

УДК 641.512
DOI: 10.31866/2616-7468.2.2018.157163

ІННОВАЦІЙНІ СПОСОБИ РІЗАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Віктор Гуць,
доктор технічних наук, професор,
Київський національний університет
культури і мистецтв,
Київ, Україна,
goots@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-3874-5609>
© Гуць В. С., 2018

Аліна Шеїна,
старший викладач,
Донецький національний університет
економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського,
Кривий Ріг, Україна,
sheyina235@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5216-3958>
© Шеїна А. В., 2018

Ольга Коваль,
кандидат технічних наук, доцент,
Національний університет харчових технологій,
Київ, Україна
koval_andreevna@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-9427-1842>
© Коваль О. А., 2018

Актуальність. У статті порушено питання встановлення основних закономірностей різання рослинної сировини лінійним ножом. Це один із найпоширеніших способів обробки харчових продуктів. Він залежить від великої кількості факторів, зокрема, структури продукту, його властивостей, режиму різання тощо. Для розробки овочерізального обладнання важливим є облік цих факторів та їх кількісна оцінка. **Мета і методи.** Метою статті є визначення основних закономірностей процесу різання групи овочів, а також дослідження механізму дії леза ножа на продукт із в'язко-пружними реологічними властивостями. Використано метод символної комп'ютерної математики для графічного зображення результатів експериментальних досліджень залежності деформації, швидкості деформування, напруження стиснення, питомих зусиль різання від тривалості деформування. **Результати.** Наведено результати теоретичного та експериментального дослідження процесу різання овочевої сировини лінійним ножом. Представлено реологічні моделі у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку для сировини з різними структурно-механічними властивостями. Виконано їх аналітичні дослідження. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено вплив на питомі зусилля різання особливостей відносного розташування продукту і ножа. За результатами експериментальних досліджень підтверджено достовірність теоретичних припущень. Визначено розрахункові величини питомих зусиль різання, роботу та миттєву потужність різання. Вони необхідні для уточнюючих розрахунків режимів технологічного процесу і параметрів овочерізального устаткування. Виконано аналіз конструкцій ножів овочерізальних машин дискового типу, які використовуються на підприємствах ресторанного господарства. **Висновки і обговорення.** Проведені дослідження та отримані математичні залежності дозволили виявити напрямки оптимізації процесу різання, встановити недоліки конструкцій овочерізального обладнання, які погіршують якість нарізки та збільшують енерговитрати. За результатами експериментальних досліджень сформульовано вимоги до різальних інструментів. Надано

рекомендації для створення нових пристроїв, орієнтації сировини по відношенню до ножів та по впровадженню раціональних режимів експлуатації овочерізального обладнання.

Ключові слова: різання, овочева сировина, реологія, робота різання.

Актуальність проблеми

Питання різання харчових продуктів є актуальними, що обумовлено передусім зростаючими вимогами споживача до якості споживаної продукції, необхідністю проектування енергоощадного безпечного при експлуатації малогабаритного технологічного обладнання.

З питань подрібнення харчових продуктів лезом накопичено значний практичний досвід, проте, незважаючи на це, різання матеріалів рослинного походження досліджено недостатньо повно, а інформація про оптимальні режими роботи устаткування, структурно-механічні властивості продуктів, що обробляються, якість їх нарізки тощо часто відображена в технічній документації односторонньо, суперечливо або не відповідає сучасному рівню технічного прогресу. У науковій літературі відсутні дані щодо вибору оптимальних режимів різання овочевої сировини за допомогою малогабаритного устаткування, що використовується підприємствами ресторанного господарства, харчової промисловості, у побуті. Не сформульована методика оцінювання якісних показників кінцевого продукту, тому, враховуючи різноманіття видів продуктів, які потребують технологічного оброблення шляхом надання їм заданої форми, існує необхідність удосконалення теорії різання в'язко-пружних твердовидних дисперсних систем. Вдосконалення конструкцій овочерізального устаткування, підвищення його продуктивності, економічності, функціональності і якості є перспективним актуальним науково-технічним завданням. Його успішно можливо розв'язати тільки на базі фундаментальних теоретичних досліджень.

Мета і методи досліджень

Метою дослідження є оптимізація процесу різання, удосконалення конструкцій обладнання для різання різної овочевої сировини, розробка ефективного способу і визначення оптимальних режимів різання шляхом теоретичного і експериментального дослідження факторів, які безпосередньо впливають на процес і якість різання, оновлення нормативних баз даних, необхідних для розрахунку конкурентоспроможного устаткування, і моніторинг вимог сучасного споживача.

Рішення вказаних проблем ефективно при комплексному підході як під час постановки завдань, так і при проведенні і аналізі результатів досліджень із використанням нових теоретичних розробок, сучасних комп'ютерних методів математичного моделювання і аналізу.

В статті використано методи математичного і фізичного моделювання структурно-механічних властивостей харчових дисперсних систем, теоретичні розробки інженерної реології аналізу структури овочевої сировини при різних режимах силового навантаження. Експериментальні дослідження проводилися за розробленими методиками на експериментальних установках, які дозволяють моделювати процеси, що відбуваються в реальних овочерізальних машинах. Обробка експериментальних даних і математичне моделювання процесу різання здійснювалися за допомогою методів математичної статистики із використан-

ням професійного програмного забезпечення, символічної комп'ютерної математики «Maple».

Результати дослідження

Різання є розповсюдженим процесом у харчовій, овочепереробній промисловості та на підприємствах ресторанного господарства. Але, як було встановлено в результаті аналітичних досліджень наукових праць (Bagley, 2013; Gubenia, & Gruts, 2010; Stropek, 2018), залежить від великої кількості факторів, у тому числі структурної будови сировини, що розрізається, та робочих швидкостей відносно руху леза та подрібнюваного продукту.

Дослідження режимів різання рослинної сировини необхідне для встановлення закономірностей протікання процесу та їх практичного використання для розрахунків технологічного обладнання, безпечної експлуатації його, отримання продукту високої якості.

Процес різання умовно твердих харчових продуктів із в'язко-пружно-пластичними властивостями здійснюється у кілька етапів: спочатку матеріал деформується лезом ножа в місці контакту, що супроводжується попереднім стисканням поверхневих шарів, після чого відбувається їх руйнування по ослаблених площинах або по напрямку найбільшої концентрації напруження. При цьому для кожного з етапів характерними є свої значення деформацій, зусиль, питомих робіт та міневої потужності стиснення і руйнування структури (Stropek, 2018). Від їх величини залежить отримання продукту високої якості за розмірами, формою, станом поверхні зрізу та розробки нових перспективних конструкцій технологічного обладнання малої продуктивності.

В побуті та ресторанному господарстві використовують, як правило, малогабаритне обладнання для різання овочевої сировини (Заплетников, & Шеина, 2016). На підприємствах ресторанного господарства найбільшого поширення набули дискові овочерізальні машини. Робочою камерою в таких машинах служить порожнистий нерухомий циліндричний об'єм (рис. 1). Зверху передбачений завантажувальний бункер, а збоку розташовується розвантажувальний люк.

Ріжучим органом такої машини служать, як правило, кілька загострених лез із харчової нержавіючої сталі, закріплених на плоских дисках. Диски розташовуються в робочій камері овочерізки і закріплюються на приводному валу, від якого їм передається обертальний рух. Залежно від технологічних вимог до якості нарізки, леза ножів можуть мати різну форму. Принцип роботи овочерізки наступний. Заздалегідь підготовлена овочева сировина потрапляє у отвори завантажувального бункера, звідки вона поступає до диска, що обертається, і рухається разом із ним доти, поки не буде зупинена стінкою робочої камери. Різальною кромкою ножа від затисненого продукту послідовно, шар за шаром, відрізаються часточки заданої форми. Подрібнений продукт видаляється через розвантажувальний пристрій за допомогою скидача, розміщеного під поверхнею опорного диска, який обертається з тією ж швидкістю. Процес повторюється доти, поки овочева сировина повністю не подрібниться.

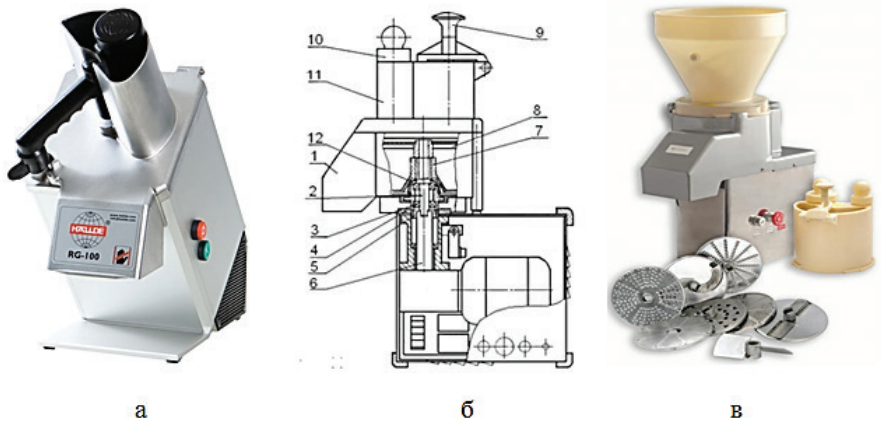


Рис. 1. Овочерізальні машини дискового типу:

а – загальний вигляд; б – схема в розрізі; в – набір ріжучих дисків

1 – розвантажувальний пристрій, 2, 6 – вали, 3 – підшипники, 4 – кільце, 5 – втулка, 7 – стакан, 8 – ножовий блок, 9 – кронштейн, 10 – проштовхувач, 11 – корпус завантажувального пристрою, 12 – ущільнювач.

Fig. 1. Vegetable cutting machines of disk type:

a – general view; b – circuit in section; c – a set of cutting discs

1 – unloading device, 2, 6 – shafts, 3 – bearings, 4 – ring, 5 – sleeve, 7 – glass, 8 – knife block, 9 – bracket, 10 – pushbutton, 11 – loader, 12 – sealant

Конструкції різального інструменту впливають на якість та енергетичні характеристики різання. Основні фактори впливу такі: товщина ножа, кут та вид його заточування, чистота поверхні фасок ножа, стан поверхні ковзання. Дослідження впливу зазначених параметрів на енерговитрати при різанні викладено в багатьох наукових роботах і достатньо вивчено. Практично не дослідженими залишаються вплив на процес різання структурно-механічних властивостей продукту, його реологічна поведінка при різних швидкостях та напруженнях деформування (Левіт, 2012). Тому при проведенні інженерних розрахунків різального обладнання рекомендації щодо раціональних значень геометричних та експлуатаційних характеристик ріжучого інструменту прийнято вважати апріорними і характеристики конструкції самих ножів відомими для кожної конкретної машини.

Устаткування для нарізання овочів, залежно від моделі машини і фірми-виробника, має зазвичай основну комплектацію різальних пристроїв (найчастіше це пристрої для нарізання скибочками товщиною 2 і 14 мм, кубиками, брусками і стружкою) і додаткову комплектацію, яка дозволяє значно розширити асортимент оброблюваної сировини і різноманітні види нарізки (Sheyina, & Goots, 2016).

Для обґрунтування вибору необхідного технологічного обладнання, визначення оптимальних режимів різання і забезпечення високої якості нарізки необхідним є проведення аналізу процесу деформування овочевої сировини до її руйнування. У більшості конструкцій малогабаритного овочерізального устаткування ніж рухається з постійною швидкістю, кріпиться на спеціальних рухомих дисках, що обертаються.

Процес різання овочевої сировини з постійною швидкістю лінійним ножом можна дослідити, виконавши аналіз експериментально отриманих узагальненої

кривої напруження стискання та кривої зусилля різання (рис. 2 та рис. 3). Під час експерименту здійснювалося перерізання зразка овочевої сировини встановленої форми і розмірів лінійним ножом. Забезпечувався коефіцієнт ковзання β наближеним до нуля, швидкість різання не перевищувала 1 м/с та була постійною. Зусилля різання визначали за допомогою тензометричних датчиків, потім розраховували напруження стискання для різних площ контакту леза із продуктом. Зусилля різання відображалось у вигляді осцилограм процесу різання. За аналізом експериментальних даних розраховували напруження стискання (Заплетніков та ін., 2014).

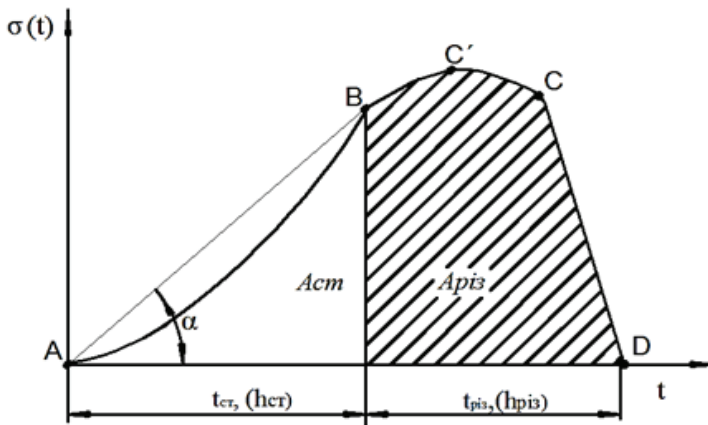


Рис. 2. Узагальнений графік різання овочевої сировини
Джерело: розроблено на основі (Заплетніков, Шеїна, 2016)

Fig. 2. A generalized schedule of cutting vegetable raw materials
Source: Developed on the basis of (Zaplatnikov, Shein, 2016)

На рис. 2 представлено графік, який відображає особливість зміни напруження стискання та руйнування структури під час просування різальної кромки ножа крізь шар продукту заданої товщини. На графіку точка А відповідає початку контакту різальної кромки ножа із продуктом. Точка В визначає критичне зусилля стиснення, і в ній має місце критичне напруження $\sigma_{кр}$ деформації. Частина кривої справа від точки В характеризує напруження різання.

Ділянка АВ – попереднє стиснення продукту різальною кромкою ножа до досягнення межі міцності, позначеної точкою В ($B = \sigma_{кр}$). Точка В відповідає початку процесу руйнування структури. На ділянці АВ спостерігається зростання напруження стиснення. На ділянці ВС' відбувається перерізання попередньо стислого шару продукту і шкірки, яка для більшості овочевої сировини має значно більшу щільність і міцність у порівнянні з м'якоттю. На цій ділянці спостерігаються максимальні зусилля різання. Ділянка діаграми ВС відображає просування різальної кромки ножа через шар продукту, точка D – закінчення процесу різання. Нерівність лінії ВС обумовлено зміною опору різанню різних шарів продукту, що пов'язано з неоднорідністю їх структури.

На величину опору впливає вміст у продукті різноманітних змінної щільності структурних елементів: волокон, плівки, насіння. Ділянка діаграми С'С характеризує поступове зниження величини зусилля різання, внаслідок зменшення опору кінцевих шарів сировини – зменшується площа контакту.

При різанні тільки м'якоті овочів (без шкірки) крива має дещо іншу динаміку (Гуць, & Губеня, 2010) що відображено на графіку (рис. 3).

На рис. 3а наведено криві різання баклажанів, отримані експериментально. На них відображена зміна питомого зусилля різання ($P_{кр1}$, $P_{кр2}$, $P_{кр3}$) залежно від наявності шкірки і різної тривалості t різання.

Для перерізання більш щільного поверхневого шару продукту – його шкірки необхідно прикласти практично удвічі більше зусилля. До того ж, відповідно до результатів проведених досліджень, на величину зусилля різання здійснюватиме вплив розміщення продукту відносно леза ножа. У випадку, коли він розміщується вздовж кромки леза, зусилля різання будуть максимальними (рис. 3б).

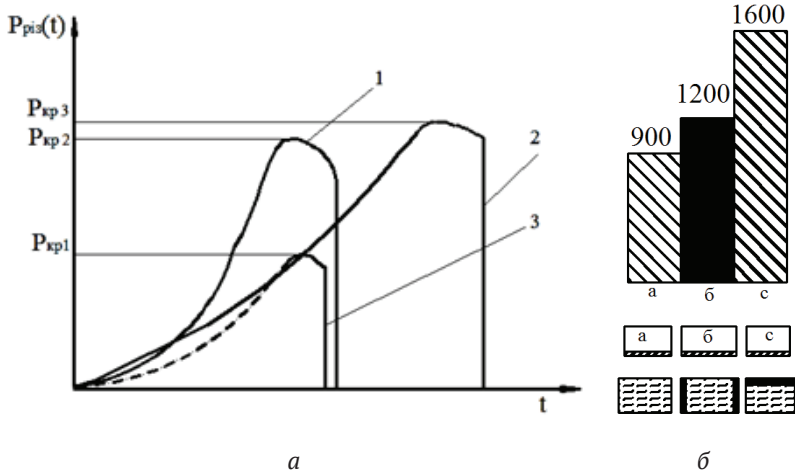


Рис. 3. Криві різання овочевої сировини:

а – криві різання баклажанів: 1 – зразок продукту зі шкіркою при $v = 0,1$ м/с, 2 – зразок продукту зі шкіркою при $v = 0,05$ м/с, 3 – м'якоть при $v = 0,1$ м/с; б – діаграми впливу розташування шкірки баклажанів відносно леза ножа на питомі зусилля різання ($P_{різ}$ Н/м²)

Джерело: розроблено на основі (Заплетников, Шеина, 2016)

Fig. 3. Cutting curves of vegetable raw materials:

a – curvature of eggplant cutting: 1 – sample of product with peel at $v = 0.1$ m / s, 2 – sample of product with peel at $v = 0.05$ m / s, 3 – the pulp with $v = 0.1$ m / s; B – diagrams of the influence of the location of peel on the knife blade on the specific cutting effort .

Source: Developed on the basis of (Zaplatnikov, Shein, 2016)

Оскільки більшість овочів мають округлу форму в поперечному перерізі, а шкірка розміщується по колу, можна стверджувати, що максимальні навантаження на лезо ножа мають місце у початковий момент різі і при виході леза з продукту (Emadi, 2015). Ці особливості процесу різання треба враховувати при конструюванні технологічного обладнання.

Аналіз наведених вище графіків дозволяє визначити долі енергетичних витрат при різанні овочевої сировини. Для баклажанів на деформування витрачається 30 %, на руйнування структури 45 %, на тертя 25 %. Для іншої овочевої сировини, залежно від виду, сорту і стану структурних елементів, відсотки витрат енергії на різання змінюються, хоча закономірність змін зберігається.

Відомо, що корисною є тільки робота $A_{\text{піз}}$. Вона витрачається безпосередньо на розрізання матеріалу, тоді як робота попереднього стиснення $A_{\text{ст}}$ і робота тертя $A_{\text{тр}}$ є некорисними, але неминучими. Процес різання треба проводити таким чином, щоб роботи попереднього стиснення та тертя були мінімальними. Реалізувати мінімізацію некорисних робіт можна, дослідивши процес різання і провівши теоретичне моделювання його з урахуванням структурно-механічних властивостей продукту, та використати на практиці отримані результати оптимізації процесу різання.

Робота різання A дорівнює сумі робіт:

$$A = A_{\text{cm}} + A_{\text{піз}} + A_{\text{мп}} \quad (1)$$

При наявності експериментальних даних роботу $A_{\text{ст}}$ можна визначити графічним способом як площу лівої ділянки графіка різання овочевої сировини (рис. 2, рис. 3). Вона має форму умовного трикутника з основою, яка дорівнює $h_{\text{ст}}$, і висотою, яка дорівнює граничному зусиллю $P_{\text{кр}}$. Воно відповідає $\sigma_{\text{кр}}$ (Заплетников, Шеина, 2016):

$$A_{\text{cm}} = \frac{P_{\text{кр}}}{2} \cdot h_{\text{ст}} \quad (2)$$

Роботи різання $A_{\text{піз}}$ та стискання A_{cm} визначаємо графічним методом, використавши експериментальну криву різання, площі прямокутника і трикутника з основами $(h - h_{\text{cm}})$ та h_{cm} і висотою $P_{\text{піз}}$, яка представляє зусилля на ділянці різання, визначене з урахуванням площі контакту леза з продуктом:

$$A_{\text{піз}} = P_{\text{піз}} \cdot (h - h_{\text{cm}}) \quad (3)$$

Робота сили тертя залежить від коефіцієнта тертя. Вважаємо $P_{\text{мп}} = \text{const}$:

$$A_{\text{мп}} = P_{\text{мп}} \cdot (h - h_{\text{cm}}) \quad (4)$$

Загальна енергія різання визначається як сума трьох складових – робіт різання $A_{\text{піз}}$, стискання $A_{\text{ст}}$, тертя $A_{\text{тр}}$.

Залежність (2) не враховує різноманіття структурно-механічних властивостей овочевої сировини та потребує використання експериментальних даних. Це зменшує точність розрахунків і перспективи широкого застосування її в аналізі процесу різання різноманітних в'язко-пружних дисперсних систем приведених вище математичних моделей. Враховуючи це, запропоновано новий реодинамічний метод розрахунку режимів різання овочевої сировини з цілісною внутрішньою структурою. Оскільки вона відноситься до в'язко-пружних систем, які при стисканні описуються реологічною моделлю Максвелла, то параметри процесу різання – деформацію, швидкість деформування, питомі роботу та миттєву потужність – можна розрахувати, використавши заздалегідь відомі реологічні характеристики матеріалу, умови деформування його та математичні моделі стану в'язко-пружної твердоподібної дисперсної системи, не проводячи попередні експериментальні дослідження окремо для кожного виду, сорту і стану (терміну і умов зберігання) овочевої сировини.

Математичне моделювання стискання овочевої сировини виконали, побудувавши диференціальне рівняння деформування дисперсної системи із суцільним каркасом, наприклад, такої, як кабачки, огірки, морква, баклажани та інші з аналогічною структурою. Диференціальне рівняння має вигляд:

$$\mu \left(\frac{d}{dt} x(t) \right) = \sigma(t) + \frac{\mu \left(\frac{d}{dt} \sigma(t) \right)}{c}, \quad (5)$$

де σ – напруження стискання, Па; c – пружна реологічна складова, Па; μ – в'язка реологічна складова, Па \times с; x – відносна деформація; t – тривалість деформування, с.

Аналіз кінетичної кривої деформування показує, що напруження стискання змінюється за лінійним законом, тоді:

$$\sigma(t) = kt, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт навантаження, який дорівнює $tg\alpha$; α – кут нахилу прямої AB (рис. 2); t – тривалість деформування.

Підставивши в диференціальне рівняння (5) лінійну залежність (6) напруження від тривалості деформування, отримаємо розв'язання рівняння деформування овочевої сировини при початкових умовах $x(0) = 0$:

$$x(t) = \frac{kt^2}{2\mu} + \frac{kt}{c} \quad (7)$$

Виконавши диференціювання рівняння отримаємо швидкість деформування:

$$V(t) = \frac{d}{dt} x(t) = \frac{kt}{\mu} + \frac{k}{c} \quad (8)$$

Питомі роботу A і миттєву N потужність знайдемо з наступних рівнянь:

$$A = \frac{1}{3} \frac{k^2 t_1^3}{\mu} + \frac{1}{2} \frac{k^2 t_1^2}{c} \quad (9)$$

$$N = \frac{k^2 t_1^2}{\mu} + \frac{k^2 t_1}{c} \quad (10)$$

Для овочевої сировини з реологічними характеристиками $\mu = 10\,000$ Па \times с, $c = 2\,500\,00$ Па, графіки 3d-залежностей $x(k,t)$, $V(k,t)$, $A(k,t)$, $N(k,t)$ представлено на рис. 4–7.

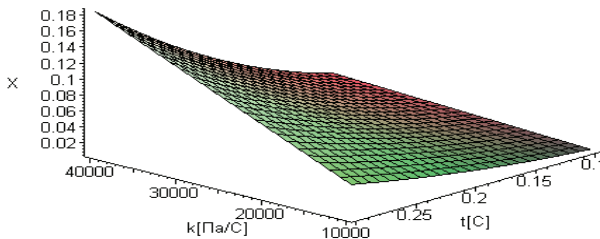


Рис. 4. Залежність відносної деформації x від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стискання
 Джерело: власна розробка

Fig. 4. Dependence of the relative deformation x on the load factor k and duration of t compression
 Source: own development

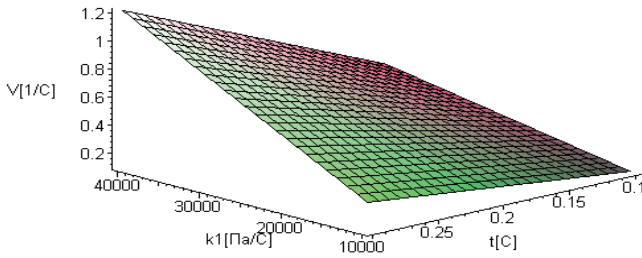


Рис. 5. Залежність швидкості деформування V від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стиснення
Джерело: власна розробка

Fig. 5. Dependence of the deformation rate V on the load factor k and duration of t compression
Source: own development

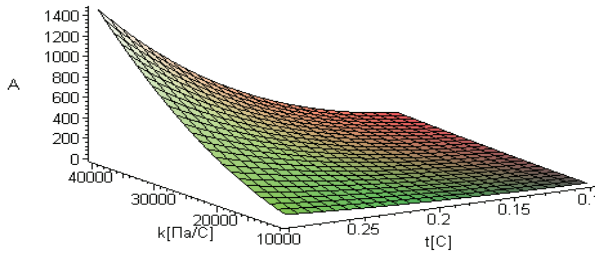


Рис. 6. Залежність питомої роботи A від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стиснення
Джерело: власна розробка

Fig. 6. Dependence of the specific work A on the load factor k and duration of t compression
Source: own development

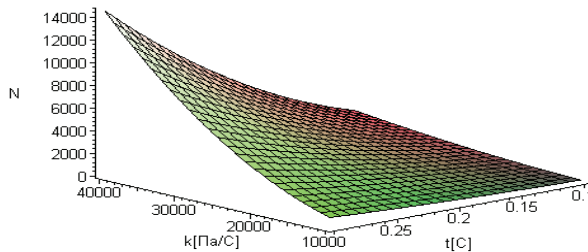


Рис. 7. Залежність питомої потужності N від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стиснення
Джерело: власна розробка

Fig. 7. Dependence of specific power N on the load factor k and duration of t compression
Source: own development

Аналіз результатів дослідження свідчить, що збільшення тривалості переміщення леза крізь шар продукту сприяє збільшенню періоду стиснення (рис. 3а) і, як наслідок, збільшенню питомих роботи A_{cm} та потужності N стиснення при різанні.

При відомих величинах коефіцієнтів Y корисної роботи різання або експериментальних даних деформування конкретного продукту визначення енергетичних характеристик процесу різання спрощується. Послідовність інженерних розрахунків енергетичних характеристик процесу різання, при наявності експериментальних даних за методикою аналізу корисної роботи різання, наступна.

Спочатку розраховується коефіцієнт Y корисної роботи різання. Він дорівнює відношенню корисної роботи різання $A_{\text{різ}}$ до всієї роботи A (відношення площ на графіку), яка витрачається при різанні.

$$Y = \frac{A_{\text{різ}}}{A_{\text{різ}} + A_{\text{ст}} + A_{\text{тр}}} = \frac{A_{\text{різ}}}{A} \quad (11)$$

Вираз (11) можна записати:

$$A = \frac{A_{\text{різ}}}{Y} \quad (12)$$

Оскільки при різанні рослинної сировини має місце попереднє стиснення верхнього шару продукту до досягнення межі міцності, то коефіцієнт Y завжди буде менший за одиницю. Збільшення Y означатиме зміну на краще характеристик процесу різання, оскільки сумарна робота різання знижуватиметься.

Збільшення товщини шару матеріалу, що розрізається, сприятиме зменшенню величини коефіцієнту Y . Відповідно, ефективність процесу різання знижуватиметься. Це пояснюється збільшенням витрат енергії на попереднє стискання продукту ножом та збільшенням тертя при переміщенні леза через шар продукту і перерозподілом внутрішніх деформацій. Збільшення тривалості процесу різання, тобто контакту продукту з лезом ножа, також призводить до зростання енерговитрат.

Коли товщина шару продукту, що перерізається, періодично збільшується або він має внутрішні тверді включення або порожнини, тоді відбуваються істотні зміни енергетичних характеристик процесу різання, і може виникнути затискання леза, ламання його або вузла різання, вібрація, перегрів двигуна. Ці проблеми треба врахувати при проектуванні овочерізального устаткування. Також слід передбачати використання пристроїв для орієнтації продукту відносно леза ножа за розміром та рівномірну подачу його, що характерно для продуктів подовженої форми: моркви (нарізка моркви «по-корейськи»), огірків, баклажанів, кабачків.

Для продуктів, які мають внутрішні порожнини і відповідно неоднорідну структурну будову, крива різання має специфічний вигляд. Вплив неоднорідності будови і особливостей структури продукту відображує крива різання плодів перцю болгарського. За умови, коли продукт нарізується в цілісному стані без попередньої обробки і порушення зовнішньої оболонки, залежність $\sigma(t)$ представлено на рис. 8.

Плоди перцю болгарського мають подовжену конусовидну форму з плодоніжкою біля основи. М'якоть покрита тонкою, але міцною оболонкою (шкіркою), а внутрішня порожнина наповнена газоподібним середовищем. В ході експерименту різання плоду здійснювали так, щоб виключити попадання під лезо плодоніжки, а перерізався тільки сам плід.

Крива різання має характерні для різання в'язко-пружних продуктів ділянки попереднього стиснення АВ з межею міцності σ_1 в точці В. Схематично початок процесу стиснення плоду різальною кромкою і безпосередньо процес стиснення відображені на рис. 8б (плід зображений умовно в поперечному перерізі).

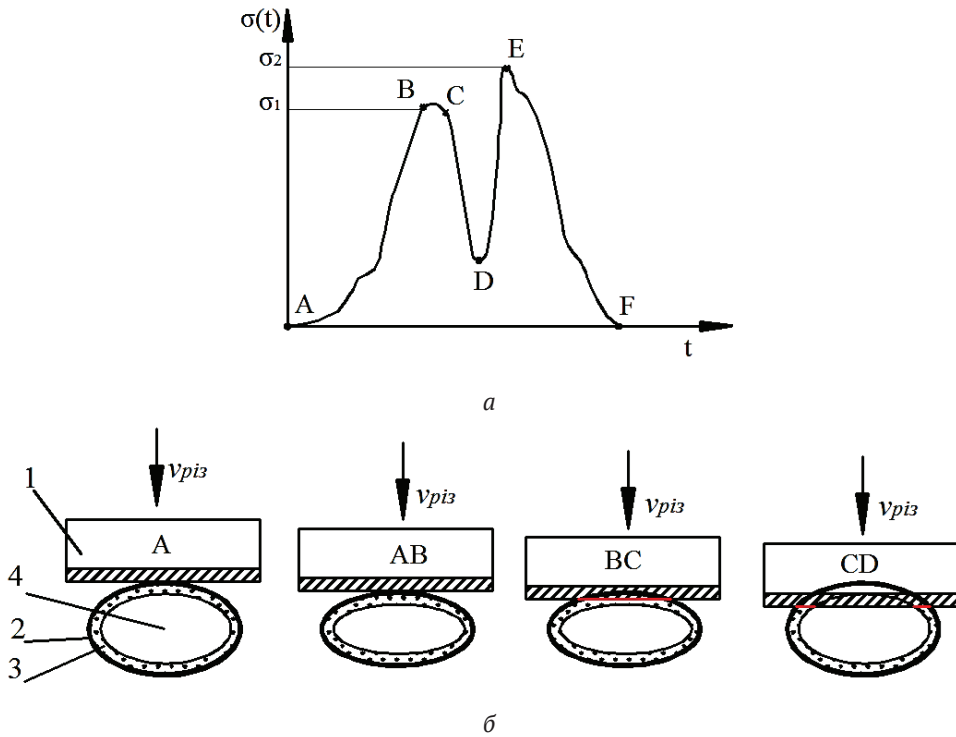


Рис. 8. Особливості різання перцю болгарського пластинчастим ножом:
 а – крива різання перцю болгарського (цілісний плід), швидкість руху ножа 0,1 м/с;
 б – схематичне зображення процесу різання (1 – ніж, 2 – оболонка плоду, 3 – м'якоть
 плоду, 4 – внутрішня порожнина плоду)

Джерело: розроблено на основі (Заплетников, Шеина, 2016)

Fig. 8. Features of cutting pepper with a Bulgarian lamellar knife:
 а – curve cutting Bulgarian pepper (integral fruit), speed of knife 0.1 m / s; б – a schematic
 representation of the cutting process (1 – knife, 2 – the membrane of the fetus, 3 – the flesh
 of the fetus, 4 – the internal cavity of the fetus)

Source: Developed on the basis of (Zaplatnikov, Shein, 2016)

Етап перерізання оболонки і наступний рух леза ножа позначено ділянкою ВС. Після досягнення точки С відбувається різке зниження зусилля різання до деякого значення, позначеного точкою D. Під час подальшого стиснення плоду лезом ножа напруження передається контактній поверхні і далі розподіляється на бічні грані, які так само чинять опір стисненню і згодом різанню. Проте разом із м'якоттю незначний опір робить і газоподібне середовище, яке заповнює внутрішню порожнину плоду. Таким чином, під час перерізання лезом верхньої контактної поверхні плоду (площа контакту з різальною кромкою становить $F = F_1(k, \epsilon_{kp})$), опір усередині продукту збільшується.

Площа контакту в даному випадку залежить від геометричних розмірів плоду l_k на ділянці різання і величини критичної відносної деформації ϵ_{kp} . При перерізання ближньої до леза поверхні плоду відбувається миттєвий перерозподіл максимального напруження σ_1 всередині продукту, викликаний порушенням цілісності його форми. М'якоть плоду поводитья як пружина, яка прагне повернутися

в початкове положення, а газоподібне середовище втрачає герметичність і більше не чинить опір, внаслідок чого загальний опір різанню миттєво знижується. Цей етап дуже нетривалий у часі, і при подальшому просуванні лева крізь продукт напруження стискання і відповідно зусилля різання знову зростають, причому його величина в точці E буде дещо більшою, ніж у точці B ($\sigma_2 > \sigma_1$). Ця ділянка кривої відповідає схематичному зображенню DE на рис. 8б.

Збільшення зусилля різання до точки E викликано збільшенням поверхні контакту плоду з різальною кромкою ножа. Розташування бічних граней плоду перцю болгарського відносно різальної кромки ножа може дещо змінюватися в процесі різання через додаткове зминання фаскою лева. Це викликано неможливістю їх жорсткої фіксації в процесі різання і обумовлене особливостями структурної будови самого плоду. Зниження зусилля різання на ділянці EF характерне для всіх кривих різання овочевої сировини, що розглядалися вище, і відбувається внаслідок зменшення опору стискання в зв'язку з тим, що зменшується товщина шару плоду.

Аналогічно, як для твердовидної рівномірно структурованої овочевої сировини, коли відомі її реологічні властивості, для розрахунків параметрів різання використаємо диференціальне рівняння першого порядку. Для вище наведеної овочевої сировини реологічна модель в'язко-пружної дисперсної системи відрізняється від попередньої. Вона має вид тіла Кельвіна (Goots et al., 2017):

$$\mu \left(\frac{d}{dt} x(t) \right) + cx(t) = \sigma(t) \quad (13)$$

Коли напруження стискання змінюється за лінійним законом:

$$\sigma(t) = kt, \quad (14)$$

підставивши в диференціальне рівняння (13) лінійну залежність (14) напруження від тривалості деформування, отримаємо розв'язання рівняння деформування овочевої сировини при початкових умовах $x(0)=0$:

$$x(t) = -\frac{k\mu}{c^2} + \frac{kt}{c} + \frac{e^{(-\frac{ct}{\mu})} k\mu}{c^2} \quad (15)$$

Виконавши диференціювання рівняння маємо швидкість деформування:

$$V(t) = \frac{d}{dt} x(t) = \frac{k}{c} - \frac{e^{(-\frac{ct}{\mu})} k}{c} \quad (16)$$

Питомі роботу A і миттєву N потужність знайдемо з наступних рівнянь:

$$A = \frac{1}{2} \frac{k^2 (-2\mu^2 + c^2 t_1^2 + 2e^{(-\frac{ct_1}{\mu})} \mu c t_1 + 2e^{(-\frac{ct_1}{\mu})} \mu^2)}{c^3} \quad (17)$$

$$N = \frac{1}{2} \frac{k^2 (2c^2 t_1 - 2c^2 e^{(-\frac{ct_1}{\mu})} t_1)}{c^3} \quad (18)$$

Для овочевої сировини з реологічними характеристиками $\mu = 10\,000 \text{ Па} \times \text{с}$, $c = 5\,500\,000 \text{ Па}$, графіки 3d-залежностей $A(k,t)$, $N(k,t)$ представлено на рис. 9–10.

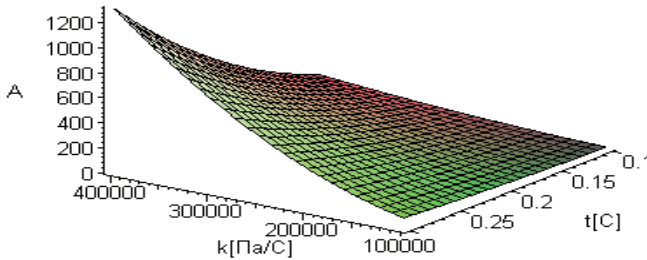


Рис. 9. Залежність питомої роботи A від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стискування
Джерело: власна розробка

Fig. 9. The dependence of the specific work A on the load factor k and the duration of the compression t
Source: own development

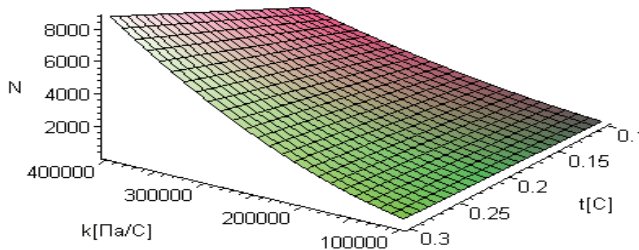


Рис. 10. Залежність питомої потужності N від коефіцієнта навантаження k та тривалості t стискування
Джерело: власна розробка

Fig. 10. Dependence of the specific power N on the load factor k and the duration of the compression t
Source: own development

Для деформування овочевої сировини з неоднорідною структурою при наявності порожнин (перець болгарський) величини витрати енергії $A(k,t) = 1200 - 100$, $N(k,t) = 8000 - 500$ значно менші, ніж при деформуванні овочевої сировини з однорідною структурою без порожнин (баклажани) $A(k,t) = 1400 - 200$, $N(k,t) = 14000 - 1000$.

При визначенні енергетичних характеристик процесу різання слід відрізнити роботу та потужність різання від питомих роботи та потужності різання. Вони мають різні розмірності, хоча перші і другі характеризують процес різання. Особливістю питомих роботи та потужності є те, що вони враховують реологічні характеристики продукту. Це дає можливість визначення оптимальних режимів різання і отримання якісної нарізки овочевої сировини.

Якість нарізки овочевої сировини залежить від режиму різання, геометричних розмірів леза, співвідношення швидкості різання і товщини нарізки та структурно-механічних властивостей. Для різних видів продукції оптимальні швидкості, які забезпечують високу якість нарізки, відрізняються.

Згідно з результатами досліджень, при подрібненні овочів зниження швидкості руху леза по відношенню до оптимальної призводить до утворення нерівностей, сколів і розтріскування бічної грані нарізаної скибочки, що є показником зниження якості. Занадто велике збільшення швидкості різання також сприяє погіршенню якості. Це спричинено нерівномірною деформацією подрібнених частинок у результаті дії ударних пружних хвиль, що виникають у зоні контакту леза і продукту та при розвантаженні за рахунок впливу відцентрових сил. При подрібненні овочів раціональним є інтервал швидкостей різання $0,4 \leq v \leq 1$ м/с з огляду на енергоефективність процесу.

З урахуванням вимог до якості подрібненої сировини нарізку овочів скибочками товщиною $1 \leq h \leq 2$ мм рекомендується здійснювати при $0,1 \leq v \leq 0,4$ м/с. При нарізці товщиною $h \geq 4$ мм при збільшенні кількості обертів понад 1 м/с для більшості овочів не спостерігалось погіршення якості.

На рис. 11 наведено зразки нарізки моркви, здійснені за однакової товщини нарізки, але при різних швидкостях обертання ножів.

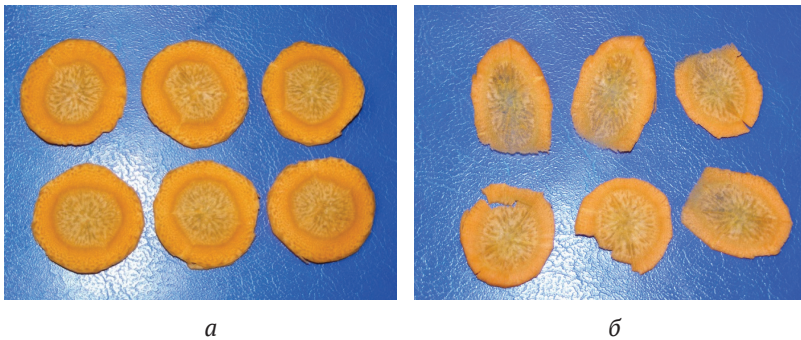


Рис. 11. Нарізка моркви скибочками товщиною 1 мм: а – швидкість різання 0,4 м/с;
б – швидкість різання 1 м/с

*Fig. 11. Slicing carrots with slices thickness of 1 mm: a – cutting speed 0,4 m / s;
b – cutting speed 1 m / s*

При подрібненні крихких продуктів із високим вологовмістом, таких як огірки та кабачки, збільшення швидкості руху ножів при товщині нарізки 1 мм також призводить до погіршення якості за рахунок руйнування скибочок. Задовільний результат був отриманий тільки для картоплі. На рис. 12а показано зразки товщиною нарізки 1 мм та 4 мм, отримані при швидкості різання 1 м/с. Аналізуючи результати, констатуємо високу якість нарізки в обох випадках. Отже, для картоплі доцільним є використання високих швидкостей різання при нарізці тонких скибочок (наприклад, для приготування чіпсів) та використання швидкісної різки при подрібненні – енергозаощаджуючим.

При подрібненні кабачків товщиною 1 мм збільшення швидкості різання від 0,4 до 1 м/с призводить до погіршення якості, а при товщині нарізки 4 мм – не чинило істотного впливу (рис. 13а). Збільшення швидкості різання понад 2 м/с призводило до крихкого зламу на периферії скибочки навіть при товщині 5 мм

(рис. 136). Рекомендована частота обертання ножів при подрібненні кабачків $n \geq 650 \text{ хв}^{-1}$ (швидкість різання відповідно $v = 1,08 \text{ м/с}$).

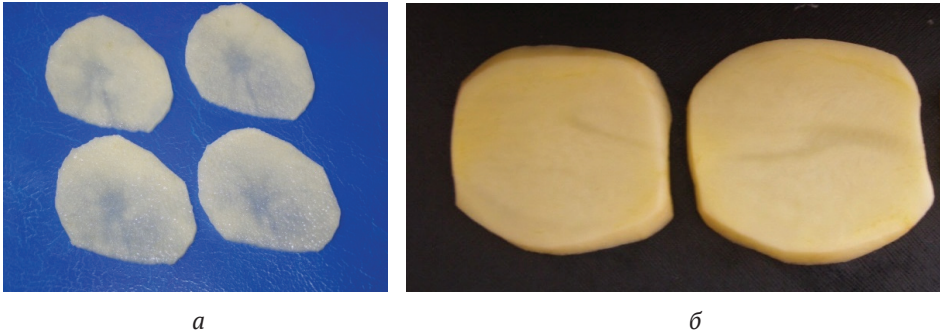


Рис. 12. Нарізка картоплі скибочками товщиною 1 мм (а) та 4 мм (б) при швидкості різання 1 м/с

Fig. 12. Slicing potatoes into slices in the thickness of 1 mm (a) and 4 mm (b) at a cutting speed of 1 m / s



Рис. 13. Якість нарізки кабачків товщиною 5 мм при швидкості різання 1 м/с (а) та швидкості різання 2 м/с (б)

Fig. 13. Quality of cutting of squashes in the thickness of 5 mm at a cutting speed of 1 m / s (a) and a cutting speed of 2 m / s (b)

Зразки нарізки овочів отримано аспіранткою Шейною А.

Висновки та обговорення результатів

Розрізненість і неоднозначність результатів досліджень подрібнення овочевої сировини лезом, виявлено при аналізі експериментальних даних, оцінці стану сучасної теорії різання в'язко-пружних матеріалів. Відсутність рекомендацій відносно вибору оптимальних режимів, зумовило необхідність проведення комплексних досліджень і аналізу їх результатів. Отриманні математичні моделі та розрахункові дані рекомендовано застосовувати при проектуванні нового устаткування, оптимізації процесу різання овочевої сировини, підвищення якості нарізки, зменшення енерговитрат.

Вперше:

За результатами досліджень встановлено, що овочева сировина за своїми структурно-механічними властивостями може відноситись до різних реологічних систем з в'язко-пружними властивостями, тобто тіл Кельвіна або Максвелла;

Отримано багатофакторні математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку, використання яких і 3d графіків дало можливість провести аналітичні дослідження процесу різання з урахуванням структурно-механічних властивостей овочевої сировини, визначити основні характеристики різання та енерговитрати при різних умовах взаємодії леза і сировини;

Враховавши результати проведених досліджень процесу різання, зроблено практичні рекомендації необхідні для ефективної експлуатації існуючого та проектування нових конструкцій малогабаритного обладнання. Робочі органи сучасного овочерізального устаткування мають бути прості і надійні у виготовленні та використанні, конструкція забезпечувати безпечну експлуатацію, санітарну обробку, високу якості нарізки при мінімальних витратах енергії;

З огляду на енергоефективність, при подрібненні більшості овочів оптимальним є інтервал швидкостей різання $0,4 \leq v \leq 1$ м/с. З урахуванням вимог до якості подрібненої сировини, нарізки овочів скибочками товщиною $1 \leq h \leq 2$ мм рекомендується здійснювати при швидкостях $0,1 \leq v \leq 0,4$ м/с. При нарізці товщиною $h \geq 4$ мм, та збільшенні швидкості руху ножів понад 1 м/с, для більшості овочів не спостерігалось погіршення якості.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Гуць В., & Губеня, А. (2010). Определение усилия резания продуктов с разными структурно-механическими свойствами. *Научни трудове на УХТ*, 57, 2, 411-416.
- Заплетников, И.Н., & Шеина А.В. (2016). *Измельчение растительного сырья* [Монография]. Харьков: Водный спектр Джи-Эм-Пи.
- Bagley, E.B. (2013). Mechanical Properties of Solid Foods Deformation, Fracture and Stress Relaxation. *Physical Properties of Foods*, 2, 345-365.
- Emadi, B. (2015). Mechanical properties of melon measured by compression, solar and cutting modes. *International Journal of Food Properties*, 12, 780-790.
- Fekete, A. (2007). Development Of Sensing System For Product Grading. In *Annual report* (pp. 44-49). Budapest.
- Goots, V., Gubenia, O., Sheyina, A., & Omelchenko, K. (2017). Modelling of mechanical systems be the reodynamical method. *Proceedings Of University Of Ruse*, 56, 10.1, 135-139.
- Gubenia, O., & Guts, V. (2010). Modeling of cutting of food products. *EcoAgroTourism*, 1, 67-71.
- Sheyina, A., & Goots, V. (2016). Cutting speed value during plant material grinding in food industry. *Ukrainian Journal Of Food Science*, 4, 1, 111-119.
- Stropek, Z. (2018). Viscoelastic response of apple flesh in a wide range of mechanical loading rates. *Int. Agrophys*, 32, 335-340.

REFERENCES

- Bagley, E.B. (2013). Mechanical Properties of Solid Foods Deformation, Fracture and Stress Relaxation. *Physical Properties of Foods*, 2, 345-365 [in English].
- Emadi, B. (2015). Mechanical properties of melon measured by compression, solar and cutting modes. *International Journal of Food Properties*, 12, 780-790 [in English].
- Fekete, A. (2007). Development Of Sensing System For Product Grading. In *Annual report* (pp. 44-49). Budapest [in English].

- Goots, V., Gubenia, O., Sheyina, A., & Omelchenko, K. (2017). Modelling of mechanical systems by the reodynamical method. *Proceedings Of University Of Ruse*, 56, 10.1, 135-139 [in English].
- Gubenia, O., & Guts, V. (2010). Modeling of cutting of food products. *EcoAgroTourism*, 1, 67-71 [in English].
- Guts V., & Gubenia A. (2010). Opredelenie usiliia rezaniia produktov s raznymi strukturno-mekhanicheskimi svoistvami [Determination effort of cutting products with different rheological properties]. *Nauchni trudove na UHT*, 57, 2, 411-416 [in Ukrainian].
- Sheyina, A., & Goots, V. (2016). Cutting speed value during plant material grinding in food industry. *Ukrainian Journal Of Food Science*, 4, 1, 111-119 [in English].
- Stropek, Z. (2018). Viscoelastic response of apple flesh in a wide range of mechanical loading rates. *Int. Agrophys*, 32, 335-340 [in English].
- Zapletnikov, I.N., & Sheina A.V. (2016). *Izmelchenie rastitelnogo syria* [Grinding plant materials] [Monograph]. Kharkiv: Vodnyiy spektr GMP [in Ukrainian].

УДК 641.512

Виктор Гуц,

*доктор технических наук, профессор,
Киевский национальный университет
культуры и искусств,
Киев, Украина,
goots@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-3874-5609>*

Алина Шеина,

*старший преподаватель,
Донецкий национальный университет
экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского,
Кривой Рог, Украина,
sheyina235@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5216-3958>*

Ольга Коваль,

*кандидат технических наук, доцент,
Национальный университет пищевых технологий,
Киев, Украина,
koval_andreevna@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-9427-1842>*

ИННОВАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ РЕЗКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Актуальность. В статье рассматриваются вопросы определения основных закономерностей резания растительного сырья линейным ножом. Это один из самых распространенных способов обработки пищевых продуктов. Он зависит от множества факторов, в том числе структуры продукта, его свойств, режима резания. Для разработки овощерезательного оборудования важным является учет этих факторов и их количественная оценка. **Цель и методы.** Целью статьи являются определение основных закономерностей процесса резания группы овощей, а также исследование механизма действия лезвия ножа на продукт с вязко-упругими реологическими свойствами. Использован метод символьной компьютерной математики для графического изображения результатов экспериментальных исследований зависимости относительной деформации, скорости деформирования, напряжения сжатия, удельных усилий резания от продолжительности деформирования. **Результаты.** Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования процесса резания овощного сырья линейным ножом. Представлены реологические модели в виде дифференциальных уравнений первого порядка для сырья с различными структурно-механическими свойствами. Выполнены их аналитические исследования. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние на удельные усилия резания особенностей относительного расположения продукта и ножа. По результатам экспериментальных исследований подтверждена достоверность теоретических предположений. Определены расчетные величины удельных усилий резания, работа и мгновенная мощность резания. Они необходимы для уточняющих расчетов режимов технологического процесса и параметров овощерезательного оборудования. Выполнен анализ конструкций ножей овощерезательных машин дискового типа, используемых на предприятиях ресторанного хозяйства. **Выводы и обсуждение.** Проведенные исследования и полученные математические зависимости позволили выявить направления оптимизации процесса резания, установить недостатки конструкций овощерезательного оборудования, ухудшающие качество нарезки и увеличивающие энергозатраты. По результатам исследований сформулированы требования к режущим инструментам. Даны рекомендации для создания новых устройств, ориентации сырья по отношению к ножам и по внедрению рациональных режимов эксплуатации овощерезательного оборудования.

Ключевые слова: резка, сырье, реология, работа резания.

UDC 641.512

Victor Goots (Guts),

*Tech – associate professor,
Kyiv National University of Culture and Arts,
Kyiv, Ukraine,
goots@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-3874-5609>*

Alina Sheyina,

*Donetsk National University of Economics and Trade
named after Mykhailo Tugan-Baranovsky,
Kriviy Rig, Ukraine,
sheyina235@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5216-3958>*

Olga Koval,

*Ph.D of Technical sciences,
Kyiv National University of Food Tecnologis,
Kyiv, Ukraine,
koval_andreevna@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-9427-1842>*

INNOVATIVE WAYS OF CUTTING RAW MATERIALS

Actuality. The article raises the question of establishing the basic laws of cutting vegetable raw material with a linear knife. It is one of the most commonly used food processing methods in the food industry. It depends on a large number of factors, in particular the structure of the product, its properties, the cutting mode, and so on. Considering these factors and their quantitative assessment are important for the cutting equipment development. **Purpose and methods.** The purpose of the article is to determine the basic regularities of the process of cutting the group of vegetables, as well as to study the mechanism of action of the knife blade on the product with viscoelastic rheological properties. The method of symbolic computer mathematics for graphic representation of the experimental studies results of strain dependence, deformation rate, compression stress, specific cutting forces from the duration of deformation has been used. **Results.** The results of theoretical and experimental research of the process of cutting vegetable raw materials with a linear knife are given. The theological models are presented in the form of differential equations of the first order for raw materials with different structural and mechanical properties. Their analytical research has been carried out. The relative positioning influence of the product and the knife on the specific cutting force has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. According to the results of experimental studies, the reliability of theoretical assumptions has been confirmed. Calculated values of specific forces of cutting, work and instantaneous power of cutting have been determined. They are necessary for specifying calculations of the modes in technological process and parameters of vegetable cutting equipment. The analysis of knives designs of vegetable cutting machines by disk type, which are used in enterprises of restaurant business, has been carried out. **Conclusions and discussion.** The conducted researches and the obtained mathematical dependencies have allowed to reveal directions of optimization in a cutting process, to define defects of constructions of vegetable cutting equipment, which worsen cutting quality and increase energy costs. According to the results of experimental studies, the requirements for cutting tools have been formulated. Recommendations for creation of new devices, raw materials orientation in relation to knives, and introduction of rational modes in operation of vegetable equipment have been given.

Key words: cutting, raw materials, rheology, cutting work.