

УДК 631.354.2.001.573

DOI:

## МЕТОДИКА АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ЧАСТОЧКИ ОБЧІСАНОГО ВОРОХУ

Головльов В. А., асп. <sup>\*</sup>,

Леженкін О. М., д. т. н.,

Вершков О. О., к. т. н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
ім. Д. Моторного*

Рубцов М. О., к. т. н.

*Мелітопольський державний педагогічний університет  
ім. Б. Хмельницького*

Тел. (098) 89-00-313

**Анотація** – у статті зазначається, що найбільш ефективним способом збирання зернових є метод обчісування рослин на корені. При чому найкращим варіантом є збирання зернових культур методом обчісування рослин на корені з доробкою обчісаного вороха на стаціонарі. Впровадження даної технології стримується відсутністю надійно функціонуючого збирального агрегату. При цьому найбільш вузьким місцем є система пневмотранспорту. Для обґрунтування якої необхідне проведення механіко-математичного досліджень. У статті поставлена задача знаходження аналітичної залежності для визначення швидкості руху часточки обчісаного вороху зернових. Використовуючи методи математики шляхом перетворення математичної моделі руху частинки вороху була отримана, залежність швидкості руху від швидкості повітряного потоку. Отримана залежність дає можливість моделювати процес та обґрунтувати найбільш економічний режим функціонування пневмотранспортера.

**Ключові слова** – математична модель, обчісаний ворох, рух часточки, диференціальне рівняння, повітряний потік.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день найбільш ефективним методом збирання зернових є обчісування рослин на корені з доробкою обчісаного вороху на стаціонарі, це фактично доведено в роботах [1-4]. Теоретичні основи обчісування рослин на корені закладені в роботах Шабанова П. А. [5]. Конструкція та основи розрахунку обчісуючого пристрою розглянуті в роботі Голубева І. К. [6]. Схематичне рішення всієї причіпної збиральної машини наведено

© Головльов В. А., Леженкін О. М., Вершков О. О., Рубцов М. О.

\* Науковий керівний – д. т. н., проф. О. М. Леженкін.

в роботах [7, 8]. Згідно цих технологічних схем виготовлений її макетний зразок та проведені польові випробування [9, 10], які підтвердили високу ефективність методу обчислення рослин на корені (низький рівень втрат зерна, відсутність травмування, високу питому продуктивність збирального процесу). Але поряд із високою продуктивністю функціонування обчислюючого пристрою мала місце недостатня технологічна надійність транспортуючої системи. Це пов'язано з недостатнім обґрунтуванням параметрів та режимів роботи пневмотранспортеру. В зв'язку з чим виникає проблема теоретичного обґрунтування пневмотранспортеру.

*Аналіз останніх досліджень.* Диференціальні рівняння руху часточки у повітряному потоці наведені в роботі [11]. У даній роботі рух часточки розглядається, як відносний, а рух повітряного потоку переносний. Теоретичні дослідження проводяться з метою обґрунтування процесу пневмосепарації. У нашому випадку поставлена задача транспортування обчисаного вороху за допомогою повітряного потоку. Питання пневмотранспортування розглянуті в роботі [12]. Але в цій роботі мова йде про пневмотранспортування у гумовій промисловості і матеріали, які транспортуються по своїм фізико-механічним властивостям суттєвим чином відрізняються від обчисаного вороху зернових. В зв'язку з цим виникає проблема отримання залежностей для визначення швидкості руху часточки обчисаного вороху зернових.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Отримати залежність для розрахунку швидкості руху часточки обчисаного вороху зернових, від швидкості повітряного потоку, з урахуванням маси часточки та її міделевого перерізу.

*Основна частина.* Швидкість руху часточки можна визначити з математичної моделі:

$$\frac{1}{2} \ln \left| u^2 - 2uV_{\Pi} + V_{\Pi}^2 + \frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F} \right| - \frac{1}{2} \ln \left| u^2 - 2u_{\Pi}V_{\Pi} + V_{\Pi}^2 + \frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F} \right| + \frac{V_{\Pi}}{\sqrt{\frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F}}} \cdot \arctg \frac{u - V_{\Pi}}{\sqrt{\frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F}}} - \frac{V_{\Pi}}{\sqrt{\frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F}}} \cdot \arctg \frac{u_{\Pi} - V_{\Pi}}{\sqrt{\frac{gm \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F}}} = \frac{k}{m} \rho_n F \cdot S, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт опору повітря;

$\rho_n$  – щільність повітря,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;

$F$  – площа проекції тіла на площину, перпендикулярну до напрямку дії повітряного потоку (міделевий переріз тіла),  $\text{м}^2$ ;

$V_{\Pi}$  – швидкість повітряного потоку,  $\text{м} / \text{с}$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м} / \text{с}^2$ ;

$u_B$  – швидкість частинки в точці вильоту з пневмотранспортеру, м/с;

$\alpha$  – кут між віссю  $S$  і вектором сили тяжіння частинки (визначається експериментально);

$S$  – довжина шляху який проходить часточка, м.

Для спрощення загального вигляду математичної моделі (1) введемо позначення:

$$a = \frac{k}{m} \rho_n F, \quad (2)$$

$$b = V_{\Pi}^2 + \frac{g m \cos \alpha}{k \rho_n \cdot F}.$$

Помножимо ліву та праву частину виразу (1) на 2 та одночасно підставимо позначення (2), в результаті отримаємо вираз:

$$\ln|u^2 - 2uV_{\Pi} + b| - \ln|u_B^2 - 2u_B V_{\Pi} + b| + \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{u - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} - \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{u_B - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} = 2aS \quad (3)$$

Потім використовуючи властивості логарифмів можемо записати вираз (3) у вигляді [13]:

$$\ln \left| \frac{u^2 - 2uV_{\Pi} + b}{u_B^2 - 2u_B V_{\Pi} + b} \right| = 2aS - \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \cdot \left( \operatorname{arctg} \frac{u - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} - \operatorname{arctg} \frac{u_B - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \right). \quad (4)$$

Пропотенціюємо вираз (4)

$$\frac{u^2 - 2uV_{\Pi} + b}{u_B^2 - 2u_B V_{\Pi} + b} = e^{2aS - \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \left( \operatorname{arctg} \frac{u - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} - \operatorname{arctg} \frac{u_B - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \right)}. \quad (5)$$

Помножимо обидві частини рівняння (5) на вираз  $(u_B^2 - 2u_B V_{\Pi} + b)$ , тоді:

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b = (u_B^2 - 2u_B V_{\Pi} + b) e^{2aS - \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \left( \operatorname{arctg} \frac{u - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} - \operatorname{arctg} \frac{u_B - V_{\Pi}}{\sqrt{b - V_{\Pi}^2}} \right)}. \quad (6)$$

Оскільки змінні  $u$  і  $V_{\Pi}$  входять до різних функцій, то виразити їх одне через друге явно, неможливо.

Для того, щоб можна було це зробити застосуємо розкладання відомих функцій в степеневі ряди (ряди Маклорена):

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots, \quad (7)$$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots \quad (8)$$

Зробимо грубу оцінку, взявши з цих розкладів лише лінійні члени. Спочатку застосуємо формулу (8):

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b = (u_{\text{B}}^2 - 2u_{\text{B}}V_{\Pi} + b) e^{2aS - \frac{2V_{\Pi}}{\sqrt{b-V_{\Pi}^2}} \left( \frac{u - V_{\Pi} - u_{\text{B}} + V_{\Pi}}{\sqrt{b-V_{\Pi}^2}} \right)}, \quad (9)$$

або

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b = (u_{\text{B}}^2 - 2u_{\text{B}}V_{\Pi} + b) e^{\frac{2aS - 2V_{\Pi}(u-u_{\text{B}})}{b-V_{\Pi}^2}}. \quad (10)$$

Тепер застосуємо формулу (7), матимемо:

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b = (u_{\text{B}}^2 - 2u_{\text{B}}V_{\Pi} + b) \left( 1 + 2aS - \frac{2V_{\Pi}(u-u_{\text{B}})}{b-V_{\Pi}^2} \right). \quad (11)$$

Якщо позначити  $u_{\text{B}}^2 - 2u_{\text{B}}V_{\Pi} + b = p$ , то рівняння (11) можна переписати у вигляді:

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b - \left( 1 + 2aS - \frac{2V_{\Pi}(u-u_{\text{B}})}{b-V_{\Pi}^2} \right) p = 0, \quad (12)$$

або

$$u^2 - 2uV_{\Pi} + b - p - 2aSp + \frac{2V_{\Pi}(u-u_{\text{B}})}{b-V_{\Pi}^2} p = 0. \quad (13)$$

Позначивши  $-p - 2aSp + b = C$ , матимемо:

$$u^2 - 2uV_{\Pi} \left( 1 - \frac{p}{b-V_{\Pi}^2} \right) - \frac{2V_{\Pi}u_{\text{B}}p}{b-V_{\Pi}^2} + C = 0, \quad (14)$$

тобто квадратне рівняння відносно  $u$ .

Розв'язавши це рівняння відносно  $u$  виразимо явно функцію  $u$  від  $V_{\Pi}$ . Для розв'язання цього рівняння знайдемо дискримінант:

$$D = 4V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{p}{b-V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{8V_{\Pi}u_{\text{B}}p}{b-V_{\Pi}^2} - 4C = \left( 2\sqrt{V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{p}{b-V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{2V_{\Pi}u_{\text{B}}p}{b-V_{\Pi}^2} - C} \right)^2,$$

тоді

$$u_1 = V_{\Pi} \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right) - \sqrt{V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{2V_{\Pi} u_B P}{b - V_{\Pi}^2} - C}, \quad (15)$$

$$u_2 = V_{\Pi} \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right) + \sqrt{V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{2V_{\Pi} u_B P}{b - V_{\Pi}^2} - C}. \quad (16)$$

або

$$u_1 = V_{\Pi} \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right) - \sqrt{V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{2V_{\Pi} u_B P}{b - V_{\Pi}^2} + p + 2aSp - V_{\Pi}^2 - \frac{gm \cos \alpha}{k \rho_{\Pi} \cdot F}}, \quad (17)$$

$$u_2 = V_{\Pi} \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right) + \sqrt{V_{\Pi}^2 \left( 1 - \frac{P}{b - V_{\Pi}^2} \right)^2 + \frac{2V_{\Pi} u_B P}{b - V_{\Pi}^2} + p + 2aSp - V_{\Pi}^2 - \frac{gm \cos \alpha}{k \rho_{\Pi} \cdot F}}. \quad (18)$$

Вибір робочих залежностей (17)-(18) можна здійснити підставивши в них значення параметрів.

#### Висновки

1. Вперше отримана математична модель швидкості руху часточки обчесаного вороху у повітряному потоці, яка у явному вигляді встановлює залежність між швидкістю руху часточки та швидкістю повітряного потоку.

2. Аналіз отриманої моделі дозволить в подальшому визначити раціональні кінематичні параметри вентилятору, які дозволять знизити витрати енергії при транспортуванні обчесаного вороху у причеп-возик.

#### Література:

1. *Леженкин А. Н.* Формирование стационарной технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств Украины // Праці ТДАТА. Мелітополь, 2006. Вип. 40. С. 195-205.

2. *Кушнарёв А. С., Леженкин А. Н.* Энергосберегающая технология уборки зерновых для фермерских хозяйств // Перспективные технологии уборки зерновых культур, риса и семян трав: сб. докл. междунаrod. науч.-техн. конф. (г. Мелітополь, 25 февраля 2003 г.). Мелітополь, 2003. С. 17-21.

3. *Леженкин А. Н.* Энергетическая оценка стационарной технологии уборки зерновой части урожая // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 2. С. 5-7.

4. *Леженкин А. Н.* Перспективная технология уборки зерновых для фермерских и крестьянских хозяйств юга Украины // Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК: материалы междунар. науч. конф. Ярославль, 2003. Ч. III. С. 28-29.

5. *Шабанов П. А.* Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис... докт. техн. наук. Мелитополь, 1988. 336 с.

6. *Голубев И. К.* Обоснование основных параметров и режимов работы двухбарабанного устройства для очеса риса на корню: дис... канд. техн. наук. Москва, 1989. 201 с.

7. *Леженкин А. Н.* Машина с очёсывающим устройством // Сельский механизатор. 2004. № 12. С. 2.

8. Причіпна збиральна машина: пат. 98161 Україна: МПК А01D 41/08 (2006. 01). № u 201408537; заявл. 28.07.2014; опубл. 27.04.2015. Бюл. № 8.

9. *Леженкин А. Н., Григоренко С. М.* Результаты полевых испытаний полевой уборочной машины для фермерских и крестьянских хозяйств // Техніка АПК. 2007. № 3. С. 30-32.

10. *Леженкин О. М., Григоренко С. М.* Аналіз виробничої перевірки збиральної машини для фермерських господарств // Праці ТДАТА. Мелітополь, 2007. Вип. 7, т. 2. С. 194-202.

11. *Нелюбов А. И., Ветров Е. Ф.* Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. Москва: Машиностроение, 1977. 190 с.

12. *Голобурдин А. И., Донат Е. В.* Пневмотранспорт в резиновой промышленности. Москва: Химия, 1983. 161 с.

13. *Выгодский М. Я.* Справочник по элементарной математике. 10-изд., стереот. Москва, 1957. 412 с.

## МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЧАСТИЧКИ ОЧЕСАНОГО ВОРОХА

Головлев В. А., Леженкин А. Н., Вершков А. А., Рубцов Н. А.

**Аннотація** – в статті відзначається, що найбільш ефективним способом уборки зернових є метод очесування рослин на корню. При цьому кращим варіантом є робота очесаного вороха в полі з доработкою на стаціонарі. Для реалізації даної технології необхідно мати уборочний модуль і стаціонарний пункт доработки очесаного вороха. Широке впровадження даної технології сдерживається відсутністю надійно функціонуючого уборочного агрегата. При цьому найбільш вузьким місцем є пневмотранспортна система. Для обґрунтування якої необхідно проведення механіко-математичних досліджень. В статті поставлена задача знаходження аналітичної залежності для визначення швидкості руху частинки очесаного вороха зернових. Використовуючи методи математики

путем преобразования математической модели движения частички вороха была получена зависимость движения частички от скорости воздушного потока. Полученную зависимость можно использовать для моделирования процесса, с целью обоснования наиболее экономического решения функционирования пневматического транспортера.

### **MATHEMATICAL MODEL OF THE MOVEMENT OF THE COMBED GRAIN HEAP AFTER STRIPPER HARVESTING MODULE IN THE AIR FLOW**

V. Holovlov, O. Lezhenkin, O. Vershkov, M. Rubtsov

#### *Summary*

The article notes that the most effective way to harvest grain is the method of combing plants on the root. In this case, the best option is to clean the field of the combed heap with completion at the stationary processing point. To implement this technology, it is necessary to have a cleaning module and a stationary point for finalizing the combed heap. The widespread introduction of this technology is constrained by the lack of a well-functioning harvesting module. At the same time, the pneumatic transport system is the bottleneck. For substantiation of which it is necessary to conduct mechanical – mathematical research. The article poses the problem of finding an analytical relationship to determine the speed of movement of a particle of a combed heap of grain. Using the methods of mathematics by transforming the mathematical model of the movement of a particle of a grain heap after stripper module, the dependence of the movement of a particle on the speed of the air flow was obtained. The resulting dependence can be used to simulate the process in order to substantiate the most economic solution for the operation of a pneumatic conveyor.