УДК 674:621.928.93

НОВІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ НА ДЕРЕВООБРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Є.М. Лютий¹, Л.М. Дорундяк²

Проаналізовано відомі досягнення в галузі аспірації та очищення повітря. Описано нове математичне моделювання руху повітря в циклоні, яке ґрунтується на рівняннях Нав'є-Стокса, рівнянні нерозривності потоку, рівнянні стану та рівнянні балансу тепла. Обґрунтовано вплив окремих елементів конструкції на експлуатаційні характеристики циклона. Запропоновано нові співвідношення геометричних розмірів розробленої конструкції циклона транспортних систем та порівняння їх із циклоном-прототипом.

Ключові слова: циклон, транспортна система, ефективність, очищування.

Пневмотранспортні системи (ПТС) широко застосовують для вирішення проблем аспірації повітря від деревообробного обладнання, завдяки чому створюються нормальні санітарно-гігієнічні умови праці робітників у цеху [1-3]. Але при тому виникає низка недоліків, до яких відносять високий рівень шуму, значні витрати електроенергії, інтенсивне зношування трубопроводів, особливо в місцях зміни напрямку руху. Тому важливими чинниками пневмотранспортних систем є зниження рівня енергоспоживання деревообробними підприємствами та підвищення рівня його екологічності.

Аналіз повітроочищувального обладнання, яке застосовують на деревообробних підприємствах, а також відомих підходів до організації питань аспірації та очищення повітря, проведено за такими напрямками:

1. Дослідження відомих конструкцій пиловловлювачів. Особливу увагу приділено циклонам – пристроям, які широко використовують на підприємствах галузі.
2. Аналіз обладнання, яке входить до складу аспіраційних та пневмотранспортних систем.
3. Розроблення теорії повітроочищення, яка, на відміну, від наявних, враховувала б форму апарата та характеристики пилоповітряного потоку на його вході.

Встановлено, що основними недоліками циклонів є низька ефективність процесу повітроочищення, високий гідравлічний опір, постійний характер роботи, що проявляється у відсутності можливості змінювати продуктивність аспіраційної системи залежно від кількості обладнання, яке працює на цей момент. Для деревообробного підприємства, де коефіцієнт одночасності роботи обладнання є низьким, це приводить до того, що обслуговуються верстати, які не працюють на цей момент часу. На це витрачається значна кількість електроенергії. З іншого боку, в зимовий період року аспіраційне повітря, температура якого становить 18-20°C, у великій кількості викидається в атмосферу. Складається ситуація, коли від обладнання, яке не працює, відбирається значна кількість повітря, на що витрачається електроенергія, внаслідок чого виникає потреба ще й нагріти таку ж кількість повітря. Для підвищення ефективності про-

цесу очищення й зменшення пилового навантаження на доквілля після циклонів встановлюють другий ступінь очищення – рукавні фільтри. Двоступеневе очищення є надміру енергозатратним.

На зміну циклонам приходять фільтрувальні станції (ФС) на базі рукавних фільтрів. Саме їх сьогодні здебільшого використовують для очищення аспіраційного повітря від деревообробного цеху. До переваг ФС можна віднести високий ступінь очищення повітря за відносно невеликого гідравлічного опору. У зимовий період року ФС дають змогу у зимовий період року повертати тепле очищене повітря у цех, а у літній – викидати у атмосферу.

Недоліками фільтрувальних станцій є:

1. Очищення повітря відбувається за рахунок проходження запиленого повітря через фільтрувальну тканину, внаслідок чого на ній залишається шар пилу. Тому гідравлічний опір фільтрувальної станції постійно зростає, як наслідок, зменшується її продуктивність. Для ефективної роботи ФС потрібно регулярно регенерувати рукавні фільтри. Відомими є випадки загорання та вибуху фільтрувальних станцій.
2. Внаслідок абразивної дії пилоповітряного потоку та регулярної регенерації фільтрувальна тканина часто руйнується та потребує заміни. Практика показує, що щороку потрібно міняти кілька рукавних фільтрів або й увесь комплект.
3. Рукавні фільтри не призначені для роботи із пилом, який злипається, і тому їх мало застосовують для систем аспірації мебельних цехів.
4. Фільтрувальні станції погано працюють під час очищення повітряних потоків з високою концентрацією пилу.

Порівняно з фільтрувальними станціями, циклони мають такі переваги:

- є прості в користуванні, не потребують додаткового обслуговування, невибагливі в роботі і використовуються у деревообробній промисловості понад століття (відомі з 1886 р.);
- встановлення пристроїв для регенерації рукавних фільтрів всередині фільтрувальних станцій підвищує їх пожежовибухонебезпечність і потребує регулярного контролю та встановлення додаткових засобів пожежогасіння, чого не потребують циклони;
- на відміну від рукавних фільтрів, є стійкими до абразивної дії повітряного потоку;
- є більш компактними і займають менші об'єми порівняно з іншими сепараторами;
- здатні працювати за високих концентрацій пилу у вхідному потоці;
- дають змогу очищати повітря, що викидається, практично від будь-якого типу пилу, дисперсністю більше 5 мкм, зокрема забруднень, які здатні злипатися.

На основі наведеного вище зроблено висновок, що циклони не можуть бути повністю усунено зі сучасного деревообробного виробництва. Їх призначення – очищення повітря від станцій перекачування відходів, де концентрація пилу може становити до 60 %. Оскільки спостерігаються тенденції до розширення робочих площ деревообробних підприємств, то актуальним є використання транспортних пневмосистем (ТПС), ґрунтовні дослідження яких фактично не проводили до цього часу. Критичний аналіз відомих конструкцій розвантажувальних пристроїв, які входять до складу системи, показав, що саме циклони

¹ проф. Є.М. Лютий, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів;

² викл. Л.М. Дорундяк, канд. техн. наук – Коломийський політехнічний коледж НУ "Львівська політехніка"

потрібно використовувати у вузлах розвантаження ТПС. Результати аналізу відомих конструкцій розвантажувальних пристроїв свідчать про необґрунтованість параметрів циклона ТПС, що приводить до збільшення рівня енергоспоживання та зниження екологічної безпеки деревообробних підприємств. Тому й дослідження процесу очищення запиленого потоку в циклонах є актуальним.

З моменту створення циклонів погляди на процес уловлення пилу постійно зазнавали змін. Базовою сепараційною зоною циклона вважали то циліндричну, то конічну його частини. Основними теоріями процесу були гравітаційна, відцентрова, моделювання на основі рівнянь гідрогазодинаміки [4-6].

Гравітаційна теорія циклонного процесу ґрунтувалася на припущенні, що незалежно від ефективності сепараційного процесу, всередині апарата і, зокрема в його висхідному потоці, розмір частинок, які можуть бути винесені з циклона, визначається швидкістю газів, які виходять через вихлопну трубу.

Насправді гравітаційне осідання частинок із висхідного потоку має тільки другорядне значення. Це легко доводиться тим, що циклонна сепарація проходить не тільки у вертикальному, а і у горизонтально розташованому апараті. Не враховувала така теорія й аеродинаміки потоку у вихлопній трубі.

Відцентрова теорія процесу циклонування ґрунтується на експериментальних дослідженнях П.М. Смухіна та П.А. Коузова і припущеннях, що сила інерції частинки дорівнює відцентровій силі, яка бере участь в обертальному русі потоку. Крім цього, вважалось, що швидкість частинки відрізняється від швидкості газу тільки наявністю радіальної складової частини.

У циклонах П.М. Смухіна і П.А. Коузова глибоко опущена вихлопна труба пом'якшує вплив радіального стоку майже вздовж всієї висоти циліндричної частини, створюючи сприятливі умови для виділення аерозольних частинок до зовнішньої стінки циклона. Значний крок до розуміння процесів циклонування зробив О.І. Пірумов [4]. Диференціальне рівняння руху частинки пилу в криволінійному потоці у векторній формі записано наступним так:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{1}{\tau}(\vec{W} - \vec{V}) = -\frac{1}{\tau}\vec{V}_C, \quad (1)$$

де: $\vec{W}$ – середня швидкість потоку; $\vec{V}$ – абсолютна швидкість прямолінійного руху частинки відносно нерухомої системи координат; $\vec{V}_C$ – відносна швидкість руху частинки; τ – величина, яка має розмірність часу і називається часом релаксації частинки.

$$\tau = \frac{m}{3\pi\mu d} = \frac{d^2}{18\mu}\rho, \quad (2)$$

де: m – маса частинки; μ – динамічна в'язкість повітря; d – діаметр частинки пилу; ρ – густина матеріалу частинки.

Якщо врахувати, що переносний рух частинки пилу є обертальним, то відповідно до теореми Кореоліса про абсолютне прискорення точки при складному русі, рівняння (1) представлено так:

$$\frac{d\vec{V}_C}{dt} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) + \left(\frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} \right) + 2(\vec{\omega} \times \vec{V}_C) = -3\pi\mu d v_c. \quad (3)$$

Після проектування рівняння (3) на осі декартової системи координат, переходу до полярних координат та здійснення перетворень отримано рівняння руху частинок у криволінійному каналі на початковому етапі, тобто

$$\frac{d}{dt} \left(R^2 \frac{d\phi}{dt} \right) + \frac{1}{\tau} R^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{k}{\tau}, \quad (4)$$

де: k – деяка постійна величина, що визначається об'ємними витратами потоку повітря та геометричними розмірами поперечного перерізу криволінійного каналу; ϕ – кутова координата; R – радіус потоку.

За межами початкового етапу, тобто, коли час перебування частинки у циклоні є більшим за час її релаксації, рівняння (4) набуває вигляду

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dR}{dt} - \frac{k^2}{R^3} = 0.$$

Внаслідок розв'язання цих рівнянь можна отримати траєкторії руху частинок пилу в циклоні.

Спільними недоліками описаних вище теорій є:

1. Не враховують конструктивних особливостей циклона;
2. Досліджують рух частинки тільки у циліндричній частині циклона або у вихлопній трубі;
3. Результати обчислення діаметра найменших частинок пилу, які будуть уловлені в циклоні, відповідно до описаних теорій, є завищеними;
4. Розглядають рух виключно окремої частинки пилу і нехтують взаємодією частинок між собою та зі стінкою апарата.

Проте описані теорії не давали змоги вивчити вплив форми циклона, співвідношення геометричних розмірів окремих його елементів.

Нижче запропоновано нове математичне моделювання аеродинаміки процесу циклонування. Потік у циклоні вважаємо гомогенним середовищем, поведінку якого описано моделлю в'язкої стискуваної рідини (газу). Повна система рівнянь для аналізу аеродинамічних процесів у циклоні містить рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності потоку, рівняння стану та рівняння балансу тепла.

Рівняння Нав'є-Стокса є основним рівнянням динаміки в'язкого газу й у векторному записі має такий вигляд:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad} \left(p + \frac{2}{3} \mu \text{div} \vec{V} \right) + 2 \text{Div}(\mu \dot{S}). \quad (5)$$

У циліндричній системі координат це рівняння набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = F_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 V_\theta - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 V_z, \end{aligned} \quad (6)$$

де: $\vec{V}(V_r, V_\theta, V_z)$ – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами (r, θ, z) у момент часу t ; $V_r(r, \theta, z, t)$, $V_\theta(r, \theta, z, t)$, $V_z(r, \theta, z, t)$ – проекції вектора швидкості на осі нерухомої циліндричної системи координат; $\rho = \rho(r, \theta, z, t)$ – густина середовища в точці з координатами (r, θ, z) у момент часу t ; $\vec{F} = (F_r, F_\theta, F_z)$ – вектор густини масової сили; $\text{div} \vec{V}$ – дивергенція вектора швидкості $\vec{V}$ у циліндричній системі координат; $\text{grad} \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)$ – градієнт скалярного поля функції ϕ ; $\dot{S}$ – тензор деформації.

Дивергенцію тензора $T \text{Div} T$ у циліндричній системі координат визначено співвідношеннями:

$$\begin{aligned} (\text{Div} T)_r &= \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{zr}}{\partial z} + \frac{T_{rr} - T_{\theta\theta}}{r}; \\ (\text{Div} T)_\theta &= \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{z\theta}}{\partial z} + \frac{T_{r\theta} - T_{\theta r}}{r}; \\ (\text{Div} T)_z &= \frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{T_{rz}}{r}. \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння нерозривності потоку з математичним записом закону збереження маси повного об'єму суцільного середовища й у векторному представленні має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0.$$

У циліндричній системі координат рівняння нерозривності потоку набуває вигляду

$$r \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial \theta} + r \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

де $\frac{dV_r}{dt}$, $\frac{dV_\theta}{dt}$, $\frac{dV_z}{dt}$ – проекції вектора прискорення на осі нерухомої циліндричної системи координат. Рівняння стану

$$p = \rho RT, \quad \frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (9)$$

де: R – газова постійна (8,31441 Дж/(моль·К)); ρ – густина (кг/м³); p – тиск (Па); μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; T_0 і μ_0 – відповідно абсолютна температура і коефіцієнт в'язкості, що відповідають певному початковому стану газу; n – показник степеня.

Рівняння балансу тепла:

$$\rho \frac{d}{dt} \left(h + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \vec{P} \cdot \vec{V} + \frac{\partial p}{\partial t} + \text{div} \left(2\mu \vec{\nabla} \dot{S} - \frac{2}{3} \mu \vec{V} \text{div} \vec{V} + \frac{\mu}{\sigma} \text{grad} h \right), \quad (10)$$

де: $\sigma = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ – число Прандтля; λ – коефіцієнт теплопровідності газу.

Для отримання розв'язку на певній ділянці під час інтегрування системи диференціальних рівнянь задано початкові та граничні умови.

Початкові умови – задавання у початковий момент часу полів швидкостей, температури і тиску. Прийнято, що в момент часу $t = 0$ частинки потоку повітря містяться у перерізі $z = 0$ (рис. 1). Складники швидкості V дорівнюють

$$V_\theta = V \cdot \cos \alpha, V_z = V \cdot \sin \alpha, V_r = 0,$$

де α – кут нахилу вхідного патрубку до горизонту (див. рис. 1). Швидкість пилоповітряної суміші у вхідному патрубку V , як правило, дорівнює 17–25 м/с.

Температуру повітряного потоку в початковий момент часу вважають рівною температурі зовнішнього середовища $T = T_{\text{зс}}$, а тиск визначають аеродинамічною характеристикою вентилятора. Задачу розглянуто з припущенням прилипання і непроникності потоку повітря на поверхнях. Теплообміном між стінками апарата і довкіллям нехтували. Статичний тиск на виході з вихлопної труби циклона приймали рівним атмосферному. Поверхню циклона умовно поділено на п'ять поздовжніх (I–V) ділянок і три горизонтальні (VI–VIII) площини (див. рис. 1). Граничні умови наведено в табл. 1.

Рис. 1. Основні ділянки циклона щодо граничних умов

Табл. 1. Граничні умови для числової реалізації математичної моделі

Ділянка	Границі	Граничні умови
I	$r = d/2 + 0; r = D/2; 0 < z < h_3$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial r = 0$
II	$r = d/2 - 0; 0 < z < h_3$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial r = 0$
III	$r = D/2; h_3 < z < H_{II}$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial r = 0$
IV	$r = \frac{z(D - d_0) + D(H_K + H_{II}) - d_0 H_{II}}{2H_K};$ $H_{II} \leq z \leq (H_K + H_{II})$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial n = 0$
V	$H_{II} + H_K \leq z \leq H_{II} + H_K + H_\delta; r = d_1 / 2$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial r = 0$
VI	$d / 2 < r < D / 2$	$V_\theta = V(r) \cos \alpha; V_z = V(r) \sin \alpha; V_r = 0$
	$0 < r < d / 2; z = 0$	$V_\theta = \omega r; V_z = 4Vab/\pi d^2; V_r = 0; \partial T / \partial z = 0$
VII	$d_0 / 2 < r < d_1 / 2; z = H_K + H_{II}$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial z = 0$
VIII	$0 < r < d_1 / 2; z = H_{II} + H_K + H_\delta$	$V_\theta = 0; V_z = 0; V_r = 0; \partial T / \partial z = 0$

Проведений числовий аналіз запропонованої математичної моделі дав змогу описати вплив окремих елементів циклона на його гідравлічний опір та аеродинаміку процесу циклонування.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, узагальнено виходячи з умов аеродинамічної подібності циклонів. Отримані результати дають змогу розробити конструкцію циклона транспортних пневмосистем дерево-

обробних підприємств з фільтрувальним рукавом на кришці його бункера для витікання частини повітря. Рекомендовані співвідношення розмірів такого циклона наведено в табл. 2. За прототип прийнято циклон ЦН-15.

Табл. 2. Співвідношення геометричних розмірів розробленої конструкції циклона транспортних пневмосистем та порівняння їх з циклоном-прототипом

Назва	Позначення	Значення	
		нова конструкція	ЦН-15
Діаметр циліндричної частини циклона	D	D	D
Висота циліндричної частини циклона	$H_{\text{ц}}$	$3D$	$2,26D$
Глибина занурення вихлопної труби	h_z	$1,7D$	$1,44D$
Висота конічної частини циклона	H_k	$2D$	$2D$
Внутрішній діаметр вихлопної труби	d	$0,5D$	$0,59D$
Внутрішній діаметр отвору для видалення пилу	d_0	$0,4D$	$0,3-0,4D$
Довжина вихлопної труби	h_i	$2,3D$	$1,74D$
Висота вхідного патрубку (внутрішній розмір)	a	$0,66D$	$0,66D$
Ширина вхідного патрубку у циклоні	b	$0,2D$	$0,2D$
Довжина вхідного патрубку	l	$0,6D$	$0,6D$
Кут нахилу кришки і вхідного патрубку циклона	α	15°	15°
Діаметр бункера	d_1	$1,5D$	$1,5D$
Висота бункера	H_b	$1,1D$	D
Діаметр фільтрувального рукава	$d_{\text{ф}}$	$0,3D$	–
Висота фільтрувального рукава	$H_{\text{ф}}$	$0,7D$	–
Загальна висота циклона	H	$6,7D$	$5,56D$
Частина повітря, що виходить з бункера, %	q	12	0

Порівняння характеристик розробленого циклона з відомою промисловою конструкцією засвідчує підвищення ефективності процесу очищення повітря в новому апараті за нижчих витрат електричної енергії. Циклони виконують функцію пристроїв розвантаження ТПС. Основним призначенням ТПС є подача подрібненої деревини від цехових систем повітроочищення до місця її тривалого зберігання. Для зберігання відходів деревообробного виробництва використовують бункери великих розмірів або, т. зв. силоси.

У разі, коли підприємство складається з кількох деревообробних цехів, аспіраційне повітря від кожного з них очищується в окремій цеховій повітроочищувальній станції з рукавними фільтрами. З бункера таких станцій подрібнена деревина перекачується за допомогою ТПС у силос, над яким встановлений циклон. Удосконалено схему приєднання циклона до силоса. Запропоновано відділити циклон від бункера-нагромаджувача за допомогою шлюзового живильника. Отже, новий вузол розвантаження ТПС міститиме: транспортний повітропровід, циклон нової конструкції з форбункером та фільтрувальним рукавом на ньому, шлюзовий живильник, силос, вихідний повітропровід.

Схему такої транспортної системи зображено на рис. 2.

Використання нової конструкції циклона у вузлі розвантаження ТПС дало змогу підвищити до 97-99 % ефективність його функціонування залежно від фракційного складу відходів, що транспортують.

Рис. 2. Схема вузла розвантаження транспортної пневмосистеми:
1) транспортний трубопровід; 2) циклон; 3) форбункер; 4) фільтрувальний рукав; 5) шлюзовий живильник; 6) силос; 7) вихідний трубопровід

Література

1. Лютий Є.М. Циклони в деревообробній промисловості : монографія / Є.М. Лютий, Ю.Р. Тисовський, Ю.Р. Дадак, А.В. Ляшеник. – Львів : Ред. журналу: "Український пасічник", 2009. – 148 с.
2. Русак О.Н. Охрана воздушной среды на деревообрабатывающих предприятиях / О.Н. Русак, В.В. Милохов, Ю.А. Яковлев, В.П. Щеголев. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1989. – 240 с.
3. Козориз Г.Ф. Пневматический транспорт деревообрабатывающих предприятий / Г.Ф. Козориз. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1968. – 122 с.
4. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / А.И. Пирумов; под ред. Н.Я. Фабриканта. – М. : Изд-во "Гостройиздат", 1961. – С. 13-19.
5. Тисовский Л.О. Математическое моделирование аэродинамических процессов в циклоне / Л.О. Тисовский, Л.М. Дорундяк, А.В. Ляшеник, Ю.Р. Дадак // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов и перспективы их развития : матер. Междунар. науч.-техн. конф. – В 2 ч., 25-27 ноября 2009 г. – Минск : Изд-во БГТУ, 2009. – Ч. 2. – С. 177-182.
6. Кирсанова Н.С. Новые исследования в области центробежной сепарации пыли: обзорная информация (НИИГаз) / Н.С. Кирсанова. – М. : Изд-во "Наука", 1989. – 57 с.

Надіслано до редакції 24.02.2016 р.

Лютий Е.М., Дорундяк Л.М. Новые подходы к моделированию процессов воздухоочистения на деревообрабатывающих предприятиях

Проанализированы известные достижения в области аспирации и воздушного очищения. Описано новое математическое моделирование движения воздуха в циклоне, которое основано на уравнениях Навье-Стокса, уравнении неразрывности потока, уравнении состояния и уравнении баланса тепла. Обосновано влияние отдельных элементов конструкции на эксплуатационные характеристики циклона. Предложены но-

вые соотношения геометрических размеров транспортных систем и проведено сравнение их с циклоном-прототипом.

Ключевые слова: циклон, транспортная система, эффективность очистки.

Lyutyi Ye.M., Dorundyak L.M. Some New Approaches to Modelling Air Cleaning Processes at Woodworking Enterprises

Well-known achievements in aspiration and air cleaning are analysed. The new mathematical modelling of air movement in the cyclone, based on the Navier-Stokes equations, equations of indissoluble, equations of heat and balance conditions, is described. The influence of separate elements of construction on exploitative characteristics of cyclone is proved. New correlations of geometrical sizes of cyclone's split construction of the transport system are proposed. These correlations are compared to the cyclone-prototype as well.

Keywords: cyclone, transport system, efficiency, cleaning.

УДК 535.343.2

II. ТЕРМОАКТИВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В РАДІАЦІЙНО ЗАБАРВЛЕНИХ КРИСТАЛАХ $\text{CaF}_2\text{-Na}^+$

**З.П. Чорний¹, І.Б. Пірко², В.М. Салапак³,
М.В. Дячук⁴, А.Д. Кульчицький⁵, О.Р. Онуфрієв⁶**

У моделі лінійного іонного кристала досліджено термоіндуковані процеси в радіаційно забарвлених кристалах $\text{CaF}_2\text{-Na}^+$, опромінених за 80 К іонізуючою радіацією. В інтервалі температур 80-300 К досліджено криві спаду концентрації V_K , $V_{KA(1)}$, F_A , $F_{A(1)}$ -центрів та наростання V_{KA} та M_A^+ -центрів. Показано, що у кристалах $\text{CaF}_2\text{-Na}$ з дефектами дипольного типу релаксація забарвленого кристала відбувається за рахунок рекомбінаційних процесів. У кристалах з термічно нерівноважними точковими дефектами рекомбінаційні процеси відсутні і сумарна концентрація центрів забарвлення під час нагрівання кристала від 80 К до 300 К залишається сталою.

Ключові слова: кристали, радіація, центри забарвлення.

Вступ. У попередніх роботах [1-3] у моделі лінійного кристала розраховано граничні значення концентрації центрів забарвлення у кристалах $\text{CaF}_2\text{-Na}$, опромінених Х-променями за $T=80$ К. Розрахунки проводили окремо для трьох типів кристалів:

- для кристалів, що містять термічно рівноважні дефекти дипольного типу $[(\text{Me}^+)(\text{V}_a)^+ - (\text{Me}^+)(\text{V}_a)^+]$ -пари дефектів;
- для кристалів з термічно нерівноважними точковими дефектами: $[(\text{Me}^+)(\text{V}_a)^+(\text{Me}^+)(\text{V}_a)^+]$ -пари;
- для кристалів із змішаним типом дефектів, де Me^+ – іон лужного металу ($\text{Me}^+=\text{Li}^+, \text{Na}^+, \text{K}^+$).

(Me^+) – знак " – " означає, що Me^+ -іон має негативний відносно кристалічної ґратки електричний заряд; $(\text{V}_a)^+$ – вакансія фтору (аніонна вакансія), яка відносно кристалічної ґратки позитивно заряджена.

¹ проф. З.П. Чорний¹, д-р фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів;

² доц. І.Б. Пірко, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів;

³ доц. В.М. Салапак, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів;

⁴ ст. викл. М.В. Дячук – НЛТУ України, м. Львів;

⁵ доц. А.Д. Кульчицький, канд. фіз.-мат. наук – НА друкарства;

⁶ доц. О.Р. Онуфрієв, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів

У цій роботі досліджено криві спаду концентрації центрів забарвлення, які генерує радіація у ґратці кристала за температури 80 К, і криві наростання нових центрів забарвлення, які виникають у кристалі під час його нагрівання.

1. Методика досліджень. Розрахунок кривих термічного знебарвлення виконано за формулою Мотта

$$n(T) = \frac{n_0}{1 + \omega \cdot \exp(-\varepsilon / kT)}, \quad (1)$$

де: n_0 – концентрація центрів забарвлення за низьких температур, за яких вони термічно стабільні; $n(T)$ – концентрація центрів забарвлення за температури T , до якої нагріли забарвлений кристал; ε – енергія активації; ω – частотний фактор. Досліджено криві знебарвлення V_K , $F_{A(1)}$, $V_{KA(1)}$ -центрів.

Для визначення кривої термічного знебарвлення V_K -центрів використано: $T_1=120$ К, $\varepsilon_1=0,25$ eВ, $n_{01}=0,6n_0$, $T_2=150$ К, $\varepsilon_2=0,29$ eВ, $n_{02}=0,4n_0$.

При знебарвленні $F_{A(1)}$ -центрів: $T_3=168$ К, $\varepsilon_3=0,51$ eВ.

При знебарвленні $V_{KA(1)}$ -центрів: $T_4=200$ К, $\varepsilon_4=0,65$ eВ.

Значення температур T_1 , T_2 , T_3 та T_4 та енергій активації ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 запозичено з роботи [4].

2. Результати досліджень. Результати розрахунків ілюструють рис. 1-12.

Рис. 1. Термоіндуковані перетворення діркових центрів забарвлення у кристалах $\text{CaF}_2\text{-0,2}$ мол. % NaF : 1, 2 – криві термічного знебарвлення V_K і $V_{KA(1)}$ -центрів відповідно; 3) крива термічного наростання концентрації V_{KA} -центрів.

C – концентрація комплементарних пар центрів забарвлення, C_0 – концентрація доорадіаційних пар дефектів

Рис. 2. Термічне знебарвлення та термоіндуковані перетворення електронних центрів забарвлення у кристалах $\text{CaF}_2\text{-0,2}$ мол. % NaF , опромінених за $T=80$ К: 1) крива термічного знебарвлення F_A -центрів; 2) крива наростання M_A^+ -центрів