leq b \leq 18$$

$$1.3 \leq h \leq 1.7$$

$$5 \leq n \leq 7$$

$V := \text{Maximize}(\eta, \alpha, \Omega, b, h, n)$

$$V^T = (17 \quad 160.937 \quad 17.178 \quad 1.3 \quad 6.217)$$

$$\alpha = 17$$

$$\Omega = 160.9$$

$$b = 17.2$$

$$h = 1.3$$

$$n = 6.2$$

$$\eta(17, 160.937, 17.178, 1.3, 6.217) = 88.291$$

## Додаток В

Програмне забезпечення для досліджень ефективності очищення  
запиленого повітряного потоку

Для досліджень ефективності очищення ПП від частинок дисперсної фази використано розроблену програму в пакеті «Mathcad». Розроблена комп'ютерна програма передбачає частину с вихідними конструктивно-технологічними параметрами процесу очищення ПП (рис. В.1).

Програма містить всі необхідні алгоритми для визначення коефіцієнта очищення і має доступний інтерфейс з вкладками (рис. В.2).

Далі програма визначала раціональні конструктивно-технологічні параметри розробленого РЦ та коефіцієнти очищення запиленого ПП (рис. В.3).

<b>U := 6</b>	<i>Скорость воздуха на входе, м/с</i>
<b>D := 0.08</b>	<i>Диаметр камеры, м</i>
<b>L := 0.1</b>	<i>Длина камеры, м</i>
<b>l := 0.08</b>	<i>Ширина доочистителя, м</i>
<b>d := 0.02</b>	<i>Диаметр центрального отверстия доочистителя, м</i>
<b>N := 1000</b>	<i>Число оборотов вентилятора, 1/мин</i>
<b>N1 := 2000</b>	<i>Число оборотов доочистителя, 1/мин</i>
<b>ros := 1200</b>	<i>Плотность частиц, кг/куб.м</i>
<hr/>	
<b>Re = <math>3.2 \times 10^4</math></b>	<i>Параметр Рейнольдса должен быть больше 10000</i>
<b>Omg(N) = 104.72</b>	<i>Угловая скорость вращения вентилятора, рад/с</i>
<b>Omg1(N1) = 209.44</b>	<i>Угловая скорость вращения доочистителя, рад/с</i>
<hr/>	
<b>g(N, U, D) = 26.273</b>	<i>Рекомендуемый угол закрутки вентилятора, град</i>
<b>g(N, U, D) = 44.634</b>	

Рисунок В.1 – Вихідні та розрахункові параметри для дослідження ефективності процесу очищення запиленого ПП

$$d_{lam}(N) := 2 \left( 9 \cdot Res \cdot \frac{r_o \cdot \nu^2}{r_{os} \cdot \Omega_{mg}(N)^2 \cdot D} \right)^{0.33} \cdot 10^6$$

Рисунок В.2 – Фрагмент алгоритму програми «Mathcad»

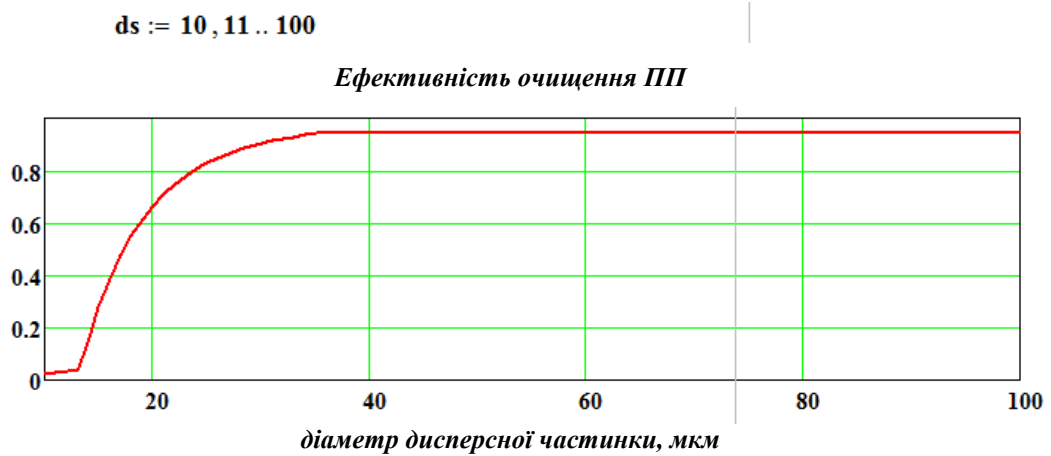


Рисунок В.3 – Отримана залежність ефективності процесу очищення запиленого ПП від розмірів частинок дисперсної фази та заданих конструктивних параметрів розробленого РЦ

Додаток Д. Акти випробування та впровадження результатів досліджень

Міністерство аграрної політики та продовольства України



Державна наукова установа  
«Український науково-дослідний інститут прогнозування та  
випробування техніки і технологій для сільськогосподарського  
виробництва імені Леоніда Погорілого»  
(УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)

Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Випробування з метою достовірного висвітлення споживчих характеристик та сприяння  
реалізації сільськогосподарської техніки (Focus-test)

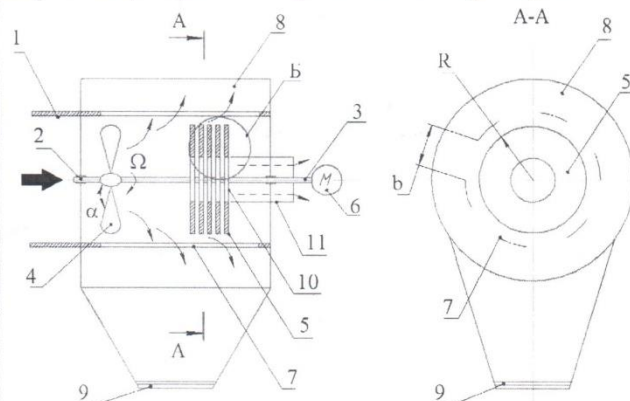
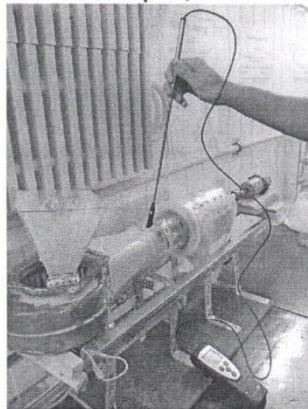


ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор ХФ УкрНДІПВТ  
ім. Л. Погорілого  
С. А. Лебедєв  
«15» липня 2019 р.

ПРОТОКОЛ № 05-04Ф-2019 від 15 липня 2019 року

## ЦИКЛОН З БАГАТОДИСКОВИМ ДООЧИСНИКОМ

Визначення ефективності очищення запиленого повітряного потоку в  
аспіраційних системах пересувних зернових сепараторів



Для очищення запиленого повітряного потоку на пересувних зернових сепараторах встановлено пилоосаджувальні камери, жалюзійно-енергійні пиловловлювачі та фільтрувальні рукави.

Для підвищення ефективності очищення запиленого повітряного потоку та забезпечення нормованої запиленості робочої зони сепараторів запропоновано використання ротаційного циклону з доочисником.

Ротаційний циклон включає в себе циліндричний корпус 1 з отворами 7, в якому на опорах 2 встановлений вал 3 з завихрювачем 4 та дисковим доочищувачем 5, який обертається

61040, м. Харків, вул. Велика Панасівська (Котлова), 236

Телефон/факс: (057) 712-90-72

E-mail: hfukrndipvt@gmail.com

Результати випробувань розповсюджуються лише на випробуваний зразок



за допомогою електродвигуна 6. Отвори 7 в корпусі 1 відділяють робочу зону і пилоосаджувальну камеру 8. В нижній частині пилоосаджувальної камери 8 встановлено шлюзовий затвор 9. Багатодисковий доочисник 5 призначений для додаткового відділення від повітряного потоку дрібнодисперсних часток, що залишились. Доочисник складається із набору дисків, що встановлено на відстані один від одного та мають в центральній частині отвір 10. Очищений повітряний потік виходить через патрубок 11.

**Виробник продукції** – ХНТУСГ ім. П. Василенка, 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

#### Призначення виробу

Очищення запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу.

Обладнання застосовується на елеваторах, млинах, самопересувних зерноочисних машинах і на інших зернопереробних підприємствах різної форми власності.

Вид кліматичного виконання «У», категорія виробу 1 згідно з ГОСТ 15150.

Тип конструктивного виконання обладнання – елемент аспіраційної системи пересувних зернових сепараторів ОВС-25, СВС-25.

Місце випробування: навчальне-дослідне поле ХНТУСГ імені Петра Василенка (Харківська обл., Харківський р-н, с. Першотравневе); ТОВ «Маковій» (Харківська обл., м. Первомайськ).

**Таблиця 1 – Умови проведення випробувань**

№ п/п	Показник	Значення показники
1	Швидкість повітряного потоку, м/с	6 – 13
2	Продуктивність (витрата) повітря, м <sup>3</sup> /с	0,66 – 1,43
3	Гідравлічний опір, Па	130 – 180

**Методи випробувань.** Випробування ротаційного циклону з обґрунтованими параметрами проводились шляхом очищення запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу зернових сумішей з наступними характеристиками: дисперсність частинок 1 – 100 мкм; концентрація дисперсних частинок 1 – 25 г/м<sup>3</sup>. Ефективність очищення запиленого повітряного потоку визначали за рівнянням:

$$\eta = \frac{M_{\text{вловлено}}}{M_{\text{загальна}}} \cdot 100 \%,$$

де:  $M_{\text{вловлено}}$  – маса вловленої пилу розробленим циклоном;  $M_{\text{загальна}}$  – маса пилу, який знаходився в повітряному потоці на вході.

Для визначення концентрації дисперсного пилу в повітрі робочої зони пересувних зернових сепараторів використана методика ГОСТ 12.1.005-88, яка передбачає використання аспіратора моделі 822 з аналітичними фільтрами АФА-ВП-10.

Запиленість робочої зони пересувних зернових сепараторів визначали за виразом:

$$C = \frac{M_{\text{пилу}} \cdot 10^3}{V},$$

де  $C$  – запиленість повітря, мг/м<sup>3</sup>;  $M_{\text{пилу}}$  – вага пилу, яка вловлена в аспіраційній системі сепараторів, мг;  $V$  – об'єм повітря, який пройшов через фільтр, л.

**Висновки.** Ефективність очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном складає 87,5...92,6% при продуктивності сепаратора 28,4...28,6 т/год. Запиленість повітря обслуговуючої зони сепараторів складає 2,78...3,71 мг/м<sup>3</sup>.

61040, м. Харків, вул. Велика Панасівська (Котлова), 236

Телефон/факс: (057) 712-90-72

E-mail: hfukrndipvt@gmail.com

**Результати випробувань розповсюджуються лише на випробуваний зразок**

**Таблиця 2 – Результати виробничої ефективності процесів модернізованих сепараторів**

Сепаратор	Зернова суміш	Ефективність очищення ПП, %		Продуктивність, т/год.	
		базовий	модернізований	базовий	модернізований
ОВС-25М	оз. пшениця	58,7	91,5	23,1	28,4
	кукурудза	62,3	90,9	16,7	20,6
	соняшник	57,6	87,5	11,5	13,8
СВС-25М	оз. пшениця	72,5	92,3	23,2	28,6
	соя	73,6	92,6	17,5	21,6
	соняшник	71,9	88,8	11,8	14,2
	горох	70,8	92,5	18,4	22,7

**Таблиця 3 – Результати визначення запиленості обслуговуючої зони модернізованих зернових сепараторів**

Сепаратор	Час відбору проби, хв.	Швидкість повітря, л/хв.	Об'єм повітря V, л	Вага фільтру початкова M <sub>п</sub> , мг	Вага фільтру кінцева M <sub>к</sub> , мг	Вага пилу, мг	Запиленість повітря С, мг/м <sup>3</sup>
СВС-25М	10	7	70	160,14	160,335	0,195	2,78
				159,96	160,17	0,21	3
				160,69	160,94	0,25	3,57
ОВС-25М				161,14	161,34	0,2	2,85
159,8				160,02	0,22	3,14	
160,4				160,66	0,26	3,71	

**Коментарі за результатами випробувань**

Результати випробувань показують високу ефективність очищення запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу розробленим циклоном з багатодисковим доочисником. Конструкція ротаційного циклону може використовуватися в аспіраційних системах зерноочисних машин та зернопереробних підприємств, забезпечувати необхідну запиленість повітря робочих зон.

**Виконавці:**

від ХФ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого:

Провідний науковий співробітник, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ А. І. Коробко

від ХНТУСГ ім. П. Василенка:

Професор кафедри ОТС ХНТУСГ, д.т.н. \_\_\_\_\_ С. О. Харченко

Асистент кафедри ОТС ХНТУСГ \_\_\_\_\_ Є. А. Гаск

61040, м. Харків, вул. Велика Панасівська (Котлова), 236

Телефон/факс: (057) 712-90-72

E-mail: hfukrndipvt@gmail.com

**Результати випробувань розповсюджуються лише на випробовуваній зразок**



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
ХНТУСГ ім. П. Василенка, професор

Мельник В.І.  
23.11.2018



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор СВІПТ «Механік»

21.11.2018

Слободенюк Є.А.  
1857307

АКТ

### про впровадження закінченої науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка в особах наукового керівника, професора Харченка С.О. та відповідального виконавця Гаєка Є.А. і представника СВІПТ «Механік» (м. Житомир) в особі директора Слободенюка Є.А. склали цей акт про те, що результати спільної науково-дослідної роботи на тему «Обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку ротаційним циклоном пересувних зернових сепараторів» у вигляді закінченої методики запроваджені та використовуються при випуску зернових сепараторів типу СВС.

З метою підвищення ефективності очистки запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу пропонується використовувати розроблений ротаційний циклон з багатодисковим доочисником.

Спільними виробничими випробуваннями пересувного вібровідцентрового сепаратору СВС-25 з розробленим ротаційним циклоном встановлено:

- ефективність очищення запиленого повітряного потоку у порівнянні з серійними збільшуються на 30-35% та складає 88-90,8%;
- продуктивність підвищується на 20-23,2%;
- запиленість повітря робочої зони складає 3,1...3,7 мг/м<sup>3</sup>.

Річний економічний ефект від впровадження розробки у виробництво сепараторів типу СВС складає 62 тис. грн.

### Висновок

На підставі результатів проведених спільних виробничих випробувань в умовах тривалої експлуатації, розробленої методики по обґрунтуванню та оптимізації процесів очистки запиленого повітряного потоку розроблена конструкція ротаційного циклону запроваджено у серійно виробництво лінійки зернових вібровідцентрових сепараторів типу СВС.

Від ХНТУСГ ім. Петра Василенка  
Науковий керівник, професор

Харченко С.О.  
Відповідальний виконавець  
аспірант Гаєк Є.А.

Від СВІПТ «Механік»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
ХНТУСГ ім. П. Василенка, професор

Мельник В.І.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Харківської філії  
УНДІВПТ ім. Л. Погорілого  
Лебедєв С.А.

## АКТ

**про виробничу перевірку і випробування розробленого ротаційного циклону на пересувному сепараторі СВС-25**

Відповідно до програми науково-дослідної роботи лабораторії вібровідцентрових зерноочисних машин ХНТУСГ ім. Петра Василенка була модернізована аспіраційна система сепаратору СВС-25 шляхом використання розробленого ротаційного циклону з обґрунтованими параметрами.

На навчально-дослідному полі ХНТУСГ ім. П. Василенка (с. Першотравневе, Харківського району Харківської області) в умовах довготривалої експлуатації на протязі 2017-2019 рр. були проведені, спільні з фахівцями УНДІВПТ ім. Л. Погорілого, виробничі випробування.

До програми випробувань модернізованого пересувного зернового сепаратора СВС-25М входило встановлення ефективності очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном, визначення техніко-економічних показників роботи сепаратора, ідентифікація запиленості повітря робочої зони.

При проведенні випробувань проводилось очищення зернового вороху озимої пшениці сорту Василенка 2-ої репродукції; гороху сорту Аудит; сої сорту Максус; соняшнику гібриду Ясон. Загальний об'єм очищених зернових сумішей за період випробувань склав: 270 т – пшениці, 30 т. – гороху, 28 т. – сої, 144 т. – соняшнику.

В результаті випробувань модернізованого сепаратора встановлено:

- ефективність очищення запиленого повітряного потоку від легких домішок та пилу склала до 87,5...92,6 %;
- збільшення питомого завантаження (продуктивності) зернового сепаратора на 20...23,2 % до 28,4...28,6 т/год;
- запиленість повітря робочої зони сепаратора 2,85...3,71 мг/м<sup>3</sup>;
- відсутність технологічних відмов та незапланованого обслуговування.

Річний економічний ефект від застосування модернізованого сепаратора СВС-25 з розробленим ротаційним циклоном за рахунок зменшення експлуатаційних витрат склав на очищенні зернових сумішей:

- пшениці – 12,8 тис.грн.;
- гороху – 8,7 тис.грн.;
- сої – 9,9 тис.грн.;
- соняшнику – 9,6 тис.грн.;

Від ХНТУСГ ім. П. Василенка

Науковий керівник, д.т.н., професор

Проф.  Харченко С.О.

Відповідальний виконавець, аспірант

 Гаск Є.А.





**АКТ**  
**про впровадження результатів**  
**закінченої науково-дослідної роботи**

Відповідно до спільної науково-дослідної роботи Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та ПраТ «Карлівський машинобудівний завод» (м. Карлівка) результати за напрямком «Обґрунтування параметрів процесу очищення запиленних повітряних потоків ротаційним циклоном» (виконавці проф. Харченко С.О., асистент Гаск Є.А.) у вигляді закінченої методики передані та запроваджені при виробництві зерноочисних машин та проектуванні стаціонарних аспіраційних систем елеваторів.

Спільна виробнича перевірка встановила ефективність очищення запиленого повітряного потоку розробленим ротаційним циклоном з доочисником 88...91%.

Ротаційні циклони з обґрунтованими параметрами можуть бути виготовлені під замовлення. Річний економічний ефект від впровадження результатів роботи у серійне виробництво складає 86,4 тис. грн.

Керівник групи конструкторів  
ПраТ «Карлівський машинобудівний  
завод»

Борщ Ю.П.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ю.П. Борщ', written over the printed name.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
ХНТУСГ ім. П. Василенка, д.т.н., проф.

Мельник В.І.

18.10.2018



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ "Маковій"

Шкурупій Ю.В.



## АКТ

**про виробничу перевірку і випробування розробленого циклону  
аспіраційної системи самопересувного сепаратора ОВС -25**

Відповідно до програми науково-дослідної роботи лабораторії вібродцентрових зерноочисних машин ХНТУСГ ім. Петра Василенка була модернізована аспіраційна система сепаратора ОВС-25 шляхом встановлення розробленого ротаційного циклону за результатами досліджень аспіранта Гаєк Є.А.

На базі ТОВ "Маковій" (м. Первомайський, вул. Залізнична 76, Первомайського району, Харківської області) в умовах довготривалої експлуатації на протязі 2017-2018 рр. були проведені виробничі випробування модернізованого сепаратора ОВС-25.

До програми випробувань входило встановлення ефективності очищення повітряного потоку на модернізованому сепараторі ОВС-25, визначення техніко-економічних показників його роботи.

При проведенні випробувань проводилось очищення зернових сумішей пшениці, кукурудзи, соняшнику. Загальний об'єм обробленого зерна за період випробувань склав: 450 т – пшениці, 560 т. – кукурудзи, 630 т. – соняшнику.

В результаті випробувань модернізованого сепаратора встановлено:

- збільшення ефективності очищення повітряного потоку від легких домішок та пилу на 30-35%.

- збільшення питомого завантаження (продуктивності) самопересувного зернового сепаратора на 20-23,2 % за умови нормованої запиленості повітря робочої зони 4 мг/м<sup>3</sup>.

- відсутність відмов та технологічних збоїв.

Річний економічний ефект від застосування модернізованого сепаратора ОВС-25 з розробленим циклоном за рахунок збільшення продуктивності склав на очищенні зернових сумішей:

- пшениці – 30,3 тис.грн.;

- соняшнику – 32,7 тис.грн.;

- кукурудзи – 27,8 тис.грн.

Від ХНТУСГ ім. П. Василенка

Науковий керівник, д.т.н., проф.

Харченко С.О.

Відповідальний виконавець, аспірант

Гаєк Є.А.

Від ТОВ "Маковій"

Директор

Шкурупій Ю.В.

Завідуючий складом

Войтенко М.Г.





УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 103446

ЦИКЛОН

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи 10.10.2013.

Голова Державної служби інтелектуальної власності України

М.В. Ковіня





УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 137443

ЦИКЛОН РОТАЦІЙНИЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.10.2019**.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Д.О. Романович





## Додаток Е. Відомості про апробацію результатів дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Харченко С.А., Гаек Е.А. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2013. Вип.135. С. 87 – 92.

2. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в разработанном циклоне. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2014 Vol. 16, № 7. С. 42 – 46.

3. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей дисперсной фазы в запылённом воздушном потоке. *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський журнал: Вінницького національного аграрного університету*. Вінниця, 2014. Т.1, № 73. С. 44 – 49.

4. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели поля скоростей несущей фазы в рабочей зоне прямооточного циклона. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2014. Вип.152. С. 114 – 120.

5. Харченко С.А., Гаек Е.А. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в зоне доочистителя разработанного прямооточного циклона. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. Харків, 2015. Вип.156. С. 237 – 242.

6. Гаек Е.А. Оптимизация конструктивно-кинематических параметров разработанного циклона аспирационных систем зерноочистительных машин. *Інженерія природокористування*. 2015. № 1(3). С.123 – 127.

7. Гаек Е.А. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований в разработанном циклоне аспирационных систем зерноочистительных машин. *Технічні системи і технології тваринництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2015. Вип.157. С. 203 – 208.

8. Гаек Е.А., Бекетова И.С. Способ повышения эффективности процесса очистки запылённого воздушного потока циклоном аспирационных систем зерновых сепараторов. *Інженерія природокористування*. 2015. № 2(4). С.101 – 105.

9. Гаек Е.А. Алгоритм математического моделирования частиц дисперсной фазы запылённого воздушного потока. *MOTROL «Commission of Motorization and Energetics in Agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol.18, №7. P. 79 – 83

10. Харченко С.А., Гаек Е.А. Эффективне очищення запиленого повітряного потоку ротаційними циклонами на зернопереробних підприємствах. *International research and practice conference. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences*. Radom, 2017. P. 218 – 221.

11. Харченко С.А., Гаек Е.А. Эффективность очистки запыленного воздушного потока циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Інженерія природокористування*. 2018. № 1(9). С. 79 – 82.

12. Харченко С.А., Гаек Е.А. Энергоемкость и металлоемкость процесса очистки запылённого воздушного потока модернизированным сепаратором СВС-25М. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2019. Вип.199. С.351 – 357.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Харченко С.А., Гаек Е.А. Повышение эффективности очистки запылённого воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали наукової конференції Сумського НАУ (1-8.11.2014 р.)*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми: СНАУ, 2014. С. 62.



14. Харченко С.А., Гаек Е.А. Интенсификация процесса очистки воздушного потока разработанным циклоном аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ХНТУСГ: «Молодь і технічний прогрес в АПК»*. Харків: ХНТУСГ. 2014. С.87.

15. Гаек Е.А., Суламанідзе Е.А. Анализ способов повышения эффективности работы аспирационных систем зерноочистительных машин. *Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми: СНАУ, 2017. С.64.

16. Гаек Е.А. Очистка запылённого воздушного потока ротационными циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Матеріали Всеукраїнській студентської наукової конференції (13-17.11.2017 р.)*. Суми, 2017. С. 662.

17. Гаек Е.А. Эффективная очистка запылённого воздушного потока ротационными циклонами на зерноперерабатывающих предприятиях. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції: Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С.218-220.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

18. Циклон: пат. 103446 U України: МПК В04С 3/00. № а 2012 14122; заявл. 11.12.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. №19.

19. Циклон ротаційний: пат. 137443 U України: МПК В04С 3/06. № u 2019 02582; заявл. 18.03.2019; опубл. 25.10.2019, Бюл. №20.