

УДК 62.784.431:621.928.93

DOI: 10.30838/P.SMM.2415.250918.215.155

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИДІЛЕННЯ ЧАСТИНОК ПИЛУ З ПОВІТРЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТАЦІЙНОГО ПИЛОВІДОКРЕМЛЮВАЧА

МАЗІЛІН С.Д.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.ЯЦУХ О.В.<sup>2\*</sup>, к.с.г.н., доц.МОХНАТКО І.М.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра цивільної безпеки, Таврійський державний агротехнологічний університет, вул. Б. Хмельницького, 18, 72310, Мелітополь, Україна, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [mazis@ukr.net](mailto:mazis@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2892-8532

<sup>2\*</sup> Кафедра цивільної безпеки, Таврійський державний агротехнологічний університет, вул. Б. Хмельницького, 18, 72310, Мелітополь, Україна, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [jazuch73@ukr.net](mailto:jazuch73@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8265-1573

<sup>3</sup> Кафедра цивільної безпеки, Таврійський державний агротехнологічний університет, вул. Б. Хмельницького, 18, 72310, Мелітополь, Україна, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua](mailto:iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0569-2205

**Мета.** Підвищення санітарно-гігієнічних умов праці за рахунок кращого очищення повітря і зменшення енергомосткості процесу обезпилення повітря в кабінах сільськогосподарських машин за рахунок обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів та режимів роботи вискоєфективного ротаційного пилевідокремлювача. **Методика.** Метод електрогідродинамічних аналогій (ЕГДА) дає змогу експериментально, за допомогою моделювання, розв'язувати різноманітні задачі про потенціальний рух повітря. Цей метод припускає створення з певного електропровідного матеріалу моделі, як правило, геометрично подібної дійсній ділянці руху повітря. **Результати.** Виявлено недоліки існуючих засобів пилевідокремлення і проведено її удосконалення шляхом удосконалення ротаційного пилевідокремлювача і розробки нової форми лопатей з вирізом в середній частині, що дозволить підвищити ефективність ротаційного пилевідокремлювача за рахунок підвищення відділення частинок пилу розміром 3 мкм. Також з використанням ЕГДА побудовані траєкторії руху частинок пилу в каналах ротора. Шляхом підбору числа лопатей та кута їхнього нахилу визначена максимальна ефективність пилевідокремлювача. Встановлено закономірності процесу сепарації часток пилу в каналах ротора і визначено залежності для розрахунку ротаційного пилевідокремлювача. **Наукова новизна.** На основі теоретичних досліджень і досліджень з допомогою електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА) визначена форма міжлопатевого осьового вихору (вихору Тейлора), який виникає при русі потоку повітря в каналах ротора і впливає на закон розподілу швидкостей потоку. Розроблені математичні залежності для визначення ефективності осадження пилових часток на лопатях ротора і видалення їх в пилезбірник в залежності від їх розмірів, діаметра ротора, довжини і кількості лопатей, частоти обертання ротора і продуктивності пилевідокремлювача. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено раціональні режими роботи ротаційного пилевідокремлювача в системі вентиляції кабін сільськогосподарських машин. **Практична значимість.** Запропонована нова форма лопатей ротору з вирізом в середній частині, що дозволяє підвищити ефективність ротаційного пилевідокремлювача за рахунок підвищення відділення частинок пилу розміром 3 мкм.

**Ключові слова:** ротаційний пилевідокремлювач; ротор; лопать; міжлопатевий осьовий вихор; рух частинок пилу, метод електрогідродинамічної аналогії

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПЫЛИ С ВОЗДУХА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТАЦИОННОГО ПЫЛЕОТДЕЛИТЕЛЯ

МАЗИЛИН С.Д.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.ЯЦУХ О.В.<sup>2\*</sup>, к.с.г.н., доц.МОХНАТКО И.Н.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup> Кафедра гражданской безопасности, Таврический государственный агротехнологический университет, ул. Б. Хмельницкого, 18, 72310, Мелітополь, Украина, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [mazis@ukr.net](mailto:mazis@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2892-8532

<sup>2\*</sup> Кафедра гражданской безопасности, Таврический государственный агротехнологический университет, ул. Б. Хмельницкого, 18, 72310, Мелітополь, Украина, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [jazuch73@ukr.net](mailto:jazuch73@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8265-1573

<sup>3</sup> Кафедра гражданской безопасности, Таврический государственный агротехнологический университет, ул. Б. Хмельницкого, 18, 72310, Мелитополь, Украина, тел. +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua](mailto:iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua). ORCID ID: 0000-0003-0569-2205

**Цель.** Повышение санитарно-гигиенических условий труда за счет лучшей очистки воздуха и уменьшения энергоемкости процесса обеспыливания воздуха в кабинах сельскохозяйственных машин за счет обоснования технологических и конструктивных параметров и режимов работы высокоэффективного ротационного пылеотделителя. **Методика.** Метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) позволяет экспериментально, с помощью моделирования, решать различные задачи о потенциальном движении воздуха. Этот метод предполагает создание с определенного электропроводящего материала модели, как правило, геометрически подобной настоящему участку движения воздуха. **Результаты.** Выявлены недостатки существующих средств пылеотделения и проведены их усовершенствования путем усовершенствования ротационного пылеотделителя и разработки новой формы лопастей с вырезом в средней части, что позволит повысить эффективность ротационного пылеотделителя за счет повышения отделения частиц пыли размером 3 мкм. Также с использованием ЭГДА построены траектории движения частиц пыли в каналах ротора. Путем подбора числа лопастей и угла их наклона определена максимальная эффективность пылеотделителя. Установлены закономерности процесса сепарации частиц пыли в каналах ротора и определены зависимости для расчета ротационного пылеотделителя. **Научная новизна.** На основе теоретических исследований и исследований с использованием электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) определена форма межлопастного осевого вихря (вихри Тейлора), который возникает при движении потока воздуха в каналах ротора и влияет на закон распределения скоростей потока. Разработанные математические зависимости для определения эффективности осаждения пылевых частиц на лопастях ротора и удаление их в пылесборник в зависимости от их размеров, диаметра ротора, длины и количества лопастей, частоты вращения ротора и производительности пылеотделителя. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлены рациональные режимы работы ротационного пылеотделителя в системе вентиляции кабин сельскохозяйственных машин. **Практическая значимость.** Предложена новая форма лопастей ротора с вырезом в средней части, что позволит повысить эффективность ротационного пылеотделителя за счет повышения отделения частиц пыли размером 3 мкм.

**Ключевые слова:** ротационный пылеотделитель; ротор; лопасть; межлопастный осевой вихрь; движение частиц пыли, метод электрогидродинамической аналогии

## MODELING OF THE PROCESS OF ISOLATION OF PARTICLES OF DUST FROM AIR AND DETERMINATION OF EFFICIENCY ROTARY DUSTDRAWER

MAZILIN S.D., *Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
YATSUKH O.V., *Ph.D. (Agric.), Assoc. Prof.*,  
MOKHNATKO I.N., *Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Civil Security, Tavriya State Agrotechnological University, 18, B. Khmelnytsky st., 72310, Melitopol, Ukraine, phone +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [mazis@ukr.net](mailto:mazis@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-2892-8532

<sup>2\*</sup> Department of Civil Security, Tavriya State Agrotechnological University, 18, B. Khmelnytsky st., 72310, Melitopol, Ukraine, phone +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [jazuch73@ukr.net](mailto:jazuch73@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-8265-1573

<sup>3</sup> Department of Civil Security, Tavriya State Agrotechnological University, 18, B. Khmelnytsky st., 72310, Melitopol, Ukraine, phone +38 (0619) 42-06-18, e-mail: [iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua](mailto:iryana.mokhnatko@tsatu.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0569-2205

**Purpose.** Improving sanitary and hygienic working conditions due to better air purification and reduction of the energy intensity of the process of dedusting air in the cabs of agricultural machines due to the substantiation of the technological and design parameters and operating modes of the high-performance rotary dust separator. **Method.** The method of electrohydrodynamic analogies (EGDA) allows experimentally, using simulation, to solve various problems of potential air movement. This method involves the creation of a model with a certain electrically conductive material, as a rule, geometrically similar to this part of the air movement. **Results.** The drawbacks of the existing dust separation means are revealed and their improvements are carried out by improving the rotary dust separator and developing a new shape of the blades with a notch in the middle part, which will increase the efficiency of the rotary dust separator by increasing the separation of dust particles 3 microns in size. Also, using EGDA, trajectories of movement of dust particles in the rotor channels were constructed. By selecting the number of blades and their angle of inclination, the maximum efficiency of the dust separator is determined. The regularities of the process of separation of dust particles in the rotor channels are established and the dependencies for calculating the rotary dust separator are determined. **Scientific novelty.** On the basis of theoretical studies and studies using electrohydrodynamic analogy (EGDA), the shape of the inter-blade axial vortex (Taylor vortices), which occurs when air flows in the rotor channels and affects the law of distribution of flow velocities, is determined. Developed mathematical relationships to determine the effectiveness of the deposition of dust particles on the rotor blades and remove them in a dust collector, depending on their size, rotor diameter, length and number of blades, rotor speed and dust separator performance. On the basis of theoretical and experimental studies, rational modes of operation of the rotary dust separators in the ventilation systems of agricultural machinery cabs have been established. **Practical meaningfulness.** A new form of rotor blades with a notch in the middle part has been proposed, which will increase the efficiency of the rotary dust separator by increasing the separation of dust particles 3 microns in size.

**Key words:** rotary saw; rotor; blade; inter-blade axial vortex; movement of dust particles; electrohydrodynamic analogy method

### Постановка проблеми

В робочій зоні операторів сільськогосподарських машин концентрація пилу в декілька разів перевищує допустимі норми та залежить від метеорологічних, кліматичних та сезонних умов, напрямку вітру, виду робіт, швидкості руху, герметичності кабіни тощо. Для створення оптимального мікроклімату в кабінах сільськогосподарських машин необхідно в систему вентиляції включати надійний пиловловлювач з певними конструкційними та енергетичними характеристиками при умові його компактності і високої продуктивності [6].

Основною проблемою в пиловій патології є ураження легеневої тканини і загальна дія пилу на організм працівника. При тривалому вдиханні виникає професійне захворювання на пневмоконіоз, що характеризується розростанням сполучної тканини в легенях і зменшенням їх дихальної поверхні [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання ротаційних пиловловлювачів є одним із найефективніших засобів боротьби з підвищеною запиленістю в кабіні сільськогосподарських машин через те, що на їх роботу не впливає зміна концентрації пилу, вологості, температури і рухливості зовнішнього повітря. Крім того, ротаційні пиловловлювачі мають меншу масу, розміри і витрати енергії, а також характеризуються меншими витратами на технічне обслуговування. Проте вони мають ряд недоліків, серед яких: складність конструкції, утворення завихрень у ділянці торцевого захисного кожуха, а також нерівномірний спектр швидкостей всмоктування по довжині ротора [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що існуючі методи розрахунку параметрів роботи ротаційних пиловловлювачів недостатньо точні, не враховують весь комплекс явищ, які виникають в каналах ротора, пилезбірника, осерадіального дифузора і не дозволяють визначити їх оптимальні геометричні та енергетичні параметри [5].

### Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми

Підвищити ефективність ротаційного пиловловлювача можливо за рахунок вивчення процесу руху частинок пилу вздовж осі пиловітряного потоку в проточній частині ротаційного пиловловлювача. З метою повного виділення часток пилу розміром 3 мкм і менше із потоку повітря, необхідно більш детально вивчити форму лопатей ротора.

### Формулювання цілей статті

Вдосконалення ротаційного пиловловлювача шляхом обґрунтування оптимальних технологічних та конструктивних параметрів для ефективного очи-

щення повітря в кабінах сільськогосподарських машин, а саме урахування числа лопатей ротора та встановлення кута їхнього нахилу.

### Виклад основного матеріалу

Для моделювання сепарації часток пилу в міжлопатевому просторі ротора пиловідокремлювача ми використали установку ЕГДА (мал. 1), яка складається з моделі каналу ротору та електроустановки.

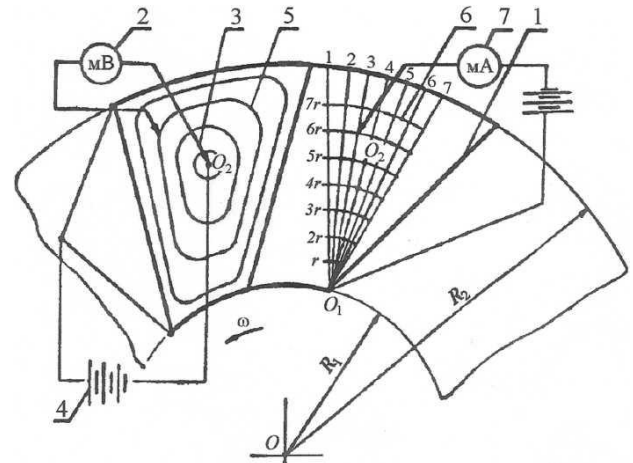


Рис. 1. Схема установки ЕГДА для визначення ліній струмів міжлопатєвого вихору:

1 – шина; 2 – вимірювальний прилад; 3 – щуп; 4 – джерело живлення; 5 – лінії струму вихору;

6 – координатна сітка; 7 – вимірювальний прилад / Installation scheme EGDA for determining the lines of currents inter-blade vortex:

1 - tire; 2 - measuring device; 3 - probe; 4 - power supply; 5 - vortex current lines; 6 - coordinate grid; 7 - measuring device

Модель каналу є областю руху електричного струму і виконана з електропровідної фольги товщиною 0,01...0,015 мм. Фольга клеїться на лист пластику. На фольгу нанесено контур нормального перетину досліджуваного каналу ротора, збільшеного в 15 раз. По периметру контуру каналу закріплена шина з електролітичної міді. До шини під'єднано провід перетином 3...4 мм<sup>2</sup>. Електроустановка містить джерело живлення та вимірювальний прилад зі щупами. В якості джерела живлення використовується акумуляторна батарея, що виключає коливання напруги живлення. З метою зниження іскріння та покращення контакту щупа з фольгою підбирається така напруга, щоб струм в моделі не перевищував 0,1...0,2 А. В якості вимірювального приладу використовували вольтметр універсальний цифровий ШЦ-31. Щупи для вимірювання потенціалу виконані з мідного дроту діаметром 1...2 мм, кінці яких виконані у вигляді шару діаметром 1,2...1,5 мм для забезпечення рівномірного натискання на поверхню моделі при відхиленні щупа від вертикалі.

Визначення ліній струмів міжлопатевого вихору проводилося в два етапи. Перший етап полягає в знаходженні центру міжлопатевого вихору. Для цього [2], з точки  $O_1$ , яка лежить на перетині робочої сторони лопатки з основою ротора, проводять ряд ліній, що перетинають передбачувану область розташування центру вихору. Потім проводять ряд окружностей з центром в точці  $O_1$ , які розсікають лінії на однакові відрізки. Розмістивши один щуп в точці  $O_1$ , а другий в довільній точці на перетині окружностей з лініями, вольтметром універсальним цифровим визначаємо значення сили струму  $I$ . В координатах  $I-r$ , де  $r$  – радіус дуги окружності, будуюмо графік зміни сили струму в напрямі від першої до останньої лінії. З'єднуючи на отриманому графіку значення мінімальних струмів отримуємо, так званий, годограф мінімальних струмів. Центр міжлопатевого вихору буде розташований в точці каналу, що відповідає мінімальному струмі на годографі.

Другий етап визначення ліній струмів вихору полягає в побудові еквіпотенціальних ліній. Для цього в центрі вихору встановлюють шину з площею контакту не менше  $5 \text{ мм}^2$ . До шини припаюють один з щупів. Другий щуп встановлюють в довільній точці каналу і визначають її потенціал. Результати вимірів наносять на модель каналу, виготовлену в такому ж масштабі з картону. Точки однакових потенціалів з'єднують лініями, які є еквіпотенціальними. Еквіпотенціальні лінії і визначають профіль ліній струмів міжлопатевого вихору. Побудовані лінії струмів вихору є вихідними для наступних розрахунків ефективності пиловідокремлювача.

Для оцінки ефективної роботи пиловідокремлювача задаємо габаритні розміри  $R_1$  і  $R_2$  та кінематичні параметри  $n$  виходячи з вибраного електродвигуна і його компонування в роторі пиловідокремлювача. Вибираємо також оптимальну кількість лопатей ротора та кут їх встановлення (нахилу).

Розглянемо вплив кута встановлення лопатей ротора на ефективність роботи пиловідокремлювача з радіусом основи ротора  $R_1=0,05 \text{ м}$ , радіусом зовнішньої частини ротора  $R_2=0,066 \text{ м}$  з частотою обертання ротора  $n=5000 \text{ хв}^{-1}$  і кількістю лопатей 60. В якості вихідного пилу приймаємо пил з густиною матеріалу  $\rho_n=2650 \text{ кг/м}^3$  (кварцовий пил) з таким розподілом частинок по вазі: часточки розміром  $1 \text{ мкм}$  –  $1,3 \%$ ,  $2 \text{ мкм}$  –  $3,2 \%$ ,  $3 \text{ мкм}$  –  $5,1 \%$ ,  $4 \text{ мкм}$  –  $7,4 \%$ ,  $5 \text{ мкм}$  –  $9,2 \%$ ,  $6 \text{ мкм}$  –  $12 \%$ , більше  $6 \text{ мкм}$  – інше.

На установці ЕГДА визначаємо залежність  $I-r$  і знаходимо годограф мінімальних струмів. Наносимо годограф на макет каналу і визначаємо центр міжлопатевого вихору. Годограф мінімальних струмів і центр вихору визначаємо для каналів з кутом встановлення лопатей  $0^\circ$  (радіальні),  $15^\circ$  і  $30^\circ$  з нахилом назад відносно напрямку обертання ротору. На малюнках 2 та 3 показано приклад побудови годографа мінімальних струмів для каналу з кутом встановлення лопатей  $30^\circ$ .

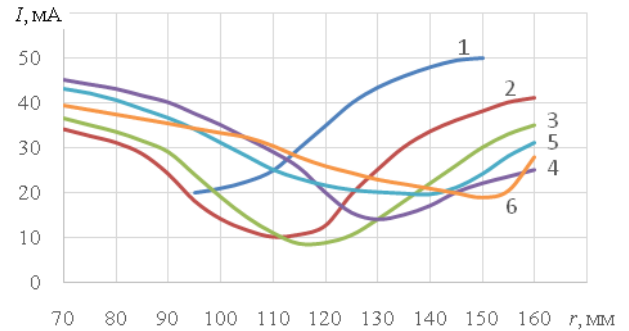


Рис. 2. Годограф мінімальних струмів, визначених на ЕГДА, для каналу ротора з кутом встановлення лопатей  $30^\circ$  / Hydrograph of minimum currents defined on EGDA, for a rotor channel with a mounting angle of blades  $30^\circ$

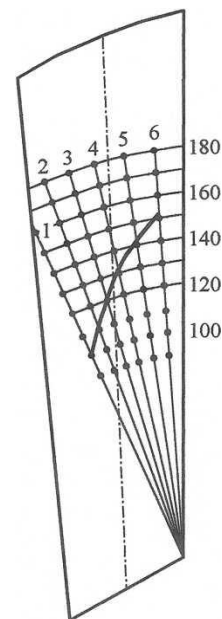


Рис. 3. Годограф мінімальних струмів, суміщений з макетом каналу ротора з кутом встановлення лопатей  $30^\circ$  / Hydrograph of minimal currents, combined with a rotor channel layout with a  $30^\circ$  blade angle

На пристрої ЕГДА визначаємо значення потенціалів в довільних точках каналу і будуюмо експотенціальні лінії. На канал з експотенціальними лініями накладаємо координатну сітку. На мал. 4 показано профіль каналу з нахилом лопатей на  $30^\circ$  і знайденіми на ЕГДА експотенціальними лініями.

Визначаємо величини  $2\tau\omega W_B$ ,  $W_B$ ,  $\tau\omega^2 R$  в точках каналу з визначеними координатами для частинок заданих розмірів. Величини і напрямки векторів  $2\tau[\bar{\omega} \times \bar{W}_B]$ ,  $W_B$ ,  $\tau\bar{\omega} \times [\bar{\omega} \times \bar{R}]$  наносимо на профіль каналу в довільному масштабі. Знаходимо в кожній точці каналу напрям і величину вектора швидкості частинки пилу  $\bar{V}$ . Проводимо плавні криві через точки так, щоб вектор швидкості  $\bar{V}$  завжди був

дотичний до кривої. Отримана крива і буде траєкторією руху частинки заданого розміру.

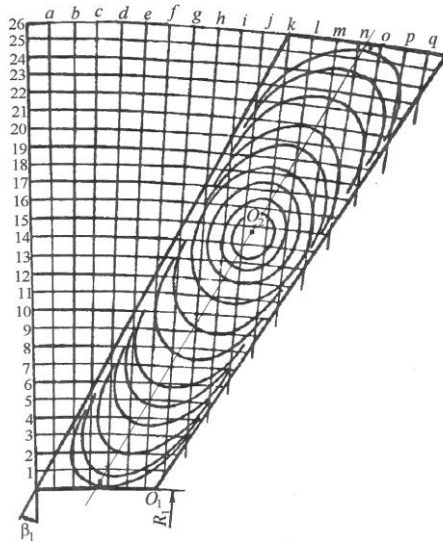


Рис. 4. Лінії струмів міжлопатевого вихору в каналі з нахилом лопатей назад на  $30^\circ$

На малюнках 5а і 5б представлені траєкторії руху частинок пилу розміром 1 мкм в каналі з радіальними лопатями і з їх нахилом на  $30^\circ$ .

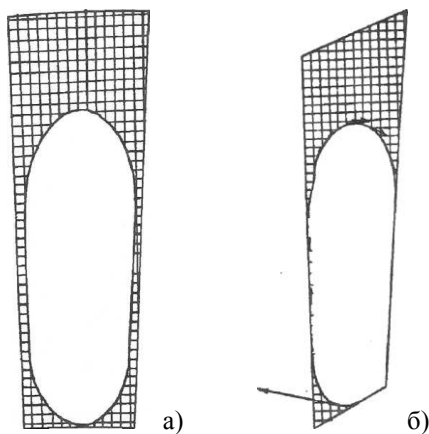


Рис. 5. Траєкторія руху частинок пилу 1 мкм в каналі: а) з радіальними лопатями; б) з нахилом лопатей на  $30^\circ$  / Trajectory of dust particles 1  $\mu\text{m}$  in the channel: a) - with radial blades; b) - with a slope of blades for  $30^\circ$

На малюнку 6а і 6б представлені траєкторії руху частинок пилу відповідно 3 і 5 мкм в каналі з нахилом лопатей на  $30^\circ$ .

Ефективність  $E$  очистки повітря з достатньою точністю визначаємо по методиці К. Будинську [7]:

$$E = 100 - \left[ \frac{S_1}{S} m_1 + \frac{S_2}{S} m_2 + \dots + \frac{S_i}{S} m_i \right] \%, \quad (1)$$

де:  $m_1, m_2, \dots, m_i$  – маса частинок розміром 1, 2, ...  $i$  мкм в % до загальної маси вихідного пилу;

$S_1, S_2, \dots, S_i$  – площа нормального перетину каналу, обмежена основою ротору, поверхнею лопатей,

що відстають від потоку і лінією траєкторії частинок розміром 1, 2, ...  $i$  мкм.

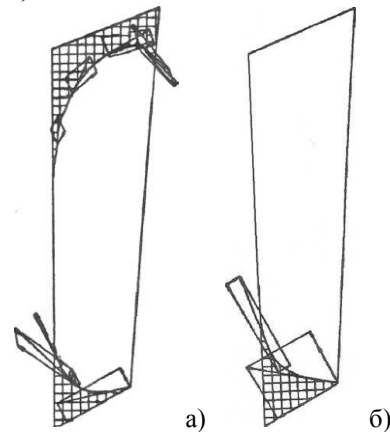


Рис. 6. Траєкторія руху частинок в каналі з нахилом лопатей на  $30^\circ$ : а) розміром 3 мкм; б) розміром 5 мкм / Trajectory of particle movement in the channel with inclination of blades on  $30^\circ$ : а) 3 microns in size; б) 5 microns in size

Для цього знайдемо відношення площі нормального перетину каналу, обмеженого траєкторією руху частинок визначеного розміру, основою ротора і поверхнею лопатей, що відстають від потоку, до загальної площі нормального перетину каналу. Для каналу з нахилом лопатей на  $30^\circ$  відношення площ буде дорівнювати: для частинок 1 мкм – 0,351, 2 мкм – 0,248, 3 мкм – 0,186, 4 мкм – 0,084, 5 мкм – 0,073, 6 мкм – 0,091. Інші частинки рахуються окремо від потоку вже на вході в канали ротору.

Визначаємо ефективність пиловідокремлювача для випадку встановлення лопатей з нахилом на  $30^\circ$ :

$$E = 100 - [0,351 \cdot 1,3 + 0,248 \cdot 3,2 + 0,186 \cdot 5,1 + 0,084 \cdot 7,4 + 0,073 \cdot 9,2 + 0,091]$$

Для каналу з радіальними лопатями відношення площ складає: для частинок 1 мкм – 0,522, 2 мкм – 0,256, 3 мкм – 0,239, 4 мкм – 0,179, 5 мкм – 0,448, 6 мкм – 0,416. Ефективність пиловідокремлення буде дорівнювати:

$$E = 100 - [0,522 \cdot 1,3 + 0,256 \cdot 3,2 + 0,239 \cdot 5,1 + 0,179 \cdot 7,4 + 0,448 \cdot 9,2 + 0,416]$$

З розрахунку видно, що при встановленні радіальних лопатей ефективність пиловідокремлення різко знижується. При встановленні лопатей з нахилом на  $15^\circ$  розрахункова ефективність пиловідокремлювача склала 93,12%.

На мал. 7 представлена залежність ефективності пиловідокремлення від кута нахилу лопатей ротора назад по ходу обертання. При збільшенні кута нахилу лопатей ефективність пиловідокремлення збільшується, але кут нахилу лопатей не може перевищувати кут природного ухилу пилу. В іншому випадку пил буде накопичуватися на поверхні лопатей і відноситися з осьовим потоком очищеного повітря. Середня величина кута природного ухилу для частинок пилу з кварцу, цементу, антрациту, карборунду складає



22...25° [4]. Тому кут нахилу лопатей повинен бути не більше 25...30°.

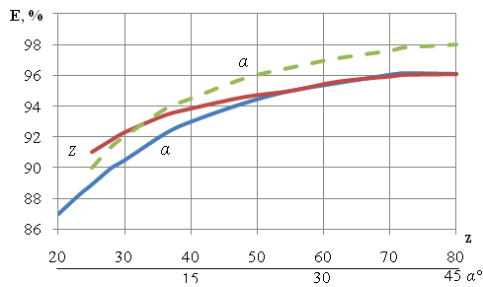


Рис 7. Залежність ефективності ротаційного пиловідокремлювача від кута  $\alpha$  нахилу і кількості  $z$  лопатей ротора:  
 — з прямокутним профілем лопатей;  
 - - - з лопатями, що мають виріз в середній частині  
 / The dependence of the efficiency of the rotary dust separator on the angle  $\alpha$  of inclination and the number  $z$  of rotor blades:  
 — with a rectangular blade profile;  
 - - - with blades having a notch in the middle part

Аналіз руху частинок в нормальному перетині каналу показав, що траєкторія частинок розміром 1...3 мкм найбільше співпадає з лініями струму міжлопатевого вихору, тому не можуть бути відділені від потоку. Але, при нахилі лопатей частинки торкаються поверхні лопатей, що відстають від потоку, тому вони можуть бути захоплені в пилозбірник частинками більших розмірів. В каналі з радіальними лопатями частинки розміром 1...3 мкм не торкаються поверхні лопатей і циркулюють разом з потоком (мал. 5а). Рух частинок розміром більше 5 мкм відбувається за траєкторією, близькою до логарифмічної спіралі. Так, траєкторії частинок більше 5 мкм в каналі з лопатями, нахиленими назад на 30°, добре апроксимуються наступним виразом:

$$R = R_1 \exp\left(\frac{yV}{\omega R_1}\right), \quad (2)$$

де:  $y$  – кутова координата частинки в нормальному перетині каналу ротора, рад.

Очевидно, чим більша результуюча швидкість  $V$  частинки і кутова координата  $y$ , тим крутіша траєкторія частинки і вона швидше досягає периферійної частини каналу. Чим більша кутова швидкість ротора і радіус основи ротора, тим пологіша траєкторія і частинка швидше досягає поверхні лопатей, що відстають від потоку.

В каналі з нахиленими лопатями всі частинки розміром більше 5 мкм відділяються від потоку та рухаються в пилозбірник.

З використанням ЕГДА були побудовані траєкторії руху частинок пилу і визначена ефективність для пиловідокремлювача з різним числом лопатей. На мал. 7 представлена залежність ефективності пиловловлення від числа лопатей. Зі збільшенням числа лопатей ефективність пиловловлення зростає. Однак, при кількості лопатей більше 60 ріст ефективності

сповільнюється, в той же час збільшується вага ротора, що приводить до додаткового дисбалансу та витрат енергії. Зі збільшенням числа лопатей необхідно застосовувати динамічне балансування ротора, що збільшує собівартість пиловідокремлювача. При цьому ефективність пиловідокремлювача при кількості лопатей, рівним 60, відрізняється всього на 0,5...0,8% від ефективності при кількості лопатей 80...90.

Тобто, залежність (1) дозволяє графоаналітичним методом з допомогою моделювання на ЕГДА оцінити ефективність ротаційного пиловідокремлювача з тими чи іншими геометричними і кінематичними параметрами і виключити більшість експериментів по багатьох факторах оцінки ефективності пиловідокремлювача. Аналіз результатів показав, що для забезпечення високої ефективності ротаційного пиловідокремлювача канали ротору необхідно виконувати з нахиленими назад лопатями. Кут нахилу лопатей не повинен перевищувати 30°. Число лопатей доцільно приймати в межах від 60 до 70.

Для вирішення питання відділення частинок пилу розміром 3 мкм і менше проаналізуємо траєкторію руху цих частинок в каналах ротора (мал. 5б і 6а). На малюнку 6а видно, що відрив частинок розміром 3 мкм від лопатей відбувається на відстані  $b_{\max}$  від кінця лопатей, а циркуляція їх закінчується на робочій лопаті на відстані  $b_{\min}$  від її кінця. Якщо висоту лопаті зменшити на цій ділянці на величину від  $b_{\min}$  до  $b_{\max}$ , то траєкторії частинок виявляться за межами перетину міжлопатевого каналу і частинки пилу підпадут під інтенсивну взаємодію відцентрових сил потоку та будуть захоплені ним в пилозбірник. Для плавного переходу висоти лопатей з повної висоти на початку і в кінці і до зменшення її в середній частині необхідно виконати виріз в верхній частині лопаті по кривій згідно мал. 8.



Рис 8. Форма лопаті, що має виріз в середній частині на величину  $0,2h$  від її висоти  $h$  / The shape of the blade that has a notch in the middle part of the value of  $0,2h$  from its height  $h$

Виріз в середній частині лопаті  $0,2h$  визначається як середнє:

$$b_{cp} = \frac{b_{\max} + b_{\min}}{2} = \frac{0,3h + 0,1h}{2} = 0,2h, \quad (3)$$

Значення  $b_{\max}$ ,  $b_{\min}$  визначили з моделі траєкторії руху частинок пилу розміром 3 мкм (мал. 6а).

З урахуванням нової форми лопатей були змодельовані на ЕГДА траєкторії руху частинок пилу в

каналі ротора з нахилом лопатей на  $30^\circ$  і визначена ефективність пиловідокремлювача (мал. 9а і 9б).

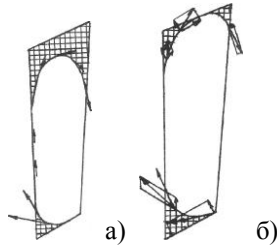


Рис. 9. Траекторія руху частинок в каналі з лопатями з нахилом на  $30^\circ$ , що мають виріз в середній частині: а) розміром 1 мкм; б) розміром 3 мкм /  
The trajectory of the particles in the channel with blades with a slope of  $30^\circ$ , with a notch in the middle part:  
а) 1 micron in size; б) 3 microns in size

Як бачимо, площі нормального перетину каналу, обмежені траекторією руху частинок, основою ротору і поверхнею лопатей, що відстають від потоку, при новій формі лопатей зменшуються, що приводить до зменшення пиловідокремлення. Для каналу з лопатями з нахилом на  $30^\circ$  і новою формою відношення площі складе наступні величини: для частинок

1 мкм – 0,261, 2 мкм – 0,178, 3 мкм – 0,093, 4 мкм – 0,084, 5 мкм – 0,073, 6 мкм – 0,091 (мал. 8).

Ефективність пиловідокремлювача складе:

$$E=100 \cdot [0,261 \cdot 1,3 + 0,178 \cdot 3,2 + 0,093 \cdot 5,1 + 0,084 \cdot 7,4 + 0,073 \cdot 9,2]$$

Аналогічно визначасмо ефективність для пиловідокремлювача з лопатями нової форми з кутом нахилу відповідно на  $15^\circ$  та  $0^\circ$ . На мал. 7 показано графік зміни ефективності пиловідокремлювача з новою формою лопатей від кута нахилу лопатей (пунктирна крива).

#### Висновки

На основі моделювання на ЕГДА процесу виділення частинок пилу з повітря в міжлопатевих каналах ротора встановлено, що лопаті ротора повинні мати нахил назад на кут  $25...30^\circ$  від вертикалі, а їх кількість становити 60...70 шт.

Таким чином, нова форма лопатей з вирізом в середній частині дозволить підвищити ефективність ротаційного пиловідокремлювача та забезпечить стан повітря в кабінах сільськогосподарських машин в межах допустимих норм.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барсуков М. П. Виробнича санітарія у сільському господарстві: навчальний посібник / М. П. Барсуков, О. В. Войналович, Г. Г. Кліценко, О. М. Барсуков, В. Є. Кірдаць. – Київ: Основа, 2011. – 287 с.
2. Мазилін С. Д., Гвоздев А. В., Роговой В. Д. Моделирование потоков в ротационном пылеотделителе систем вентиляции кабин сельскохозяйственных машин / Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. – 1999, №3 – С. 190-194.
3. Мохнатко І. М. Експериментальні дослідження протипотокового ротаційного пиловіддільника повітря / І. М. Мохнатко // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2009. – Вип. 9, т. 3. – С. 160-164.
4. Роговой В. Д., Мазилін С. Д. Моделирование процесса сепарации пылевидных частиц в ротационном пылеотделителе / Труды ТГАТА: «Техника в с.х. производстве», Вып. 1, Том 9, Мелітополь, 2010. – С. 87-89.
5. Штокман Е. А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности / Е. А. Штокман, В. А. Шилов, Е. Е. Новгородский, Т. А. Скорик, Р. А. Амерханов. – М.: АСВ, 2007. – 633 с.
6. Штокман, Е. А. Теплогазоснабжение и вентиляция / Е. А. Штокман, Ю. Н. Карагодин. – Москва : Издательство АСВ, 2013. – 172 с.
7. Karel Budinsky Reberender. Zentrifugalabschidsr mit Kontinierlicher Stanbaleitung.: Staub-Rcinhalt der Zuft, 1970, Vol. 30, no 9, pp. 366-370.

#### REFERENCES

1. Barsukov M.P., Voynalovich O.V., Klitsenko G.G., Barsukov V.Ie., Kirدان V.Ie. *Vyrobnycha sanitariia u silskomu hospodarstvi* [Industrial sanitation in agriculture]. Kyiv: Osnova, 2011, 287 p. (in Ukrainian).
2. Mazilin S.D., Gcozdev A.V., Rogovoy V.D. *Modelirivanie potokov v rotazionnom pyleotdelitele cictem ventilatsii kabin selskokhoziaistvennikh mashin* [Simulation of flows in a rotary dust separator for agricultural vehicles cabin ventilation systems]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universitetu: Ahroinzhenerni doslidzhennia* [Visnyk of Lviv State Agrarian University: Agroengineering research.]. Lviv, 1999, no 3, pp. 190-194. (in Ukrainian).
3. Mokhnatko I.M. *Eksperymentalni doslidzhennia protypotokovoho rotatsynogo pyloviddilnyka povitria* [Experimental studies of counterflow rotary saw blade air]. Pratsi TDAU – Melitopol, 2009, vol. 9, t.3, pp. 160-164. (in Ukrainian).
4. Rogovoy V.D., Mazilin S.D. *Modelirivanie prozessa separatsii pilevidnikh chastits v rotazionnom pyleotdelitele* [Simulation of the separation of dust particles in a rotary dust separator]. *Trudi TGATA: Tekhnika v silskokhoziaistvennom proizvodstve* [Proceedings of TGATA: Technique in agricultural production]. Melitopol, 2010, vol. 1, no 9, pp. 87-89.
5. Shtokman E.A., Shilov V.A., Novgorodskiy T.A., Skorik T.A., Amerkhanov R.A. *Ventiliatsiia, kondizionirovanie i ochistka vozdukh na predpriatiakh pishchevoy promishlennosti* [Ventilation, air conditioning and air purification at food industry enterprises]. Moscow: Izd-vo ASV, 2007, 633 p. (in Russian).
6. Shtokman E.A. *Teplogazosnabzhenie i ventiliatsiia* [Heat and ventilation]. Moscow: Izd-vo ASV, 2013, 172 p. (in Russian).
7. Karel Budinsky Reberender. *Zentrifugalabschidsr mit Kontinierlicher Stanbaleitung.:* Staub-Rcinhalt der Zuft, 1970, vol. 30, no 9, pp. 366-370.

Надійшла до редколегії 7.10.2018 р.