

Objective. *The aim of this article is the solution of urgent scientific problem of automated control of the electricity consumption trajectory of the bakery products enterprise during periods of restrictions of the power system through the development of intelligent control systems and forecasting of active and reactive power.*

Methods. *For problems solution the methods of theory of random processes, artificial intelligence, vector optimization and statistical modeling, as well as specialized software tools for forecasting costs of the reactive and active powers of the company were used.*

Results. *It was developed an intelligent control system of the electrical energy consumption of the industrial bakery products enterprise during periods of constrained power grid.*

Key words: *power consumption, intellectualization, bread production, energy efficiency, forecasting, power, reactive.*

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 532.135: [635.1/8:641.51.06]

Шейна А. В., аспірант¹

Мельник О. Є., канд. техн. наук., доцент¹

¹ Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: sheyina@donnuet.edu.ua

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ РІЗАННІ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

UDK 532.135: [635.1/8:641.51.06]

Sheyina A. V., PhD student¹

*Melnik O. E., PhD in Engineering sciences,
Associate Professor¹*

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky (Kryvyi Rih, Ukraine), e-mail: sheyina@donnuet.edu.ua

ENERGY COST SAVINGS BY VISCOELASTIC MATERIALS CUTTING

Мета статі — дослідження особливостей деформування в'язко-пружних систем, встановлення факторів впливу на енергетичні показники процесу різання, визначення можливості управління цими факторами.

Методи. Дослідження в'язко-пружних систем виконувалося за стандартною методикою двофазного тесту напруга — стиснення. Для дослідження впливу швидкості різання і кута різання на питомі зусилля була розроблена експериментальна установка, яка дозволяє в широкому діапазоні варіювати змінними факторами. Визначення зусиль відбувалося за допомогою тензорезисторів.

Результати. Розглянуто особливості різання рослинної сировини пластинчастим ножем. Визначено роботу на деформування в'язко-пружної системи. Надано опис в'язко-пружних систем та визначено роботу цих систем. Встановлено залежність зусилля різання від швидкості різання, кута різання, геометричних розмірів подрібнюваної сировини, особливостей її розташування відносно леза ножа. Надано рекомендації щодо можливостей управління факторами впливу та зниження енерговитрат при подрібненні рослинної сировини.

Ключові слова: в'язко-пружна система, робота, різання, швидкість різання, кут різання.

Постановка проблеми. У харчовій та овочерепереробній промисловості дуже поширеними є процеси подрібнення рослинної сировини. Їх застосовують для збільшення поверхні твердих матеріалів з метою прискорення дифузійних та біохімічних процесів при переробці сировини, здійснюють у разі необхідності відділення від загальної маси продукту певної його частини або за необхідності отримання продукту відповідного розміру чи форми. Різання, як технологічна операція, може бути як обов'язковим процесом при виробництві якого-небудь продукту, так і завершальною стадією, що визначає його зовнішній вигляд.

Важливим показником процесу подрібнення рослинної сировини є енерговитрати під час різання. Енерговитрати і потужність овочерізального устаткування — це одні з основних його характеристик. Правильний облік усіх факторів, що впливають на енерговитрати під час різання, має вирішальне значення при розробці конструкції овочерізальної машини, а знання причин, що сприяють збільшенню або, навпаки, зниженню енерговитрат, дозволить уникнути великої кількості помилок при проектуванні. Саме тому питання зменшення енерговитрат під час різання є актуальним і потребує всебічного дослідження й аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання зменшення енерговитрат при виконанні будь-яких технологічних операцій завжди знаходиться у центрі уваги багатьох до-

Надійшла до редакції 19.10.2017 р.

© А. В. Шейна, О. Є. Мельник, 2017

слідників. Вивченню підлягає як детальний аналіз і опис самого досліджуваного процесу (фізичний, аналітичний, математичний), так і встановлення залежностей між енергетичними складовими та факторами впливу.

Згідно зі ствердженням [2; 3], задача енергетичної оцінки різання зводиться до достовірного визначення модуля пружності і коефіцієнту тертя продукту по лезу ножа. Детально реологічні властивості рослинної сировини і фактори впливу на них досліджені в роботах [1; 5]. Доведено, що структурно-механічні властивості рослинної сировини по різному проявляються залежно від швидкості різання, нормального тиску на продукт під час обробки, температури сировини під час обробки та її вологовмісту.

На енерговитрати при різанні також здійснюють вплив товщина леза ножа, кут загошення ножа, шорсткість поверхні різальних фасок леза, товщина різу (глибина впровадження леза) і швидкість різання [4; 7–9]. Питання впливу геометричних характеристик ріжучого інструменту на зусилля різання розглянуто всебічно і має більш сталі залежності [5; 6; 10], у той час як вплив структури сировини, що обробляється, залежить від великої кількості факторів, які важко врахувати та передбачити. Питання визначення факторів впливу та можливості управління цими факторами потребує додаткового дослідження.

Метою статті є встановлення математичних залежностей впливу режиму різання, геометричних параметрів ножа та особливостей взаємного розташування подрібнюваної сировини і леза на питомі зусилля різання, аналіз результатів дослідів та надання рекомендацій щодо зниження енергетичних витрат при різанні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час різання на лезо ножа діють сили опору, величина яких визначає енергетичну складову процесу. Величина цих сил залежить від структурно-механічних властивостей сировини, що обробляється, геометричних характеристик ріжучого інструменту, режиму різання та різновиду відносного руху продукту і ножа.

Загальна робота A зовнішніх сил, що витрачається на подрібнення сировини, витрачається на деформацію об'єму матеріалу A_{cm} , яка передуює процесу різання, і на утворення нових поверхонь A_{piz} :

$$A = A_{cm} + A_{piz}. \quad (1)$$

На рис. 1 наведено діаграму $P_{piz} = f(t)$ статичного різання овочевої сировини, отриману експериментально, яка показує динаміку зміни зусилля різання під час просування різальної кромки ножа крізь шар продукту заданої товщини. Дослідження проводилися за встановленою методикою при постійній швидкості впровадження пластинчастого ножа, коефіцієнт ковзання $\beta = 0$ [1].

Умовно процес перерізання зразка продукту можна розділити на два етапи, які відповідають різним стадіям процесу: перший етап характеризує стискання досліджуваного зразка різальною кромкою ножа до досягнення межі міцності $\sigma_{кр}$, другий — безпосередньо відтворює рух ножа крізь шар продукту. Для кожного з етапів характерне деяке значення питомої роботи стиску A_{cm} і різання A_{piz} (рис. 1).

Роботу A_{cm} наглядно можна розглядати як площу першої ділянки діаграми, що є умовним трикутником з основою, яка дорівнює $h_{ст}$, і висотою, яка дорівнює критичній напрузі стиснення $\sigma_{кр}$.

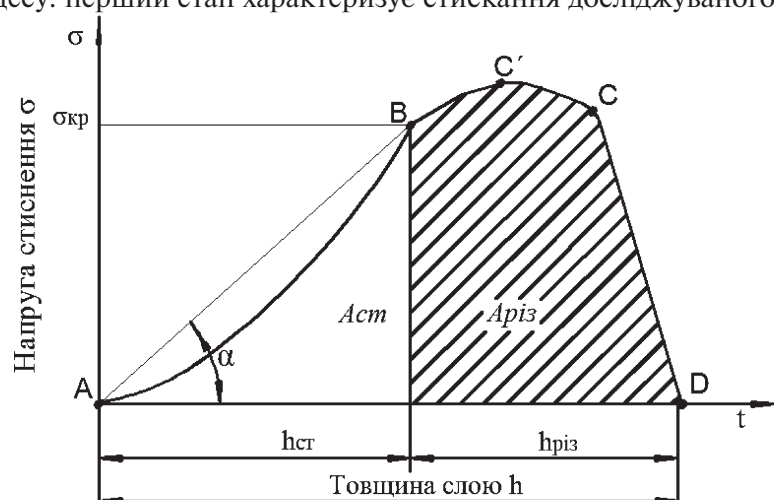


Рисунок 1 — Діаграма різання рослинної сировини при постійній швидкості впровадження ножа

На діаграмі різання: точка А відповідає початку контакту різальної кромки ножа з продуктом; ділянка АВ — попереднє стискання продукту різальною кромкою ножа до досягнення межі міцності, позначеної точкою В ($B = \sigma_{кр}$); точка В відповідає початку процесу різання. На ділянці АВ спостерігається зростання напруги стиску. На ділянці ВС відбувається перерізано попередньо стислого шару продукту і оболонки (шкірки), яка має значно більшу щільність порівнянні з м'якоттю. На цій ділянці спостерігаються максимальні зусилля різання. Ділянка діаграми CD відображує просування різальної кромки ножа через шар продукту і закінчення процесу різання.

Таким чином, робота стиснення A_{cm} залежить від структурно-механічних властивостей сировини, характеру прикладання рушійної сили та її швидкості й ін.

На величину роботи різання A_{piz} впливатимуть геометричні розміри ріжучого інструменту, реологічні та фрикційні властивості продукту, режим різання, відносний рух сировини та виконавчого механізму тощо.

Характер прояву структурно-механічних властивостей рослинної сировини визначають проведенням двофазного тесту напруги-релаксації [2]. Зразок досліджуваного матеріалу стискається між двома плоскопаралельними пластинами, одна з яких є нерухомою, а інша рухається з постійною швидкістю, стискаючи зразок досліджуваного матеріалу до зазначеної величині відносної деформації ϵ . Реологічні константи матеріалу визначатимуться шляхом аналізу та обробки кривих кінетики деформації при навантаженні і релаксації при різних значеннях напруження.

Згідно з класичною реологією овочева сировина відноситься до в'язко-пружних матеріалів, які описуються моделлю тіла Максвелла. Тіло Максвелла складається з послідовно сполучених елементів тіл Гука і Ньютона, які, відповідно, умовно позначаються пружиною та демпфером. Механічна модель тіла Максвелла наведена на рис. 2.

Тіло Максвелла поводить себе як пружне або як в'язке залежно від відношення тривалості часу релаксації матеріалу до тривалості експерименту. Під дією миттєвого навантаження (розтягування або стиску) демпфер не встигає рухатись, і система поводить себе як пружне тіло. Цей процес моделює поведінку овочевої сировини під час різання. Якщо система перебуває під постійним навантаженням, тобто підтримується розтягування або стискання пружини, вона поступово релаксує, надаючи рух демпферу, в такому випадку система поводить себе як ньютонівська рідина.

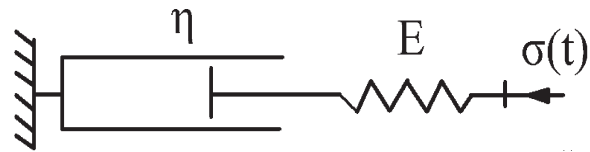


Рисунок 2 — Механічна модель тіла Максвелла

Реологічне рівняння Максвелла має вид [4]:

$$\dot{\sigma} + \frac{E}{\eta} \cdot \sigma = E \cdot \dot{\epsilon}, \quad (3)$$

де E — пружна характеристика системи (модуль пружності), H/m^2 ; η — в'язка характеристика системи (в'язкість), $\frac{\text{H} \times \text{с}}{\text{m}^2}$; σ — рушійна сила (напруга стиснення або розтягування), H/m^2 ; $\dot{\epsilon}$ — швидкість деформування системи, $\text{m}/\text{с}$, $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$; $\dot{\sigma}$ — швидкість навантаження системи, $\text{m}/\text{с}$; $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$.

Робота деформування в'язко-пружної системи складатиметься з роботи, яка витрачається на деформування пружини A_n , і роботи, яка необхідна для деформування демпфера A_d , тобто:

$$A_{cm} = A_n + A_d. \quad (4)$$

При $\sigma(t) = \text{const}$ з урахуванням (3) робота деформування пружини визначатиметься за формулою:

$$A_n = \sigma \epsilon_1. \quad (5)$$

Роботу на деформування демпферу знайдемо, використовуючи формулу (6):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (6)$$

$$A_{\partial} = \int_0^{t_1} \sigma d\varepsilon(t) = \int_0^{t_1} \frac{1}{\eta} \sigma^2 dt = \frac{\sigma^2}{\eta} \cdot t_1. \quad (7)$$

Тоді повна робота на деформування в'язко-пружної системи визначатиметься таким чином:

$$A_{cm} = \sigma \cdot \varepsilon(t) = \sigma \left(\frac{\sigma t}{\eta} + \varepsilon_1 \right) = \frac{\sigma^2 t}{\eta} + \sigma \cdot \varepsilon_1. \quad (8)$$

Ущільнення шарів продукту різальною кромкою під час пересування ножа в шарі буде істотнішим при малих швидкостях різання. Збільшення швидкості супроводжуватиметься стрімкішим ущільненням шарів продукту. Зростання швидкості різання сприятиме зменшенню загальної роботи різання A за рахунок зменшення зусилля попереднього стиснення.

Роботу A_{piz} можна визначити за формулою:

$$A_{piz} = P_{piz} \cdot l, \quad (9)$$

де P_{piz} — зусилля різання, H ; l — товщина шару сировини, що перерізається, з урахуванням попереднього стиснення, тобто $l = (h - h_{cm})$ (рис. 1).

Енергетичне оцінювання процесу різання, яке характеризує його енергоємність, прийнято виконувати за показником питомої роботи різання, яка визначається за формулою:

$$A_{num} = \frac{A}{F}, \quad (10)$$

де F — площа перетину шару сировини, що перерізається, м.

З урахуванням того факту (9), що зі збільшенням швидкості різання робота стиснення A_{cm} зменшуватиметься (адже за високих швидкостей стиснення деформація, пов'язана із в'язкістю не встигатиме поновлюватися) і її вплив на процес різання стає менш значним, робимо висновок, що робота різання A_{piz} безпосередньо залежатиме від зусилля різання P_{piz} . Тому зниження зусилля різання буде однією з пріоритетних задач при зниженні енерговитрат на процес різання.

Зі збільшенням товщини шару сировини, що перерізається, питома робота різання зростатиме. Це пояснюється збільшенням витрат енергії на попереднє стискання продукту ножом, яке супроводжується перерозподілом внутрішніх деформацій. Збільшення тривалості процесу різання, тобто контакту продукту з різальною гранню ножа, також призводить до збільшення енергетичних показників процесу, що пов'язане зі зростанням витрат на тертя [5; 6].

Подібна ситуація, коли величина шару продукту, що перерізається, значна і чинить істотний вплив на енергетичні характеристики процесу різання, може виникнути при проектуванні спеціалізованого або універсального овочерізального устаткування з орієнтацією продукту відносно леза ножа за максимальним розміром (уздовж волокон). Це характерно для продуктів подовженої форми: моркви (нарізка моркви «по-корейски»), огірків, баклажанів, кабачків та ін. У такому разі при розрахунках і проектуванні устаткування виникає потреба в урахуванні залежності реологічних і фрикційних характеристик продукту від товщини шару, що перерізається.

На енергетичні показники процесу також чинитиме вплив орієнтація овочевої сировини відносно ріжучої грані ножа з урахуванням розташування шкірки. Слід зазначити, що цей фактор матиме більш виражене значення для рослинної сировини, що має досить тверду, щільну оболонку, яка за структурно-механічними показниками суттєво відрізняється від структури м'якоті. Прикладами такої сировини є кабачки, баклажани, гарбуз, кавуни та ін.

На рис. 3 показано зміну зусилля різання залежно від наявності твердої оболонки та її розташування відносно ріжучої кромки. Найбільше зусилля різання спостерігатиметься при

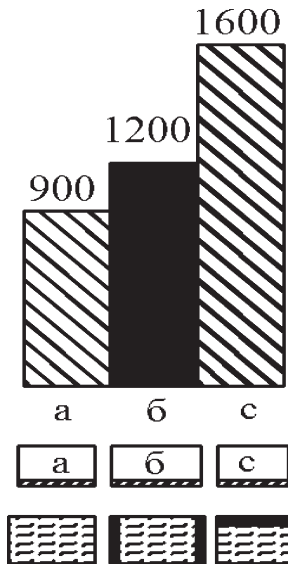


Рисунок 3 — Вплив розташування шкірки відносно леза ножа на зусилля різання, ($P_{різ}$, Н/м)

розташуванні оболонки безпосередньо на вході леза в шар сировини. Найменше зусилля різання матимемо при перерізанні м'якоті.

На рис. 4 показані графічні залежності зміни питомого зусилля різання деяких овочів у інтервалі швидкостей різання від 0,005 до 1,25 м/с, які були отримані експериментально.

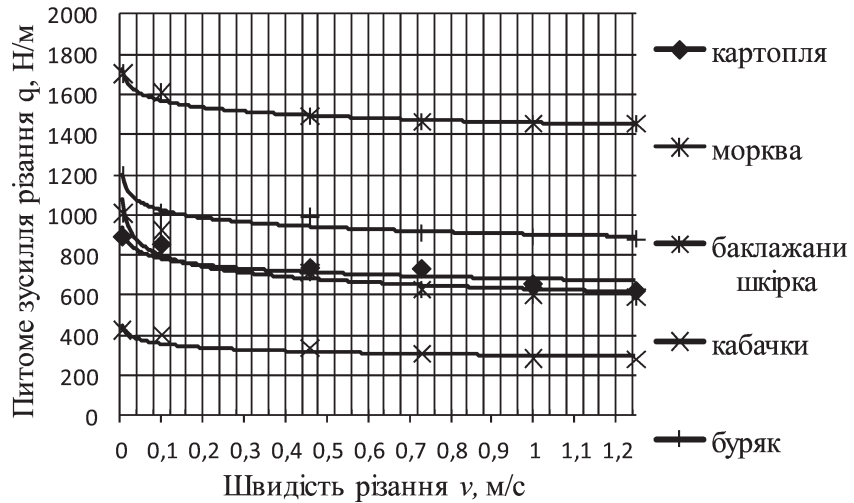


Рисунок 4 — Залежність питомих зусиль різання рослинної сировини від швидкості впровадження ножа

У зазначеному інтервалі швидкостей різання відзначається зменшення питомого зусилля різання овочевої сировини в 1,4...2 рази. Найбільш суттєве зниження величини $q_{пит}$ спостерігається в інтервалі швидкостей від 0,005 м/с до 0,2 м/с, після чого крива стає більш лінійною. Зниження питомого зусилля різання з підвищенням швидкості різання пов'язане із впливом на процес фрикційних і реологічних властивостей зразка подрібнюваного продукту.

На рис. 5 наведено вплив кута різання β на питомі зусилля різання овочевої сировини. Експериментально було визначено, що максимальні значення питомих зусиль різання спостерігатимуться при рубці.

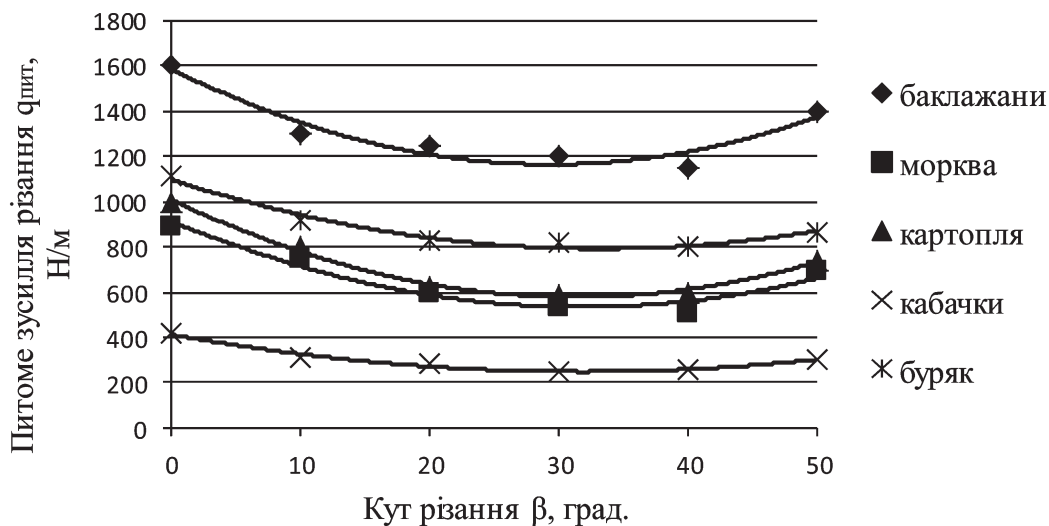


Рисунок 5 — Залежність питомих зусиль різання овочів від кута різання пластинчастим ножом

Зі збільшенням кута різання відбувається зниження питомих зусиль різання в середньому в 1,5...2 рази до величини, позначеної екстремумом функції, після чого спостерігається їх зростання. Наведені графічні залежності рекомендовано використовувати для визначення оптимальних кутів різання при проектуванні овочерізального устаткування.

Висновки. Знизити зусилля різання можна, регулюючи швидкість обертання ножів та підбираючи оптимальні параметри леза. У овочерізальних машинах продуктивністю 60–900 кг/год для подрібнення сирих овочів використовують лінійні швидкості обертання ножів від 0,3 м/с до 1,25 м/с. Згідно з отриманими математичними залежностями зі збільшенням швидкості ножа у зазначеному інтервалі питоме зусилля різання рослинної сировини знижується в 1,5 рази. При швидкостях різання менш ніж 0,3 м/с спостерігається поступове зростання питомих зусиль різання, а при швидкостях нижчих за 0,1 м/с, тобто при статичному різанні, це зростання має стрімкий характер.

Встановлено залежність питомих зусиль різання від особливостей розташування сировини відносно леза ножа. Визначено, що при подрібненні очищених від шкірки овочів зусилля різання будуть мінімальні, а при перерізанні плоду зі шкіркою — майже в два рази більше. Це слід враховувати при розрахунках на міцність ножів обладнання, адже ці розрахунки ведуться за максимальними значеннями зусиль різання.

Встановлено, що при подрібненні корнебульбоплодів оптимальним є кут різання від 30° до 50°, при різанні продуктів з високим вмістом вологи (кабачки, огірки) — від 20° до 30°. Ці дані слід враховувати при проектуванні ріжучих пристроїв овочерізок.

Дослідження факторів, які здійснюють вплив на різання овочевої сировини, ступеня їх впливу та уміння ними управляти надасть можливість створення сучасного енергоощадного, конкурентоспроможного овочерізального устаткування.

Список літератури/References

1. Заплетников, И. Н. Исследование реологического поведения овощей в условиях одноосного сжатия / И. Н. Заплетников, А. В. Шеина // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сборник статей Международной научно-практической конференции. — Минск : БГАТУ, 2013. — 453 с.

Zapletnikov, I. N., Sheyina, A. V. (2013). *Issledovanie reologicheskogo povedeniia ovoschey v usloviiah odnoosnogo szhatia* [Research of reological conduct of green-stuffs in the conditions of monaxonic compression]. Minsk, BGATU Publ., p. 453.

2. Gołacki, K. Stropiek, Z., Graboś, A. (1999). Test of stress relaxation in plant material under conditions of dynamic load-technical implementation. *Inzynieria Rolnicza*, no. 2, pp. 55–61.

3. Gubenia, O., Guts, V. (2010). Modeling of cutting of food products. *EcoAgroTourism*, no.1, pp. 67–71.

4. Sheyina, A., Goots, V. (2016). Cutting speed value during plant material grinding in food industry. *Ukrainian Journal Of Food Science*, vol. 4, iss. 1, pp. 111–119.

5. Заплетников, И. Н. Измельчение растительного сырья : монография / И. Н. Заплетников, А. В. Шеина. — Харьков : Водный спектр Джи-Ем-Пи, 2016. — 205 с.

Zapletnikov, I. N., Sheyina, A. V. (2016). *Izmelchenie rastitelnogo syrya* [Grinding plant material]. Kharkiv, Vodniy spektr J-M-P Publ., 205 p.

6. Заплетников И. Н. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов / И. Н. Заплетников, А. В. Шеина, А. В. Гордиенко // Актуальные вопросы современной науки : сборник научных трудов. — 2014. — Вып. 33. — С. 52–62.

Zapletnikov, I. N., Sheyina, A. V., Gordienko, A. V. (2014). *Eksperymentalnye issledovania protsessu rezania rastitelnyh materialov* [Experimental researches process of cutting of vegetable materials]. *Aktualnye voprosy sovremennoy nauki*, is. 33, pp. 52–62.

7. Гуць, В. Определение усилия резания продуктов с разными структурно-механическими свойствами / В. Гуць, А. Губеня // Научни трудове на VXT, том 57, свитък 2. — Пловдив. — 2010. — С. 411–416.

Guts, V., Gubenua, A. (2010). *Opredelenie usiliia rezaniia produktov s raznymi strukturno-mekhanicheskimi svoystvami* [Determination effort of cutting products with different reological properties], *Nauchni trudove na UHT*, vol. 57, part 2, pp. 411–416.

8. Горюшинский В. С. Определение усилия резания корнеклубнеплодов барабанными измельчителями / В. С. Горюшинский // Механизация заготовки, приготовления и раздачи кормов : сборник научных работ. — Саратов, 1982. — С. 100–106.

Goryushinskiy, V. S. (1982). *Opredelenie usiliia rezaniia korneklubneplodov barabannymi izmelchiteliami* [Determination effort of cutting vegetables drum grinding]. *Mehanizatsiya zayuuyvki, prigotovleniya i razdachi kormov*. Saratov, pp.100–106.

9. Горелков, Д. В. Розробка ресурсозберігаючого процесу очищення плодів перцю солодкого та його апаратурне оформлення : дис. ... канд. наук : 05.18.12 / Горелков Д. В.. — Харків, 2009. — 168 с.

Gorelkov, D. V. (2009). *Rozrobka resursozberihayuchogo protsesu ochischennya plodiv pertsii solodkoho ta yoho aparaturne oformlennia* [Development of process cleaning garden-stuffs of pepper sweet and him apparatus registration]. Kharkyv, 168 p.

10. Левіт, І. Б. Реологія харчових продуктів : монографія / І. Б. Левіт, В. О. Сукманов. — Донецьк : ДонНУЕТ, 2012. — 408 с.

Levit, I. B. & Sukmanov, V. O. (2012). *Reologiya harchovih produktiv* [Reology of food products]. Donetsk, DonNUET, 408 p.

Цель статьи — исследование особенностей деформирования вязко-упругих систем, анализ факторов влияния на энергетические показатели процесса резания, определение возможностей управления этими факторами.

Методы. Исследование вязко-упругих систем осуществляется по стандартной методике двухфазного теста напряжение-сжатие. Для исследований влияния скорости резания и угла резания на удельные усилия резания была разработана экспериментальная установка, позволяющая в широком диапазоне варьировать переменными факторами влияния. Во время экспериментов усилия замерялись тензодатчиками.

Результаты. Рассмотрены особенности резания растительного сырья пластинчатым ножом. Определена работа, затрачиваемая на деформирование вязко-упругой системы. Установлена зависимость усилий резания от скорости резания, угла резания, геометрических размеров измельчаемого сырья и особенностей его размещения относительно лезвия ножа. Даны рекомендации относительно возможностей управления факторами влияния и снижения энергозатрат при измельчении растительных материалов.

Ключевые слова: вязко-упругая система, работа, резание, скорость резания, угол резания.

Objective. Research of the deformation features of the viscoelastic systems. Establishment of the influence factors on the power indexes of the cutting process. Determination of possibility of management these factors.

Methods. Research of the viscoelastic systems executed after the standard method of diphasic creep-recovery test. For research of the influence of the cutting speed and cutting corner on specific efforts the experimental setting which allows in a wide range to vary variable factors was developed. During the experiments the forces were measured by tenzorezistors.

Results. In this paper, the features of cutting vegetable materials with a plate knife are considered. The work on deformation viscoelastic models is determined. The dependence of the cutting effort on the cutting speed, the corner, geometrical sizes of the raw material and the features of its location concerning the knife is set. The recommendations regarding possibilities of the influence management and power cost saving factors by grinding plant materials are given.

Key words: viscoelastic system, work, cutting, cutting speed, cutting corner.