

Література

1. Довідник Ibbotson Yearbook, 1994.
2. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 142 с.
3. Федотова М.А. Сколько стоит бизнес. – М.: Перспектива, 1996. – 103 с.

УДК 674: 621.928.93

*Проф. Є.М. Лютий¹, д-р техн. наук;
доц. Л.О. Тисовський², канд. фіз.-мат. наук. – УкрДЛТУ;
інж. А.В. Ляшеник – Коломийський політехнічний коледж*

ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ ДЕРЕВНОГО ПИЛУ В ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ЦИКЛОНАХ

Наведено різні підходи до математичного моделювання руху частинки пилу в циклоні, що найчастіше зустрічаються в літературі. Визначено межі застосування кожного з методів для опису руху частинки деревного пилу в сепараторі.

*Prof. Ye.M. Lyutyj; L.O. Tysovs'kyj – USUFWT;
A.V. Lyashenyk – Kolomyjskij polytechnical college*

To the problem of modelling of particle movement in filter cyclone

This article describes the different method of describing of movement of a particle in a cyclone. It describes the limit of using each of different methods.

Останнім часом зріс інтерес до вивчення роботи і практичного застосування циклонів. Незважаючи на простоту конструкції, аеродинамічні процеси, які відбуваються при очищенні повітря від пилу, складно описати математично. У публікаціях [1-3] представлено математичні моделі для опису руху частинки пилу в циклоні. Їх можна розділити на дві групи. До першої групи [1] належать моделі, які створені на основі теореми Кореоліса про абсолютне прискорення точки при складному русі. До другої [2, 3] – спрощені рівняння, які можна одержати, виходячи з умови рівності відцентрової і сили опору середовища рухові частинки пилу до зовнішньої стінки циклона. Обидва підходи до створення математичних моделей розглядалися для опису руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні [4-6].

При використанні теореми Кореоліса було записане рівняння руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні, яке має вигляд [6]:

$$\frac{d\vec{V}_c}{dt} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) + \left(\frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} \right) + 2(\vec{\omega} \times \vec{V}_c) = -\frac{1}{\theta} \vec{V}_c + \frac{\vec{F}}{m}, \quad (1)$$

де: $\vec{F}$ – аеродинамічна сила, яка виникає у фільтрувальному циклоні внаслідок виникнення потоку фільтрації; $\vec{V}_c$ – швидкість сепарації; θ – час релаксації частинки пилу; $\vec{\omega}$ – миттєва кутова швидкість частинки пилу, яка збігається із кутовою швидкістю обертання повітряного потоку навколо осі циклона; m – маса частинки пилу.

¹ завідувач кафедри прикладної механіки УкрДЛТУ

² кафедра прикладної механіки УкрДЛТУ

Перший член рівняння (1) $\frac{d\vec{V}_c}{dt}$ є відносним прискоренням частинки пилу (прискоренням сепараційного руху) (рис. 1) і може дорівнювати нулю лише при $V_c = \text{const}$, що, як правило, неможливо [6].

Сума $\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) + (\frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R})$ є переносним прискоренням частинки пилу, причому, перший доданок характеризує радіальну (відцентрову) складову, а другий – трансверсальну (поперечну) складову, яка завжди збігається із напрямком повітряного потоку.

Останній доданок у лівій частині рівняння (1) характеризує прискорення Кореоліса, яке спрямоване на периферію потоку.

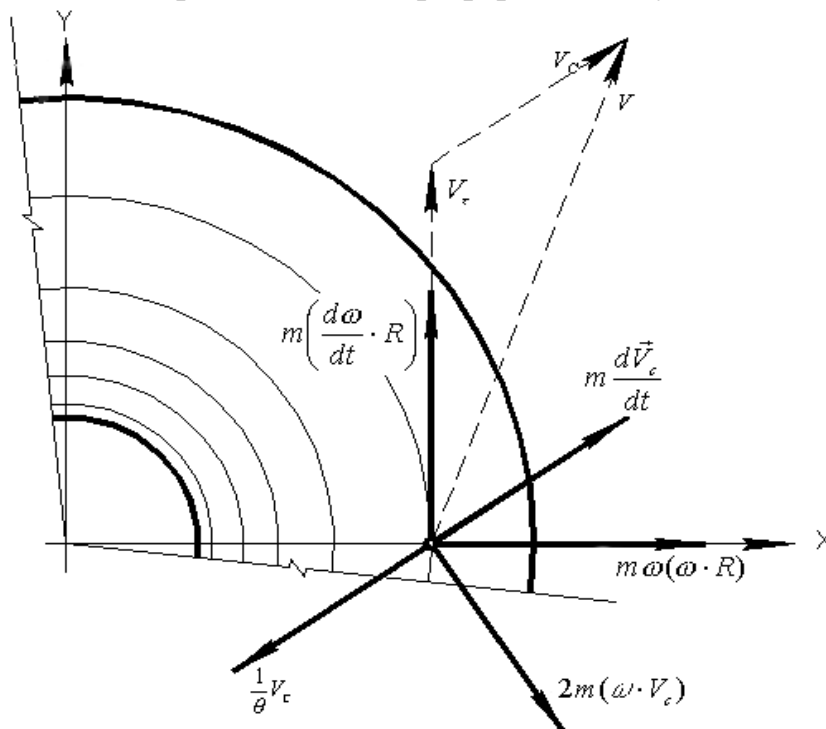


Рис. 1. Схема сил, що діють на частинку пилу в циклоні

При проектуванні даного рівняння на осі координат після перетворень було отримано систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{a_1y - a_2x}{x^2 + y^2} = 0 \\ \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \cdot \frac{dy}{dt} - \frac{a_1x - a_2y}{x^2 + y^2} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де a_1 і a_2 – постійні, що характеризують фізико-механічні властивості частинки пилу і відповідно дорівнюють [6] $a_1 = k/\theta$; $a_2 = G/\theta$; G – потік фільтрації на одиниці висоти H циклона.

Після перетворень системи (2) було одержане рівняння руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні:

- на початковій ділянці руху

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \cdot \frac{dR}{dt} - \frac{[k + (V_{\tau 0} R_0 + k)e^{-\frac{t}{\theta}}]^2}{R^3} - \frac{a_2}{R} = 0, \quad (3)$$

• та за її межами

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\theta} \cdot \frac{dR}{dt} - \frac{A}{R} = 0, \quad (3')$$

де $A = V_{\tau}^2 + a_2$.

Перейшовши до полярної системи координат ($R = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi = \arctg y/x$) та після деяких перетворень, систему диференціальних рівнянь (2) можна записати у такому вигляді:

$$R^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2R \frac{dR}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \frac{R^2}{\theta} \cdot \frac{d\varphi}{dt} - a_1 = 0. \quad (4)$$

Для того, щоб результат розв'язання системи диференціальних рівнянь (3)-(4) був єдиним, то мають задовольнятися дві початкові умови:

$$t = 0 \quad R = R_0, \quad \frac{dR}{dt} = V_0. \quad (5)$$

Визначивши із першого рівняння системи (3)-(4) координату R і підставивши її значення в друге рівняння системи, визначимо траєкторію руху частинки пилу у фільтрувальному циклоні [6]. Недоліком такого підходу є те, що розв'язок знаходиться числовими методами, а тому важко побудувати інженерні формули, які можна було б використати при проектуванні циклонів.

Інший підхід, що ґрунтується на умові рівності відцентрової сили, сили опору середовища та сили захоплення частинки потоком фільтрації, було наведено в роботі [5]. У цьому випадку рівняння руху частинки пилу в циклоні має вигляд:

$$\frac{1}{\theta} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{R} V_{\tau}^2 + \frac{G}{\theta R}, \quad (6)$$

де: $\frac{1}{\theta} \cdot \frac{dR}{dt}$ – сила опору середовища; $\frac{1}{R} V_{\tau}^2$ – відцентрова сила, що діє на частинку пилу; $G/\theta R$ – сила захоплення частинки пилу потоком повітря.

У результаті проведеного аналізу було отримано формулу для визначення діаметра найменших частинок пилу, ефективність вловлення яких становить 100 %.

$$d = 3 \sqrt{\frac{\mu \cdot a \cdot b}{\pi \rho Q (1-q)} \left(\frac{R_2 - R_1}{n_{об}} - \frac{q \cdot a \cdot b}{H(1-q)} \right)}. \quad (7)$$

Різниця між рівняннями (3) та (7) полягає в тому, що при виведенні (6) з рівняння (3) в останньому нехтують членом $d^2 R/dt^2$, який, з точки зору

математики, може мати визначальний вплив на математичний опис процесу вловлення частинки пилу в циклоні.

У даній роботі зроблена спроба оцінити правомірність такого нехтування і визначити можливість застосування рівняння (7) для оцінки ефективності конструкції циклона.

Розглядався рух частинок деревного пилу з такими характеристиками:

- густина матеріалу частинки 700 кг/м^3 ;
- продуктивність $Q=0,4 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Характеристики циклона:

- висота циліндричної частини $H=0,6 \text{ м}$;
- діаметр циклона $D=400 \text{ мм}$;
- діаметр вихлопної труби $d=236 \text{ мм}$;
- частка продуктивності фільтрації $q=0,1$.

Для вивчення можливості застосування рівняння (6) і формули (7) для розрахунку характеристик циклона з фільтрувальною зовнішньою стінкою, проаналізуємо результати, отримані за допомогою спрощеної формули та розв'язуванням точних диференціальних рівнянь (3)-(4). Із рівняння (6) після перетворень було отримано [5]:

$$R = \sqrt{2(\theta V_{\tau}^2 + G)t + R_{bx}^2}. \quad (8)$$

Тепер, підставляючи відповідні значення t , побудуємо траєкторії руху частинки в циклоні з фільтрувальною стінкою. На тому ж графіку відобразимо рух частинок пилу, скориставшись результатами розв'язку задачі в точній постановці [6]. Результати представлені на рис. 1. Крива 1 відповідає траєкторії руху частинки пилу, яка була описана за допомогою рівняння (6), крива 2 – одержана при розв'язку точних диференціальних рівнянь.

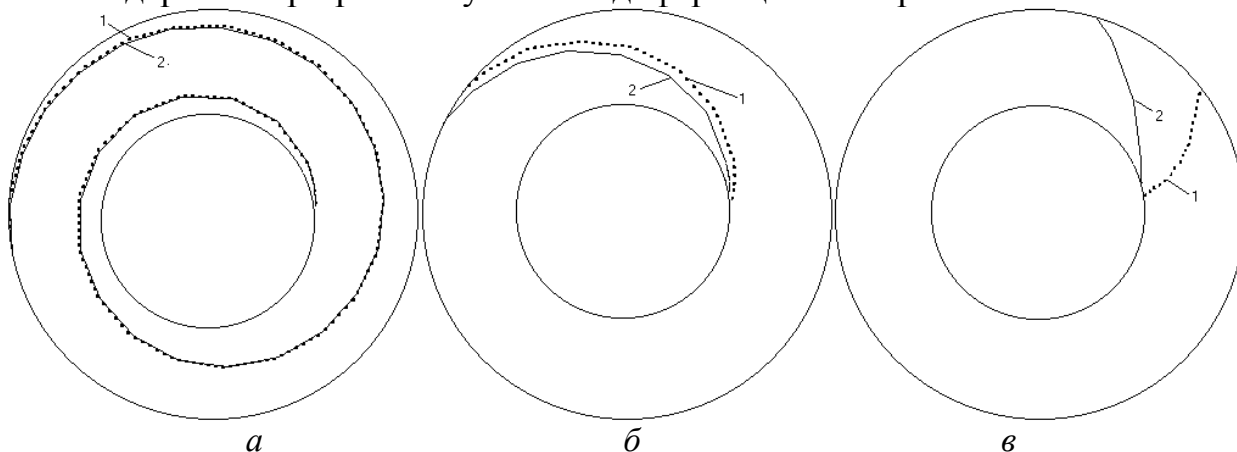


Рис. 2. Траєкторії руху частинок у циклонах, побудовані по спрощеній формулі (крива 1) та при розв'язуванні точних диференціальних рівнянь (крива 2) для частинок пилу діаметром 5 мкм (а), 10 мкм (б) і 20 мкм (в)

Для частинки пилу, діаметр якої становить 5 мкм (рис. 2,а), траєкторії руху частинки (крива 1 і 2) практично збігаються. Зі зростанням діаметра частинки траєкторії починають відрізнятися. Причому зі збільшенням діаметра зростає різниця між траєкторіями (рис. 2 б, в).

Із рівняння (8) обчислимо час, за який частинка пилу досягне зовнішньої стінки циклона. При цьому вважаємо, що в момент входу в циклон

вона розміщена в найбільш віддаленій від зовнішньої стінки точці, тобто її початкове положення – R_1 :

$$t = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2(\theta V_\tau^2 + G)},$$

де: R_1 – радіус вихлопної труби циклона; R_2 – радіус зовнішньої стінки циклона.

Залежність часу, за який частинка досягне зовнішньої стінки циклона, від діаметра цієї частинки зображено на рис. 3. Крива 1 відображає час досягнення зовнішньої стінки різними за діаметром частинками пилу, що був визначений з рівняння (6), а крива 2 – при розв'язуванні числовими методами точних диференціальних рівнянь.

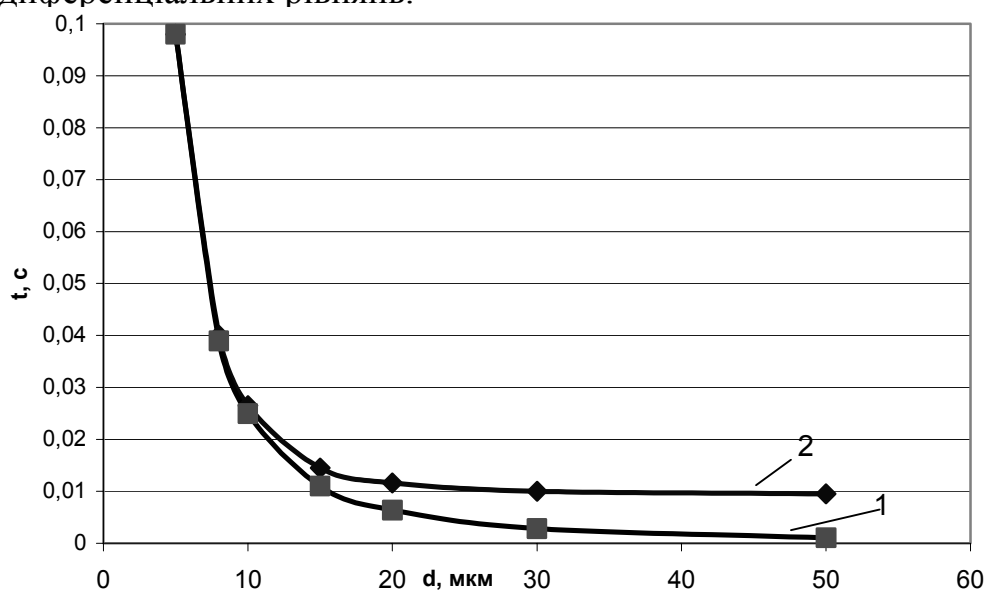


Рис. 3. Залежність часу досягнення зовнішньої стінки частинкою пилу, яка обчислена за допомогою спрощеного методу (крива 1) та точних диференціальних рівнянь (крива 2)

Для частинок пилу, діаметр яких не перевищує 10 мкм, час досягнення зовнішньої стінки, що був обчислений обома методами, практично збігається. При зростанні діаметра ($d > 10$ мкм) значення часу починає різнитися, причому значення часу, визначене з рівняння (6), є меншим.

Наведені результати на рис. 2 та рис. 3 дають змогу зробити ряд висновків. Для дрібних частинок пилу ($d < 10$ мкм) траєкторії руху, описані точними диференціальними рівняннями, практично збігаються з результатами, що були одержані при використанні (6). Тому для таких частинок можна знехтувати першим членом у рівнянні (3). З подальшим зростанням діаметра частинки пилу траєкторії починають відрізнятися. Різниця між траєкторіями зростає зі збільшенням діаметра частинки пилу. Траєкторії, які побудовані за допомогою спрощеної формули, починають різко зміщуватися до зовнішньої стінки циклона. Такий рух не є природним і не може бути пояснений дією якихось фізичних факторів, а є наслідком того, що дія членів рівняння (3) на крупні частинки, які були відкинуті при спрощеному розв'язку, є настільки великою, що їх ігнорування призводить не тільки до кількісних, але й до якісних похибок. Тому спрощені формули не можуть бути використані для опису

руху частинки пилу при інерційній сепарації в криволінійних потоках. Такі розрахунки можуть проводитися тільки засобами використання точних диференціальних рівнянь (3)-(4).

З іншого боку, кількість обертів, які здійснює частинка навколо осі циклона, залежить від її діаметра (маси). На рис. 4 представлено графік залежності кількості обертів, які здійснює частинка пилу, щоб досягнути зовнішньої стінки циклона, від її діаметра.

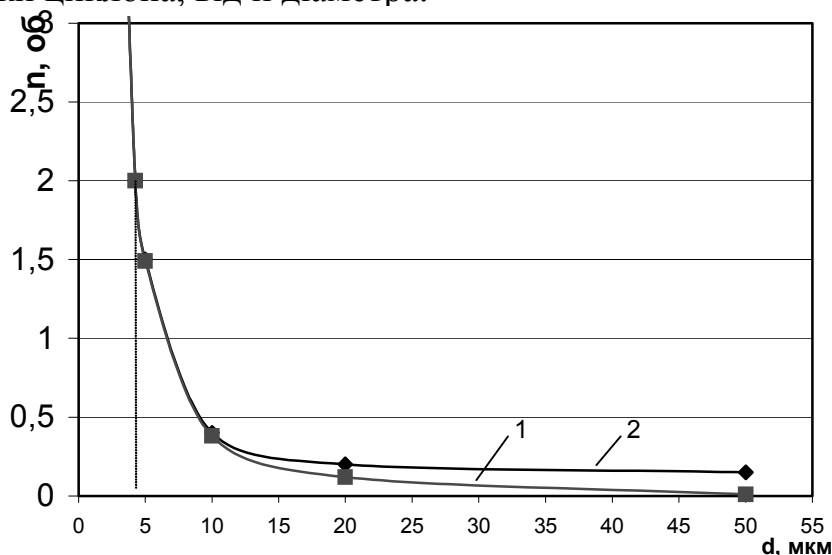


Рис. 4. Залежності кількості обертів, які здійснює частинка пилу в циклоні від її діаметра: 1 – використання спрощеного рівняння; 2 – використання точних диференціальних рівнянь

Якщо тепер припустити, що вловленою буде та частинка пилу, яка за час перебування в циклоні досягне зовнішньої стінки менше, ніж за два оберти [5], то з наближеної (рис. 4 крива 1) та точної (рис. 4 крива 2) теорії можна прийти до однакових висновків. А саме, вловленою буде та частинка пилу, діаметр якої не менший за 4,26 мкм. Траєкторії такої частинки зображено на рис. 5. Рівняння (6) (рис. 4, крива 1) та точний розв'язок (крива 2) рух такої частинки описують однаково. При визначенні критичного діаметра частинки з формули (7) значення діаметра буде дорівнювати 4,33 мкм. Похибка між 4,26 і 4,33 мкм викликана наближеним обчисленням часу перебування частинки пилу в циклоні, проте вона не має значного впливу на результат. Тому рівняння (6) і формула (7) можуть бути використані для опису руху частинки пилу критичного діаметра в циклоні з фільтрувальною зовнішньою стінкою, а формула (7) – для інженерних розрахунків.

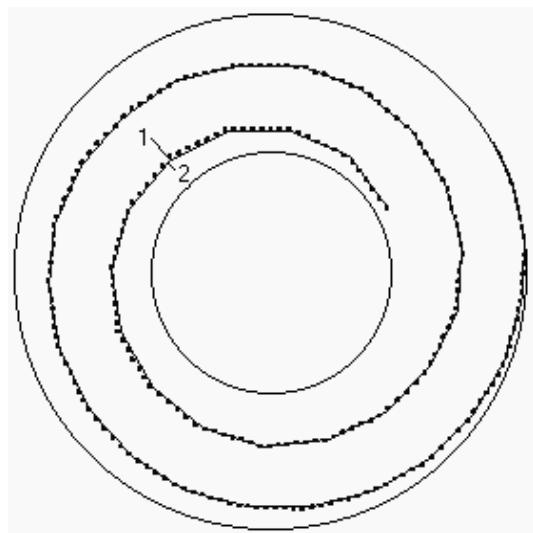


Рис. 5. Траєкторії руху частинки пилу, діаметр якої становить 4,26 мкм в циклоні з фільтрувальною зовнішньою стінкою, побудовані за спрощеною (крива 1) формулою та при розв'язуванні точних диференціальних рівнянь (крива 2)

Проаналізуємо опис впливу характеристик конструкції циклона та режиму очищення повітря на діаметр частинки, що буде вловлена в циклоні, який описується за допомогою точних рівнянь та спрощеної формули. Для цього скористаємось формулою (7) і побудуємо графік залежності діаметра частинки пилу, що буде вловлена в циклоні, від продуктивності циклона (рис. 6).

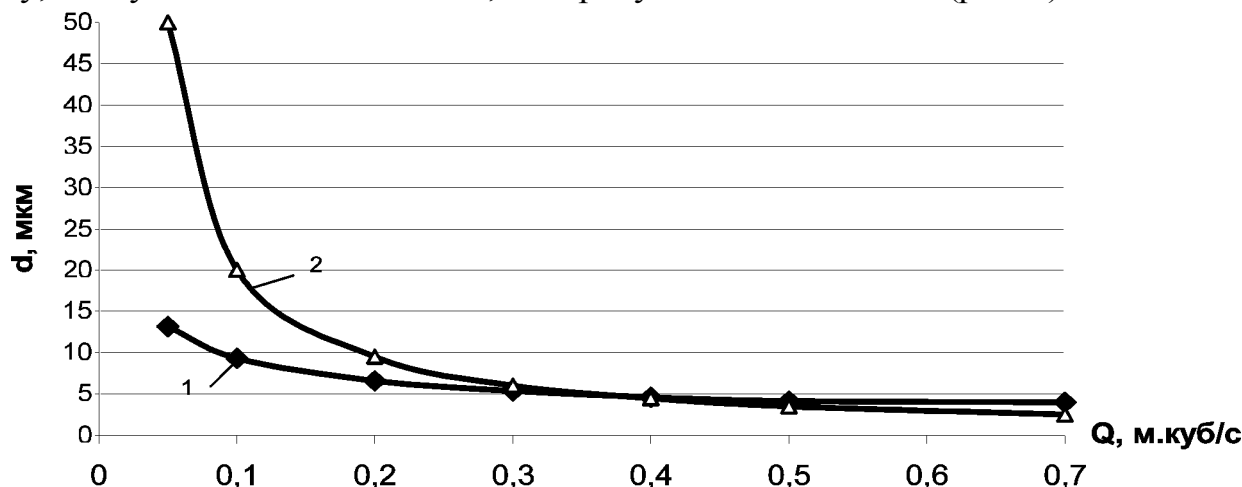


Рис. 6. Залежність діаметра частинки пилу, що буде вловлена в циклоні, від продуктивності циклона при визначенні за спрощеною формулою (крива 1) і розв'язком точних рівнянь (крива 2)

На рис. 6 крива 1 відповідає обчисленню за спрощеною формулою, а крива 2 – за допомогою точних рівнянь. У межах продуктивності вище $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ обидва методи дають близькі результати. Зі спаданням продуктивності менше $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ різниця між значенням діаметра частинки різко зростає. Проте необхідно зауважити, що даний циклон був спроектований на продуктивність $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$, за якої різниця між значеннями є мінімальною. При роботі циклона залежно від завантаження обладнання кількість повітря, яке подається в циклон для очищення може змінюватися від $0,3$ до $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$. У цьому діапазоні продуктивностей різниця між результатами, отриманими двома методами, є незначною. Тому вплив режиму очищення повітря від пилу в циклоні в межах робочих продуктивностей може бути описаний за допомогою рівняння (6) і формули (7).

На основі наведеного вище можна сформулювати такий висновок. Для фракцій пилу та режимів роботи циклона, що зустрічаються в деревообробній промисловості для інженерних розрахунків критичного діаметра частинки пилу, яка буде вловлена в циклоні, може бути використане спрощене рівняння руху частинок пилу (6) та формула (7). Одержаний результат є справедливим для частинок деревного пилу, густина яких $\leq 700 \text{ кг}/\text{м}^3$. Зростання густини частинок пилу буде призводити до збільшення похибки між точним та спрощеним рівнянням. Тому одержаний результат є справедливим для деревообробної галузі. Використання спрощеної формули для розрахунку циклонів у хімічній промисловості та металургії має вивчатися додатково.

Література

1. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации/ Под ред. Н.Я. Фабриканта. – М.: Госстройиздат, 1961. – 121 с.

2. **Yuanhui Zhang.** Modeling and Sensitivity Analysis of Dust Particle Separation for Uniflow Dedusters. University of Illinois Urbana-Champaign, 2000. – p.1-13.

3. **Christian Fredriksson.** Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder. Doctoral thesis. Lulea university of technology. Sweden. 1999. – p.169.

4. **Лютій Є.М., Нахаєв П.П., Ляшеник А.В.** Ефективність застосування циклонів із фільтруючими зовнішніми стінками// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип. 12.2. – С. 121-125.

5. **Лютій Є.М., Тисовський Л.О., Нахаєв П.П., Ляшеник А.В.** Моделювання руху частинки в фільтрувальному циклоні// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип. 12.8. – С. 131-137.

6. **Лютій Є.М., Тисовський Л., Кондур О.С., Ляшеник А.В.** До виведення рівняння руху частинки пилю у фільтрувальному циклоні// Наук. вісник УкрДЛТУ: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип. 13.2. – С. 241-249.

7. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. Издательство иностранной литературы, Москва, 1956. – 512 с.

УДК 674.047 *Инж. В.І. Полоз; проф. В.В. Шостак, д-р техн. наук – УкрДЛТУ*

БЕЗВІДМОВНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ ГОЛОВНОГО КОНВЕЄРА ЗАВОДУ "ІНТЕРПЛИТ"

Визначено середнє напрацювання на відмову і параметр потоку відмов у вигляді рівняння регресії, яке представлено поліномом третього степеня. Показники безвідмовності дають змогу оптимізувати тривалості міжремонтного періоду і структуру ремонтного циклу для всього обладнання.

Ключові слова: надійність, безвідмовність, обладнання, деревностружкова плита.

Eng. V.I. Poloz; prof. V.V. Shostak – USUFWT

No-failure operation of the equipment of the principal conveyor of the factory "Interplyt"

It is defined an average time between failures and a failure rate as the equation of a regression which presented by a polynomial of the third extent. Indexes of no-failure operation allow to optimize duration of between-repairs phase and structure of a repair cycle of all equipment.

Keywords: reliability, no-failure operation, the equipment, wood particle plate.

Обладнання для виробництва деревностружкових плит представляє собою комплекс автоматичних ліній об'єднаних в одну систему, яка працює безперервно. Для таких систем надійність є вирішальним показником, який визначає якість продукції і продуктивність обладнання. Дослідженням надійності обладнання для виробництва деревностружкових плит присвячено ряд робіт [1, 2], в яких показано що на роботу основного конвеєра впливає тривалість міжремонтного періоду, вид профілактичних ремонтів і тривалість ремонтного циклу. Однак у цих роботах не визначені показники надійності для обладнання що працює за безпіддонним способом.

Метою наших досліджень було встановити залежність показників надійності від часу оперативної роботи обладнання, що працює за безпіддонним способом. Дослідження проводили на заводі "Інтерплит" Надвірнянського ліскокомбінату протягом п'яти ремонтних циклів. Завод працює у три зміни в безперервному режимі. Зупинку роблять тільки на профілактичні ремонти