



УДК 641.512

Пільненко А.К., канд. техн. наук

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк, Україна,
e-mail: pilnenko_a@mail.ru**АНАЛІЗ НОРМАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ
ТА КОЕФІЦІЄНТА КОВЗАННЯ ЛЕЗА ДИСКОВОГО НОЖА
ПРИ КОЛИВАЛЬНОМУ СПОСОБІ ПОДАЧІ ПРОДУКТУ**

Pilnenko A.K., Cand. Sc. (Tech.)

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky, Donetsk, Ukraine, e-mail: pilnenko_a@mail.ru

**ANALYSIS OF THE NORMAL COMPONENT OF THE CUTTING SPEED
AND SLIP COEFFICIENT BLADES CIRCULAR CUTTER AT OSCILLATORY
METHOD OF SUPPLYING PRODUCT**

Мета. Проаналізувати процес різання харчового продукту дисковим ножом при коливальному способі подачі. Визначити оптимальні значення нормальної, тангенціальної швидкості різання та коефіцієнта ковзання в процесі різання дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту.

Методика. У роботі використовується графоаналітичний метод визначення напрямку нормальної, тангенціальної швидкості різання кромкової частини дискового ножа. Для одержання кінематичних залежностей різання дисковим ножом при коливальному способі подачі харчового продукту застосовувався аналітичний метод дослідження. Використовувались сучасні методики дослідження, а також математична обробка отриманих результатів за допомогою сучасних комп'ютерних програм.

Результати. Аналіз коливального способу подачі продукту дозволив визначити вплив кінематичних і конструктивних параметрів механізму на процес різання гастрономічних продуктів. Виконано розрахунок полів нормальної складової швидкості різання та коефіцієнта ковзання, що показує можливість оптимального розташування лотка з продуктом у зоні різання. Встановлено оптимальні значення нормальної, тангенціальної швидкості різання та коефіцієнта ковзання. Розроблено практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів роботи машин для нарізання гастрономічних продуктів дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту та пропозиції стосовно вдосконалення конструкції машин. Запропоновано вдосконалення конструктивних параметрів машин для нарізання гастрономічних продуктів для покращення якості нарізання продукту та підвищення продуктивності.

Наукова новизна. Побудовано поля нормальної складової швидкості різання й коефіцієнта ковзання дискового ножа за умови коливального руху продукту, що дозволило раціонально розташувати продукт у зоні різання.

Практична значущість. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення конструкції машин для нарізання гастрономічних продуктів. Результати дослідження були використані під час модернізації та проектування нової конструкції машини для нарізання гастрономічних продуктів. Інженерні рішення впроваджені на підприємствах.

Ключові слова: параметри процесу різання, дисковий ніж, гастрономічні продукти, машина для нарізання гастрономічних продуктів.

Постановка проблеми і її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Найбільш поширеним і енергоємним технологічним процесом об-



робки харчових продуктів є різання. Найважливішою тенденцією подальшого прогресу сучасної м'ясопереробної та молочної промисловості є зниження енерговитрат, підвищення якості продуктів і відсутність відходів у процесі різання.

У харчовому виробництві невирішеними залишаються важливі питання, в яких розглядаються актуальні проблеми процесу різання. Насамперед це стосується теоретичних і практичних розробок способу, режимів і конструктивних параметрів процесу різання гастрономічних продуктів.

Харчові продукти, що піддаються нарізанню, мають різноманітні фізико-механічні властивості. Залежно від реологічних властивостей матеріалу обирають спосіб різання, вид різального інструменту, швидкість різання та подачі харчових продуктів.

Аналітичний огляд літератури та досвід експлуатації різального обладнання показує, що зі збільшенням коефіцієнта ковзання K_B поліпшується якість процесу нарізання продукту (нарізані шматочки менше деформуються, мають більш чисту поверхню зрізу та зменшуються енерговитрати процесу).

Методика розрахунку коефіцієнта ковзання в різних способах руху робочого органа є не простим завданням. Значення коефіцієнта ковзання необхідні для проектування конструкції, способів різальних машин і розробки методики розрахунку процесу різання.

У науковій і довідковій літературі немає даних коефіцієнта ковзання в процесі різання дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту.

Аналіз наукових досліджень і публікацій. У дослідженнях процесу різання вчені [1-3] звертають увагу на великий вплив коефіцієнта ковзання. Дослідниками встановлено його вплив на такі фактори при ковзаючому різанні, як перенесення опору тертя з нормального напрямку на тангенціальне, перепилуюча дія, кінематична трансформація самої різальної кромки, зменшення питомого навантаження на погонну довжину леза і т. ін.

Таким чином, за умови ковзаючого різання зі збільшенням коефіцієнта ковзання K_B величина загального зусилля, що діє на інструмент, а також нормальна складова цього зусилля, від яких залежить деформація продукту під час різання, зменшуються. Це сприяє зниженню динамічних навантажень у різальній машині та більш якісному нарізанню продукту.

У науковій і довідковій літературі немає методики розрахунку процесу різання дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту та даних для вибору раціональних параметрів процесу різання.

Мета статті. Встановити оптимальні значення нормальної, тангенціальної швидкості різання та коефіцієнта ковзання в процесі різання дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту. Проаналізувати процес різання та дати раціональні рекомендації.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для різання пластичних харчових продуктів найбільше поширення одержали різальні інструменти, зокрема дискові ножі.

Для здійснення різання необхідно відносно переміщення різального інструменту та продукту: нерухомий продукт і рухомий ніж, продукт подається на нерухомий ніж і переміщення обох цих тіл.

Є чотири основні види робочих рухів і відповідно чотири класи різальних апаратів: обертальний, зворотно-поступальний, коливальний і поступальний [1]. Дискові ножі здійснюють рівномірно-обертальний рух, який може бути попутним або зустрічним щодо напрямку подачі продукту.

Усі способи різання дисковим ножом здійснюють ковзаюче різання, яке характеризується коефіцієнтом ковзання. Дисковим ножом ковзаюче різання здійснюється



шляхом обертання ножа і зворотно-поступального руху продукту, обертання ножа і коливального руху продукту, обертання ножа і обертання продукту, планетарного руху ножа при нерухомому продукті [1].

Застосування ковзаючого різання визначається фізико-механічними властивостями продукту, вимогами, що ставлять до якості поверхні відрізаних шматочків, а також енергетичними показниками.

За умови обертального руху дискового ножа та коливального способу подачі, згідно з рисунком 1, швидкість різання $V_{різ}$ дорівнює векторній сумі двох швидкостей: швидкості точки C , що лежить на різальній кромці ножа відносно осі обертання A (V_n) і швидкості точки C , яка належить продукту, щодо осі обертання B , взятої з протилежним знаком ($-V_{пр}$).

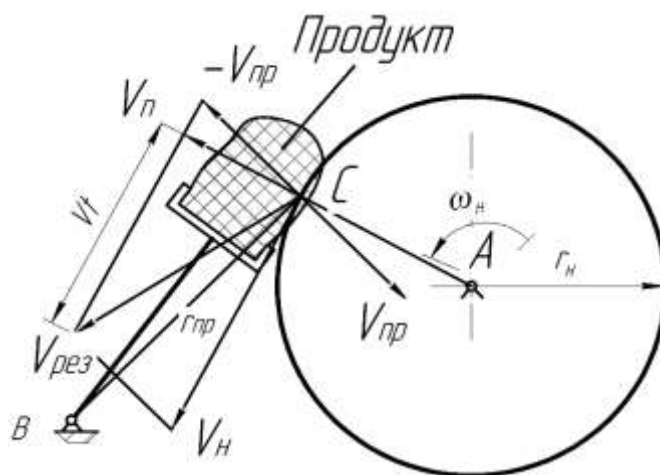


Рисунок 1 – Схема процесу різання дисковим ножом при коливальному способі подачі продукту

Швидкість V_n спрямована перпендикулярно радіусу CA у бік обертання дискового ножа. Швидкість $-V_{пр}$ спрямована перпендикулярно радіусу CB – у бік, зворотний руху продукту. Складаючи ці швидкості (V_n і $-V_{пр}$) за правилом паралелограма, отримаємо швидкість різання $V_{різ}$. Дотичну V_t і нормальну V_n складові швидкості різання $V_{різ}$ отримаємо, спроектувавши останню на відповідно дотичну і нормаль до різальної кромки ножа, проведені через точку C .

Кожній точці площини розрізу продукту, описуваної лезом різального ножа, відповідає певний вектор швидкості леза щодо продукту. Повна сукупність цих векторів становить векторне поле швидкостей, картина якого обумовлена формою, розміром і швидкістю привідних пристроїв ножа. Вектори, що складають це поле, можуть бути розкладені на компоненти – нормальну V_n і дотичну V_t до леза ножа. Власне руйнування масиву продукту визначається подачею леза всередину нього, тобто нормальною складовою швидкості леза. Більшість продуктів, що нарізаються на підприємствах торгівлі (сир, хліб, ковбаса і т. ін.), має властивість ізотропності, і тому напрямок V_n не впливає на процес, а значить, під час проектування можна брати до уваги тільки абсолютні значення (модулі) V_n і відносини V_n/V_t , тобто коефіцієнти ковзання K_β . Повні сукупності цих значень у робочій зоні різального пристрою становлять скалярні поля V_n і K_β , які зручно графічно зобразити у вигляді ліній однакового рівня.

Знання цих полів дозволяє конструктору обрати місце розташування продукту (продуктового лотка, вікна) у проектуваному пристрої так, щоб воно найкращим чином

відповідало вимогам технології щодо оптимальних для того чи іншого продукту швидкості подачі V_n і коефіцієнта ковзання K_β [1].

Зображення полів нормальної складової швидкості V_n і коефіцієнта ковзання K_β поєднують на одному кресленні, щоб обґрунтовано розташувати в полі V_n-K_β продуктивний лоток (переріз продукту).

Графічні зображення полів не потрібні: до прямолінійного руху прямого леза ($K_\beta = 0$ або $K_\beta = \text{const}$); до обертових радіальним лезам ($K_\beta = 0$); до лез, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі ($K_\beta = \text{const}$). В останньому випадку виникає необхідність спеціального розрахунку профілю леза [2].

Розрахунок і побудова полів V_n-K_β для обертового дискового ножа з нерухомим центром і коливальним способом подачі продукту на ніж дозволяє створити в масштабі кінематичну схему механізму.

Через центр O_1 проводимо дугу O_1O_2 руху продукту. Поділяємо дугу на рівні відрізки шляху ножа. З точок дуги $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_7$ радіусом R описуємо ряд дуг $i = 1, 2, \dots, 7$, як зображено на рисунку 2. Початкову дугу леза поділяємо на кілька частин, рівних між собою K_1K_2, K_2K_3 і т. ін. З точок K_j проводимо дуги, паралельні руху подачі продукту. Ці прямі позначаємо від початку руху леза K_1, K_2, \dots, K_j . Нанесені два сімейства ліній утворюють координатну сітку, яка покриває всю площу, описувану лезом ножа. Точки перетинів ліній сітки є вузловими, що позначаються як M_{ij} . Перший індекс – номер дуги лінії радіусом R – виходить з точок Π_j , а другий – номер дуги ліній K_j руху подачі продукту.

Миттєва швидкість у будь-якій з цих точок V_{pi3} є результуючою двох швидкостей: обертальної V_{nod} (швидкості подачі) і колової швидкості різальної кромки дискового ножа $V_{кол}$. На рисунку 2 показано розкладання у вузловій точці сітки M_{41} швидкості різання V_{pi341} . Отримані раніше аналітичним способом значення швидкості подачі будемо відкладати у вузлових точках [2].

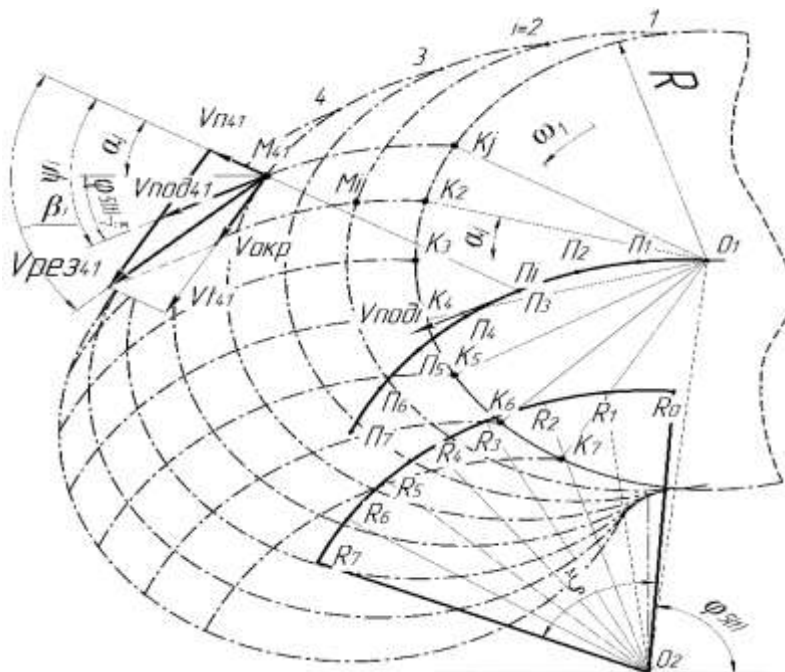


Рисунок 2 – Побудова полів нормальної складової швидкості різання V_n і коефіцієнта ковзання K_β леза дискового ножа при коливальному русі продукту



Нормальна швидкість у вузловій точці визначається [1; 2]:

$$V_{nij} = V_{нодій} \cos(\varphi_{ij}), \quad (1)$$

де $\psi_{ij} = \alpha_j + (\varphi_s(t) - \pi/2)$.

Використовуючи формулу (1), обчислимо величину V_{nij} для точок сітки. Обчислені V_{nij} надписують на кресленні поля в усіх вузлових точках координатної сітки (на рисунку 3 величини V_{nij} виділені кружками) і заносимо в таблицю 1. Вузлові точки з'єднуємо плавними лініями.

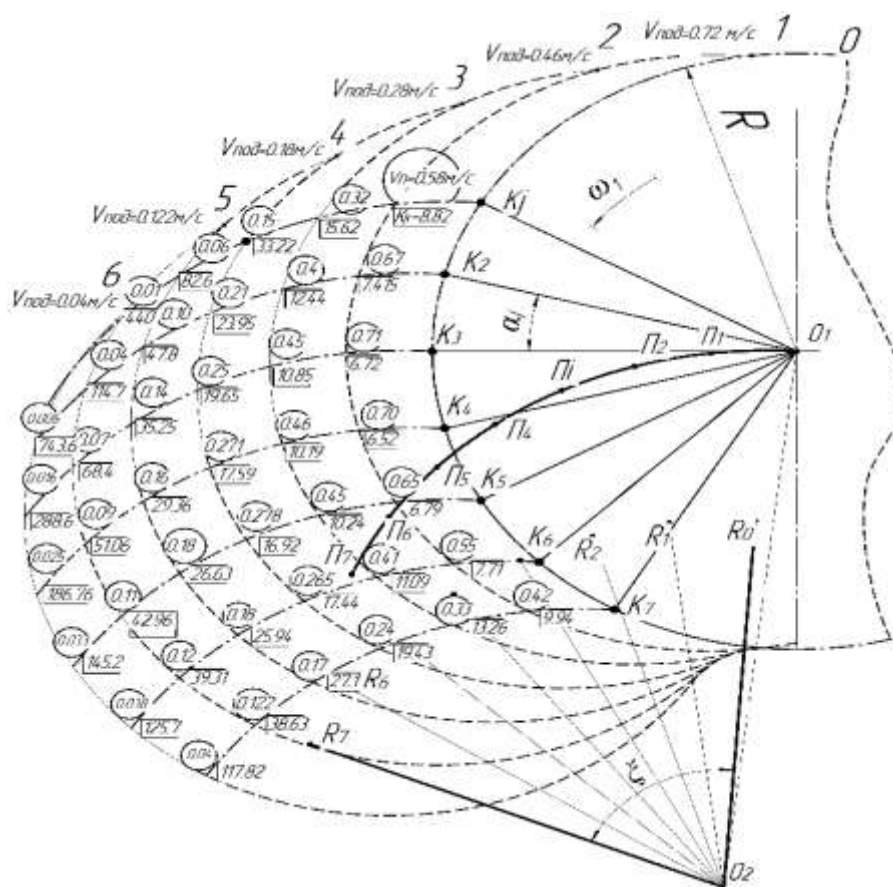


Рисунок 3 – Числова побудова полів нормальної складової швидкості різання V_n і коефіцієнта ковзання K_β леза дискового ножа

Для побудови поля й обчислення коефіцієнтів ковзання леза $K_{\beta ij}$ треба знати величину тангенціальної складової V_{tij} повної швидкості $V_{різій}$ точки леза. З рисунка 2 видно, що $V_{tij} = V_{кол} + V_{нодій} \cdot \sin(\psi_i)$, тому загальна формула для коефіцієнта ковзання набире вигляду:

$$K_{\beta ij} = \frac{V_{tij}}{V_{nij}} = \frac{V_{кол} + V_{нодій} \sin \psi_{ij}}{V_{нодій} \cos \psi_{ij}}, \quad (2)$$

де $V_{кол} = \omega \cdot R = \pi \cdot n \cdot R / 30 = \pi \cdot 300 \cdot 0,15 / 30 = 4,71$ м/с, $n = 300$ об/хв [2].



Підраховані за формулою (2) значення $K_{\beta ij}$ у вузлових точках координатної сітки ($K_{\beta ij}$ – виділені квадратами) і занесені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Значення нормальної, тангенціальної швидкості різання та коефіцієнта ковзання у вузлових точках координатної сітки полів швидкості V_n коефіцієнта ковзання K_{β}

Значення швидкості подачі у вузлових точках $V_{nod i}$	Нормальна, тангенціальна швидкість різання та коефіцієнт ковзання	Дуги ліній K_j руху подачі продукту на дисковий ніж						
		$K_1, (α_1 = 30°)$	$K_2, (α_1 = 15°)$	$K_3, (α_1 = 0°)$	$K_4, (α_1 = -15°)$	$K_5, (α_1 = -30°)$	$K_6, (α_1 = -45°)$	$K_7, (α_1 = -60°)$
$V_{nod1} = 0,72$ м/с $φ_{51}(t) = 95°$	$V_{n1j},$ м/с	0,58	0,669	0,71	0,705	0,651	0,552	0,416
	$V_{t1j},$ м/с	5,12	4,963	4,78	4,595	4,417	4,258	4,131
	$K_{\beta 1j}$	8,82	7,415	6,72	6,516	6,786	7,713	9,937
$V_{nod2} = 0,46$ м/с $φ_{52}(t) = 105°$	$V_{n2j},$ м/с	0,32	0,398	0,44	0,463	0,449	0,405	0,332
	$V_{t2j},$ м/с	5,05	4,95	4,84	4,72	4,6	4,49	4,39
	$K_{\beta 2j}$	15,6	12,44	10,8	10,18	10,24	11,08	13,21
$V_{nod1} = 0,28$ м/с $φ_{53}(t) = 117°$	$V_{n3j},$ м/с	0,15	0,21	0,24	0,271	0,278	0,265	0,235
	$V_{t3j},$ м/с	4,95	4,9	4,8	4,77	4,7	4,63	4,56
	$K_{\beta 3j}$	33,2	23,95	19,6	17,59	16,92	17,44	19,43
$V_{nod1} = 0,18$ м/с $φ_{54}(t) = 131°$	$V_{n4j},$ м/с	0,06	0,102	0,13	0,163	0,178	0,181	0,172
	$V_{t4j},$ м/с	4,88	4,86	4,83	4,79	4,74	4,7	4,65
	$K_{\beta 4j}$	82,6	47,88	35,2	29,36	26,63	25,94	27,1
$V_{nod1} = 0,12$ м/с $φ_{55}(t) = 144°$	$V_{n7j},$ м/с	0,01	0,042	0,07	0,094	0,111	0,12	0,122
	$V_{t5j},$ м/с	4,84	4,83	4,81	4,79	4,76	4,73	4,7
	$K_{\beta 5j}$	440	114,5	68,4	51,06	43	39,31	38,62
$V_{nod1} = 0,04$ м/с $φ_{56}(t) = 155°$	$V_{n6j},$ м/с	0,004	0,006	0,01	0,025	0,033	0,038	0,04
	$V_{t6j},$ м/с	4,75	4,75	4,74	4,744	4,736	4,727	4,716
	$K_{\beta 6j}$	800	743,5	288	186,7	145,22	125,7	117,8

На рисунку 4 показано розташування продуктового лотка. Штриховий контур 1 – розташування лотка під кутом $90°$ до важеля подачі. Суцільний контур 2 – розташування лотка під кутом $60°$ до важеля подачі. Пунктирний контур 3 – під кутом $45°$. По довжині зрізу нормальна швидкість V_n і коефіцієнт ковзання K_{β} змінюються.

Для контуру 1 по перерізу R_5A нормальна швидкість перебуває в межах $V_n = 0,24... 0,278... 0,14$ м/с і коефіцієнт ковзання $K_{\beta} = 19,43... 17... 35,25$.

Для контуру 2 по перерізу R_5B нормальна швидкість перебуває в межах $V_n = 0,24... 0,45... 0,44$ м/с і $K_{\beta} = 19,43... 10,24... 10,85$.

Для контуру 3 по перерізу R_5B нормальна швидкість перебуває в межах $V_n = 0,24... 0,65... 0,75$ м/с і $K_{\beta} = 19,43... 6,8... 6,7$.

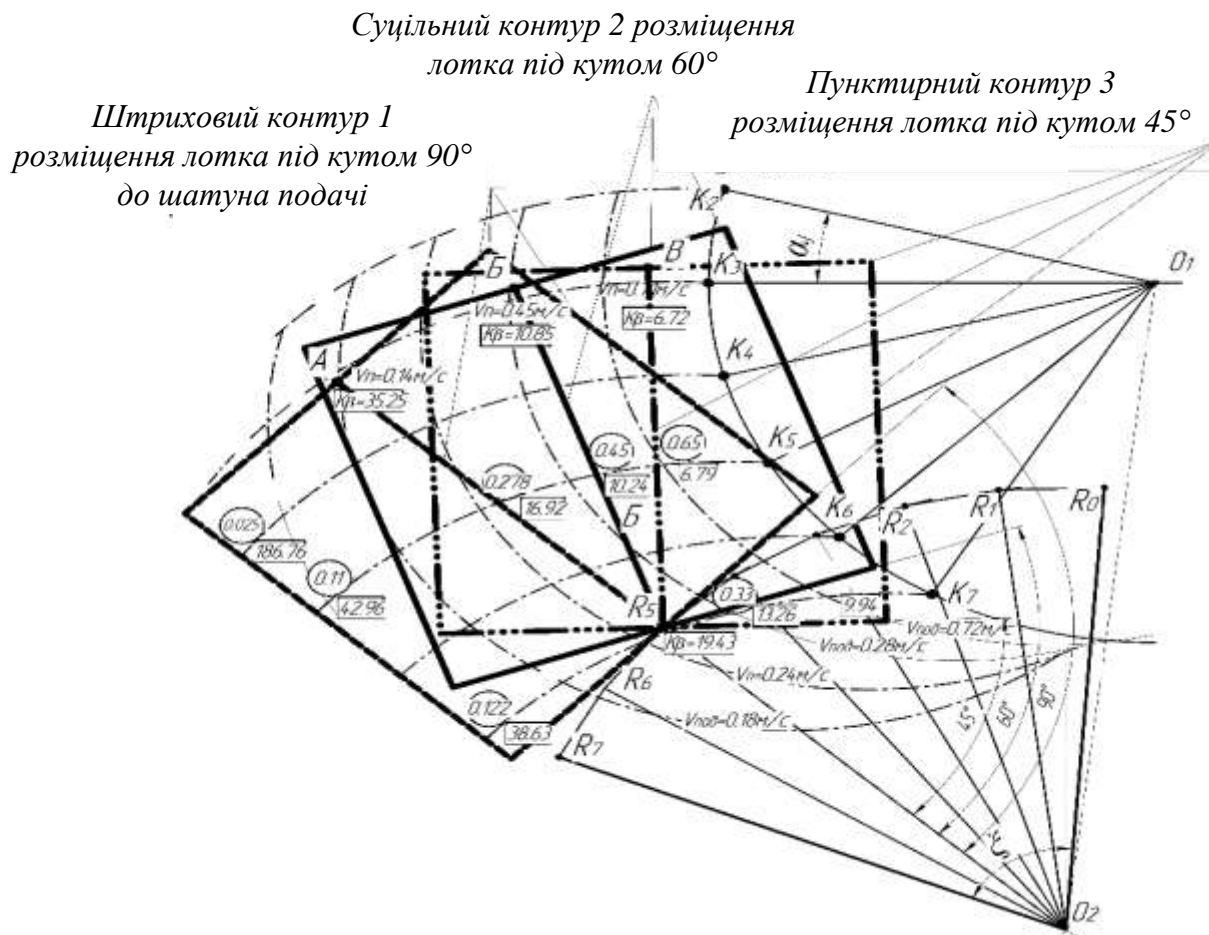
Інтервал значень нормальної швидкості ΔV_n :

- для контуру 1: $\Delta V_{n1} = V_{nr5} - V_{nA} = -0,095$ м/с – зменшується на 0,6 м/с;
- для контуру 2: $\Delta V_{n2} = V_{nr5} - V_{nB} = 0,205$ м/с – збільшується на 1,8 м/с;
- для контуру 3: $\Delta V_{n3} = V_{nr5} - V_{nB} = 0,515$ м/с – збільшується на 3,2 м/с.



Інтервал значень коефіцієнт ковзання ΔK_{β} :

- для контуру 1: $\Delta K_{\beta 1} = 15,8$ – збільшується в 0,6 разу;
- для контуру 2: $\Delta K_{\beta 2} = 8,5$ – зменшується в 0,55 разу;
- для контуру 3: $\Delta K_{\beta 3} = 12,9$ – зменшується в 0,33 разу.



- Контур 1 – під кутом 90° до важеля подачі;
- контур 2 – під кутом 60° до важеля подачі;
- контур 3 – під кутом 45° до важеля подачі

Рисунок 4 – Розташування продуктового лотка

Проведене аналітичним способом кінематичне дослідження механізму подачі продукту в зону різання дозволило встановити залежності переміщення, швидкості та прискорення продукту за умови коливального руху. Вибір раціональних параметрів механізму подачі забезпечує максимальне значення різальної здатності ножів. Рекомендовано розташувати продуктивний лоток під кутом 60° до осі важеля подачі, який здійснює коливальний рух [3].

Висновки. Встановлено значення коефіцієнта ковзання, нормальної та тангенціальної швидкості в машинах для нарізання харчових продуктів при коливальному способі подачі продукту на обертальний дисковий ніж. Фактичні значення змінюються в межах: нормальна швидкість різання – від 0,04 м/с до 0,416 м/с, тангенціальна – від 4,72 м/с до 4,13, коефіцієнт ковзання – від 9,9 до 118.



Розрахунок полів нормальної складової швидкості різання й коефіцієнта ковзання показує, що оптимальне розташування лотка з продуктом в зоні різання має бути під кутом 60° до радіуса важеля подачі. Це положення лотка поліпшить якість різання, скоротить інтервал змін значень V_n і K_β до мінімуму. Інтервал зміни нормальної швидкості різання до мінімальних значень 0,21 м/с і коефіцієнта ковзання до 13,77.

Список літератури / References:

1. Гордон Л.И. Расчет и конструирование торгово-технологического оборудования / Л.И. Гордон [и др.]; под ред. В.Н. Шувалова, С.В. Харламова. – Л.: Машиностроение, 1985. – 335 с.
Gordon, L.I. (1985), *Raschet i konstruirovaniye torgovo-tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Calculation and design of catering equipment], Mashinostroyeniye, Leningrad, Russia, 335 p.
Заплетников И.Н. Кинематическое исследование механизма подачи продукта / И.Н. Заплетников, А.К. Пильненко // Сб. науч. тр. ОНАПТ. – 2012. – Вып. 41. – С. 115-120.
Zapletnikov, I.N. and Pilnenko, A.K. (2012), “Kinematic study feed mechanism product”, *Sbornik nauchnykh trudov ONAPT*, Issue 41, pp. 115-120.
2. Пильненко А.К. Усовершенствование машин для нарезания гастрономических продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / А.К. Пильненко. – Донецк, 2013. – 22 с.
Pilnenko, A.K. (2013), “Improvement of machinery for cutting gastronomic products”, *Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Engineering, Donetsk, Ukraine*, 22 p.

Цель. Проанализировать процесс резания пищевого продукта дисковым ножом при колебательном способе подачи. Определить оптимальные значения нормальной, тангенциальной скорости резания и коэффициента скольжения в процессе резания дисковым ножом при колебательном способе подачи продукта.

Методика. В работе используется графоаналитический метод определения направления нормальной, тангенциальной скорости резания кромочной части дискового ножа. Для получения кинематических зависимостей резания дисковым ножом при колебательном способе подачи пищевого продукта применялся аналитический метод исследования. Использовались современные методики проведения исследования, а также математическая обработка полученных результатов с помощью современных компьютерных программ.

Результаты. Анализ колебательного способа подачи продукта позволил определить влияние кинематических и конструктивных параметров механизма на процесс резания гастрономических продуктов. Выполнен расчет полей нормальной составляющей скорости резания и коэффициента скольжения, показывающий возможность оптимального расположения лотка с продуктом в зоне резания. Установлены оптимальные значения нормальной, тангенциальной скорости резания и коэффициента скольжения. Разработаны практические рекомендации по выбору рациональных режимов работы машин для нарезки гастрономических продуктов дисковым ножом при колебательном способе подачи продукта и предложения по совершенствованию конструкции машин. Предложено усовершенствование конструктивных параметров машин для нарезания гастрономических продуктов с целью улучшения качества нарезания продукта и повышения производительности.

Научная новизна. Построены поля нормальной составляющей скорости резания и коэффициента скольжения дискового ножа при колебательном движении продукта, что позволило рационально расположить продукт в зоне резания.

Практическая значимость. Разработаны рекомендации по усовершенствованию конструкции машин для нарезания гастрономических продуктов. Результаты исследования были



использованы при модернизации и проектировании новой конструкции машины для нарезания гастрономических продуктов. Инженерные решения внедрены на предприятиях.

Ключевые слова: параметры процесса резания, дисковый нож, гастрономические продукты, машина для нарезания гастрономических продуктов.

Objective. To analyze the process of cutting food circular blade vibration method of supplying. To determine the optimal values of the normal, tangential cutting speed and slip coefficient in the process of cutting circular blade vibration method of supplying of the product.

Methods. During the research was used graphical-analytical method for determining the direction of the normal, tangential velocity cutting edge portion of circular cutter.

For kinematic dependencies rotary knife cutting vibration method of supplying food analytical method applied research.

Used modern methods of conducting research, as well as the mathematical treatment of the results obtained using sophisticated computer programs.

Results. Vibrational analysis method of supplying the product allowed us to determine the influence of kinematic and structural parameters of the mechanism for the cutting process of gastronomic products.

The calculation of the normal component of the field of cutting speed and slip coefficient, showing the possibility of the optimal location of the tray with the product in the cutting zone. The optimal values of the normal, tangential cutting speed and slip coefficient.

Practical recommendations on the choice of rational modes of machines for cutting gastronomic products rotary knife vibration method of supplying of the product and suggestions for improving the design of machines.

Was proposed the improvement of the design parameters for cutting machines gastronomic products to improve the quality of the product cutting and increased productivity.

Scientific novelty. Were constructed fields of normal component of cutting speed and slip coefficient circular cutter the oscillatory motion of the product, thus rationally arrange product in the cutting zone.

Practical value. Were made recommendations for improving the design of machines for cutting gastronomic products. Results of the study were used for modernization and new construction design machine for cutting gastronomic products. Engineering solutions implemented in the workplace.

Key words: parameters of the cutting process, disc blade, fine foods, machine for cutting gastronomic products.

Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. Михайловим О.М. Дата надходження рукопису 19.06.2013 р.

... все материальное благосостояние человечества зависит от его господства над окружающей природой и... это господство заключается только в знании естественных сил и законов

Д.И. Писарев