**Гуць В.С.**

д.т.н., професор

Полевода Ю.А.

к.т.н., доцент

Симонік Б.В.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Goots V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Polievoda Y.**

Ph.D., Associate Professor

Symonik B.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 664:532****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-13**

ДЕФОРМУВАННЯ В'ЯЗКО- ПРУЖНИХ СИСТЕМ В ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

У статті розглянуто процеси деформування в'язко-пружних систем, що широко застосовуються у харчових технологіях у складі транспортно-технологічного та пакувального обладнання. Робочі органи таких систем (упори, направляючі, стопори, пружини, демпфери, вузли тертя тощо) під дією зовнішніх навантажень змінюють форму та розміри, що впливає на ефективність роботи обладнання й витрати енергії. Запропоновано методичні підходи до розрахунку роботи та енергетичних характеристик пружних і в'язко-пружних елементів з урахуванням їх конструктивних та реологічних властивостей.

На основі рівнянь реодинаміки проаналізовано роботу сил пружності під час стискання та розтягування, показано залежність роботи від квадрата подовження та незалежність від траєкторії чи тривалості процесу. Для врахування часових характеристик деформування введено в механічні моделі в'язкий елемент – демпфер, що дозволяє описати поступове деформування пружини при постійному або змінному навантаженні. Розглянуто диференціальні рівняння для паралельного та послідовного з'єднання пружних і в'язких елементів, отримано їх розв'язки та вирази для обчислення роботи, швидкості деформації, потужності та енерговитрат.

Особливу увагу приділено випадкам, коли зусилля деформування змінюється за лінійним чи нелінійним законом, зокрема експоненційним, що відповідає реальним умовам пакувальних процесів. Представлено графічні залежності, які відображають характер деформування при різних видах навантаження. Отримані співвідношення можуть бути використані для оптимізації енергетичних параметрів технологічного обладнання, підвищення надійності та довговічності його робочих органів, а також для вдосконалення конструкцій транспортно-технологічних і пакувальних ліній.

Ключові слова: в'язко-пружні системи; реологія; деформування; пружина; демпфер; диференціальні рівняння; енергетичні характеристики; робота деформування; потужність; пакувальне обладнання; транспортно-технологічні лінії; нелінійні закони навантаження.

Постановка проблеми. У харчових технологіях широко використовують різноманітні робочі органи технологічного обладнання, які деформуються під дією зовнішніх навантажень. Вони не є ідеально жорсткими, твердими тому під дією силового навантаження можуть змінювати форму і розміри. До таких робочих органів відносяться: різноманітні упори, направляючі, стопори,

виконавчі органи формоутворюючих механізмів та багато інших конструктивних елементів технологічного обладнання, транспортно-технологічних та пакувальних ліній. Багато робочих органів технологічного обладнання мають конструктивні елементи у вигляді пружин, демпферів, вузлів тертя різних за конструкцією та в'язко-пружними механічними характеристиками. Вони необхідні для



регулювання швидкості руху, зусиль та напрямів руху різних за формою сировини, напівфабрикатів та готових виробів в технологічному процесі. Необхідно вміти їх розраховувати для оптимізації енерговитрат при експлуатації транспортно-технологічного обладнання.

У харчових технологіях транспортно-технологічне та пакувальне обладнання працює з різними видами сировини, напівфабрикатами та готовими виробами, які мають неоднорідні фізико-механічні властивості. Це вимагає застосування робочих органів, здатних до пружних і в'язко-пружних деформацій, що забезпечують точність формоутворення, стабільність руху та надійність процесів пакування. Неправильний розрахунок деформаційних характеристик призводить до перевитрати енергії, порушення режимів транспортування чи пакування і зниження якості продукції.

Дослідження механізмів деформування в'язко-пружних систем дозволяє врахувати вплив силових навантажень і часу на роботу робочих органів, забезпечити оптимальне використання енергії та підвищити ефективність функціонування обладнання. Це особливо важливо для сучасних харчових виробництв, де високі вимоги до якості, енергоефективності та надійності процесів визначають конкурентоспроможність продукції.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та математичний опис процесів деформування в'язко-пружних систем, що застосовуються у робочих органах харчового технологічного та пакувального обладнання, а також визначення їх енергетичних характеристик при різних законах навантаження. Це дозволяє створити основу для оптимізації конструкцій і режимів роботи машин з метою зниження енерговитрат, підвищення надійності та ефективності технологічних процесів у харчовій промисловості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За законами реодинаміки роботу сил пружності у спрощеному вигляді знаходять з рівняння:

$$A = \int_0^h F dy = \int_0^h c y dy = \frac{ch^2}{2}. \quad (1)$$

Рівняння (1) дає можливість розрахувати роботу на деформування пружини силою $F = c y$ у на величину h , врахувавши її жорсткість c .

З точки зору теоретичної механіки:

y – подовження пружини в інтервалі від 0 до h , м; c – коефіцієнт жорсткості пружини, Н/м; h – максимальне подовження пружини, м.

Аналіз рівняння (1) показує, що робота сили пружності при стисканні бо розтягуванні пружини від початкового недеформованого стану пропорційна квадрату відхилення h . Вона не залежить від траєкторії, тривалості деформування, та залежить тільки від кінцевого положення.

Враховуючи, що за законами механіки, пружина деформується миттєво, тому витрати енергії можна визначити ввівши поняття – потужність приведена до одиниці часу $t=1$. Тоді,

$$N = \frac{A}{t}, \text{ де } t - \text{тривалість деформування.}$$

Рівняння (1) вважається адекватним при умові повільного деформування пружини. Коли деформування пружини відбувається під дією сили $F=mg$, для практичного використання можна використати залежність:

$$A = \int_0^h -mg dy = -\frac{ch^2}{2}. \quad (2)$$

Робота в першому і другому випадку відрізняються тільки знаком, бо має місце протилежний напрямок дії сил тяжіння і пружності (рис. 1).

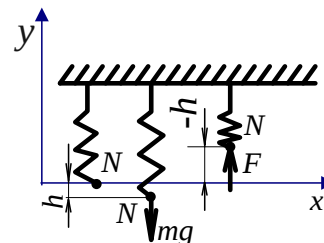


Рис. 1. Деформування пружини за різних умов роботи

Рівняння (1) і (2) придатні до обмеженого використання в практиці інженерних розрахунків технологічного обладнання, перш за все при визначенні його енергетичної складової.

В реальних умовах деформація відбувається поступово. Врахувати тривалість деформування (поступове деформування пружини) можна ввівши у механічну модель в'язкий елемент-демпфер (рис. 2).

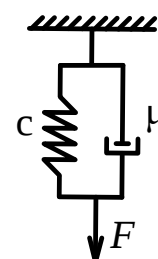
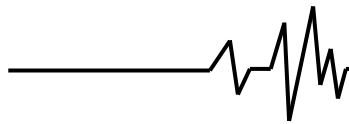


Рис. 2. Механічна модель тіла Кельвіна (реологічна система)



Диференціальне рівняння деформування в'язко-пружної системи запишемо:

$$F = cy(t) + \mu \frac{dy}{dt}, \quad (3)$$

де коефіцієнти в рівнянні (3) мають розмірність відповідно c [Н/м] і μ [Н·с/м].

Слід мати на увазі, як що деформування розглядати за критеріями інженерної реології. Коефіцієнти в рівнянні (3) мають розмірність c [Па], μ [Па·с] [6].

Врахувавши початкові умови $t=0 \Rightarrow y(0)=0$ отримаємо розв'язок рівняння (3):

$$y(t) = \frac{F}{c'} (1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (4)$$

Виконавши диференціювання маємо:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{F}{\mu} e^{-\frac{ct}{\mu}}. \quad (5)$$

Тоді

$$dy(t) = \frac{F}{\mu} e^{-\frac{ct}{\mu}} dt. \quad (6)$$

Аналогічно попередньому (рівняння 1) врахувавши, що $F = \text{const}$ отримаємо роботу деформування в'язко-пружної сили (рис. 2). Його можна використовувати в практичних розрахунках, як деформацію пружини з урахуванням тривалості деформування

$$A = \int_0^{t_1} F dy(t) = \frac{F^2}{c'} (1 - e^{-\frac{ct_1}{\mu}}). \quad (7)$$

Після диференціювання рівняння (7) знайдемо енергію витрачену на деформування (потужність).

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F^2}{\mu} e^{-\frac{ct}{\mu}}. \quad (8)$$

Рівняння (7), (8) дозволяють визначити енергетичні характеристики деформування в'язко-пружної системи в довільний час t в інтервалі від 0 до t_1 , коли використовують механічну модель у вигляді паралельно з'єднаних в'язкого та пружного елементів і деформування відбувається в режимі постійно діючого зусилля $F = \text{const}$ деформування. В техніці це має місце, коли крива деформування має вигляд (рис. 3, а).

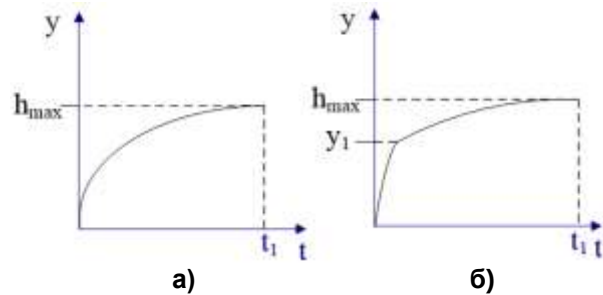


Рис. 3. Криві деформування

Коли деформування відбувається за законом (крива рис. 3, б). Тобто на початку іде миттєве деформування за рахунок пружини, а потім поступове за рахунок демпфера. Механічна модель послідовно з'єднаних пружного та в'язкого елементів має вигляд (рис. 4).

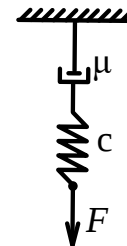


Рис. 4. Механічна модель послідовно з'єднаних пружного та в'язкого елементів

Роботу деформування знайдемо як суму робіт пружини $A_{пр}$ і демпфера $A_{дм}$. Коли пружина деформується миттєво, а демпфер – поступово.

$$A = A_{пр} + A_{дм}. \quad (9)$$

Роботу деформації пружини $A_{пр}$ знайдемо з рівняння (1):

$$A_{пр} = \frac{cy_1^2}{2}. \quad (10)$$

Роботу деформації демпфера:

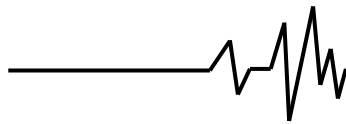
$$A_{дм} = \int_{y_1}^{h_{\max}} F dy. \quad (11)$$

Знайдемо dy розрахувавши механізм деформування демпфера.

Виклад основного матеріалу. Механізм деформування демпфера наступний:

$$F = \mu \frac{dy}{dt} \Rightarrow dy = \frac{Fdt}{\mu}, \quad (12)$$

звідки



$$A_{\text{ом}} = \int_0^{t_1} \frac{F^2}{\mu} dt = \frac{F^2}{\mu} t_1. \quad (13)$$

Остаточно роботу деформування механічної моделі у вигляді послідовно з'єднаних пружини і демпфера.

$$A = \frac{cy_1^2}{2} + \frac{F^2 t_1}{\mu}. \quad (14)$$

Витрати енергії (потужність) за одиницю часу $t_{\text{од}}$:

$$N = \frac{cy_1^2}{2t_{\text{од}}} + \frac{F^2 t_1}{\mu t_{\text{од}}}. \quad (15)$$

При пакуванні зусилля $F_{\text{д}}$ деформування може змінюватися за різними законами. За лінійним $F_{\text{д}}=kt$ або $F_{\text{д}}=ky$, та нелінійним. В цьому випадку універсальною для пакувального обладнання є залежність $F_{\text{д}}=F_1 e^{-at}$, де a може мати, як позитивне так і від'ємне значення.

У разі деформування в'язко-пружної системи зусиллям, яке змінюється за лінійним законом запишемо:

$$cy(t) + \mu \frac{dy(t)}{dt} = kt. \quad (16)$$

При початкових умовах $t=0 \Rightarrow y(0)=0$ отримаємо:

$$y(t) = \frac{k}{c^2} (tc - \mu + e^{-\frac{ct}{\mu}} \mu). \quad (17)$$

Виконавши диференціювання рівняння (17) знайдемо швидкість деформування:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{k}{c} (1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (18)$$

Робота деформування буде:

$$A = \int_0^{t_1} F_{\text{д}} dy(t) = \int_0^{t_1} F_{\text{д}} \frac{k}{c} (1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}) dt = \frac{F_{\text{д}} k}{c^2} (ct - \mu + \mu e^{-\frac{ct_1}{\mu}}). \quad (19)$$

$$N = \frac{F_{\text{д}} k}{c} (1 - e^{-\frac{ct_1}{\mu}}), \quad (20)$$

де $F_{\text{дс}}$ – середнє значення зусилля деформування в інтервалі від нуля до t_1 .

Порядок знаходження $F_{\text{дс}}$ потребує додаткових пояснень і буде викладено в окремому розділі теоретичних досліджень.

Коли на початку деформування була деформація $t=0 \Rightarrow y(0)=h_0$ маємо розв'язок диференціального рівняння (16).

$$y(t) = \frac{k}{c^2} \left[tc - \mu + e^{-\frac{ct}{\mu}} (h_0 + \frac{k\mu}{c^2}) \right]. \quad (21)$$

Відповідно швидкість деформування:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{k}{c} - \frac{ce^{-\frac{ct}{\mu}} (h_0 + \frac{k\mu}{c^2})}{\mu}. \quad (22)$$

Відповідно робота:

$$A = \frac{F_{\text{дс}}}{c^2} (kct - h_0 c^2 - \mu k + h_0 c^2 e^{-\frac{ct}{\mu}} + \mu k e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (23)$$

Витрати енергії:

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_{\text{дс}}}{c^2} (kc - \frac{c^3 h_0 e^{-\frac{ct}{\mu}}}{\mu} - c k e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (24)$$

Коли зусилля деформування є функцією від величини деформації $F_{\text{д}}=y(t)$, диференціальне рівняння запишемо:

$$cy(t) + \mu \frac{dy(t)}{dt} = ky(t). \quad (25)$$

Воно має практичне значення при початкових умовах $t=0 \Rightarrow y(0)=h_0$ (система працює на розвантажування так як була попередньо деформована).

Розв'язок рівняння (21) буде:

$$y(t) = h_0 e^{\frac{(k-c)t}{\mu}}. \quad (26)$$

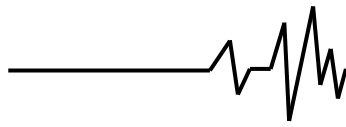
Аналогічно попередньому знайдемо енергетичні характеристики деформування:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{h_0}{\mu} (k - c) e^{\frac{(k-c)t}{\mu}}. \quad (27)$$

$$A = F_{\text{д}} h_0 (e^{\frac{(k-c)t}{\mu}} - 1). \quad (28)$$

$$N = F_{\text{д}} \frac{h_0}{\mu} (k - c) e^{\frac{(k-c)t}{\mu}}. \quad (29)$$

Для послідовно з'єднаних демпфера та пружини, коли деформування відбувається під дією зусилля F , яке змінюється за лінійним (рис. 5, а, б) або нелінійним законами (рис. 5, в).



Графічно ці залежності представлено на графіках (рис. 5).

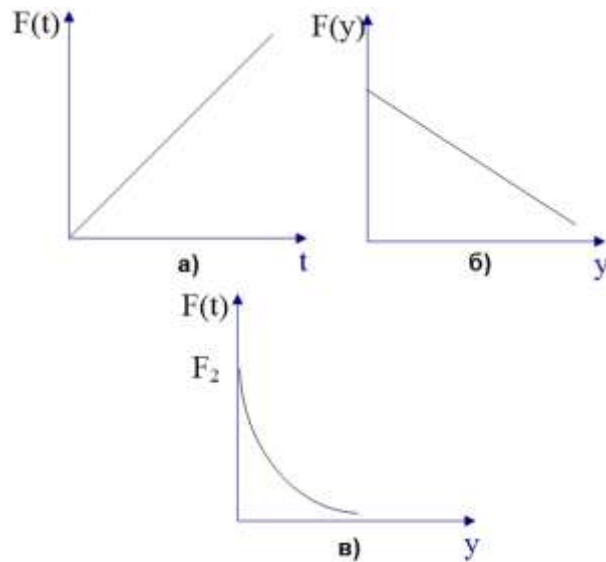


Рис. 5. Залежності деформування під дією лінійних і нелінійних законів

В разі послідовного з'єднання пружного і в'язкого елементів математична модель буде:

$$\mu \frac{dy(t)}{dt} = F(t, y) + \frac{\mu}{c} \frac{dF(t, y)}{dt}. \quad (30)$$

У випадку лінійної залежності, коли $F(t)=kt$:

$$\mu \frac{dy(t)}{dt} = F(t) + \frac{\mu}{c} \frac{dF(t)}{dt}. \quad (31)$$

Розв'язок рівняння (31) при початкових умовах $t=0 \Rightarrow y(0)=0$:

$$y(t) = kt \left(\frac{t}{2\mu} + \frac{1}{c} \right). \quad (32)$$

Після диференціювання отримаємо швидкість деформування:

$$V(t) = \frac{dy(t)}{dt} = k \left(\frac{t}{\mu} + \frac{1}{c} \right). \quad (33)$$

Прийнявши зусилля деформування $F(t)=F_{cp}$ знайдемо роботу A витрати енергії N :

$$A = \int_0^{t_1} F_{cp} dy(t) = \frac{1}{2} F_{cp} k t_1 \left(\frac{t_1}{\mu} + \frac{1}{c} \right). \quad (34)$$

$$N = \frac{dA}{dt} = F_{cp} k \left(\frac{t_1}{\mu} + \frac{1}{c} \right). \quad (35)$$

При $F_{cp} = kt$ маємо:

$$A = \int_0^{t_1} k t dy(t) = k^2 t_1^2 \left(\frac{t_1}{3\mu} + \frac{1}{2c} \right). \quad (36)$$

$$N = \frac{dA}{dt} = k^2 t_1 \left(\frac{t_1}{\mu} + \frac{1}{c} \right). \quad (37)$$

При деформуючому зусиллі $F(y)=k_1 y(t)$ і початкових умовах $t=0 \Rightarrow y(0)=y_0$:

$$y(t) = y_0 e^{\frac{k_1 c t}{\mu(c-k_1)}}. \quad (38)$$

Швидкість деформування:

$$V(t) = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{y_0 k_1 c}{\mu(c-k_1)} e^{\frac{k_1 c t}{\mu(c-k_1)}}. \quad (39)$$

Енергію (роботу) деформування можна визначити:

$$A = \int_0^{t_1} F_{cp} dy(t) = F_{cp} y_0 (e^{\frac{k_1 c t_1}{\mu(c-k_1)}} - 1). \quad (40)$$

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_{cp} y_0 k_1 c}{\mu(c-k_1)} e^{\frac{k_1 c t}{\mu(c-k_1)}}. \quad (41)$$

При лінійному зусиллі $F(t)=F_2 e^{at}$ деформування аналогічно попередньому знайдемо:

$$y(t) = \frac{F_2 (c + \mu a)}{a \mu c} (e^{at} - 1) + y_0. \quad (42)$$

Швидкість деформування:

$$V(t) = \frac{dy(t)}{dt} = \frac{F_2 (c + \mu a)}{\mu c} e^{at}. \quad (43)$$

Енергія (робота) при $F(t)=F_{cp}$:

$$A = \int_0^{t_1} F_{cp} dy(t) = \frac{F_{cp} F_2 (c + \mu a)}{a \mu c} (e^{at_1} - 1). \quad (44)$$

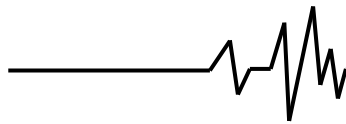
Витрати енергії (потужність):

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_{cp} F_2}{\mu c} (c + \mu a) e^{at_1}. \quad (45)$$

Енергію і витрати її на деформування вважаючи $F(t)=F_2 e^{at}$:

$$A = \frac{1}{2} \frac{F_2^2 (c + \mu a)}{a \mu c} (e^{2at_1} - 1). \quad (46)$$

$$N = \frac{F_2^2 (c - \mu a)}{\mu c} e^{2at_1}. \quad (47)$$



Знаходження F_{cp} для вище наведених лінійних і нелінійних змінах.

Висновки.

1. Розглянуто процеси деформування в'язко-пружних систем, що є складовими робочих органів харчового технологічного та пакувального обладнання.
2. Встановлено математичні залежності для опису роботи, швидкості деформації, енерговитрат і потужності при різних законах навантаження.
3. Показано відмінності у деформуванні систем із паралельним та послідовним з'єднанням пружних і в'язких елементів.
4. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації енергетичних характеристик обладнання, підвищення його ефективності, надійності та довговічності у харчових технологіях.

Список використаних джерел

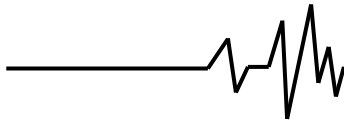
1. Левіт І. Б., Сукманов В. О., Афенченко Д. С. 2015. Реологія харчових продуктів. Полтава: ПУЕТ. 540 с.
2. Левіт І. Б., Сукманов В. О., Афенченко Д. С. 2014. Реологія харчових продуктів. Донецьк: ДонНУЕТ. 559 с.
3. Daubert C. R., Foegeding E. A. Rheological principles for food analysis. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. In S. S. Nielsen (Ed.), *Food analysis*. 2003. (3), pp. 507–508.
4. Реологія в процесах виробництва харчових продуктів : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 1. Класифікація та характеристика неньютонівських рідин / [О. І. Черевко, В. М. Михайлов, В. І. Маяк, О. А. Маяк] ; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Х. : ХДУХТ, 2014. 244 с.
5. Генчева В. І., Лашко Н. П., Брашко О. А. Реологія харчових продуктів. Запоріжжя: Запорізький національний університет. 2019. 74 с.
6. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Коваль О. А. Визначення структурно-механічних характеристик, в'язкісних дисперсних систем. *Упаковка*. 2011. № 1. С. 46–47.
7. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Ткачук І. В., Коваль О. А. Моделювання процесу соління м'яса в горизонтальних барабанах. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 1 (112). С. 72–80.
8. Goots V., Solona O., Polievoda Y., Symonik B. Rheology in standardized food formation processes. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 1 (116). С. 112–119.
9. Гуць В.С. Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.18.12./УДУХТ. К., 1999. 36 с.

References

1. Levit, I. B., Sukmanov, V.O., Afenchenko, D. S. 2015. Rheology of food products. Poltava: PUET. 540 p. [in Ukrainian].
2. Levit, I. B., Sukmanov, V. O., Afenchenko, D. S. 2014. Rheology of food products. Donetsk: DonNUET. 559 p. [in Ukrainian].
3. Daubert, C. R., Foegeding, E. A. 2003. Rheological principles for food analysis. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. In S. S. Nielsen (Ed.), *Food analysis* (3), pp. 507–508. [in English].
4. Cherevko, O. I., Mykhailov, V. M., Maiak, V. I., Maiak, O. A. (2012). Reolohiya u protsesakh vyrobnytstva kharchovykh produktiv. Kharkiv: KhDUFT. 180 p. [in Ukrainian].
5. Hencheva, V. I., Lashko, N. P., Brazhko O. A. 2019. The rheology of food grade products. Zaporizhzhya: Zaporizhzhya National University. 74 p. [in Ukrainian].
6. Guts, V. S., Polievoda, Y. A., Koval, O. A. 2011. Determination of structural and mechanical characteristics of viscosities dispersed systems. *Packaging*. N 1. pp. 46–47. [in Ukrainian].
7. Guts, V. S., Polyevoda, Yu. A., Tkachuk, I. V., Koval, O. A. 2024. Modeling of the meat salting process in horizontal drums. *Vibrations in engineering and technology*. N 1 (112). P. 72–80. [in Ukrainian].
8. Goots, V., Solona, O., Polievoda, Y., Symonik, B. (2025). Reolohiya u standardyzovanykh protsesakh formuvannya kharchovykh produktiv. *Vibrations in engineering and technology*. № 1 (116), P. 112–119. [in English].
9. Huts, V. S. (1999). Prykladna reolohiya ta intensyfikatsiya protsesiv kharchovykh vyrobnytstv: Avtoref. dys... d-ra tekhn. nauk: 05.18.12. UDUKhT. K., 36 p. [in Ukrainian].

DEFORMATION OF VISCOELASTIC SYSTEMS IN FOOD TECHNOLOGIES

The article examines the deformation processes of viscoelastic systems, which are widely used in food technologies as part of transport-technological and packaging equipment. The working components of such systems (stops, guides, stoppers, springs, dampers, friction units, etc.) change their shape and dimensions under external loads, affecting the efficiency of the equipment and energy consumption. Methodological approaches are proposed for calculating the work and energy characteristics of elastic and viscoelastic elements, taking into account their structural and rheological properties.



Based on the equations of rheodynamics, the work of elastic forces during compression and tension is analyzed, showing that the work depends on the square of the elongation and is independent of the trajectory or duration of the process. To account for the time-dependent characteristics of deformation, a viscous element – a damper – is introduced into the mechanical models, allowing the description of gradual spring deformation under constant or variable loads. Differential equations for parallel and series connections of elastic and viscous elements are considered, and their solutions and expressions for calculating work, deformation rate, power, and energy expenditure are obtained.

Particular attention is given to cases where the deformation forces vary according to a

linear or nonlinear law, including exponential, which corresponds to real conditions in packaging processes. Graphical dependencies are presented, illustrating the nature of deformation under different types of loads. The obtained relationships can be used to optimize the energy parameters of technological equipment, improve the reliability and durability of its working components, and enhance the designs of transport-technological and packaging lines.

Keywords: viscoelastic systems; rheology; deformation; spring; damper; differential equations; energy characteristics; deformation work; power; packaging equipment; transport-technological lines; nonlinear load laws.

Відомості про авторів

Goots Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies, Faculty of Production, Processing and Robotics in Animal Husbandry, Vinnytsia National Agrarian University (8 Yunosti Avenue, Vinnytsia, 21008, Ukraine, 21021, e-mail: Goots@ukr.net, orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3874-5609>).

Polievoda Yurii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Symonik Bohdan – recipient of a Doctor of Philosophy degree in specialty 181 Food Technologies of the Vinnytsia National Agrarian University.

Гуць Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (проспект Юності, 8, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: Goots@ukr.net, orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3874-5609>).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Симонік Богдан Володимирович – здобувач наукового ступеня доктора філософії спеціальності 181 Харчої технології Вінницького національного аграрного університету.

Стаття надійшла 07.12.2025

Стаття прийнята 16.12.2025

Опубліковано 25.12.2025.