

УДК 6621.928.9:66.074.2, 621.928.9, 66.063/.065.002.5, 66.067.1.002.5,
621.928.002.5, 662.613.13.002.5, 666.29.022.5, 621.928.93
№ держреєстрації 0122U002553

Inv. №

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ДБТУ)**

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002,
+38(057)7003888 <http://btu.kharkov.ua>, info@btu.kharkiv.ua



Валерій Михайлов

**ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИСНИКІВ ПОВІТРЯ ВІД
ДЕРЕВНОГО ПИЛУ
(остаточний)**

Керівник НДР
д.т.н., доцент

С.А. Шевченко


2022 р.

Рукопис завершено «15» грудня 2022 р.

Результати цієї роботи розглянуто науково-технічною радою факультету лісового господарства, деревооброблювальних технологій та землевпорядкування, протокол №4 від 26.12.2022 р.

СПИСОК АВТОРІВ

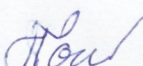
Керівник НДР
докт. техн. наук



15.12.22

Шевченко С.А.
(підрозділи 2.1, 2.3, 3.1,
4.3, 4.4; висновки)

Майстер виробничого
навчання



15.12.2022

Погорілий В.К.
(вступ, розділ 1,
підрозділи 2.2, 3.2, 3.3,
4.1, 4.2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 39 стор., 5 рис., 15 джерел.

ОЧИСНИК ПОВІТРЯ, ОБЕРТОВІ РОБОЧІ ОРГАНИ, ТРАЄКТОРІЯ ЧАСТИНКИ, МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

Об'єкт дослідження - активні обертові робочі органи очисник повітря від деревних частинок.

Мета роботи - розробка методики оптимізації параметрів активних робочих органів очисника повітря від деревних частинок.

Методи дослідження: аналітичне моделювання руху деревних частинок у зоні дії обертових робочих органів очисника із використанням методів фізики та аеродинаміки; моделювання вібраційного навантаження на опори обертових робочих органів, обумовленого їх неврівноваженістю, методами теорії коливань машин.

Одержана математична модель робочого процесу очисника повітря з активними робочими органами дає змогу визначити можливість вловлювання очисником частинок певного розміру (граничної швидкості) та може бути використана при оптимізації їх конструктивно-технологічних параметрів за критерієм мінімізації граничної швидкості частинок, уловлюваних очисником.

Економічний ефект від оптимізації параметрів очисника повітря обумовлені більш повним очищенням пилоповітряної суміші від деревних частинок, що дає змогу використовувати їх як матеріал для подальшої переробки. Дослідження сприяє поліпшенню умов роботи працівників завдяки зменшенню концентрації деревних частинок у повітрі робочої зони.

Перспективним напрямком подальших робіт є удосконалення моделі робочого процесу в очиснику повітря, а саме - тривимірне комп'ютерне моделювання руху деревних частинок

ABSTRACT

Report on research work: 39 pages, 5 figures, 15 sources.

AIR PURIFIER, ROTATING WORKING BODIES, PARTICLE TRAJECTORY, MODELING, OPTIMIZATION.

The object of research is the active rotating working bodies of the air purifier from wood particles.

The purpose of the work is to develop a methodology for optimizing the parameters of the active working bodies of the air purifier from wood particles.

Research methods: analytical modeling of the movement of wood particles in the area of action of the rotary working bodies of the purifier using the methods of physics and aerodynamics; simulation of the vibration load on the supports of rotating working bodies, caused by their imbalance, using the methods of machine vibration theory.

The obtained mathematical model of the work process of the air purifier with active working bodies makes it possible to determine the possibility of the purifier catching particles of a certain size (limiting speed) and can be used in the optimization of their design and technological parameters according to the criterion of minimizing the limit speed of particles caught by the purifier.

The economic effect of optimizing the parameters of the air purifier is due to a more complete cleaning of the dust-air mixture from wood particles, which makes it possible to use them as material for further processing. The research also has social significance, as it makes it possible to improve the working conditions of workers due to the reduction of the concentration of wood particles in the air.

A promising direction of further work is the improvement of the model of the work process in the air purifier, namely, three-dimensional computer modeling of the movement of wood particles.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначок.....	6
Вступ.....	8
1 Огляд публікацій.....	9
2 Методика дослідження.....	12
2.1 Конструкція та принцип дії очисника повітря з активними робочими органами.....	12
2.2 Методика дослідження робочого процесу очисника повітря з активними робочими органами.....	14
2.3 Методика формулювання задачі оптимізації параметрів активних робочих органів.....	16
3 Моделювання робочого процесу активних робочих органів очисника повітря.....	17
3.1 Обґрунтування початкових умов.....	17
3.2 Визначення горизонтальної складової переміщення частинки в зазорі активного робочого органу.....	18
3.3 Визначення вертикальної складової переміщення частинки в зазорі активного робочого органу.....	22
3.3.1 Визначення вертикального переміщення частинки виключно під дією сили земного тяжіння.....	22
3.3.2 Визначення вертикального переміщення частинки під дією сили земного тяжіння з урахуванням сили опору повітря.....	24
4 Оптимізація параметрів активних робочих органів очисника.....	31
4.1 Дослідження робочого процесу комплекту активних робочих органів.....	31
4.2 Обмеження на параметри робочих органів.....	32
4.3 Методика оптимізації розмірів і кількості активних робочих органів очисника.....	34
4.4 Перспективи подальших досліджень з удосконалення математичної моделі очисника повітря з активними робочими органами.....	35
Висновки.....	36
Перелік джерел посилання.....	37

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

- A_p - площа міделевого перерізу частинки, м²;
- $d_{\text{ч}}$ - діаметр частинки, м;
- e - ексцентриситет, м;
- F_H - сила, обумовлена неврівноваженістю обертових мас, Н;
- $F_{H \text{ max}}$ - максимально-допустима сила, обумовлена неврівноваженістю обертових мас, Н.
- F_O – сила опору повітря, Н;
- F_T - сила тяжіння, Н;
- g - прискорення вільного падіння ($g= 9,81 \text{ м/с}^2$).
- h - зазор між кільцями активного робочого органу, м;
- h_k - товщина кільця, м;
- k_e - коефіцієнт ексцентриситету.
- M - маса комплекту кілець, кг;
- M_1 - маса кільця, кг;
- N - кількість зазорів між кільцями активних робочих органів.
- N_k - кількість кілець.
- $r_{\text{ц}}$ - радіус циліндричної поверхні, м;
- R - зовнішній радіус кільця, м;
- Re – число Рейнольдса;
- Q - потік повітря через очисник, м³/с;
- Q_1 - витрата повітря крізь проміжок між парою кілець, м³/с;
- r - радіус вихідної труби, м.
- S - площа циліндричної поверхні, м²;
- t - час, с;
- t_1 - моменти часу, с;
- t_k - час досягнення поверхні нижнього кільця, с.

V_{Π} - швидкість повітря, м/с;

V_{out} - швидкість повітря у вихідній трубі, м/с.

V_y - вертикальна швидкість деревної частинки, м/с;

$V_{y \max}$ - модуль максимальної вертикальної швидкості (граничної швидкості) частинки.

x_i - горизонтальна координата частинки в момент часу t_i , м.

X - горизонтальна координата частинки, м;

y - вертикальна координата, м;

$\rho_{\text{ч}}$ - щільність матеріалу частинки, кг/м³.

ΔF - рівнодіюча сил, які діють у вертикальному напрямку.

– динамічна в'язкість газового середовища, Па·с (для повітря - 18,27 мкПа·с).

ξ - коефіцієнт опору;

ρ_m - щільність матеріалу кільця, кг/м³.

ρ_{Π} - щільність повітря, кг/м³.

ω - циклічна частота обертання, 1/с.

ВСТУП

Існує багато факторів, які спричиняють потребу очищення повітря від деревного пилу на підприємствах лісової та деревообробної галузей. Серед найбільш вагомих є наступні:

деревний пил, потрапляючи в дихальні шляхи та органи легеневої системи, шкодить здоров'ю людей;

деревний пил утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші;

деревний пил, накопичуючись у виробничих приміщеннях, підвищує небезпеку виникнення пожеж та погіршує їх наслідки;

деревний пил, потрапляючи у верстати, зменшує їх надійність та точність оброблення;

деревний пил є вторинною сировиною, яку варто використати (наприклад, для виготовлення деревних пелет, спалювання в енергетичних установках для обігріву сушильних камер тощо);

деревний пил, потрапляючи на поверхню заготовок, негативно впливає на якість склеювання, личкування, нанесення декоративно-захисних покриттів, що призводить до додаткових витрат праці на його видалення;

деревний пил, потрапляючи в довкілля, шкодить екології.

Для очищення повітря від деревного пилу в процесах деревообробки використовують різноманітне обладнання, яке за принципом дії поділяють на фільтраційне, інерційне та обладнання інших принципів дії. Оскільки зростають вимоги до очищення повітря та внаслідок прагнення до підвищення економічної ефективності деревообробних виробництв відбувається постійне удосконалення обладнання для очищення повітря від деревного пилу.

1 ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Деревний пил завдає шкоди легеневій системі та дихальним шляхам людини. Наприклад, у статті [1] наводяться відомості про те, про те як деревний пил у концентрації близько 4 мг/м^3 впливає на організм людини. Дослідження проводили серед деревообробників, які мали стаж роботи менше 10 років. Виявлено, що в 176 робітників (53,7%) під час роботи був закладений ніс, у 141 (43,0%) – спостерігалось почервоніння очей, у 135 (41,2%) – свербіж очей і в 78 (23,8%) – нежить. Результати даного дослідження показали, що деревний пил негативно вплинув на дихальні функції працівників.

Найсильніші статистичні зв'язки між впливом деревного пилу на працівників і погіршенням їх здоров'я в країнах, що розвиваються, спостерігаються в таких проявах, як респіраторні симптоми та підвищений ризик виникнення новоутворень в носі [2].

До того ж, деревообробна промисловість є однією з найбільш вибухонебезпечних галузей виробництва внаслідок високої концентрації деревного пилу в повітрі робочої зони. З вищесказаного можна зробити висновок, що проблема очищення повітря робочої зони є актуальною.

Усе це спонукає до подальших досліджень з удосконалення очисників повітря та використання нових, більш ефективних методів. Дослідження відбуваються як у напрямках з оптимізації параметрів відомих конструкцій, так і пропонування нових різновидів очисників.

У статті [3] наведено огляд основних методів очищення повітря. Визначено фактори, які впливають на вибір системи пиловловлення, та проведено їх порівняльний аналіз. На основі теоретичних досліджень обґрунтовано ефективність циклонних очисників повітря та показано необхідність подальшого удосконалення їх конструкції.

На деревообробних підприємствах широко застосовуються пиловловлювачі різного типу дії, як фільтраційні так і інерційні. Фільтраційний

пиловловлювачам притаманний досить високий ступінь очищення, але вони мають й декілька суттєвих недоліків: вони швидко забиваються, що призводить до втрати пропускної здатності та підвищення гідравлічного опору (що, у свою чергу, призводить до збільшення споживаної електричної потужності). Ці недоліки значно зменшують ефективність аспіраційної системи та підвищують витрати на електроенергію. Очисники інерційного типу дії, циклони, дешеві та прості в експлуатації. Основний їх недолік - проблематичність вловлювати частки дрібних розмірів, які завдають найбільшої шкоди здоров'ю.

Напрямом, у якому відбувається пошук компромісу між перевагами та недоліками циклонів і фільтраційних сепараторів, є фільтрувальні циклони. Вплив конструктивних параметрів фільтрувального циклона, таких як радіальний зазор, висота циліндричної частини циклона та продуктивність циклона на ефективність вловлювання частинок різного діаметру, досліджено в статті [4].

У роботі [5] здійснено огляд конструкцій циклонних пиловловлювачів та проведено аналіз основних факторів, що впливають на ефективність роботи циклонів. На основі аналізу математичної моделі руху пилоповітряної суміші описано, як висота циліндричної частини циклона, глибина занурення вихідної труби та діаметр пиловипускного отвору впливають на гідравлічний опір циклона та на критичний діаметр частинок, які вловлюються.

У статті [6] розроблено математичну модель для визначення аеродинамічного опору жалюзійного циклону із застосуванням системи рівнянь Нав'є-Стокса.

У дослідженні [7] запропоновано підвищити ефективність циклонної технології за допомогою розділової пластини.

У статті [8] показано, як геометричні параметри багатоканального циклону впливають на ефективність очищення повітря від деревного пилу.

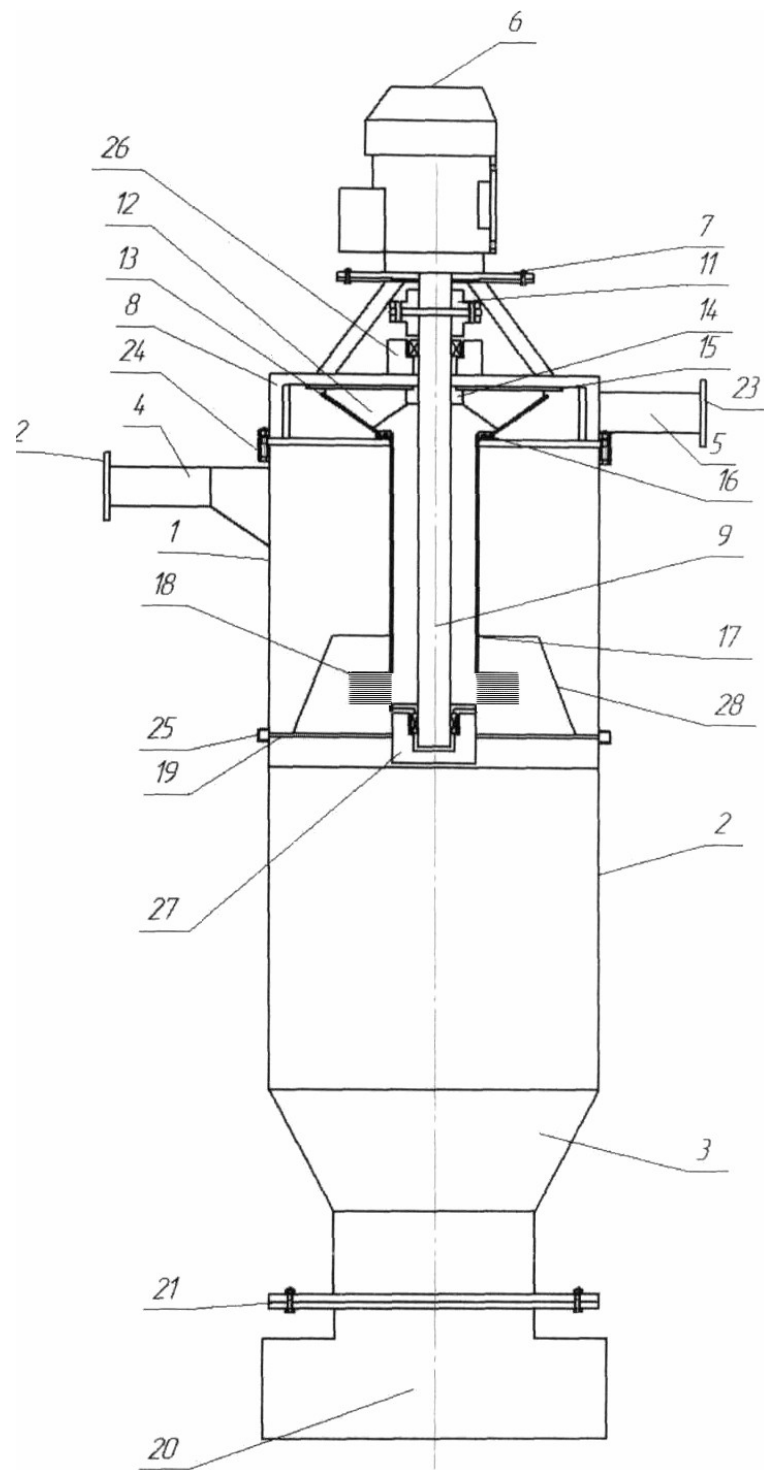
Отже, дослідження з удосконалення очисників повітря від деревного пилу є актуальними. Перспективним напрямом підвищення ефективності очисників повітря від деревного пилу є використання активних робочих органів. У даній

роботі досліджуватимемо заходи з підвищення ефективності очисника повітря від деревного пилу з активними робочими органами [9], розташованими в нижній частині ротора з вертикальною віссю, які являють собою горизонтально розташовані кільця, віддалені одне від одного на малу однакову відстань. Метою даної роботи є розробка методики оптимізації параметрів активних робочих органів очисника повітря від деревних частинок.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Конструкція та принцип дії очисника повітря з активними робочими органами

У даній роботі досліджується очисник повітря відповідно до [9], його поперечний перетин показано на рис. 2.1. Пилоповітряна суміш надходить у верхню частину корпусу очисника 1 через вхідний патрубок 4. При цьому великі та середні частинки під дією відцентрових сил потрапляють на внутрішню поверхню корпусу очисника 1 та накопичуються в бункері 20. Електродвигун 6, передає обертовий момент муфті 11, яка обертає вал 9 з комплектом лопаток 12. Завдяки цьому повітря втягується в робочу трубу 17 через зазори в комплекті кілець 18, який є активним робочим органом очисника. З цим повітрям у зону активних робочих органів потрапляють частинки менших розмірів (див. рис. 2.2). Залежно від розмірів частинок та їх початкової висоти над поверхнею кільця, вони можуть або ж падати на поверхню кільця та викидатись відцентровою силою з активного робочого органу й накопичуватись у бункері 20, або ж потрапляти в робочу трубу 17 і викидатись з очисника через вихідний патрубок 5.



1 - циліндрична верхня частина корпусу, 2 - середня частина корпусу, 3 - конічна нижня частина корпусу, 4 - вхідний патрубок, 5 - вихідний патрубок, 6 - електродвигун, 7 - фланець, 8 - верхній павук, 9 - обертальний вал, 11 - втулково-пальцева муфта, 12 - лопатки, 13 - зрізаний конус, 14 - втулка, 15 - опорний диск, 16 - лабіринтове ущільнення, 17 - робоча труба, 18 - комплект кілець, 19 - нижній павук, 20 - приймальний бункер, 21 - 23 - фланці, 24 - верхнє кільце жорсткості та, 25 - нижнє кільце жорсткості, 26 і 27 - підшипникові опори, 28 - конусний екран.

Рисунок 2.1 - Очисник повітря з активними робочими органами

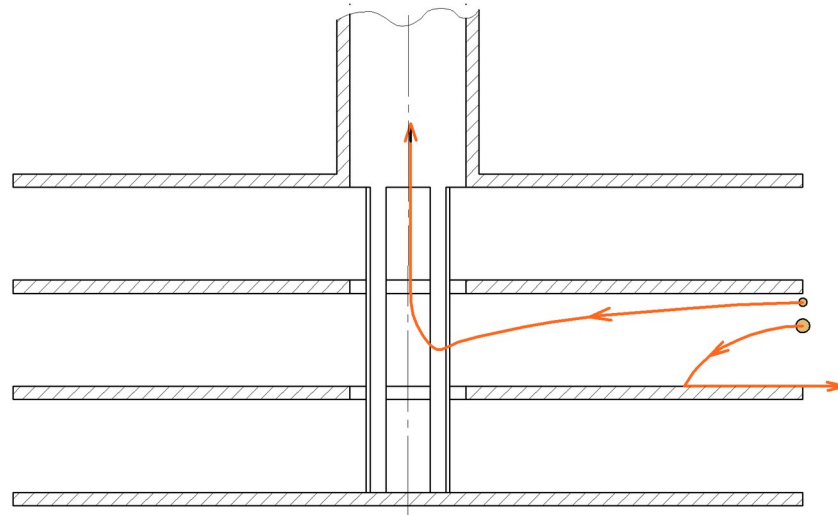


Рисунок 2.2 - Можливі траєкторії руху деревних частинок у зазорі між активними робочими органами

2.2 Методика дослідження робочого процесу очисника повітря з активними робочими органами

Дослідження робочого процесу активних робочих органів очисника повітря полягає у визначенні траєкторії руху деревної частинки при надходженні в їх зону дії. Для цього розглядається рух частинки у двох напрямках: горизонтальному (під дією потоку повітря, яке проходить через очисник) і вертикальному (під дією сили земного тяжіння).

Зважаючи на багаторазову відмінність у швидкості переміщення частинки в горизонтальному та вертикальному напрямках, ці складові руху розглядаються як незалежні.

Прийmemo, що горизонтальне переміщення частинки відбувається із зазначеною швидкістю потоку. З точки зору впливу на одержувані результати дослідження, це є більш несприятливим випадком порівняно з переміщенням зі швидкістю, дещо меншою від швидкості потоку (що фактично й відбуватиметься внаслідок певної інерційності руху частинки під впливом

зовнішньої сили), оскільки переміщення з дещо меншою швидкістю сприятиме падінню частинки на кільце та викиданню її з активного робочого органу. Натомість, радіальний рух зі швидкістю, яка дорівнює швидкості потоку, сприятиме потраплянню частинки у вихідну трубу очищеного повітря.

Отже, визначаючи швидкість радіально спрямованого потоку в зазорі між кільцями залежно від відстані певної точки міжкільцевого простору до вісі обертання активного робочого органу дає змогу дослідити горизонтальний рух деревної частинки, яка переноситься таким потоком.

Що стосується вертикальної складової руху деревної частинки в зазорі між кільцями, то розглядатимемо два випадки:

- вертикальне переміщення деревної частинки відбувається виключно під дією сили земного тяжіння (що припустимо для часток, які не встигають набрати швидкість, сумірну з граничною швидкістю);

- вертикальне переміщення деревної частинки під дією сили земного тяжіння з урахуванням опору повітря.

Отже, будимо виходити з того, що частинка, потрапляючи в потік повітря, який спрямовано горизонтально між кільцями, набуває швидкості цього повітря, а горизонтальне переміщення частинки відбувається зі швидкістю повітря. Водночас розпочинається переміщення частинки у вертикальному напрямку під дією сили земного тяжіння. Це переміщення триватиме або до падіння частинки на нижнє кільце, або до її потрапляння у вихідну трубу очищеного повітря. Для того щоб частинка була затримана очисником, вона повинна потрапити на поверхню нижнього кільця, звідкіля викидається з активного робочого органу.

2.3 Методика формулювання задачі оптимізації параметрів активних робочих органів

Показником ефективності очисника повітря є розмір уловлюваних частинок. Зауважимо, що з діаметром вловлюваних частинок безпосередньо пов'язана їх гранична швидкість, яка, до того ж, враховує щільність матеріалу частинок. Отже, саме граничну швидкість вловлюваних частинок доцільно вибрати критерієм оптимізації.

Визначаючи траєкторію руху частинки, можна оцінити, чи буде вона вловлена очисником. Це дає змогу пошуковим методом, застосовуючи формулу (3.63), знайти найменшу граничну швидкість частинки, яка буде вловлена очисником за прийнятих початкових умов.

Варійованими параметрами активних робочих органів очисника є кількість кілець і відстань між ними. Звернемо увагу на те, що збільшення кількості та розмірів робочих органів (бажане для підвищення ефективності очисника) внаслідок їх залишкової неврівноваженості призведе до зростання вібраційного навантаження на підшипникові опори ротора, що зменшить їх ресурс [10]. Отже, обмеження на кількість та розміри робочих органів доцільно встановити, виходячи із зазначеного навантаження.

Зважаючи на складність оптимізаційної задачі, пошук раціональних значень параметрів очисника доцільно здійснювати пошуковим методом.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ АКТИВНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОЧИСНИКА ПОВІТРЯ

3.1 Обґрунтування початкових умов

Обґрунтуємо вибір початкового положення та вектора швидкості деревної частинки при надходженні в зону дії активних робочих органів. Оберемо їх такими, щоб створювались найнесприятливіші умови для роботи очисника повітря (тобто, спрощується потрапляння деревної частинки у вихідну трубу очищеного повітря). Отже, таким найнесприятливішим початковим положенням є розташування частинки безпосередньо нижньому ребрі верхнього кільця, (див. рис. 3.1), коли частинка перенесеться потоком повітря на максимальну відстань перед тим, як потрапити на нижнє кільце. Пояснюється це тим, що менша початкова висота частинки над нижнім диском призведе до зменшення тривалості її падіння на нижній диск, а, отже, і до меншого горизонтального переміщення частинки в напрямку вихідної труби. При цьому найгіршим випадком буде, коли її початкова вертикальна швидкість є нульовою, а горизонтальна швидкість лорівнює швидкості повітряного потоку в місці її розташування.

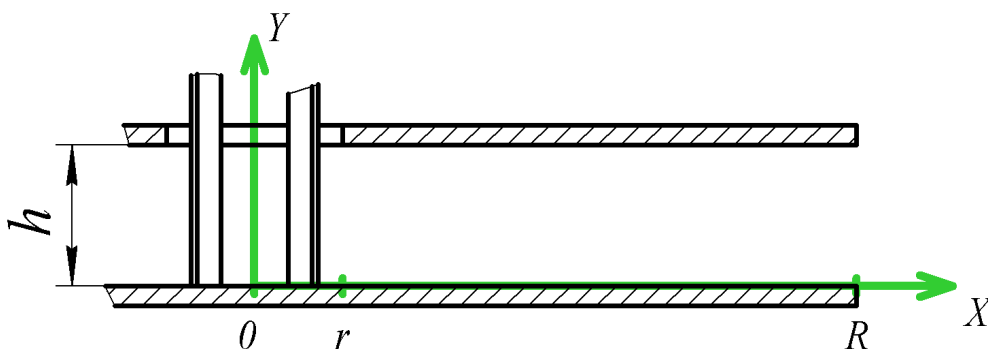


Рисунок 3.1 – Активний робочий орган очисника повітря

3.2 Визначення горизонтальної складової переміщення частинки в зазорі активного робочого органу

Для того щоб визначити залежність горизонтального переміщення частинки від часу, перш за все визначимо, як змінюється швидкість повітряного потоку в зазорі між кільцями - див. рис. 3.1. Для цього розглянемо умовну циліндричну поверхню, розташовану між сусідніми кільцями активного робочого органу - таку, що її вісь співпадає з віссю обертання активних робочих органів. Радіус поверхні знаходиться в інтервалі між зовнішнім радіусом кільця та радіусом вихідної труби. Визначимо швидкість радіально спрямованого потоку через цю циліндричну поверхню. Вихідними даними для такого розрахунку будуть відстань між кільцями, витрати повітря крізь проміжок між кільцями та радіус указаної циліндричної поверхні. Визначимо бічну площу такої умовної циліндричної поверхні:

$$S(r_{\text{ц}}) = 2\pi h r_{\text{ц}} \quad , \quad (3.1)$$

$$R < r_{\text{ц}} < r \quad , \quad (3.2)$$

де S - площа циліндричної поверхні, м²;

h - зазор між кільцями активного робочого органу, м;

$r_{\text{ц}}$ - радіус циліндричної поверхні, м;

R - зовнішній радіус кільця, м;

r - радіус вихідної труби, м.

Обчислимо швидкість радіально спрямованого потоку повітря через циліндричну поверхню (знак мінус обумовлений тим, що вектор швидкості потоку спрямовано проти напрямку вісі x):

$$V_{\text{п}}(x) = - \frac{Q_1}{S(x)} \quad , \quad (3.3)$$

$$V_{\Pi}(x) = -\frac{Q_1}{2\pi h x}, \quad (3.4)$$

де V_{Π} - швидкість повітря, м/с;

Q_1 - витрата повітря крізь проміжок між парою кілець, м³/с;

Отже, визначимо, як змінюватиметься горизонтальна координата частинки, радіальне переміщення якої відбуватиметься зі швидкістю потоку повітря. Визначення рівняння зміни горизонтальної координати із часом має певну специфіку - швидкість змінюється залежно від цієї ж координати (швидкість повітря зростатиме по мірі його переміщення до вихідної труби по гіперболічній залежності (3.4)). Отже, розглянемо послідовність моментів часу:

$$t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_k, \quad (3.5)$$

де t_i - моменти часу, с;

Цим моментам часу відповідають значення горизонтальної координати:

$$x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k, \quad (3.6)$$

де x_i - горизонтальна координата частинки в момент часу t_i , м.

При цьому

$$x_{i+1} = x_i + V(x_i) \cdot (t_{i+1} - t_i), \quad (3.7)$$

Переходячи в (3.5) від моментів часу і відповідних положень частинки (3.6) до інтервалів часу та переміщень частинки на цих інтервалах, отримаємо:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}, \quad (3.8)$$

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}, \quad (3.9)$$

$$\Delta t_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{V(x_i)} = \frac{\Delta x_i}{V(x_i)} . \quad (3.10)$$

Припустимо, що рух частинки починається в нульовий момент часу, а початкові умови є такими, як визначено вище (розташуванню деревної частинки на ребрі нижньої поверхні верхнього кільця):

$$t_0 = 0 , \quad (3.11)$$

$$x_0 = R . \quad (3.12)$$

Сумуючи всі інтервали часу в (3.6), одержимо:

$$t_k = t_0 + \sum_{i=1}^k \Delta t_i , \quad (3.13)$$

$$t_k = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta x_i}{V(x_i)} . \quad (3.14)$$

Здійснюючи перехід в (3.14) до безкінечно малих проміжків часу, перетворимо (3.14) і одержимо рівняння для визначення тривалості переміщення частинки від початкового стану до заданої горизонтальної координати:

$$t(X) = \int_R^X \frac{dx}{V_{II}(x)} , \quad (3.15)$$

де t - час, с;

X - горизонтальна координата частинки, м;

Перетворимо формулу (3.15) з урахуванням формули (3.4):

$$t(X) = - \int_R^X \frac{2\pi h x}{Q_1} dx = - \frac{2\pi h}{Q} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_R^X , \quad (3.16)$$

$$t(x) = -\frac{\pi h}{Q}(x^2 - R^2) = \frac{\pi h}{Q}(R^2 - x^2) , \quad (3.17)$$

Формула (3.17) дає змогу обчислити час, необхідний для подолання деревиною часткою певної відстані. Для побудови траєкторії руху деревинної частинки необхідно є зворотна залежність – тобто, залежність переміщення від часу. Для цього розв'яжемо квадратне рівняння (3.17) відносно часу:

$$t(x) = \frac{\pi h}{Q_1} R^2 - \frac{\pi h}{Q_1} x^2 , \quad (3.18)$$

$$x^2(t) = R^2 - \frac{Q_1 t}{\pi h} . \quad (3.19)$$

Рівня (3.17) має два рішення:

$$x(t) = \pm \sqrt{R^2 - \frac{Q_1 t}{\pi h}} . \quad (3.20)$$

Виходячи з фізичної суті задачі,

$$x(t) = \sqrt{R^2 - \frac{Q_1 t}{\pi h}} . \quad (3.21)$$

Отже, рівняння (3.21) дає змогу визначити горизонтальну координату частинки, радіальне переміщення якої в зазорі активного робочого органу відбувається зі швидкістю повітряного потоку.

3.3 Визначення вертикальної складової переміщення частинки в зазорі активного робочого органу

3.3.1 Визначення вертикального переміщення частинки виключно під дією сили земного тяжіння

Тепер розглянемо вертикальну складову руху деревної частинки в зазорі між кільцями. У першому наближенні розглядатимемо цей рух як такий, що відбувається лише під дією земного тяжіння - див. рис. 3.2.

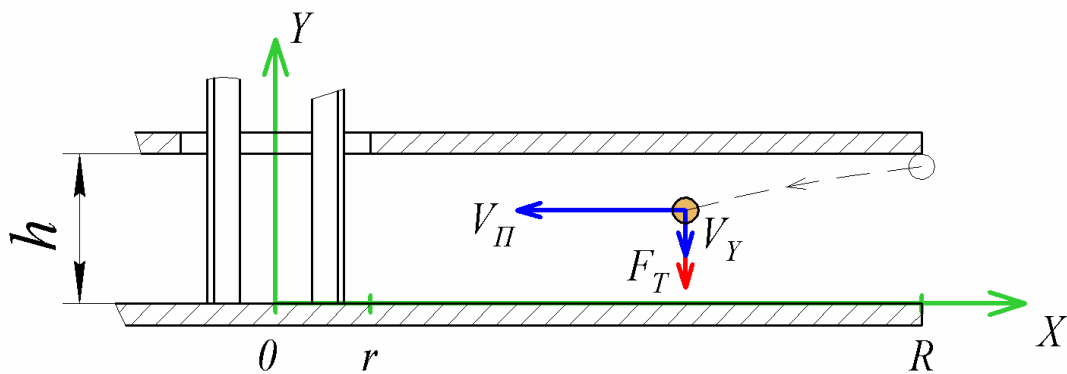


Рисунок 3.2 - Рух частинки в горизонтальному напрямку та у вертикальному напрямку (під дією сили земного тяжіння)

Отже, приймаючи до уваги визначені початкові умови, рівняння вертикальної складової руху буде наступним:

$$y(t) = h - \frac{gt^2}{2}, \quad (3.22)$$

де y - вертикальна координата, м;

g - прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Таким чином, траєкторія руху деревної частинки виражається системою рівнянь:

$$\begin{cases} x(t) = \sqrt{R^2 - \frac{Q_1 t}{\pi h}} \\ y(t) = h - \frac{g t^2}{2} \end{cases} . \quad (3.23)$$

Визначимо відстань, на яку переміститься деревинна частка до падіння на кільце. Для цього, передусім, знайдемо момент часу, відповідний її падіння на кільце:

$$y(t_K) = 0 , \quad (3.24)$$

$$t_K = \sqrt{\frac{2h}{g}} , \quad (3.25)$$

де t_K - час досягнення поверхні нижнього кільця, с.

Визначимо горизонтальну координату точки, у якій деревна частинка досягне поверхню нижнього кільця:

$$x_K = x(t_K) , \quad (3.26)$$

$$x_K = \sqrt{R^2 - \frac{Q_1}{\pi h} \sqrt{\frac{2h}{g}}} , \quad (3.27)$$

$$x_K = \sqrt{R^2 - \frac{Q_1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gh}}} . \quad (3.28)$$

Для того, щоб частинка не потрапила у вихідну трубу, горизонтальна координата точки досягнення нею поверхні нижнього кільця повинна бути більшою, ніж радіус труби. Отже, вважаючи, що радіус вихідної труби відомий, знайдемо співвідношення між рештою параметрів:

$$x_K > r , \quad (3.29)$$

$$\sqrt{R^2 - \frac{Q_1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gh}}} > r , \quad (3.30)$$

$$R^2 - \frac{Q_1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gh}} > r^2, \quad (3.31)$$

$$R^2 > r^2 + \frac{Q_1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gh}}, \quad (3.32)$$

$$R > \sqrt{r^2 + \frac{Q_1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gh}}}. \quad (3.33)$$

Рівняння (3.33) зв'язує розміри активного робочого органу та потік повітря крізь нього. Оскільки воно виведено з припущення, що вертикальне переміщення частинки відбувається виключно під дією сили тяжіння, то виконання нерівності (3.33) є необхідною (але не є достатньою) умовою відділення частинок і може використовуватись для попередньої оцінки геометричних розмірів активного робочого органу, а також для порівняння з більш точними рішеннями.

Вищенаведена модель не враховує опір повітря, тому може бути використана лише для відносно крупних частинок деревини, швидкість яких не встигає наблизитись до швидкості осідання.

3.3.2 Визначення вертикального переміщення частинки під дією сили земного тяжіння з урахуванням сили опору повітря

Тепер проаналізуємо рух деревинної частинки з урахуванням опору повітря. Приймемо, як і в попередньому випадку, що горизонтальне переміщення частинки відбувається зі швидкістю потоку повітря. При цьому вважатимемо, що відносно потоку відбувається лише вертикальне переміщення частинки. Для цього розглянемо сили, які діють на неї (див. рис. 3.3).

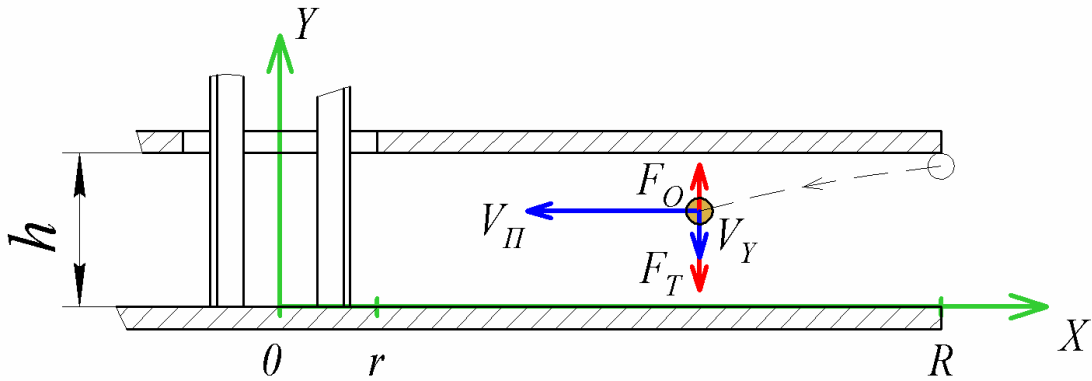


Рисунок 3.3 - Рух частинки в горизонтальному напрямку та у вертикальному напрямку (під дією сили земного тяжіння з урахуванням сили опору повітря)

По-перше, це сила тяжіння:

$$F_T = m_q g , \quad (3.34)$$

$$m_q = \frac{\pi}{6} d_q^3 \rho_q , \quad (3.35)$$

де F_T - сила тяжіння, Н;

d_q - діаметр частинки, м;

ρ_q - щільність матеріалу частинки, кг/м³.

По-друге, це сила опору повітря. При вертикальному русі частинки:

$$F_O = \frac{\xi(\text{Re}) \cdot A_q \cdot V_y^2 \cdot \rho_{\text{П}}}{2} , \quad (3.36)$$

де F_O – сила опору повітря, Н;

ξ - коефіцієнт опору;

Re – число Рейнольдса;

A_p - площа міделєвого перерізу частинки, м²;

V_y - вертикальна швидкість деревної частинки, м/с;

$\rho_{\text{П}}$ - щільність повітря, кг/м³.

Обчислимо площу міделєвого перерізу частинки:

$$A_q = \pi \frac{d_q^2}{4} . \quad (3.37)$$

Критерій Рейнольдса при обтіканні частинки газом дорівнює [11]:

$$Re = \frac{V_y d_q \rho_{\Pi}}{\mu} , \quad (3.38)$$

де – динамічна в'язкість газового середовища, Па·с (для повітря - 18,27 мкПа·с).

Коефіцієнт опору залежить від критерію Рейнольда. Зважаючи на невелику швидкість частинки відносно повітря приймемо, що має місце ламінарний режим обтікання частинки повітрям, коли $Re < 2$. Для ламінарного режиму [11]:

$$\xi(Re) = \frac{24}{Re} . \quad (3.39)$$

Перетворюючи формулу (3.36) з урахуванням (3.37-3.39), отримаємо вираз для сили опору:

$$F_O = \pi \frac{24 \mu}{V_y d_q} \frac{d_q^2}{4} \frac{V_y^2}{2} , \quad (3.40)$$

$$F_O = 3\pi \mu d_q V_y . \quad (3.41)$$

Оскільки ці сили спрямовані в протилежних напрямках, визначимо рівнодіючу вказаних сил:

$$\Delta F = - F_T + F_O , \quad (3.42)$$

де ΔF - рівнодіюча сил, які діють у вертикальному напрямку.

Відповідно до другого закону Ньютона визначимо прискорення деревної частинки:

$$a = \frac{\Delta F}{m_{\text{ч}}} , \quad (3.43)$$

$$a = \frac{-m_{\text{ч}}g - 3\pi\mu d_{\text{ч}}V_y}{m_{\text{ч}}} , \quad (3.44)$$

$$a = -g - \frac{3\pi\mu d_{\text{ч}}V_y}{\frac{\pi}{6}d_{\text{ч}}^3\rho_{\text{ч}}} , \quad (3.45)$$

$$a = -g - \frac{18\mu}{d_{\text{ч}}^2\rho_{\text{ч}}} V_y . \quad (3.46)$$

На основі формули (3.46) складаємо диференціальне рівняння для визначення вертикальної швидкості руху деревної частинки відносно потоку з урахуванням початкової умови:

$$a(t) = -g - \frac{18\mu}{d_{\text{ч}}^2\rho_{\text{ч}}} V_y(t) , \quad (3.47)$$

$$V_y(0) = 0 . \quad (3.48)$$

Розважимо диференціальне рівняння (3. 48) операторним методом [12]:

$$pV_y(p) - V_{y0} = -\frac{g}{p} - \frac{18\mu}{d_{\text{ч}}^2\rho_{\text{ч}}} V_y(p) . \quad (3.49)$$

З урахуванням нульової початкової швидкості деревної частинки:

$$pV_y(p) = -\frac{g}{p} - \frac{18\mu}{d_{\text{ч}}^2\rho_{\text{ч}}} V_y(p) , \quad (3.50)$$

$$pV_y(p) + \frac{18\mu}{d_{\text{ч}}^2\rho_{\text{ч}}} V_y(p) = -\frac{g}{p} , \quad (3.51)$$

$$V_y(p) \left(p + \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \right) = - \frac{g}{p} , \quad (3.52)$$

$$V_y(p) = - \frac{g}{p \left(p + \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \right)} . \quad (3.53)$$

Отже, у термінах операційного обчислення, (3.53) є зображенням залежності вертикальної швидкості деревної частинки від часу. Знайдемо оригінал цього зображення:

$$V_y(t) = -g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \left(1 - \exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} t \right) \right) . \quad (3.54)$$

Для того, щоб визначити час досягнення деревною часткою верхньої поверхні кільця, одержимо вираз для залежності вертикального переміщення від часу:

$$y(t) = y(0) + \int_0^t V_y(\tau) d\tau , \quad (3.55)$$

$$V_y(\tau) = -g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} + g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \tau \right) , \quad (3.56)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t \left(-g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} + g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \tau \right) \right) d\tau , \quad (3.57)$$

$$y(t) = h - \int_0^t g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} d\tau + \int_0^t g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \tau \right) d\tau , \quad (3.58)$$

$$y(t) = h - g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \int_0^t d\tau + g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \int_0^t \exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} \tau \right) d\tau , \quad (3.59)$$

$$y(t) = h - g \frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} t - g \left(\frac{d_q^2 \rho_q}{18\mu} \right)^2 \left(\exp \left(- \frac{18\mu}{d_q^2 \rho_q} t \right) - 1 \right) , \quad (3.60)$$

$$y(t) = h - g \frac{d_q^2 \rho_q}{18 \mu} t + g \left(\frac{d_q^2 \rho_q}{18 \mu} \right)^2 \left(1 - \exp \left(- \frac{18 \mu}{d_q^2 \rho_q} t \right) \right). \quad (3.61)$$

Для практичного застосування формули (3.61) необхідні чисельні значення змінних, які до неї входять: діаметр і щільність деревної частинки. Ці величини не завжди відомі з достатньою точністю. Натомість, може бути відомою максимальна вертикальна (гранична) швидкість, яку може досягти деревна частка:

$$V_{y \max} = g \frac{d_q^2 \rho_q}{18 \mu}, \quad (3.62)$$

де $V_{y \max}$ - модуль максимальної вертикальної швидкості (граничної швидкості) частинки.

Формула (3.62) дає змогу спростити (3.61):

$$y(t) = h - V_{y \max} t + \frac{V_{y \max}^2}{g} \left(1 - \exp \left(- \frac{g}{V_{y \max}} t \right) \right), \quad (3.63)$$

Таким чином, траєкторія руху деревної частинки з урахуванням опору повітря виражається системою рівнянь: .

$$\begin{cases} x(t) = \sqrt{R^2 - \frac{Q_1 t}{\pi h}} \\ y(t) = h - V_{y \max} t + \frac{V_{y \max}^2}{g} \left(1 - \exp \left(- \frac{g}{V_{y \max}} t \right) \right) \end{cases}. \quad (3.64)$$

Використовуючи (3.64), можна будувати траєкторії руху деревних частинок при різних значеннях розмірів активних робочих органів і перевіряти можливість вловлювання частинок заданих розмірів очисником повітря.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОЧИСНИКА.

4.1 Дослідження робочого процесу комплексу активних робочих органів

Дослідимо робочий процес комплексу активних робочих органів з кількома зазорами. Для того, щоб можна було використати одержані в розділах 2-3 результати, виразимо потік одного робочого органу через потік усього очисника:

$$Q_1 = \frac{Q}{N}, \quad (4.1)$$

де Q - потік повітря через очисник, м³/с;

N - кількість зазорів між кільцями активних робочих органів.

Аналогічно визначимо потік через один робочий орган:

$$h = \frac{H}{N}, \quad (4.2)$$

де H - сумарна висота зазорів усіх робочих органів очисника, м.

Розглянемо випадок, коли частинка рухається лише під впливом сили земного тяжіння. Для цього перетворимо (3.33):

$$R > \sqrt{r^2 + \frac{Q}{\pi N} \sqrt{\frac{2N}{gH}}}, \quad (4.3)$$

$$R > \sqrt{r^2 + \frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{2}{gNH}}}. \quad (4.4)$$

Визначимо радіус вихідної труби через потік повітря та його швидкість у вихідній трубі:

$$Q = \pi r^2 V_{out} \quad . \quad (4.5)$$

де V_{out} - швидкість повітря у вихідній трубі, м/с.

Отже,

$$r^2 = \frac{Q}{\pi V_{out}} \quad , \quad (4.6)$$

$$R > \sqrt{\frac{Q}{\pi V_{out}} + \frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{2}{g H N}}} \quad , \quad (4.7)$$

$$R > \sqrt{\frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{1}{V_{out}} + \sqrt{\frac{2}{g H N}}}} \quad . \quad (4.8)$$

4.2 Обмеження на параметри робочих органів

З розгляду робочого процесу активних робочих органів очисника випливає, що його здатність затримувати деревні частинки тим більше, чим більший діаметр кілець і більша їхня кількість.

Однак збільшення кількості та розмірів кілець призводить до збільшення маси активних робочих органів. Зважаючи на їх досить велику частоту обертання, невідношеність активних робочих органів призведе до збільшення вібраційного навантаження на конструкцію.

Відомо, що сила, обумовлена невідношеністю обертювих мас, характеризується наступним рівнянням [13]:

$$F_H = M e \omega^2 \quad , \quad (4.9)$$

де F_H - сила, обумовлена неврівноваженістю обертових мас, Н;

e - ексцентриситет, м;

ω - циклічна частот обертання, 1/с.

Виражаючи масу кільця через його розміри та щільність матеріалу й враховуючи кількість кілець, отримаємо:

$$M = M_1 N_k, \quad (4.10)$$

$$M_1 = \pi (R^2 - r^2) h_k \rho_m, \quad (4.11)$$

$$N_k = N + 1, \quad (4.12)$$

де M - маса комплекту кілець, кг;

M_1 - маса кільця, кг;

N_k - кількість кілець.

h_k - товщина кільця, м;

ρ_m - щільність матеріалу кільця, кг/м³.

Що стосується ексцентриситету, то приймемо його пропорційним радіусу кільця:

$$e = k_e R, \quad (4.12)$$

де k_e - коефіцієнт ексцентриситету.

Отже,

$$F_H = \pi k_e k_h N_k R^3 h_k \rho_m \omega^2, \quad (4.13)$$

$$N_k R^3 \leq \frac{F_{H \max}}{\pi k_e h_k \rho_m \omega^2}, \quad (4.14)$$

де $F_{H \max}$ - максимально-допустима сила, обумовлена неврівноваженістю обертових мас, Н.

4.3 Методика оптимізації розмірів і кількості активних робочих органів очисника

Як було показано в 2.3, показником ефективності очисника повітря є гранична швидкість вловлюваних частинок. Отже, саме гранична швидкість вловлюваних частинок доцільно вибрати критерієм оптимізації. Зауважимо, що з граничною швидкістю вловлюваних частинок безпосередньо пов'язана з їх діаметром (3.62). Варійованими параметрами є кількість кілець і відстань між ними.

Оскільки, виходячи зі структури рівнянь, які описують процеси в очиснику, дана задача відноситься до нелінійних задач дискретної оптимізації, то пропонується наступна її послідовність із застосуванням пошукового методу:

1. Пошук по кількості кілець, який полягає у виконанні пп. 2-7.
2. При певній кількості кілець обчислюється максимально можливий їх радіус, виходячи з обмежень на габаритно-масові характеристики (4.14).
3. Пошук по радіусу кілець, який полягає у виконанні пп. 4-7.
4. Пошук по зазору між кільцями, який полягає у виконанні пп. 5-7.
5. Для певного кількості кілець і зазору між ними перевіряється виконання необхідної умови (3.33) перед продовженням подальшого аналізу цього сполучення параметрів.
6. Для певного радіусу та певної зазору обчислюється час, за який частинка у своєму горизонтальному русі досягне вихідної труби, за формулою (3.17).
7. Виходячи з одержаного значення часу, обчислюється гранична швидкість частинки, відповідна її потраплянню на поверхню кільця в цей момент часу, шляхом розв'язання рівняння (3.63) при кінцевому нульовому значенні вертикальної координати:

$$h - V_{y \max} t_K + \frac{V_{y \max}^2}{g} \left(1 - \exp \left(- \frac{g}{V_{y \max}} t_K \right) \right) = 0 . \quad (4.15)$$

Це трансцендентне рівняння, яка можна розв'язати пошуковим методом.

8. Раціональними значеннями кількості кілець, зазору між ними та їх радіусу є ті, яким відповідає найменша гранична швидкість частинки.

4.4 Перспективи подальших досліджень з удосконалення математичної моделі очисника повітря з активними робочими органами

Перспективним напрямком подальших робіт є удосконалення моделі робочого процесу в очиснику повітря, а саме - тривимірне комп'ютерне моделювання руху деревних частинок [14-15]. Рух деревної частинки в повітряному потоці доцільно досліджувати шляхом складання та чисельного розв'язання диференційного рівняння її руху. Повітряна швидкість частинки визначатиметься як різниця швидкостей частинки та повітря, яке її оточує. Це дасть змогу визначити характер обтікання частинки повітрям за допомогою критерію Рейнольдса та відповідне значення коефіцієнту опору. Далі обчислюватимуться компоненти вектора сили опору. Векторна сума сил опору та земного тяжіння визначить рівноважну сил, які діють на частинку. Диференційне рівняння руху частинки складатиметься на основі другого закону Ньютона. Чисельне розв'язати таке рівняння можливе шляхом двократного інтегрування [14-15].

ВИСНОВКИ

1. Одержано рівняння траєкторії руху частинки в зазорі активного робочого органу. При цьому розглядався рух частинки у двох напрямках:

горизонтальному (зі швидкістю потоку повітря, яке проходить через зазорі активного робочого органу) і вертикальному (під дією сили земного тяжіння з урахуванням сили опору).

2. Проаналізовано вплив кількості та розмірів активних робочих органів на траєкторію руху деревних частинок. Обґрунтовано обмеження на кількість та радіус активних робочих органів, виходячи з навантаження на опори, обумовленого дисбалансом активних робочих органів.

3. Запропоновано методику оптимізації кількості та розмірів активних робочих органів за критерієм мінімальної граничної швидкості частинок, вловлюваних очисником повітря.

4. Технічний ефект та економічна ефективність робота обумовлені більш повним очищенням пилоповітряної суміші від деревних частинок, що дає змогу використовувати їх як матеріал для подальшої переробки.

5. Соціальне та екологічне значення роботи полягає в зменшенні забруднення повітря частинками, які утворюються в різноманітних процесах обробки матеріалів різанням тощо.

6. Сфера застосування одержаних результатів - очисники повітря з активними робочими органами, які використовуються в різноманітних галузях промисловості. Одержані результати можуть бути застосовані при удосконаленні конструкцій раніше виготовлених очисників повітря та при обґрунтуванні основних конструктивно-технологічних параметрів очисників повітря залежно від потреб замовника.

7. Перспективним напрямком подальших досліджень є тривимірне моделювання траєкторій руху деревних частинок в очиснику повітря з активними робочими органами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Osman E., Occupational exposure to wood dust and health effects on the respiratory system in a minor industrial estate in Bursa/Turkey [Text] / E. Osman, K.

Pala // International journal of occupational medicine and environmental health. 2009. -Vol. 22(1). -P. 43-50. DOI: 10.2478/v10001-009-0008-5

2. Kasangana Kevin. Exposure to Wood Dust and Health Effects: A Review of Epidemiological Evidences from Developing Countries [Text] / Kevin Kasangana, Martha Chadyiwa, Daniel Masekameni, Tafadzwa Makonese // Conference of the National Association for Clean Air at Johannesburg, South Africa, October 2017.

Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/323826306_Exposure_to_Wood_Dust_and_Health_Effects_A_Review_of_Epidemiological_Evidences_from_Developing_Countries

3. Озарків І. М. Особливості розрахунку пиловловлювальних апаратів у процесах механічного оброблення деревини [Текст] / І. М. Озарків, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. -2013. -Вип. 23.10. -С. 292-296. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2013_23.

4. Лютий Є. М. Моделювання руху частинки в фільтрувальному циклоні [Текст] / Є. М. Лютий, Л. О. Тисовський, П. П. Нахаєв, А. В. Ляшеник // Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. -2002. -Вип. 12.8. -С. 131-137.

5. Ляшеник А. В. Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі [Текст] / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. -2011. -Вип. 21.09. -С.119-125.

6. Серебрянський Д. О. Математичне моделювання процесу очищення запиленних газових потоків в циклонному пиловловлювачі [Текст] / Д. О. Серебрянський, С. В. Плашихін, Ю. О. Безносик, О. М. Набок. Восточно-европейский журнал передовых технологий. -2014. -Т. 2. -№10 (68). -С. 11-16.

7. Galins Janis. Increasing Cyclone Efficiency By Using A Separator Plate [Text] / Janis Galins, Aigars Laizans, Ainars Galins // Research for Rural Development. -2018. -Vol. 1. -P. 207-210. DOI: 10.22616/rrd.24.2018.032

8. Baltrenas Pranas. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency [Text] / Pranas Baltrenas, Mantas Pranskevičius, Albertas Venslovas // Energy Procedia. -2015. -Vol. 72. -P. 188-195. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.027.

9. Активний циклон з додатково створеним зниженим тиском [Текст] : патент на корисну модель 133367 Україна : МПК В04С 5/13, В04С 5/10, В01D 45/00, В01D 45/14, В08В 5/04 / Войтов В. А., Цимбал Б. М., Шевченко О. М. -№ а 2017 12563 ; заявл. 18.12.2017 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. № 7.

10. Мигаль В.Д. Вибродіагностика машин при експлуатації. Сельськогосподарська техніка / В.Д. Мигаль. – Харків: ХГПУ, 1997. –293 с.

11. Винниченко В.И. Скорость витания частиц и коэффициент запаса для определения скорости газового потока в установке для дегидратации гипса [Текст] / В.И. Винниченко, В.В. Котляренко, А.В. Бабинцев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Химия, химическая технология и экология. Харків : НТУ "ХПИ", 2008. -№ 38. -С 102-112.

12. Легеза В. П. Операційне числення: практикум [Текст] : навч. посіб. / В. П. Легеза, Л. М. Олещенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. -70 с.

13. Кобрін Ю. Г. Аналіз дії незбалансованості ротора молоткової дробарки на його опори [Текст] / Ю. Г. Кобрін, Т. О. Васильченко, Ю. В. Бондаренко, І. А. Шевченко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2019. № 17. С. 5-13.

14. Шевченко С. А. Методика моделювання руху деревних частинок у перехідній зоні очищувача повітря з активними робочими органами [Текст] / С. А. Шевченко, В. К. Погорілий // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022) : матеріали тез доповідей Дванадцятій міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.). – Чернігів : Національний університет «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. – С. 181.

15. Шевченко С.А., Погорілий В.К. Чисельне моделювання руху деревної частинки в очищувачі повітря з активними робочими органами [Текст] / С. А. Шевченко, В. К. Погорілий // Лісівництво, деревообробка та озеленення: стан, досягнення і перспективи : Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки в системі МОН України (ДБТУ, 22–23 листопада 2022 р.). – Харків, 2022. – С. 60.