

*Цвіркун Л. О., канд. пед. наук¹,
Омельченко О. В., канд. техн. наук¹,
Цвіркун С. Л., канд. техн. наук²
Шкільна Ю. С., здобувач ОС магістр¹,
Корінь К. О., здобувач ОС бакалавр¹*

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

²Криворізький національний університет (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: tserg30@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ ОВОЧІВ З ОДНОРІДНОЮ ТЕКСТУРОЮ

UDC 641.512(045)

*Tsvirkun L. A., PhD in Pedagogical sciences¹
Omelchenko O. V., PhD in Engineering
sciences¹
Tsvirkun S. L., PhD in Engineering sciences²
Shkilna Yu. S., a graduate of a master's degree¹
Koryn K. O., a graduate of a bachelor degree¹*

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

²Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine), e-mail: tserg30@ukr.net

SIMULATION OF FORCE CHARACTERISTICS IN THE PROCESS OF CUTTING VEGETABLES WITH A HOMOGENEOUS TEXTURE

Мета. Метою статті є моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою.

Методи. У роботі для здійснення аналізу силової взаємодії матеріалу з ріжучим інструментом, застосовано методи статистики та динаміки.

Результати. Зазначено, що овочі забезпечують людський організм вітамінами, мінералами та антиоксидантами. Для зручності споживання овочі підлягають механічній обробці, а саме: різанню, подрібненню, шинкуванню, що є різними методами зменшення розміру. Зазначені операції досягаються механічним шляхом без зміни хімічних властивостей сировини. Різання є однією з найважливіших операцій, що має надати відповідну форму та забезпечується проникненням гострого ножа крізь матеріал, що призводить до отримання нової поверхні та менших розмірів, необхідних для певної мети. Надання оброблюваному матеріалу певної форми, здійснюється за допомогою гострого ріжучого інструменту, наприклад ножа чи леза. Для того щоб кінцевий продукт мав необхідну форму, прикладається певне зусилля до ножа для того, щоб під впливом його леза матеріал почав поділятися на частини. Тому важливим є тип різального інструменту, а саме леза які мають різну форму та конструктивні параметри – гостроту і кут заточування. Сконцентровано увагу на тому, що нормальне різання передбачає лише наявність нормальних зусиль при переміщенні леза перпендикулярно оброблюваній поверхні. При похилому різанні частина нормальних зусиль перетворюється у тангенціальні, внаслідок чого суттєво знижується зусилля різання. Ріжучий інструмент при ковзанні різанні, крім переміщення в нормальному або похилому напрямку щодо поверхні оброблюваного продукту, може здійснювати переміщення

© Цвіркун Л. О., Омельченко О. В., Цвіркун С. Л.,
Шкільна Ю. С., Корінь К. О.

паралельно ріжучій кромці, що значною мірою знижує зусилля різання. Здійснено моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою. Розглянуто співвідношення сили різання та деформації (глибини різання) на прикладі розрізання овочевої сировини. У процесі розрізання картоплі спостерігалось постійне збільшення сили різання. Досягши критичного значення, зусилля почало зменшуватися у міру збільшення глибини розрізання. Всю криву можна розділити на дві половини, які є майже дзеркальним відображенням відносно точки, що відповідає критичній силі. Збільшення сили під час проникнення леза, аж до приблизно середньої точки, пояснюється циліндричною формою сировини та вказує на однорідність текстури.

Ключові слова: овочі, різання, ріжуча кромка леза, ріжучий інструмент, нормальне різання, похиле різання, ковзне різання, сила різання, моделювання.

Постановка проблеми. Овоч – це широкий термін, який відноситься до їстівних частин рослини. Тому будь-яка частина рослини, яку можна вживати в сирому або вареному вигляді, називається овочем. Вони забезпечують людський організм вітамінами, мінералами та антиоксидантами. Наприклад, вітамін А, який міститься в овочах зеленого, жовтого або помаранчевого кольору, важливий для здоров'я очей і шкіри, а також зміцнює імунну систему. Вітамін Е одним з найважливіших антиоксидантів, що допомагає у відновленні клітин – це броколі, зелень, шпинат. Овочі покращують смак і споживання нашої основної їжі та є джерелом необхідних мінералів, таких як: мідь, магній, цинк, фосфор, селен.

Для зручності споживання овочі підлягають механічним обробці, а саме: різанню, подрібненню, шинкуванню, що є різними методами зменшення розміру. Зазначені операції досягаються механічним шляхом без зміни хімічних властивостей сировини. Різання є однією з найважливіших операцій, що має надати відповідну форму та забезпечується проникненням гострого ножа крізь матеріал, що призводить до отримання нової поверхні та менших розмірів, необхідних для певної мети [1]. Ручне різання та нарізання овочів займає не лише багато часу, а й може призвести до забруднення харчових продуктів. Тому у процесі подрібнення сировини застосовуються і електричні та автоматизовані методи, які постійно удосконалюються.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом багато досліджень присвячено висвітленню різним аспектам, пов'язаних із автоматизацією обладнання для подрібнення овочевої сировини [1, 2, 3, 4]. З-поміж таких досліджень є розробка автоматичної овочерізки, яка складається з камери для зйомки зображення овочів, двигуна постійного струму для керування рухом овочі та нарізка. Процес автоматизації здійснюється за допомогою програмного забезпечення та мікроконтролера запрограмованого для аналізу отриманих зображень сировини [2]. Овочі подаються в установку через бункерний пристрій, а потік овочів до мікроконтролера. Камера встановлена на бункер здійснює відстеження потоку зображень в реальному часі. Розпізнавання овочів виконується за кольором та отриманими контурами овочевої сировини.

Також науковцями запропоновано конструкцію автоматизованої овочерізки у якій здійснюється автоматизоване управління процесом різання за допомогою використання програмного забезпечення. Здійснюється автоматизований контроль та вибір відповідного діапазону швидкості для різання різних видів овочів, контролю руху усіх рухомих частин [3]. Крім того, реалізована УФ-платформа, яка забезпечує безпеку продуктів для споживання без шкоди як для користувача, так і для їжі.

Надання оброблюваному матеріалу певної форми, здійснюється за допомогою гострого ріжучого інструменту, наприклад ножа чи леза. Для того щоб кінцевий продукт мав необхідну форму, прикладається певне зусилля до ножа для того, щоб під впливом його леза матеріал почав поділятися на частини. Тому важливим є тип різального інструменту, а саме леза які мають різну форму та конструктивні параметри – гострота і кут заточування, рис. 1.

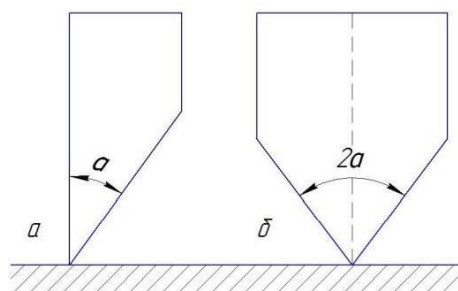


Рисунок 1 – Форма ножа
а – односторонній; б – двосторонній

У контексті окресленої проблеми, розглянемо типи різання ножом, а саме: нормальне різання, похиле різання, ковзне різання, рис. 2.

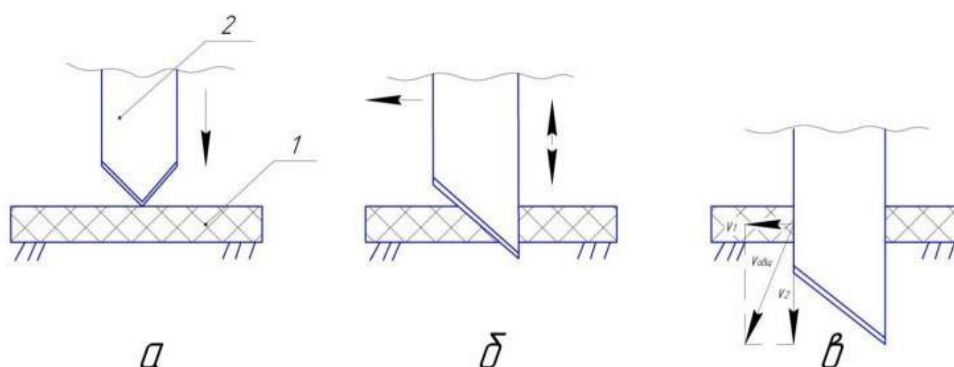


Рисунок 2 – Різання ножом
а – нормальне різання, б – похиле різання,
в – ковзне різання

Ефективність процесу різання може бути підвищена за рахунок зменшення сил опору, що з'являються при розрізанні матеріалу на невеликі порції. Це може бути досягнуто геометричним і кінематичним перетворенням складових сили різання, зокрема кута заточування ножа і гостроти ріжучої кромки леза [6, 9, 10]. Взаємодія леза з матеріалом у процесі різання характеризується надзвичайно складними процесами. Під час поділу матеріалу на частині під впливом леза відбувається процес попереднього стиснення сировини до виникнення на його кромці руйнівної контактної напруги. Момент виникнення контактної напруги визначається значенням зусилля P , що прикладається до ножа. У більшості випадків при різанні однорідних матеріалів зусилля P при якому завершується процес стиснення матеріалу і починається його різання є максимальним з усіх зусиль, що виникають у процесі різання. Як зазначалося раніше, таке зусилля різання приймає величину P і є критичним зусиллям різання [5, 6, 7, 8]. Нормальне різання передбачає лише наявність нормальних зусиль при переміщенні леза перпендикулярно оброблюваної поверхні. При похилому різанні частина нормальних зусиль перетворюється у тангенціальні, внаслідок чого суттєво знижується зусилля різання. Ріжучий інструмент при ковзанні різанні, крім переміщення в нормальному або похилому напрямку щодо поверхні оброблюваного продукту, може здійснювати переміщення паралельно ріжучій кромці, що значною мірою знижує зусилля різання.

Мета статті – моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо силову взаємодію матеріалу з ріжучим інструментом, рис. 3.

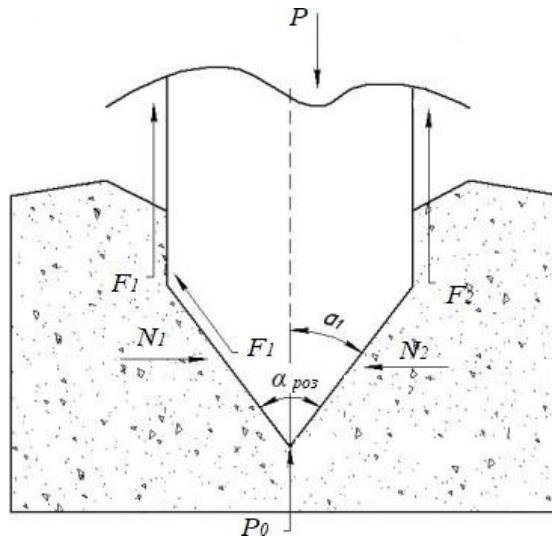


Рисунок 3 – Силова взаємодія матеріалу з ріжучим інструментом

Під час дії ножа на шар матеріалу на нього впливає вертикальна сила P , нормальні реакції N_1 та N_2 , сили тертя, що діють на бічні грані F_1 та F_2 та сила опору різання лезом P_p . Вважаючи рух леза рівномірним, рівняння рівноваги набуде вигляду [5, 6, 7, 8]

$$\begin{cases} | N_1 - N_2 \cos \beta + F_2 \sin \beta = 0; \\ | -P + P_p + F_1 + F_2 \cos \beta + N_2 \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

При русі ножа та наявності ковзання між матеріалом та бічними гранями мають місце співвідношення]

$$F_1 = f N_1, H \quad (2)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання.

$$F_2 = f N_2, H \quad (3)$$

Ніж розсуває шар матеріалу на деяку відстань, яка дорівнює товщині ріжучої кромки. Тоді $P_p = 0$, а $P = P_0$. Отримаємо

$$N_1 = \frac{P_0 (\cos \beta - f \sin \beta)}{2 f \cos \beta - (1 - f) \sin \beta} \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{P_0}{2 f \cos \beta - (1 - f) \sin \beta} \quad (5)$$

Сили P та P_0 перпендикулярні до осі шару. При швидкостях різання, незначних порівняно зі швидкістю поширення деформацій, сили майже рівномірно розподіляються по всьому поперечному перерізу матеріал, а це означає, що при різанні на малих швидкостях

руйнування відбувається майже одночасно. Проте необхідно враховувати низку чинників, які впливають на процес різання, а саме: фізико-механічні та реологічні властивості овочевої сировини [8]. Моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою представлено на рис. 4. Розглянуто характеристики сили різання та деформацію (глибину різання) на прикладі картоплі.

У процесі розрізання картоплі спостерігається постійне збільшення сили різання. Досягши критичного значення, зусилля починає зменшуватися у міру збільшення глибини розрізання. Всю криву можна розділити на дві половини, які є майже дзеркальним відображенням відносно точки, що відповідає критичній силі. Збільшення сили під час проникнення леза, аж до приблизно середньої точки, пояснюється циліндричною формою сировини та вказує на однорідність текстури.

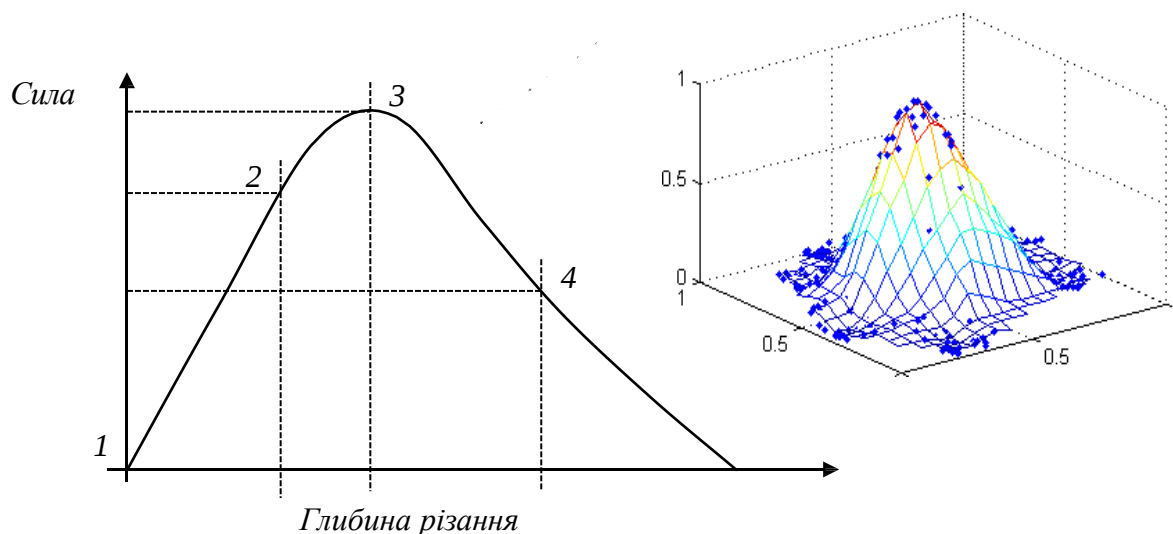


Рисунок 4 – Моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою

Точка 1. Під впливом леза відбувається процес попереднього стиснення сировини до виникнення на його кромці руйнівної контактної напруги. На цьому етапі відбувається деформація під дією ножа.

Точка 2 та Точка 3. При різанні однорідних матеріалів зусилля при якому завершується процес стиснення матеріалу і починається його різання є максимальним з усіх зусиль, що виникають у процесі різання. На цьому етапі відбувається постійне збільшення сили різання, яке досягає критичного значення в *Точці 3*.

Точка 4. При подальшому зануренні леза спостерігається зменшення значення зусилля у міру збільшення глибини розрізання.

Висновки. Зазначено, що різання є однією з найважливіших операцій, що має надати відповідну форму та забезпечується проникненням гострого ножа крізь матеріал, що призводить до отримання нової поверхні та менших розмірів, необхідних для певної мети. Надання оброблюємому матеріалу певної форми, здійснюється за допомогою гострого ріжучого інструменту, наприклад ножа чи леза. Для того щоб кінцевий продукт мав необхідну форму, прикладається певне зусилля до ножа для того, щоб під впливом його леза матеріал почав поділятися на частини. Тому важливим є тип різального інструменту, а саме леза які мають різну форму та конструктивні параметри – гострота і кут заточування.

Сконцентровано увагу на тому, що нормальне різання передбачає лише наявність нормальних зусиль при переміщенні леза перпендикулярно оброблюваної поверхні. При похилому різанні частина нормальних зусиль перетворюється у тангенціальні, внаслідок чого суттєво знижується зусилля різання. Ріжучий інструмент при ковзанні різанні, крім переміщення в нормальному або похилому напрямку щодо поверхні оброблюваного продукту,

може здійснювати переміщення паралельно ріжучій кромці, що значною мірою знижує зусилля різання.

Здійснено моделювання силових характеристик у процесі різання овочів з однорідною текстурою. Розглянуто співвідношення сили різання та деформації (глибини різання) на прикладі розрізання овочевої сировини. У процесі розрізання картоплі спостерігалось постійне збільшення сили різання. Досягши критичного значення, зусилля почало зменшуватися у міру збільшення глибини розрізання. Всю криву можна розділити на дві половини, які є майже дзеркальним відображенням відносно точки, що відповідає критичній сили. Збільшення сили під час проникнення леза, аж до приблизно середньої точки, пояснюється циліндричною формою сировини та вказує на однорідність текстури.

Список літератури

1. Adewale Mary, Raji A.O., Sedara Adewale. Development leafy vegetable slicing machine for vegetables. *World academics journal of engineering sciences*. 2023. Vol. 10. P. 24–36.
2. Aditya Pratap K., Roji Marjorie S., Saikumar M. Automatic vegetable chopper using image processing. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 33. P. 4787–4789.
3. Guide Ganyani, Tawanda Mushiri. Design of an automated vegetable cutter and slicer. *Industrial Engineering*. 2019. Vol. 3. P. 22–26.
4. Ramakrishna Reddy, Venkata Chaitanya Kumar. Fabrication of automated vegetable cutting machine. *International research journal of engineering and technology*. 2021. Vol. 8. P. 1390–1393.
5. Мазур М. П. Основи теорії різання матеріалів. Львів: Новий Світ-2000, 2020. 471 с.
6. Increasing the efficiency of food material cutting during inclined and shear movements of knife. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8746097/>.
7. Advanced cutting techniques for solid food: mechanisms, applications, modeling approaches, and future perspectives. URL: https://www.researchgate.net/publication/358091568_Advanced_cutting_techniques_for_solid_food_Mechanisms_applications_modeling_approaches_and_future_perspectives
8. Vishal Singha, Madhusweta Dasa. Effects of knife edge angle and speed on peak force and specific energy when cutting vegetables of diverse texture. *International journal of food studies*. 2016. Vol. 5. P. 22–38.
9. Закалов О., Мазяк З., Бортник А. Вплив форми леза ножів на енергоспоживання кутера. *Вісник ТДТУ*. 2010. № 2. С. 94–100.
10. Люлька О. М., Мирончук В. Г., Люлька Д. М. Геометрія ріжучої кромки бурякорізальних ножів, як фактор отримання якісної стружки. *Цукор України*. 2016. №12. С. 36–40.

References

1. Adewale, Mary, Raji, A.O., Sedara Adewale. (2013). *Mashyna dlya narizky lystovykh ovochiv rozrobky* [Development leafy vegetable slicing machine for vegetables.]. *Vsesvitniy akademichnyy zhurnal inzhenernykh nauk* [World academics journal of engineering sciences]. Vol. 10. P. 24–36.
2. Aditya, P. K., Roji, M. S., Saikumar, M. (2020). *Avtomatychna ovocherizka z obrobkoyu zobrazhen'* [Automatic vegetable chopper using image processing]. *Materialy s'ohodni: Materialy* [Materials Today: Proceedings]. Vol. 33, P. 4787–4789.
3. Guide, Ganyani, Tawanda, Mushiri. (2019). *Konstruktsiya avtomatyzovanoyi ovocherizky ta narizky* [Design of an automated vegetable cutter and slicer]. *Promyslove budivnytstvo* [Industrial Engineering]. Vol. 3. P. 22–26.
4. Ramakrishna, Reddy, Venkata Chaitanya, Kumar. (2021). *Vyhotovlennya avtomatyzovanoyi ovocherizky* [Fabrication of automated vegetable cutting machine]. *Mizhnarodnyy doslidnyts'kyi zhurnal tekhniki ta tekhnolohiy* [International research journal of engineering and technology]. Vol. 8. P. 1390–1393.

5. Mazur, M. P. (2020). *Osnovy teoriiy rizannya materialiv* [Fundamentals of material cutting theory]. Lviv, Novy Svit-2000, 471 p.

6. *Pidvyshchennya efektyvnosti rizannya kharchovykh produktiv pry pokhylykh i zsvnykh rukhakh nozha* [Increasing the efficiency of food material cutting during inclined and shear movements of knife]. Access mode: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8746097/>

7. *Peredovi tekhnolohiyi rizannya tverdoyi yizhi: mekhanizmy, zastosuvannya, pidkhody do modelyuvannya ta maybutni perspektyvy* [Advanced cutting techniques for solid food: mechanisms, applications, modeling approaches, and future perspectives]. Access mode: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35075750/>.

8. Vishal, S., Madhusweta, D. (2016). *Vplyv kuta ta shvydkosti leza nozha na pikovu sylu ta pytomu enerhiyu pry narizanni ovochiv riznoyi tekstury* [Effects of knife edge angle and speed on peak force and specific energy when cutting vegetables of diverse texture]. *Mizhnarodnyy zhurnal kharchovykh doslidzhen'* [International journal of food studies]. Vol. 5, P. 22–38.

9. Zakalov, O., Mazyak, Z., Bortnyk, A. (2010). *Vplyv formy leza nozhiv na enerhospozhyvannya kutera* [The influence of the shape of the knife blade on the energy consumption of the cutter]. *Visnyk TDTU* [Bulletin of TDTU]. Vol. 2. P. 94–100.

10. Lyul'ka, O. M., Myronchuk, V. H., Lyul'ka, D. M. (2016). *Heometriya rizhuchoyi kromky buryakorizal'nykh nozhiv, yak faktor otrymannya yakisnoyi struzhky* [The geometry of the cutting edge of borax knives, as a factor in the removal of acid chips]. *Tsukor Ukrayiny* [Sugar of Ukraine]. Vol. 12. P. 36–40.

Objective. The purpose of the article is to model the force characteristics in the process of slicing vegetables of uniform texture.

Methods. In this work, statics and dynamics methods were used to analyze the force interaction of the material with the cutting tool.

Results. It is noted that vegetables supply the human body with vitamins, minerals and antioxidants. For ease of consumption, vegetables are subject to mechanical processing, namely: cutting, chopping, shredding, which are different methods of reducing size. These operations are achieved mechanically without changing the chemical properties of the raw material. Cutting is one of the most important operations that gives the appropriate shape and is achieved by the penetration of a sharp knife through the material, resulting in a new surface and smaller dimensions required for a specific purpose. Giving the processed material a certain shape is carried out using a sharp cutting tool, such as a knife or blade. In order for the final product to have the required shape, a certain force is applied to the knife so that, under the influence of its blade, the material begins to divide into parts. Therefore, the type of cutting tool is important, namely blades that have different shapes and design parameters - sharpness and sharpening angle. Attention is focused on the fact that normal cutting involves only the presence of normal forces when moving the blade perpendicular to the surface being processed. During bevel cutting, part of the normal forces turns into tangential forces, as a result of which the cutting force is significantly reduced. When sliding cutting, the cutting tool, in addition to moving in a normal or inclined direction relative to the surface of the product being processed, can move parallel to the cutting edge, which significantly reduces the cutting force. Modeling of force characteristics in the process of cutting vegetables with a uniform texture was carried out. The relationship between cutting force and deformation (cutting depth) is considered using the example of cutting vegetable raw materials. As the potatoes were cut, a constant increase in cutting force was observed. Having reached a critical value, the force began to decrease as the cutting depth increased. The entire curve can be divided into two halves, which are almost a mirror image relative to the point corresponding to the critical force. The increase in force with blade penetration up to approximately the midpoint is explained by the cylindrical shape of the raw material and indicates uniformity of texture.

Key words: vegetables, cutting, blade cutting edge, cutting tool, normal cutting, inclined cutting, sliding cutting, cutting force, modeling.