

**Бандура В. М.**

к.т.н., професор

**Вінницький національний  
аграрний університет****Липовий І. Г.**

викладач

**Подільський науково-  
технічний ліцей для  
обдарованої молоді****Bandura V.****Vinnitsia National Agrarian  
University****Lipoviy I.****Podolsk scientific and  
technical lyceum for the  
gifted young people**

УДК:515.87:637.5.03:621.928.3

DOI: 10.37128/2306-8744-2019-2-3

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНО- ПЛАНЕТАРНОГО ВІДТИСКУВАННЯ В'ЯЗКО- ПЛАСТИЧНОЇ СИРОВИНИ НА ОСНОВІ БЕЗРОЗМІРНИХ КОМПЛЕКСІВ

Визначено фактори, що впливають на процес вібраційно-планетарного центрифугування такі як: швидкість руху вологи, щільність і вологість продукту, конструктивні і технологічні характеристики обезводнювача. На підставі зазначених чинників, використовуючи метод аналізу розмірностей складено критеріальне рівняння, що описує процес вібраційно-планетарного зневоднення в'язко-пластичної сировини.

**Ключові слова:** зневоднення, вібропланетарний рух, розмірність, метод подібності

**Постановка проблеми.** Важко переоцінити важливість застосування фізичного моделювання в сучасних галузях техніки та технологій. Моделювання стало потужним засобом пошуку різних недоліків технічних пристроїв та знаходження шляхів їх усунення. Воно широко використовується для перевірки нових оригінальних технологій. З іншого боку теорія подібності стала науковою основою фізичного експерименту, що робить її невід'ємним засобом фундаментальних досліджень.

Процес зневоложення використовується в різних областях промисловості і займає вагомe місце в технологічних процесах первинної переробки продукції тваринництва і рослинництва. Особливо важливим є зневоложення високоволової сировини, яке зустрічається, наприклад, при виробництві цукру, в фармацевтичній промисловості – при виробництві інсуліну з підшлункових залоз ВРХ і свиней, та ін.

Процес відтискування (зокрема центрифугування) часто передує сушінню, якому піддаються продукти після видалення вільної вологи. Пов'язане це з тим, що механічне зневоднення дешевше і швидше термічного.

Механічне зневоложення є безальтернативним, коли продуктом технологічного процесу є видалена волога (розчин, який в подальшому піддається кристалізації). В цьому випадку від кількості видаленої вологи залежить вихід готового продукту. Для видалення вологи із в'язко-пластичної сировини використовують пресування, центрифугування, сепарацію, рідше просте фільтрування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основна ідея фізичного моделювання полягає в дослідженні об'єкту (моделі), яка є в деякому відношенні подібною до оригінального об'єкту (натури). Проблемами встановлення подібності займалися вчені в різних галузях науки. Використання методів теорії подібності та аналізу розмірностей припускає можливість визначити оптимальні параметри нових зразків обладнання за результатами дослідів по їх зменшеним моделям, які володіють фізичною подібністю. Після цього за характеристиками моделі внаслідок перерахунку через масштабні коефіцієнти можна одержати величини всіх параметрів натурального зразка машини, яка проектується. Але такий підхід не завжди себе виправдовує, що може бути пов'язано як із



самою сировиною, так і дотриманням необхідних кінематичних та динамічних режимів. Альтернативним рішенням є напрямок, при якому експериментальні дослідження за основними факторами відповідають натурному зразку. При такому підході достовірність одержаних даних зростає. Якщо дослідження виконуються на однаковій натурній сировині, то фізичне моделювання перетворюється в геометричне і необхідно витримувати умови подібності як сполучення кінематичного та матеріального [1].

Одними із останніх досліджень в тепломасообмінних процесах [2] де були використані основні положення теорії подібності, динаміки руху віброзваженого шару сипкої продукції, методи теплофізичного експерименту. Складене критеріальне рівняння в узагальнених змінних процесу сушіння насіння соняшнику дозволяє більш точно врахувати вібраційні ефекти при реалізації тепломасообмінних процесів, зокрема збільшення поверхні тепломасообміну, зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя та відповідно сухої в'язкості технологічного середовища. Останні чинники створюють сприятливі умови для потенційного зменшення енерговитрат при транспортуванні та теплової обробці сипкої продукції.

Авторами [3] запропоновані технології адресної доставки енергії для інтенсифікації тепломасопереносу при переробці харчової сировини. В основі запропонованих гіпотез хвильові технології комбінованої електромагнітної та вібраційної дії. Обґрунтовано механізми, ефекти і математичні моделі бародифузії та дії вібраційних полів. Запропоновано числа хвильової подібності, на основі яких узагальнені бази експериментальних даних з екстрагування і сушіння.

У літературному джерелі [4] проведено аналіз процесу вібраційно-відцентрової обробки. За допомогою математичного моделювання технологічного процесу визначено оптимальні його параметри. Виявлено зв'язок параметрів вібраційно-відцентрового процесу з режимами обробки деталей.

У статті [5] представлені результати експериментальних досліджень переробки плодів аличі сорту "Фіолетова десертна" холодним способом (у свіжому стані) на перфорованій поверхні в поле відцентрових сил. Мета досліджень -розділення плодів на фракції -напівфабрикат, який використовується для подальшої переробки, і відходи (кісточки). На основі фізичного моделювання, використовуючи теорію подібності та аналіз розмірностей, отримано залежність числа

подібності з метою оцінки впливу діаметрів отворів та колової швидкості лопатей на ефективність процесу розділення плодів та отримано безрозмірний комплекс, що враховує співвідношення сил інерції та сил протидії при відокремленні м'якоті від кісточок.

За результатами проведеного аналізу [6] зазначено, що найбільш ефективними у більшості випадків є механічні способи зневоднення особливо при його реалізації на обладнанні з гідроімпульсним приводом, які поєднують високу продуктивність, низькі енергоємність та кінцеву вологість відходів. В якості обладнання для механічного зневоднення найбільш раціонально використовувати установки з електромеханічним, гідравлічним та гідроімпульсним приводами, на яких робочий процес реалізується у декілька стадій з підвищенням від стадії до стадії інтенсивності навантаженні оброблюваних відходів.

Серед досліджуваних вібророздільних процесів можна виділити розділення сипучої маси на фракції, фільтрування, відокремлення рідкої фракції пресуванням, центрифугування. Вібраційне центрифугування набуло широкого використання при розділенні неоднорідних структур із рідким дисперсним середовищем. У процесі обробки з відцентровим поділом за допомогою обертального руху, має місце створення коливального руху робочих елементів машини у площині перпендикулярній напрямку відцентрових сил, що дає змогу руйнувати дисперсні структури з вивільненням рідкої фази. Рівномірний розподіл часток по поверхні ротора, краще їх просування, зниження ефективної в'язкості маси продукції, більш якісний поділ матеріалу досягається завдяки використанню роторів вібраційних центрифуг циліндричної та конічної форми. Слід зауважити, що ротори із конічною формою (з кутом нахилу стінок) більш практичні, так як мають менший коефіцієнт тертя матеріалу по даній поверхні [7].

Для інтенсифікації процесу відцентрового відтискування доцільно використовувати центрифуги з вібраційно-планетарним рухом робочих барабанів, завдяки чому якісно зростає рушійна сила та якість процесу механічного зневоложення [8]. Крім того в цьому випадку можливе одночасне використання двох і більше барабанів, що дасть можливість постадійної обробки сировини. Це і обумовлює актуальність і перспективи даного дослідження. Принципова схема реалізації механічного зневоложення сировини вібраційно-планетарним способом представлена на рисунку 1.



**Мета дослідження.** Метою даного дослідження є складання і аналіз критеріального рівняння відцентрово-планетарного зневоложення в'язко-пластичної сировини з використанням методу аналізу розмірностей.

Для вирішення вказаної мети були поставлені наступні задачі:

- охарактеризувати фактори впливу на процес відцентрово-планетарного зневоложення та визначити параметри цього впливу;

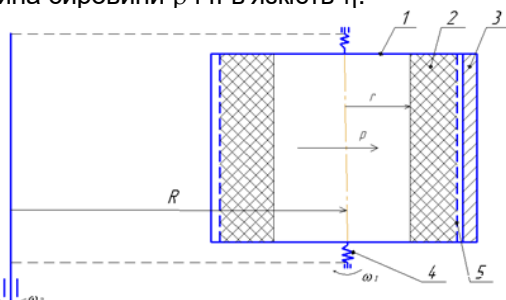
- скласти критеріальне рівняння досліджуваного процесу та оцінити характер залежності рушійної сили механічного зневоложення відцентрово-планетарним способом.

**Результати дослідження.**

Характеризуючи механічне зневоложення в'язко-пластичної сировини при вібраційно-планетарному центрифугуванні можна відзначити наступні фактори впливу:

- відношення сил зовнішнього тиску до сил капілярної взаємодії;
- відношення сил зовнішнього тиску до сил внутрішнього тертя;
- відношення об'єму оброблюваної сировини до об'єму робочої ємності;
- відношення структурно-механічних властивостей сировини в кінцевому і початковому стані;
- відношення швидкості видалення вологи до швидкості обертання робочих органів;
- відношення початкової вологості сировини до її кінцевої вологості.

Таким чином, на середній тиск, необхідний для зневоложення, впливають наступні фактори: розміщення робочого барабану відносно осі обертання підвіски (відстань від осі обертання підвіски до осі обертання барабану)  $R$ ; швидкість руху вологи по мікропорам продукту  $v$ ; об'єм оброблюваної сировини або ступінь завантаження барабану, яка визначається радіусом  $r$  (рис.1); початкова густина сировини  $\rho$  і її в'язкість  $\eta$ .



**Рис. 1. Принципова схема відцентрово-планетарного зневоложення:**  
**1 – робочий барабан; 2 – оброблювана сировина; 3 – дебаланси; 4 – пружні елементи; 5 – перфоровані стінки**

При математичній обробці представлених параметрів використовуємо другу теорему Федермана-Бекінгема та метод аналізу розмірностей [9]. Тому шукану функціональну залежність представимо у вигляді

$$p = f(R, v, \rho, \eta, r) \tag{1}$$

Основні складові функції (1) занесемо у таблицю 1.

**Таблиця 1**

**Основні параметри досліджуваного процесу**

№ з/п	Параметр факторного простору	Символ	Розмірність
1	Відстань від осі обертання підвіски до осі обертання барабану	$R$	$m$
2	Швидкість руху вологи	$v$	$m \cdot c^{-1}$
3	Початкова густина сировини	$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$
4	В'язкість сировини	$\eta$	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$
5	Ступінь завантаження робочої ємності	$r$	$m$
6	Середній тиск зневоложення	$p$	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-2}$

Очевидно, що для досліджуваного факторного простору число змінних дорівнює 6 при кількості розмірностей 3. Тому за π-теоремою [10] кількість безрозмірних комплексів становить  $6 - 3 = 3$ .

Згідно з принципом аналізу розмірностей функцію (1) представимо у вигляді

$$p = A \cdot R^a \cdot v^b \cdot \rho^c \cdot \eta^e \cdot r^k \tag{2}$$

що відповідає матриці, яка представлена у таблиці 2.

**Таблиця 2**

**Матриця розмірностей досліджуваних факторів**

	$a$	$b$	$c$	$e$	$k$	$p$
$M(kg)$	0	0	1	1	0	1
$L(m)$	1	1	-3	-1	1	-1
$T(c)$	0	-1	0	-1	0	-2



На основі даної матриці складаємо наступну систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} c + e = 1 \\ a + b - 3c - e + k = -1 \\ -b - e = -2 \end{cases} \quad (3)$$

Дана система рівнянь має п'ять незалежних змінних і містить три рівняння, тому її розв'язок представимо у вигляді

$$\begin{cases} c = -1 + b \\ e = 2 - b \\ k = -2 - a + b \end{cases} \quad (4)$$

Враховуючи отримані вирази, перепишемо залежність (2) у вигляді

$$p = A \cdot R^a \cdot v^b \cdot \rho^{-1+b} \cdot \eta^{2-b} \cdot r^{-2-a+b} \quad (5)$$

Після нескладних математичних перетворень отримаємо наступну функціональну залежність

$$\frac{p\rho r^2}{\eta^2} = A \cdot \left(\frac{vr\rho}{\eta}\right)^b \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^a \quad (6)$$

Ліву частину рівняння (6) перетворимо до вигляду

$$\frac{p\rho r^2}{\eta^2} = p\rho \cdot \frac{r^2}{\eta^2 v^2} \cdot v^2 = p\rho v^2 \cdot \left(\frac{r}{\eta v}\right)^2 \quad (7)$$

Згідно із законом Ньютона для внутрішнього тертя можна записати

$$p = \eta \cdot \frac{v}{r} \quad (8)$$

Тоді залежність (7) буде виражати безрозмірний комплекс, який є зворотнім до критерію гідродинамічної подібності Ейлера, а саме

$$\frac{p\rho r^2}{\eta^2} = \frac{\rho v^2}{p} = (Eu)^{-1} \quad (9)$$

Права частина рівняння (6) також містить два безрозмірних комплекси: аналог критерію Рейнольдса

$$Re = \frac{vr\rho}{\eta}$$

і параметричний критерій геометричної подібності

$$\Gamma = \frac{R}{r}$$

Таким чином отримаємо наступне критеріальне рівняння, яке описує механічне зневоложення в'язко-пластичної сировини вібраційно-планетарним способом:

$$Eu = A \cdot (Re)^n \cdot \Gamma^m \quad (10)$$

Постійні  $A$ ,  $n$  і  $m$  визначаються експериментально і залежать від

конструктивних характеристик зневоднювача, співвідношення кутових швидкостей обертання підвіски і робочої ємності, параметрів вібраційного руху барабану, структурно-механічних властивостей оброблюваної сировини та інших факторів.

Аналіз рівняння (10) показує, що при механічному видаленні вологи із в'язко-пластичної сировини має місце подібність руху рідини по мікропорам продукту із рухом рідини в трубопроводі.

**Висновок.** 1. Серед факторів, від яких залежить процес вібраційно-планетарного центрифугування можна відзначити гідромеханічні: швидкість руху вологи по мікропорам продукту, початкова густина сировини і її в'язкість та геометричні або конструкційні: розміщення робочого барабану відносно осі обертання підвіски та ступінь завантаження барабану.

2. Складено критеріальне рівняння, яке описує механічне зневоложення в'язко-пластичної сировини вібраційно-планетарним способом.

#### Список використаних джерел

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. –Изд. 2-е доп. и перераб. –М.: Высшая школа, 1976. –479 с.

2. Бандура В.М., Зозуляк І.А., Зозуляк О.В. Моделювання процесу вібраційного сушіння соняшнику при використанні теорії подібності.//ОНАХТ. Наукові праці, випуск 47, Т.1. 2015. – С.94-99

3. Burdo O. Development of the wave technologies of heat-mass transferring processes intensification/O. Burdo, V. Bandura, A. Zykov, I. Zozulyak, Y. Levtrinskaya, E. Marenchenko//Eaestern-European Jurnal of Enterprise Tehnologies.– Vol. 4, №11 (88).– 2017.– P.34-42

4. Гевко Б. М., Ляшук О.Л., Кондратюк О.М. Оптимізація технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей.//Процеси механічної обробки в машинобудуванні, випуск 14, 2013.–С.33-43.

5. Кепін, М. Використання методів теорії подібності та аналізу розмірностей при фізико-математичному моделюванні процесів переробки плодів кісточкових культур холодним способом.// Scientific Works, 80(1).– 2017.– С.161-164.

<https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.241>

6. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов. Монография / И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.

7. Полевода Ю. А. Перспективи



застосування вібраційних ефектів в рідких технологічних системах харчових і переробних виробництв//Зб. наук. пр. ВНАУ.Серія: Технічні науки.–№1 (89) Том 1.– 2015.– С.124-130.

8. Паламарчук И.П., Липовый И.Г. Определение динамических характеристик механического обезвоживания инсулиносодержащего сырья вибрационно-планетарным способом. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.– Vol.18. № 8. – 2016. – С.23-27.

9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.:Наука, 1977. – 440 с.

10. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физическое моделирование / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск, 1986. – 295 с.

### References

1. Venikov, V.A. (1976), *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Similarity theory and modeling], 2nd ed., Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

2. Bandura V.M., (2015), *Modelyuvannya protsesu vibratsiynoho sushynnya sonyashnyku pry vykorystanni teoriiy podibnosti*. [Modeling of the process of vibration drying of sunflower using a similarity theory]//Bandura V.M., Zozulyak I.A., Zozulyak O.V./ ONAKHT. Naukovi pratsi, випуск 47, Т.1. 2015. – P.94-99.

3. Burdo O. (2017), *Development of the wave technologies of heat-mass transferring processes intensification*/O. Burdo, V. Bandura, A. Zikov, I. Zozulyak, Y. Levtrinskaya, E. Marenchenko//Eaestern-European Jurnal of Enterprise Tehnologies.– Vol. 4, №11 (88).– 2017.– P.34-42.

4. Hevko B. M.(2013), *Optymizatsiya tekhnolohichnoho protsesu vibratsiynovidtsentrovoyi obrobky detaley*. [Optimization of the technological process of vibration-centrifugal processing of parts ]//Hevko B. M., Lyashuk O.L., Kondratyuk O.M. /Protsesy mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni, випуск 14, 2013.– P.33-43.

5. Kepin, M. (2017). *Vykorystannya metodiv teoriiy podibnosti ta analizu rozmirnostey pry fizyko-matematychnomu modelyuvanni protsesiv pererobky plodiv kistochkovykh kul'tur kholodnym sposobom*. [The use of methods of similarity theory and dimensional analysis in the physico-mathematical modeling of processes for the processing of stone fruit in a cold way.]/ Scientific Works, 80(1).–P.161-164.

6. Sevost'yanov I. V.(2013), *Protsessy i oborudovaniye dlya vibroudarnogo razdeleniya pishchevykh otkhodov*. [Processes and equipment for the vibro-impact separation of food waste] Monografiya / I. V. Sevost'yanov. – Saarbrücken:

LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 p.

7. Polyevoda Y. A. (2015), *Perspektyvy zastosuvannya vibratsiynykh efektiv v ridkykh tekhnolohichnykh systemakh kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv*[Prospects of the application of vibrational effects in liquid technological systems of food and processing industries]//Zb. nauk. pr. VNAU.Seriya: Tekhnichni nauky.–№1 (89) Том 1.– P.124-130.

8. Palamarchuk I.P. (2016), *Determination of dynamic characteristics of mechanical dehydration of insulin-containing raw materials in vibrational-planetary way*// Palamarchuk I.P., Lipovyi I.G./ MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Vol.18. No. 8. – P. 23-27.

9. Sedov L.I. (1977), *Methods of similarity and dimensionality in mechanics* / L. I. Sedov. – М.: Nauka, 1977. – 440 p.

10. Kutateladze S.C. (1986), *Similarity analysis and physical modeling* / S. S. Kutateladze. – Novosibirsk, 1986. – 295 p.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННО-ПЛАНЕТАРНОГО ОТЖИМА ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ БЕЗРОЗМЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Определены факторы, влияющие на процесс вибрационно-планетарного центрифугирования такие как: скорость движения влаги, плотность и влажность продукта, конструктивные и технологические характеристики обезвоживателя. На основании указанных факторов, используя метод анализа размерностей составлено критериальное уравнение, описывающее процесс вибрационно-планетарного обезвоживания вяко-пластического сырья.

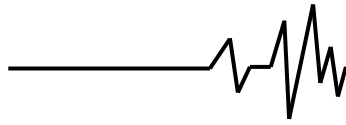
**Ключевые слова:** обезвоживание, вибропланетарное движение, размерность, метод подобия

Ф. 10. Рис. 1. Лит.10.

### MODELING OF VIBRATION AND PLANETARY WRING OF VISCOUS-PLASTIC RAW MATERIALS ON THE BASIS OF A DIMENSIONAL COMPLEX

*The factors affecting the process of vibration-planetary centrifugation such as moisture velocity, product density and moisture, design and technological characteristics of the dehydrator are determined. On the basis of these factors, using the dimension analysis method, a criterion equation was compiled describing the process of vibration-planetary dehydration of visco-plastic raw materials.*

**Keywords:** dehydration, vibroplanetary motion, dimension, similarity method



F. 10. Fig. 1. Ref. 10

### **Відомості про авторів**

**Бандура Валентина Миколаївна** – кандидат технічних наук, професор кафедри Процесів та обладнання переробних і харчових виробництв ім. проф. П.С.Берника, в.о. зав.кафедри Агроінженерії і технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: bandura\_3@ukr.net).

**Липовий Ігор Григорович** – викладач комунального закладу «Подільський науково-технічний ліцей для обдарованої молоді» (вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 9, м. Вінниця, 21030, Україна e-mail: igorlipovyi@ukr.net).

**Бандура Валентина Николаевна** – кандидат технических наук, профессор кафедры Процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств им. проф. П.С.Берника, и.о. зав.кафедрой Агроинженерии и технического сервиса Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: bandura\_3@ukr.net).

**Липовый Игорь Григорьевич** – преподаватель коммунального учреждения «Подольский научно-технический лицей для одаренной молодежи» (ул. Воинов-Интернационалистов, 9, г. Винница, 21030, Украина e-mail: igorlipovyi@ukr.net).

**Bandura Valentina** – PhD, Professor of the Department of Processes and Equipment for Processing and Food Manufacturing them. prof. P. S. Bernick, acting director Head of the Department of Agroengineering and Technical Services of Vinnitsa National Agrarian University (3, Sunny St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: bandura\_3@ukr.net).

**Lipoviy Igor** – a teacher of communal establishment is the "Podolsk scientific and technical lyceum for the gifted young people" (street of Warriors-internationalists, 9, Vinnytsya, 21030, Ukraine, e-mail: igorlipovyi@ukr.net).