

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 532.135: [635.1/8:641.51.06]

Возняк А. В., канд. техн. наук., доцент¹
Шейна А. В., аспірант¹

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

ПОДРІБНЕННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

UDC 532.135: [635.1/8:641.51.06]

Voznyak A. V., PhD in Engineering sciences,
Associate Professor¹
Sheyina A. V., graduate student¹

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

CUTTING OF PLANT RAW MATERIAL IN FOOD INDUSTRY

Мета. Встановлення взаємовпливу режимів різання, геометричних параметрів різального інструменту і структурно-механічних властивостей рослинної сировини на питомі зусилля різання. Отримання якісної та кількісної оцінки впливу обраних чинників на досліджуваний процес.

Методи. Реалізація повного факторного експерименту виду 2^3 . За цільову функцію приймалося питоме зусилля різання плоским ножем. В якості варійованих чинників були обрані швидкість різання, кут різання і модуль пружності рослинної сировини. Інтервали варіювання чинників впливу обиралися відповідно до результатів експериментальних досліджень.

Результати. Виконано аналіз результатів багатофакторного дослідження процесу різання рослинних матеріалів плоским ножем з урахуванням впливу режимів роботи овочерізального устаткування, особливостей конструктивного виконання ножів і реологічних властивостей продукту. Отримано рівняння регресії у вигляді неповного рівняння другого ступеня. Виконана оцінка однорідності паралельних дослідів та оцінка адекватності отриманого рівняння. Встановлено, що найбільший вплив на питомі зусилля різання рослинних матеріалів плоским ножем здійснює модуль пружності продукту. Міра впливу модуля пружності залежить від величини швидкості різання: чим нижче значення модуля пружності, тим у меншій мірі проявляється вплив швидкості різання. Істотний вплив на питомі зусилля різання здійснює поєднання чинників «модуль пружності — кут різання». Для подрібнення буряка, моркви, картоплі оптимальним являтиметься кут різання від 30° до 50° , при різанні продуктів з високим вмістом вологи і менш вираженими пружними властивостями (кабачки, огірки) — від 20° до 40° . Встановлено, що при подрібненні овочів, пружні властивості яких проявляються значною мірою, раціональним є зниження зусиль різання за рахунок збільшення швидкості різання.

Ключові слова: різання, плоский ніж, швидкість різання, кут різання, модуль пружності, овочі.

Постановка проблеми. В харчовій промисловості процес різання рослинної сировини може здійснюватися як технологічна операція, яка є обов'язковою стадією при виробництві будь-якого продукту, або бути завершальним етапом, що визначає його зовнішній вигляд відповідно до вимог споживача. Виробництво нарізаної продукції має велику рентабельність в порівнянні з реалізацією необробленої сировини, що стимулює виробника збільшувати долю такої продукції на ринку споживання.

Надійшла до редакції 22.05.2018 р.

© А. В. Возняк, А. В. Шейна, 2018

Овочерізальне устаткування широко використовується на підприємствах харчової промисловості і ресторанного господарства. Воно може використовуватися як самостійний технологічний пристрій або входити до складу технологічної лінії. При цьому, величезна конкуренція на ринку пред'являє усе більш жорсткі вимоги до конструктивних, енергетичних і експлуатаційних характеристик овочерізальних машин, а також до якісних показників виконання самого процесу. Це робить актуальними питання усебічних досліджень процесу різання різних харчових матеріалів, у тому числі рослинного походження, з метою удосконалення як самого процесу, так і устаткування, призначеного для його здійснення.

Одним з визначальних параметрів процесу різання є зусилля різання. Це основна енергетична складова різання. Від величини цього показника залежить ефективність і доцільність використання обраного способу подрібнення харчового матеріалу. Отже, зниження величини зусилля різання є пріоритетним завданням інтенсифікації самого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження різання рослинних матеріалів є завданням із складною структурою, оскільки існує велика кількість чинників, що здійснюють вплив на кінцевий результат. Умовно ці чинники можна розділити на три групи: чинники, обумовлені структурно-механічними властивостями продукту, що обробляється; чинники, обумовлені конструктивним виконанням устаткування і робочих інструментів; чинники, обумовлені режимами роботи устаткування [1, 2]. При цьому слід враховувати, що усі вони здійснюють складний взаємовплив на процес різання, причому комбінації чинників можуть істотно впливати на характер взаємодії.

На підприємствах ресторанного господарства при подрібненні овочевої продукції найбільше поширення отримали овочерізальні машини дискового типу. В цих машинах продукт нарізається пласким ножом. Ніж закріплюється на опорному диску за допомогою гвинтових або заклепкових з'єднань і рухається разом з ним. Опорний диск розміщується в робочій камері овочерізки на робочому валу, якому обертовий рух від електродвигуна передається через, як правило, клинопасову передачу [1].

Проведений аналіз техніко-експлуатаційних показників овочерізального устаткування показав, що в машинах різних моделей швидкість подрібнення варіюється в межах 0,4–2,5 м/с [2, 3]. Аналіз літературних джерел виявив відсутність даних про вплив чинника швидкості на процес різання рослинних матеріалів у зазначеному інтервалі. Основний масив досліджень різання рослинної сировини в цій області відноситься до агротехнічного комплексу, де використовуються інші методики і граничні умови досліджень [4, 6]. Крім того, висуваються абсолютно інші вимоги до якості нарізки і використовуються режими різання, які не відповідають харчовій промисловості [4, 5]. Цей факт зумовив необхідність вивчення процесу різання і проведення відповідних досліджень в умовах, що максимально моделюють реальний технологічний процес.

Зусилля різання в овочерізальних машинах дискового типу залежить від геометричних параметрів різального інструменту (товщина леза, кут заточування ножа, шорсткість поверхні різальної кромки), техніко-експлуатаційних параметрів машини (швидкість різання), і від структурно-механічних властивостей продукту (коефіцієнта тертя продукту об поверхню ножа і модуля пружності) [1, 4, 6].

Вплив геометричних параметрів ножів на зусилля різання описаний у багатьох наукових роботах [1, 5–7, 10], проте нас цікавили дані відносно обраної групи овочів.

Структурно-механічні властивості рослинної сировини приведені в роботах [1, 4, 8, 9]. Дані щодо впливу швидкості різання на структурно-механічні властивості рослинних матеріалів у зазначеному інтервалі швидкостей різання не систематичні. Відсутні дослідження, що дозволяють об'єднати дані відносно обраної групи овочів, оскільки є істотні відмінності в методиках проведення експериментів і граничних інтервалах чинників впливу, що задаються. Цей факт зумовив необхідність проведення комплексного дослідження структурно-механічних властивостей обраної групи овочів з урахуванням чинника швидкості.

Мета статті. Метою досліджень є встановлення взаємовпливу режимів різання, геометричних параметрів різального інструменту і структурно-механічних властивостей рослинної сировини на питомі зусилля різання. Для цього був реалізований повний факторний експеримент виду 2^3 . Така постановка завдання дозволяє послідовно отримати якісну і кількісну оцінку впливу обраних чинників на досліджуваний процес.

Для досліджень були відібрані чинники з різних груп впливу, що дозволяє розглянути процес різання в комплексі. Це дасть можливість оцінити значимість кожного з даних чинників і встановити можливість і ефективність впливу на них.

Виклад основного матеріалу дослідження. Планування експериментального дослідження здійснювалося згідно наступних етапів: збір і аналіз апріорної інформації, вибір вхідних і вихідних змінних, вибір математичної моделі і методу аналізу даних, проведення експерименту, обробка і аналіз експериментальних даних.

За цільову функцію приймалося питоме зусилля різання плоским ножом q_{num} . В якості варійованих чинників були обрані швидкість різання v , кут різання β і модуль пружності E рослинного матеріалу. При цьому швидкість різання — це швидкість різальної кромки леза плоского ножа в заданій точці у напрямку різання. Це найважливіший параметр процесу різання, з яким пов'язана як продуктивність машини, так і енергоємність процесу. Крім того, швидкість різання визначає режим роботи устаткування. За кут різання приймали кут між вектором швидкості різання і її нормальною складовою. Кут різання визначає вид різання — рубляче або ковзаюче — і є характеристикою конструктивного виконання різального інструменту. Модуль пружності — це коефіцієнт пропорційності між напругою, що викликає деформацію матеріалу, і величиною самої деформації. Цей параметр є структурно-механічною характеристикою досліджуваних рослинних матеріалів.

При аналізі і виборі чинників впливу враховувалися їх однозначність, керованість, висока точність і можливість варіювання в широкому діапазоні. Кожен чинник варіювався на двох рівнях.

Для досліджень використовувалися овочі наступних сортів: картопля — «Невський», цибуля ріпчаста — «Альвіз», морква — «Шаєтене», баклажани «Алмаз», кабачки «Садко», огірки «Анніка». Для досліджень обиралися свіжі продукти одного сорту і з однієї партії. Перелічені сорти овочів були виведені не більше 10 років тому.

Інтервал варіювання (таблиця 1) швидкості різання обумовлений інтервалом швидкостей, що використовується в овочерізальному устаткуванні, згідно з дослідженням ринку продукції [2]. Овочерізальне устаткування, яке застосовується на підприємствах харчової промисловості і ресторанного господарства, має режимні швидкості різання від 0,4 м/с до 2,5 м/с (швидкості різання від 0,25 м/с до 0,4 м/с рекомендується застосовувати при нарізці варених овочів) [1, 2]. Тому для проведення багатофакторного експерименту було обрано саме цей інтервал. До того ж, встановлено, що в межах зазначених швидкостей відбувається зменшення питомих зусиль різання обраної групи овочів (рис. 1).

Вибір інтервалу кута різання обумовлений загальними рекомендаціями для подрібнення рослинної сировини [1, 4] і проведеними дослідженнями [2]. Графічні залежності для обґрунтування оптимального кута різання показані на рис. 2. Обираємо у якості варійованого інтервалу кути різання від 10° до 40° , адже за зазначених умов питоме зусилля різання буде мінімальним.

Вибір модуля пружності, як чинника, що характеризує структурні властивості подрібнюваної продукції, здійснювався відповідно до експериментальних даних в інтервалі обраних швидкостей різання (рис. 3).

Згідно з рис. 3, для досліджуваної групи овочів модуль пружності змінюється від 1 до 4 МПа, тому цей інтервал було обрано у якості варійованого при проведенні багатофакторного експерименту.

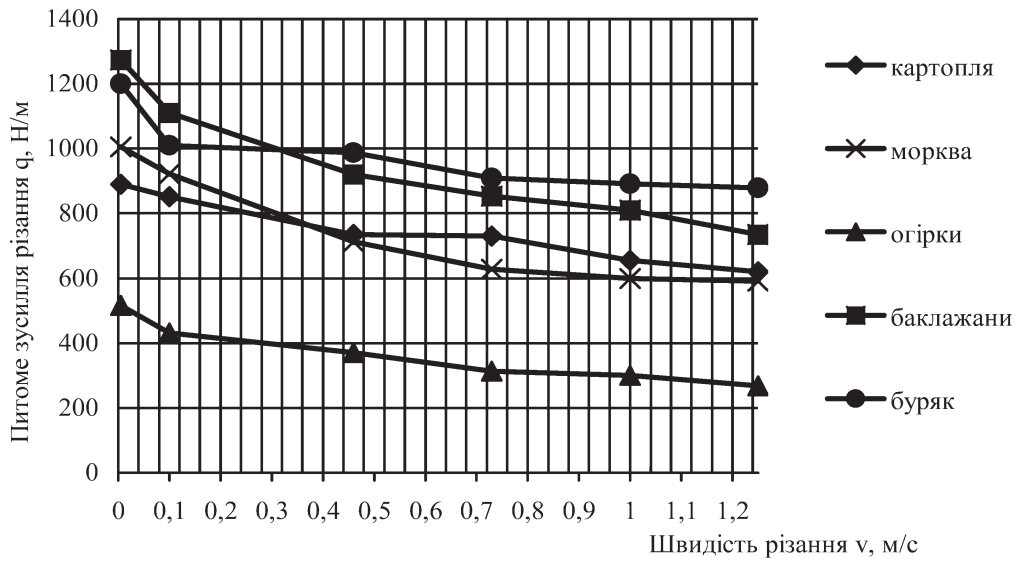


Рисунок 1 — Графічні залежності до визначення варійованого інтервалу швидкості різання

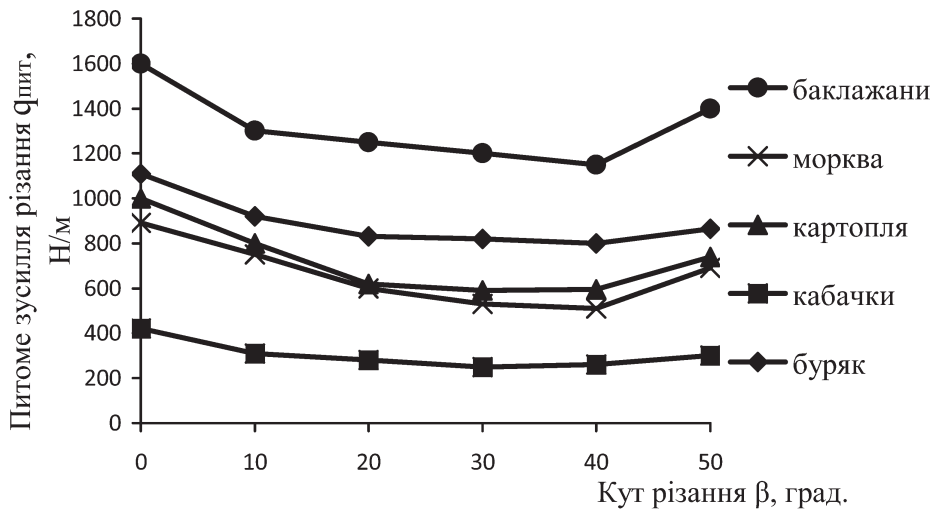


Рисунок 2 — Графічні залежності до вибору варійованого кута різання

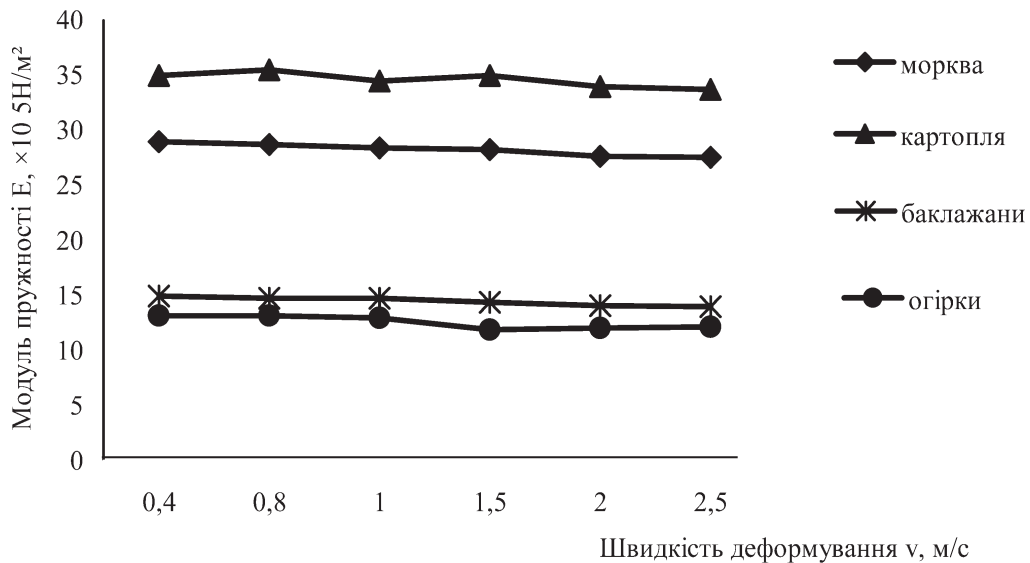


Рисунок 3 — Графічні залежності до обрання варійованого інтервалу модуля пружності

Таблиця 1 — Рівні та інтервали варіювання чинників процесу різання

Рівні		x_1	x_2	x_3
Нульовий	0	0,825	25	2,5
Верхній	+1	1,25	40	4
Нижній	-1	0,4	10	1
Інтервал варіювання	ΔX_i	0,425	15	1,5
Позначення		v , м/с	β , град.	E , МПа

В результаті обробки і аналізу експериментальних даних було отримано рівняння регресії у вигляді неповного рівняння другого ступеня, що дозволяє оцінити вплив на питоме зусилля різання як самих чинників, так і їх взаємодії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (1)$$

де b_0, \dots, b_6 — коефіцієнти регресії.

Оцінка однорідності паралельних дослідів здійснювалася за критерієм Кохрена. Отримано значення критерію Кохрена $G = 0,19$, що менше за критичне $G_{0,05}^{kp}(2;8) = 0,52$. Це свідчить про однорідність паралельних дослідів.

За результатами математичної обробки експериментальних даних за допомогою методу найменших квадратів отримані значення коефіцієнтів регресії рівняння (1), які приведені в таблиці 2. Для оцінки значимості отриманих коефіцієнтів регресії для кожного з них розрахований критерій Стюдента.

Таблиця 2 — Коефіцієнти регресії і оцінка їх значимості

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
Значення	832,29	-39,00	-96,85	133,61	-6,67	-20,5	19,49
Критерій Стюдента	293,82	13,77	34,19	47,17	2,36	7,24	6,88

Оскільки для всіх коефіцієнтів регресії значення критерія Стюдента більше, ніж критичне $t_{0,05}^{kp}(16) = 2,12$, можна з вірогідністю 95 % зробити висновок про їх значимий вплив на функцію відгуку.

Аналіз даних таблиці 3 показує, що досліджувані чинники окремо здійснюють більший вплив на питомі зусилля різання, ніж їх взаємодія. Із визначених чинників максимальний вплив здійснює модуль пружності продукту, мінімальний — швидкість різання. Зі взаємодій найбільш значимим є поєднання швидкості різання і модуля пружності продукту.

Оцінка адекватності отриманого рівняння здійснювалася за критерієм Фішера. Отримано значення критерію Фішера $F = 2,80$, яке менше за критичне $F_{0,05}^{kp}(1;16) = 4,49$, що свідчить про адекватність отриманого рівняння.

На рис. 4–5 приведені графічні зображення рівняння (1) з урахуванням табл. 3 при фіксованих значеннях двох з трьох чинників.

Аналіз рис. 4 показує, що збільшення швидкості різання сприяє зниженню зусилля різання. Динаміка зниження визначається значною мірою значеннями двох інших чинників. Так, при $E = 1$ МПа і $\beta = 10^\circ$ динаміка зниження мінімальна, при значеннях

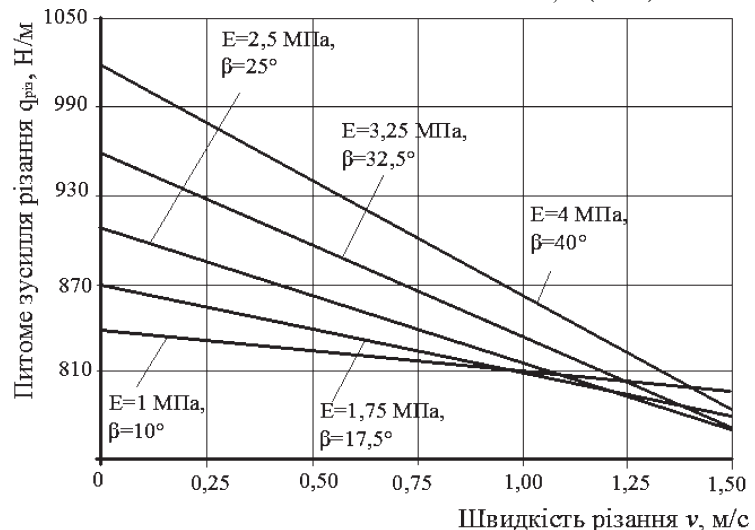


Рисунок 4 — Вплив швидкості різання на зусилля різання

$E = 4$ МПа, $\beta = 40^\circ$ — максимальна. Тобто, для продуктів з низькими значеннями модуля пружності E підвищення швидкості різання не завжди є ефективною мірою зі зниження зусилля різання. Ефективніше, як показує рис. 5, використовувати різальні пристрої з великим значенням кута різання.

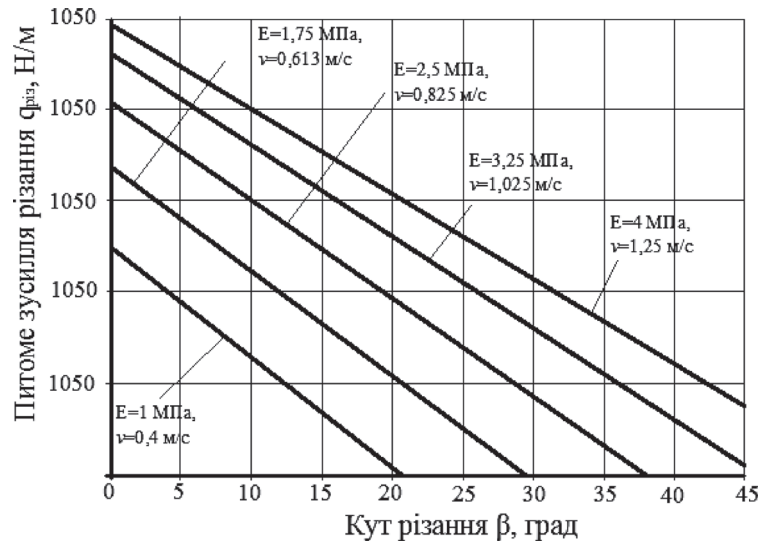


Рисунок 5 — Вплив кута різання на зусилля різання

Аналіз рис. 5 показує, що збільшення кута різання сприяє зниженню питомих зусиль. Проте, вплив двох інших чинників на динаміку цієї залежності незначний.

Аналізуючи отримане рівняння регресії і результати експериментальних досліджень можна виділити наступне:

1. Найбільший вплив на питомі зусилля різання рослинних матеріалів плоским ножом здійснює модуль пружності продукту. Міра впливу модуля пружності залежить від величини швидкості різання: чим нижче значення модуля пружності, тим у меншій мірі проявляється вплив швидкості різання. Отже, чим більш виражені пружні властивості продукту, тим ефективніше стає зниження питомих зусиль різання за рахунок коригування (збільшення) швидкості різання.

2. В інтервалі швидкостей різання від 0,4 м/с до 1,25 м/с вплив швидкості різання на питомі зусилля різання мінімальний, в порівнянні з іншими чинниками. Зниження питомих зусиль різання буде ефективним при обліку взаємовпливу швидкості різання і модуля пружності. Такий підхід є раціональнішим при проектуванні спеціалізованого устаткування, призначеного для переробки одного виду продукції (подрібнення моркви для консервного виробництва, подрібнення буряка в цукровій промисловості, нарізка картоплі «фрі», тощо) або декількох, що мають близькі за значенням пружні властивості.

3. Істотний вплив на питомі зусилля різання здійснює поєднання чинників «модуль пружності — кут різання». Чим більш виражені пружні властивості сировини, тим прийнятніше використовувати більш високі значення кута різання. Для подрібнення буряка, моркви, картоплі оптимальним являтиметься кут різання від 30° до 50° , при різанні продуктів з високим вмістом води і менш вираженими пружними властивостями (кабачки, огірки) — від 20° до 40° .

4. При подрібненні сировини, пружні властивості якої проявляються незначною мірою, збільшення швидкості різання вище 0,5–0,75 м/с і кута різання вище 30° не є ефективною мірою впливу на питомі зусилля різання і не сприяє економічному ефекту з урахуванням енергетичних витрат.

5. При подрібненні сировини з вираженими пружними властивостями збільшення швидкості різання і кута різання (в межах оптимуму) є економічно ефективною мірою.

Висновки. Експериментально встановлено вплив на питомі зусилля різання швидкості різання, модуля пружності та кута різання. Обґрунтовано вибір інтервалів варіювання цих чинників при плануванні багатofакторного експерименту, відповідно до вимог та

технологій, які використовуються в харчовій промисловості. Сплановано та проведено експериментальне дослідження, за результатами якого виявлено, що структура продукту має вирішальне значення при виборі оптимальних параметрів різання за визначених в цій роботі умов.

Для рослинної сировини, пружні властивості яких проявляються незначною мірою, раціональним є зниження зусиль різання за рахунок зменшення кута різання. Згідно результатів експерименту, швидкість різання не здійснюватиме істотного впливу на енергетичну складову процесу за зазначених умов. Її збільшення має сенс тільки в аспекті її впливу на якість нарізки.

При подрібненні овочів, пружні властивості яких проявляються значною мірою, раціональним є зниження зусиль різання за рахунок збільшення швидкості різання.

Врахування результатів досліджень і наведених рекомендацій на стадії проектування і в процесі експлуатації овочерізального устаткування, сприятиме створенню сучасного, ефективного і конкурентоздатного устаткування.

Список літератури / References

1. Заплетников, И. Н. Измельчение растительного сырья : монография / И. Н. Заплетников, А. В. Шеина. — Харьков : Водний спектр Джи-Ем-Пи, 2016. — 205 с.
Zapletnikov, I. N., Sheyina, A. V. (2016). *Izmelchenie rastitel'nogo syrya* [Grinding plant material]. Kharkiv, Vodniy spektr J-M-P Publ., 205 p.
2. Gubenia, O., Guts, V. (2010). Modeling of cutting of food products. *EcoAgroTourism*, no. 1, pp. 67–71.
3. 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.
4. Горюшинский, В. С. Совершенствование резания корнеплодов с обоснованием параметров измельчителя. — Пенза, 2004.—13 с.
Goryushinskiy, V. S. (2004). *Sovershenstvovanie rezaniya korneplodov s obosnovaniem parametrov izmelchatelya* [Perfection of cutting of root crops with the ground of parameters of grinding down]. Penza, 13 p.
5. Гуць, В. Определение усилия резания продуктов с разными структурно-механическими свойствами / В. Гуць, А. Губеня // Научни трудове на УХТ, том 57, свит'к 2. — 2010. — С. 411–416.
Guts, V., Gubanya, A. (2010). *Opređenje usiliya rezaniya produktov s raznyimi strukturno-mehanicheskimi svoystvami* [Determination effort of cutting products with different reological properties]. *Nauchni trudove na UHT*, vol. 57, svit'k 2, pp. 411–416.
6. Левіт, І. Б. (2012). Реологія харчових продуктів: монографія / І. Б. Левіт, В. О. Сукманов — Донецьк: ДонНУЕТ. — 408 с.
Levit, I. B., Sukmanov, V. O. (2012). *Reologiya harchovih produktiv: monografiya* [Reology of food products]. Donetsk, DonNUET Publ., 408 p.
7. Дейниченко, Г. В. Удосконалення комбінованих способів переробки баклажан та перцю солодкого: монографія / Г. В. Дейниченко, О. Г. Терешкін, Д. В. Горелков. — Харків, 2011. — 224 с.
Deynychenko, H. V, Tereshkin, O. H, Horyelkov, D. V. (2011). *Udoskonalennya kombinovanykh sposobiv pererobky baklazhan ta pertsyu solodkoho* [An improvement of the combined methods of processing is an egg-plant and pepper sweet]. Kharkiv, 224 p.
8. Molenda, M., Thompson, S. A. and Ross, I. J. (2011). Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces. *Jagric. Engng Res.*, vol. 77 (2), pp. 209–219.
9. Ялпачик, В. Ф. Коэффициент трения некоторых видов плодоовощной продукции / В. Ф. Ялпачик, С. Ф. Буденко // Холодильна техніка і технології. — 2007. — № 2 (106). — С. 68–74.
Yalpachik, V. F., Budenko, S. F. (2007). *Koeffitsient treniya nekotoryih vidov plodoovoschnoy produktsii* [Coefficient of friction of some types of fruit and vegetable products]. *Holodilna tehnika i tehnologiya*, № 2 (106), pp. 68–74.

10. Goots, V., Gubenia, O., Sheina, A., Omelchenko, K. (2017). Modelling of mechanical systems by the reodynamical method. Proceedings Of University Of Ruse, vol. 56, b. 10.1. — pp. 135–139.

Цель. Определение взаимовлияния режимов резания, геометрических параметров режущего инструмента и структурно-механических свойств растительного сырья на удельные усилия резания. Качественная и количественная оценка влияния выбранных факторов на исследуемый процесс.

Методы. Реализация полного факторного эксперимента вида 23. Для исследований были выбраны факторы из разных групп влияния, что позволяет рассматривать процесс резания в комплексе, оценить их значимость. Интервалы варьирования факторов влияния выбирались на основе проведенных экспериментальных исследований.

Результаты. Выполнен анализ результатов многофакторного эксперимента. Установлено, что из рассматриваемых характеристик наибольшее влияние на удельные усилия резания растительных материалов плоским ножом оказывает модуль упругости. Степень влияния модуля упругости зависит от скорости резания. Так же значительным является взаимовлияние факторов «модуль упругости-угол резания». В работе установлены оптимальные значения углов резания для некоторых овощей.

Установлено, что для растительного сырья с выраженными упругими свойствами снижение показателя удельных усилий резания за счет увеличения скорости резания является рациональным.

Ключевые слова: резание, плоский нож, скорость резания, угол резания, модуль упругости, овощи.

Objective. Determination of mutual influence of cutting regimes, geometric parameters of the cutting tool and structural and mechanical properties of plant raw materials on the specific cutting forces. Qualitative and quantitative assessment of the influence of selected factors on the process under study.

Methods. Implementation of a full factorial experiment of the type 23. For the research, factors from different influence groups were chosen, which allows to consider the cutting process in a complex, to evaluate their significance. Intervals for varying the influence factors were chosen on the basis of the experimental carried out studies.

Results. The analysis of the multifactor experiment results is performed. It is established that the modulus of elasticity exerts the greatest influence on the specific cutting forces of plant materials by a flat knife. The degree of influence of the modulus of elasticity depends on the cutting speed. Also significant is the mutual influence of factors «elastic-angle cutting unit». The optimal cutting angles for some vegetables have been determined.

It has been established that for a plant raw material with pronounced elastic properties, a decrease in the specific force of cutting due to an increase in the cutting speed is rational.

Key words: angle of cutting, modulus of elasticity, vegetables.