

УДК [621.9.02:641.51.06]:531.1

**А. К. Пильненко**, канд. техн. наук, доц., **И. Н. Заплетников**, д-р техн. наук, проф.  
Донецкий национальный университет экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского, Украина, Донецк  
Тел./Факс: +38 (062) 3045046; E-mail: [pilnenko\\_a@mail.ru](mailto:pilnenko_a@mail.ru)

## **КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ДИСКОВЫМ НОЖОМ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С КАЧАТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ**

*Работа посвящена исследованию, установлению основных закономерностей процесса резания дисковым ножом при качательном способе подачи продукта. Рассмотрены особенности кинематических и динамических параметров процесса резания.*

**Ключевые слова:** процесс резания, дисковый нож, качательный способ подачи, коэффициент скольжения, угол заточки ножа.

**A. K. Pilnenko, I. G. Zapletnikov**

### **KINEMATIC ANALYSIS OF THE PROCESS OF CUTTING CIRCULAR KNIFE FOOD WITH SWINGING FEED**

*The work is devoted to research, the establishment of the basic laws of the process of cutting rotary knife during oscillation method of supplying the product. The features of the kinematic and dynamic parameters of the cutting process.*

**Keywords:** the cutting process, blade disc, swinging method feed, the slip coefficient, sharpening angle blade.

#### **1. Введение**

На современном этапе развития техники выделяют следующие основные способы резания: механические, гидравлические, электрофизические [1]. Механические способы получили наибольшее развитие в различных отраслях пищевой промышленности.

В процессе резания пищевых материалов происходит комплекс сложных явлений: механическое воздействие инструмента, вызывающее деформации, напряжение и разрушение материала, нагрев инструмента и материала, химические явления, диспергирование (изнашивание) рабочих поверхностей инструмента. Все эти явления взаимосвязаны.

Изучение процесса резания пищевых материалов, необходимо решать как задачу со сложной структурой, в которых большое количество различных явлений влияет на конечный результат не посредством простого их сложения, так и как комплекс сравнимых по величине, одновременно действующих факторов, находящихся в сложном взаимодействии между собой [2].

Механические процессы – разрушение, деформирование и трение – играют ведущую роль при резании пищевых материалов. Учитывая это, в качестве частных критериев по каждому выделенному процессу можно использовать такие характеристики, как режущую способность, предварительное сжатие, коэффициент трения. Каждая из указанных характеристик связана с определенной группой входных факторов и позволяет оптимизировать соответствующий процесс.

Входные факторы процесса резания можно подразделить на факторы, относящиеся к объекту резания, конструкции резальной машины и ее рабочим органам.

Факторы, относящиеся к резальной машине, могут быть разделены на две группы: 1) технического состояния; 2) фиксации объекта. Две основные группы факторов

относятся к рабочим органам резальных машин: 1) кинематические параметры; 2) геометрические параметры.

Режущая способность является комплексной характеристикой геометрических и микрогеометрических параметров, определяющих форму и размеры режущей части. Она характеризует возможность внедрения лезвия в разрезаемый материал и зависит от условий вида процесса резания. Режущая способность связана с геометрическими и кинематическими факторами и предопределяет условия образования новой поверхности при разрушении материала лезвием.

Предварительное сжатие характеризует процесс деформирования материала при резании и, в основном, зависит от технологической группы факторов. Для эффективного резания необходимо, чтобы разрушение зарождалось как можно раньше, а пластическая деформация, ему предшествующая, была предельно малой. Это важно для получения низкой энергоемкости резания и сохранения формы разрезаемых заготовок. Отсюда видна целесообразность минимизации этих характеристик процесса (режущую способность, предварительное сжатие, коэффициент трения).

Современная теория резания пищевых продуктов базируется на трудах выдающихся ученых, таких как А.И. Пелеева, М.Н. Клименко, А.Н. Позднышева, В.М. Горбатова, В.И. Карпова, Б.А. Николаева, Н.Е. Резника, А.Н. Даурского, Ю.А. Мачихина и других исследователей [1-3].

Все исследователи сходятся в оценке энергозатрат при резании в виде обобщенного показателя эффективности процесса резания. Правильный учет всех факторов, влияющих на энергозатраты при резании, имеют решающее значение при разработке конструкции режущих машин.

Энергозатраты и высокое качество разрезаемой поверхности можно обеспечить выбором геометрии режущего инструмента, т. е. формы режущей кромки ножа, угла заточки, степени остроты лезвия, вида заточки, толщины и др.

В исследованиях по резанию ученые обращают внимание на большое влияние тангенциальной составляющей  $V_t$  скорости режущего инструмента. В качестве показателя, характеризующего влияние тангенциальной скорости на процесс резания, В.П. Горячкин предложил коэффициент скольжения.

Опыт эксплуатации резательного оборудования показывает, что с увеличением коэффициента скольжения  $K_\beta$  улучшается качество нарезанного продукта (нарезанные кусочки меньше деформируются и имеют более чистую поверхность среза). Это можно объяснить несколькими причинами [1-3]:

- во-первых, при скользящем резании микрозубцы, имеющиеся на лезвии ножа, воздействуют на продукт на крайне ограниченных площадях контакта и, как бы перепиливают его;

- во-вторых, при скользящем резании режущий инструмент внедряется в продукт с углом заострения, равным эффективному углу заточки ножа  $\gamma$ , который всегда меньше действительного угла заточки  $\alpha$ ;

- в-третьих, при скользящем резании уменьшается эффективная длина режущей кромки лезвия, что приводит к уменьшению усилий резания.

В процессе наклонного резания и резания со скольжением угол заточки в направлении резания (рабочего перемещения лезвия) меняет свое значение – уменьшается в зависимости от угла наклона лезвия или угла скольжения  $\beta$ .

Широко используются дисковые ножи с формой линии лезвия в виде эксцентрической окружности. Дисковые ножи несложны в изготовлении и удобны в эксплуатации.

На предприятиях торговли и общественного питания используются машины для нарезания продуктов типа МРГ, в которых используется качательный способ подачи продукта на вращающийся дисковый нож.

В литературных источниках отсутствуют теоретические и экспериментальные данные о величине угла заточки в направлении резания дискового ножа при качательном способе подачи продукта.

Целью статьи – выполнить кинематический анализ процесса резания дисковым ножом пищевых продуктов в машинах, обеспечивающих качательную подачу продукта.

## 2. Основное содержание и результаты работы

В зависимости от реологических свойств продукта выбирают способ резания, вид режущего инструмента, режимы процесса резания.

Для резания пластичных пищевых материалов наибольшее распространение получили дисковые ножи. Для резания пластичных продуктов применяют дисковые ножи со сплошным гладким лезвием; для резания хрупких продуктов режущая кромка ножа снабжается зубьями, поочередно заточенными с правой и левой сторон; а для резания пластичных волокнистых материалов ножи имеют неразведенные зубья, заточенные с двух сторон.

Особенность рассматриваемого способа резания дисковым ножом заключается в том, что вращающийся дисковый нож неподвижно закреплен в корпусе машины, а подача продукта в зону резания осуществляется механизмом, обеспечивающим качательное движение продукта на вращающийся нож и гравитационное удаление отрезаемого ломтика из зоны резания. Качательный способ подачи продукта осуществляет кривошипно-коромысловый механизм.

Аналитическое описание принципа резания дисковым ножом заключается в определении направления движения элемента режущей кромки в соответствии с рисунком 1. Дуга АВ настолько мала, что замена ее хордой прямой линией, не изменит движение выделенного элемента режущей кромки. Продукт подается со скоростью подачи  $-V_{\text{под}}$ , окружная скорость режущей кромки  $V_{\text{окр}} = \omega r$ . Сопоставив положение режущей кромки с направлением  $V_{\text{рез}}$ , получаем, что кромка АВ внедряется в материал как нож с наклонной режущей кромкой. Проведя нормаль к вектору скорости  $V_{\text{рез}}$ , найдем угол наклона режущей кромки  $\gamma$  (рис. 1):

$$\cos \gamma = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi}}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол, определяющий положение режущей кромки;  $\lambda$  – отношение окружной скорости  $V_{\text{окр}}$  к скорости подачи материала  $V_{\text{под}}$ ,  $\lambda = V_{\text{окр}}/V_{\text{под}}$ .

Значение  $\cos \gamma$  меняется в пределах от 0 при  $\varphi_k = 0$  до  $1/(\sqrt{1 + \lambda^2})$  при  $\varphi_k = 90^\circ$ . Это отношение  $\lambda$  имеет большое значение в теории резания дисковым ножом. Отметим, что угол фактического раздвижения материала дисковым ножом не превышает 1,5–2,0 град. Поэтому дисковые ножи очень остры при работе. КПД на кромке дискового ножа достигает 99% [3-5].

Сила, приложенная к режущей кромке элементарного ножа, например опирающегося на кромку 2-3, будет равна:

$$dR = \sigma_{np}(2-3)_{\perp v} = \sigma_{np}(2-3') = \frac{\sigma_{np} \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{np}$  – удельная сила резания, Н/м;  $(2-3)_{\perp v}$  – проекция режущей кромки на нормаль к вектору скорости  $V$ ,  $r$  – радиус режущей кромки, м.

Момент силы  $R_{2-3}$  относительно оси вращения дискового ножа:

$$M_{2-3} = dR_{2-3}h_2 \quad (3)$$

Суммарная сила, приложенная к режущей кромке ножа равна геометрической сумме сил, приложенных ко всем элементарным ножам:

$$\overline{dR_{рез}} = \overline{dR_{1-2}} + \overline{dR_{2-3}} + \overline{dR_{3-4}} + \overline{dR_{4-5}} + \overline{dR_{5-6}} \quad (4)$$

Моменты сил  $dR_{1-2}$ ,  $dR_{2-3}$ ,  $dR_{3-4}$ , ... вычисляются по формуле (3).

Суммарный момент сил, приложенных к кромочной части ножа равен:

$$M_{кр} = M_{1-2} + M_{2-3} + M_{3-4} + M_{4-5} + M_{5-6} \quad (5)$$

Момент на валу дискового ножа от сил резания определяется по формуле:

$$M_{кр} = \frac{\sigma_{np} \cdot r^2}{2\lambda\eta_n} \left(1 - \cos \varphi + \frac{\lambda^2 - 1}{2\lambda} \ln \frac{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi}{1 + \lambda^2 - 2\lambda}\right) = \sigma_{np} \cdot r^2 \int_{\varphi_n}^{\varphi_k} \frac{(\lambda - \cos \varphi) \sin \varphi}{1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos \varphi} d\varphi. \quad (10)$$

Анализ выражений (6), (7) и (10) позволяет сделать выводы: с увеличением  $\lambda$  сила резания и момент на валу дискового ножа уменьшаются; с увеличением толщины разрезаемого материала повышаются сила резания и момент на валу; при постоянных толщине материала и скорости подачи для данного ножа момент на валу уменьшается во столько раз, во сколько раз увеличивается окружная скорость ножа, т.е. моменты обратно пропорциональны отношению скоростей.

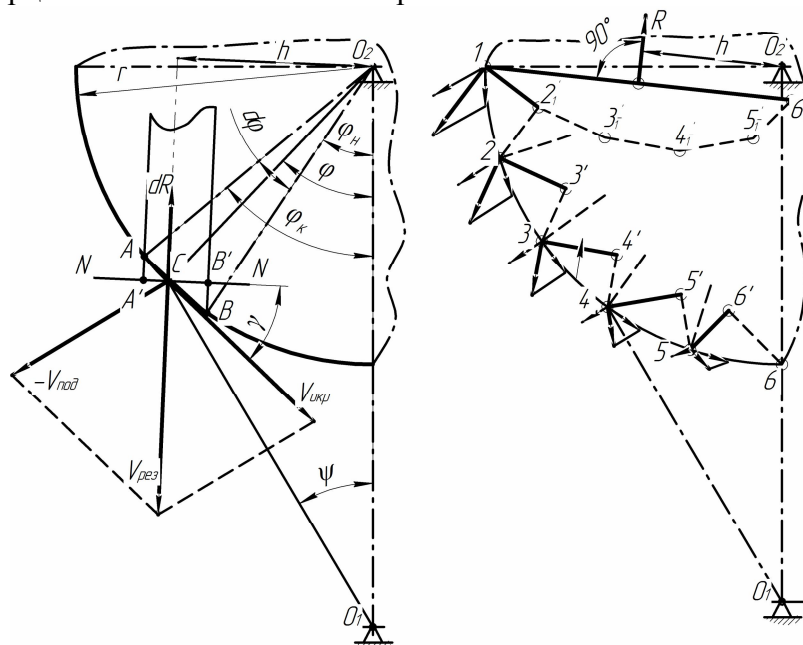


Рис. 1. Расчетная схема процесса резания дисковым ножом при качательном способе подачи продукта: 1–2'; 2–3' и т.д. – проекции режущих кромок на нормаль к вектору скорости;  $\varphi_n$  и  $\varphi_k$  – углы, определяющие положение активного участка режущей кромки; 1–2'–3'–4'–5'–6' – многоугольник проекций режущих кромок

Абсолютное движение лезвия диска 1 складывается из вращательного вокруг оси  $O$  со скоростью  $\omega$  и движения продукта 2  $V_{пр}$  (рис. 2). Для точки  $C$  лезвия тангенциальная скорость  $V_t$  перемещения лезвия будет равна окружной скорости этой точки, т.е.

$$V_t = V_{окр} = \omega \cdot r_{max},$$

где  $r_{max}$  – радиус кромки лезвия, т.е. вершины угла заточки.

В рабочее движение складывается из радиального движения продукта на нож и вращательного движения лезвия дискового ножа (рис. 2). Точка 1 продукта поворачиваясь на угол  $\Delta\theta$  и перемещаясь на диск на путь  $\Delta S_n$  пройдет последовательно положения всех последующих точек от 1 до 8. При этом в каждой последующей точке окружная скорость  $V_{окр}$  будет изменять направление и величину. Скорость  $V_{окр}$  при повороте на угол  $\Delta\theta$  будет меняться в связи с уменьшением радиуса  $r$  на величину  $\Delta S_n$ :

$$V_{окр2} = \omega \cdot (r_{max} - \Delta S_n) \quad (11)$$

а для последней восьмой точки  $V_{окр8} = \omega \cdot r_{min}$ .

За указанное время радиус  $r_{max}$  уменьшится за счет перемещения материала на величину  $\Delta S_n$ :

$$\Delta S_n = V_n \Delta t = V_n \frac{\Delta\theta}{\omega}.$$

и тогда, согласно выражению (11) окружная скорость  $V_{окр}$  равна:

$$V_{окр} = \omega \cdot (r_{max} - V_n \frac{\Delta\theta}{\omega}) = \omega \cdot r_{max} - V_n \cdot \Delta\theta. \quad (12)$$

Тангенциальная скорость равна:  $V_t = V_n \cdot \cos \Delta\theta = (\omega \cdot r_{max} - V_n \cdot \Delta\theta)$

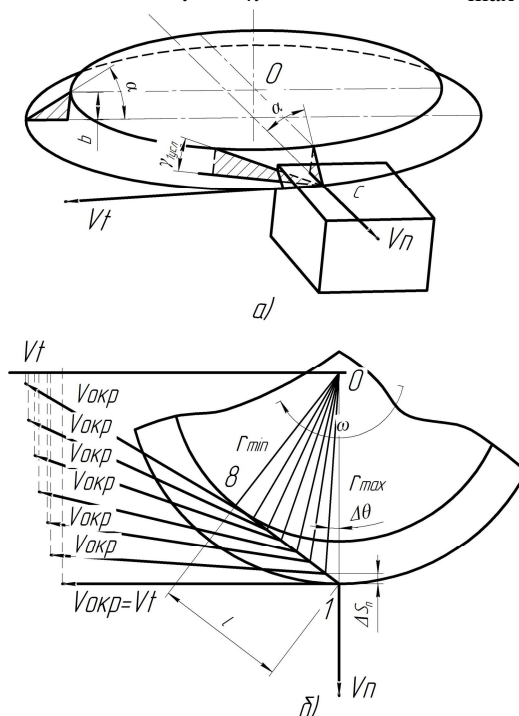


Рис. 2. Кинематическая трансформация угла заточки дискового ножа:  
 а – общий вид взаимодействия дискового ножа с продуктом;  
 б – схема изменения тангенциальной скорости резания

Следовательно, коэффициент скольжения для режущего диска равен [3-5]:

$$K_{\beta} = \frac{V_t}{V_n} = \frac{(\omega \cdot r_{\max} - V_n \cdot \Delta\theta) \cos \Delta\theta}{V_n} \quad (13)$$

Эффективный угол заточки ножа  $\gamma$  равен углу внедрения режущего инструмента в направлении рабочего перемещения лезвия в продукте. В соответствии с выражением (14) трансформация угла заточки будет иметь вид:

$$\gamma = \arctan \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \left[ \frac{(\omega \cdot r_{\max} - V_n \cdot \Delta\theta) \cos \Delta\theta}{V_n} \right]^2}} \quad (14)$$

Угол наклона хорды указанной кривой к плоскости вращения диска с незначительной погрешностью принимаем как условный угол наклона фаски лезвия или условная величина трансформированного угла  $\gamma_{\text{усл}}$  заточки ножа [5,6].

Зная величину  $\theta$  (рис. 1), при которой  $\gamma=0$ , можно из треугольника 1;8;0 определить сторону 1;8, которая является катетом  $l$  треугольника лезвия.

$$l = \sqrt{r_{\max}^2 + r_{\min}^2 - 2 \cdot r_{\max} \cdot r_{\min} \cdot \cos \theta}.$$

Таким образом,

$$\gamma_{\text{усл}} = \arctg\left(\frac{b}{l}\right) = \frac{b}{\sqrt{r_{\max}^2 + r_{\min}^2 - 2 \cdot r_{\max} \cdot r_{\min} \cdot \cos \theta}} \quad (16)$$

Приняв некоторые частные параметры угол заточки  $\alpha=15^{\circ}$ , радиус диска  $r=200\text{мм}$ , частота вращения 200 об/мин, скорость подачи продукта на диск  $V_n=1,5$  м/с. Проанализируем значение  $\gamma$  при каждом повороте диска на угол  $\Delta\theta=5^{\circ}$ . Графическая зависимость  $\gamma=f(\Delta\theta)$ ,  $\gamma_{\text{усл}}=f(\Delta\theta)$  представлена на рис.3 [4-6].

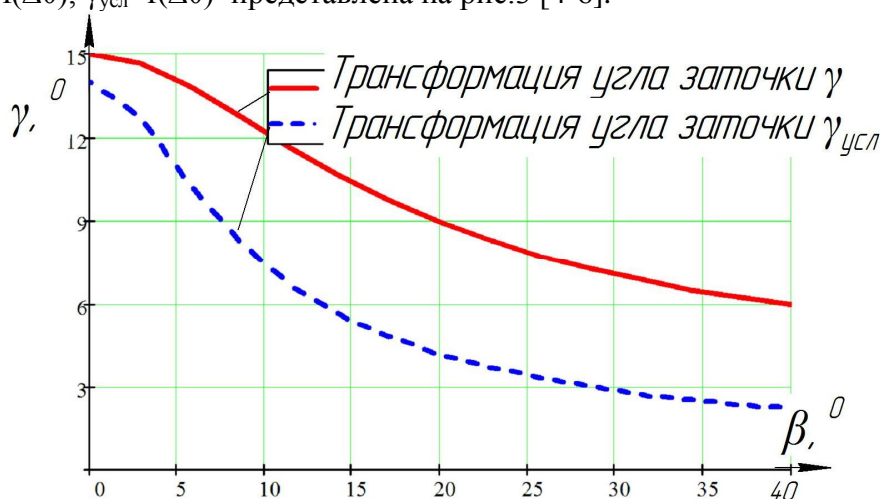


Рис. 3. Зависимость кинематической трансформации угла заточки  $\alpha$  лезвия режущего диска от угла поворота относительно продукта

Анализ выражения (14) показывает, что увеличением текущего угла  $\Delta\theta$  угол заточки вначале уменьшается интенсивно, а затем все медленнее приближается к нулевому значению. Это означает, что вследствие кинематической трансформации проекция фаски лезвия режущего диска приобретает очертание выпуклой кривой.

Эффект кинематической трансформации угла заточки состоит в том, что при косом резании фактический или эффективный угол  $\gamma$  расклинивания продукта и отгиба-

ния частицы его от массива оказывается меньшим, чем конструктивный угол заточки ножа  $\alpha$ .

Коэффициент трансформации – это отношение разности между исходным углом заточки  $\alpha$  и трансформированным углом  $\gamma$  к исходному  $\alpha$  [3,5,6]:

$$K_{\text{трансф}} = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha} = \frac{\alpha - \arctg(\tg \alpha \cdot \cos \beta)}{\alpha} \quad (17)$$

При  $\beta=20^{\circ}$   $K_{\text{трансф}}=0,2$ ; при  $60^{\circ}$   $K_{\text{трансф}}=0,8$ .

### **Заключение**

В результате кинематического анализа процесса резания пищевых продуктов дисковым ножом при качательной подаче, установлено существенное влияние конструктивных и кинематических характеристик на динамические параметры процесса. Получена зависимость угла  $\gamma$  внедрения режущего инструмента в направлении рабочего перемещения лезвия.

Эффект кинематической трансформации угла заточки состоит в том, что при ком резании фактический или эффективный угол  $\gamma$  расклинивания продукта и отгибания частицы его от массива оказывается меньшим, чем конструктивный угол заточки ножа  $\alpha$ .

Трансформация угла заточки обратно пропорциональна угловой скорости вращения дискового ножа, радиусу дискового ножа, нормальной скорости резания. Коэффициент трансформации показывает, на какую долю исходного угла уменьшился угол заточки от его трансформации. Это позволяет рассчитывать величину рабочего угла лезвия.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию режимов резания дисковым ножом пищевых продуктов при качательном способе подачи.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
2. Даурский А. Н., Мачихин Ю. А. Резание пищевых материалов. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.
3. Карпов В. И. Технологическое оборудование рыбообрабатывающих предприятий. – М.: Колос, 1993. – 304 с.
4. Заплетников И. Н., Пильненко А. К. Кинематическое исследование механизма подачи продукта // сб. науч. трудов ОНАПТ. – Одесса: ОНАПТ, 2012. – Вып. 41, т. 2 – С. 115–120.
5. Заплетников И. Н., Пильненко А. К. Математическая модель процесса резания дисковым ножом при качательном способе подачи продукта // Инновационные технологии в пищевой промышленности и ресторанному хозяйству: международ. научно-практ. интернет-конф., 14-16 ноября 2012 г.: тезисы докл. – Харьков: ХДУХТ, 2012. – С. 185–186.
6. Пильненко А. К. Розрахунок технологічних параметрів машини для нарізання гастрономічних продуктів // тем. зб. наук. праць ТДАТУ. – Мелітополь: ТДАТУ, 2014. Вип. 14. Т.1 – С. 146–153.
7. Пильненко А.К. Удосконалення машин для нарізання гастрономічних продуктів: Автореф. дис. ...канд. техн. Наук. Донецьк: ДонНУЕТ, 2013. – 20 с.

Поступила в редколлегию 15.01.2016 г.