

## Снижение затрат энергии при резании пищевых продуктов

Виктор Гуць, Олексий Губеня, Евгений Родионов

*Energy cost savings for cutting food products. The possibility of reducing energy consumption during cutting has been investigated. A new technique for determining the cutting force was developed. Mathematical models in the form of second-order differential equations for the determination of the cutting forces were obtained. The dependence of the cutting force of the cutting speed and the structure of the materials is determined. Recommendations to reduce the cutting forces and improve the quality of the cut is presented.*

**Key words:** cutting, food products, energy cost savings.

### ВВЕДЕНИЕ.

Современное пищевое производство нуждается в уменьшении затрат энергии на механические процессы, включая и резание. Известно, что уменьшить силу резания можно при рациональном выборе режимных параметров процесса.

В литературе отсутствуют данные о влиянии структуры продукта и скорости режущего инструмента на изменение силы резания. Отсутствуют методики, позволяющие непосредственно определить силу резания материала при значительном изменении скорости ножа. Сила резания определялась лишь для определённой скорости ножа, которая часто не является оптимальной. Математические модели не достаточно учитывают влияние на процесс режимов резания, явлений трения и адгезии. Не учитывалась многослойность продукта, например наличие кости и жил в мясе, тонкой прочной оболочки в овощах.

Основная масса научных исследований резания проводилась до 1980 года, их основные результаты представлены в [1]. Большинство последующих исследований рассматривали частные случаи резания, без усовершенствования теории процесса.

Нами проведены исследования, в результате которых разработаны простые методики исследования, ряд математических моделей, определены рациональные режимы резания с учётом структуры продукта.

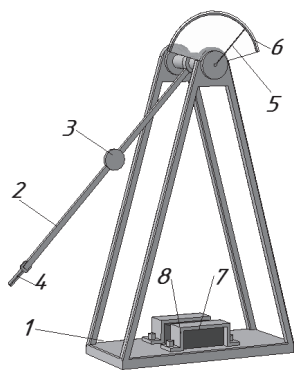


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса резания:

- 1 - станина; 2 - коромысло;
- 3 - груз; 4 - нож;
- 5 - указательная стрелка;
- 6 - шкала; 7 - продукт;
- 8 - фиксатор продукта.

### ИЗЛОЖЕНИЕ.

#### Методика определения силы резания.

Разработано простую и надёжную методику, которая позволяет определить силу резания для большого диапазона скоростей ножа и разных по структуре продуктов. Методика заключается в использовании экспериментальной установки, которая выполнена в виде маятника. На коромысле маятника закреплён нож, который разрезает продукт. Такая конструкция позволяет в широких диапазонах изменять скорость лезвия и запас кинетической энергии режущего устройства. Для определения силы резания на основании экспериментальных данных необходимо вывести ряд математических моделей.

#### Экспериментальная установка

Установка изготовлена в виде физического маятника (рис. 1). На торце коромысла 2 закреплён нож 4. Нож при опускании коромысла разрезает продукт 7. Продукт

находится в фиксаторе 8. Скорость ножа и запас кинетической энергии изменяется в широких пределах. Для этого коромысло запускается с разных углов, а также изменяется положение груза 3. Например, при длине коромысла 1.4 м и его весе 0.2 кг скорость ножа можно изменять от 0.1 до 8 м/с.

Скорость ножа определяется по формуле:

$$V_{ax} = R \sqrt{2 \frac{\sum P_i r_i}{J} (1 - \cos \beta)}, \quad (1)$$

где  $P_i$  - вес каждой детали коромысла,  $r_i$  - расстояние от центра масс детали к оси коромысла;  $\beta$  – угол запуска коромысла;  $R$  – длина коромысла;  $J$  – момент инерции всех деталей коромысла.

### Математическое моделирование движения ножа в продукте

Цель математическое моделирование – определить непосредственно силу резания при разных скоростях лезвия на основании экспериментальных данных.

Рассмотрим механизм процесса резания. Составим дифференциальное уравнение, которое описывает движение лезвия в продукте. На нож действуют силы сопротивления:  $F_r$  - сила резания,  $G$  - сила трения между боковой поверхностью лезвия и продуктом,  $P_i$  - сила инерции. В случае проявления продуктом адгезионных свойств, вместо силы трения используем силу адгезии  $F_{ад}$ .

Сила трения определяют по формуле:

$$G = C_{mp} + k_1 V = C_{mp} + k_1 \frac{dy}{dt}, \quad (2)$$

где  $C_{mp}$  - коэффициент, зависящий от удельной нагрузки продукта на боковую поверхность ножа;  $V$  - скорость скольжения между продуктом и поверхностью ножа;  $k_1$  – коэффициент влияния скорости скольжения на силу трения;  $y$  - перемещение ножа в продукте;  $t$  - продолжительность резания.

Сила инерции  $P_i$ :

$$P_i = ma = m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}, \quad (3)$$

где  $m$  - приведенная к ножу масса режущего механизма;  $a$  - ускорение ножа в продукте.

Получаем уравнение движения:

$$F_r + G + P_i = 0 \quad (4)$$

Учитывая уравнение 2 и 3, раскрываем члены уравнения 16:

$$F_r + (C_{mp} + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = 0 \quad (5)$$

Решение уравнения:

$$y(t) = \frac{C_1 \cdot m \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1} - \frac{(F_r + C_{mp})t}{k_1} + C_2, \quad (6)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования.

При начальных условиях  $t=0 \Rightarrow y=0 \Rightarrow dy/dt = V_{oy}$  имеем:

$$y(t) = \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot k_1) \cdot m \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1^2} - \frac{(F_r + C_{mp}) \cdot t}{k_1} + \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot k_1) \cdot m}{k_1^2} \quad (7)$$

Дифференцируем уравнение 19:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{(F_r + C_{mp} + V_{oy} \cdot K_1) \cdot e^{-\frac{k_1 \cdot t}{m}}}{k_1^2} - \frac{F_r + C_{mp}}{k_1} \quad (8)$$

Из уравнения (8) находим силу резания:

$$F_r = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{-\frac{k_1 t}{m}} (C_{mp} + V_{oy} k_1) + C_{mp}}{e^{-\frac{k_1 t}{m}} - 1}, \quad (9)$$

где  $dy(t)/dt$  - скорость движения ножа.

При расчете силы и мощности резания необходимо знать удельную силу резания как отношение силы резания к длине среза  $L$ .

$$F_{y0} = \frac{F_r}{L}, \quad N/m \quad (10)$$

Рассмотрим второй случай, когда на продукт проявляется адгезионные свойства. Сила адгезии может быть непостоянна. Это характерно для неоднородных по структуре продуктов. Например, в продукте может быть тонкая прочная оболочка, которая не позволяет продукту деформироваться при внедрении ножа.

Силу адгезии определяем по формуле

$$F_{ao} = P_{ao} S \cos(\alpha + \alpha_0) \quad (3)$$

где  $P_{ao}$  - прочность адгезии,  $N/m^2$ ,  $S$  – площадь контакта продукта с ножом.

Уравнение движения ножа:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + F_r + F_{ao} = 0 \quad (11)$$

Принимаем, что прочность адгезии линейно зависит от продолжительности  $t$  резания:

$$P_{ao} = b + at \quad (12)$$

где  $a$  и  $b$  – экспериментально найденные коэффициенты. Получаем решение уравнения (5). Учитываем начальные условия  $t=0 \Rightarrow y=0, dy/dt=V_{oy}$ , и получаем уравнение:

$$y(t) = V_{oy} t - \frac{t^2 (3F_r + S \cos(\alpha + \alpha_0)(3b + at))}{6m} \quad (13)$$

Дифференцируем уравнение (13). Определим скорость резания:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{2V_{oy} t - 2F_r t - S \cos(\alpha + \alpha_0)(2bt - at^2)}{2m} \quad (14)$$

Из уравнения (8) определяем сила резания:

$$F_r = \frac{2V_{oy} t - S \cos(\alpha + \alpha_0)(2bt - at^2)}{2t} - \frac{m}{t} \frac{dy}{dt} \quad (15)$$

Чаще прочность адгезии изменяется во времени по закону:

$$P_{ao} = Be^{bt} \quad (16)$$

Тогда, раскрыв члены уравнения (11), проведя аналогичные преобразования, получаем силу резания

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + F_r + Be^{bt} S \cos(\alpha + \alpha_0) = 0 \quad (17)$$

$$F_r = \frac{V_{oy} m}{t} - \frac{BS \cos(\alpha + \alpha_0)(b - be^{bt})}{tb^2} - \frac{dy}{dt} \frac{m}{t} \quad (18)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования применены для определения рациональных режимов резания пищевых продуктов. По формуле (21) определена удельная сила резания. Результаты установлены при скоростях ножа 1-10 м/с и представлены на рис. 2.

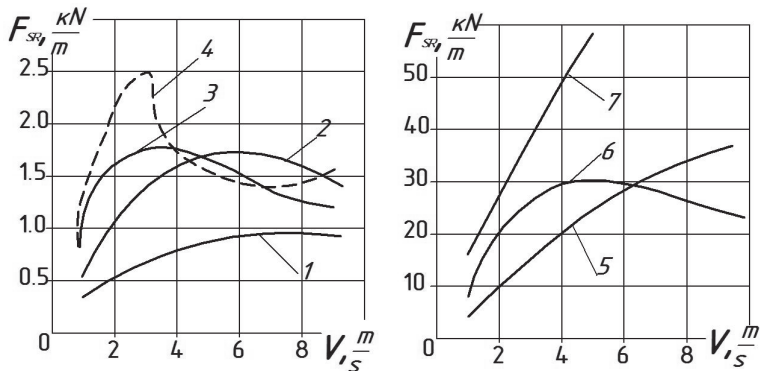
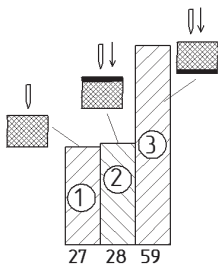


Рис. 2. Зависимость удельной силы резания от скорости лезвия в продукте: 1 – мякиш горячего хлеба; 2 – мякиш хлеба после охлаждения 6 часов; 3 – сыр твёрдый; 4 – стебли мяты; 5 – корка хлеба; 6, 7 – мясо (свинина) при температуре 5° С и -5°С.



Удельная сила резания,  $kN/m$

Рис. 3. Влияние расположения жилистой оболочки на удельную силу резания мяса:  
1 – без оболочки  
2 – оболочка на входе лезвия в продукт;  
3 – на выходе с продукта.  
(скорость лезвия 3.3 м/с, температура мяса – 5 °С);

наружную оболочку. А также упаковочные материалы, состоящие из разных по структуре слоёв.

Приведём пример для резания мяса, которое имеет жилистую прослойку (рис. 3). Размещение оболочки на входе ножа в продукт незначительно влияет на увеличение силы резания. Если оболочка размещена на выходе ножа с продукта – сила резания возрастает в 2 раза.

В некоторых случаях расположение оболочки может изменять силу резания в 10-50 раз. Это характерно для многослойных материалов, мяса с костью.

Работа, затраченная на резание непосредственно оболочки, обычно незначительна. Но, если оболочка расположена на выходе ножа, она создаёт сопротивление деформированию продукта при его внедрении. При этом на боковую

При увеличении скорости ножа сила резания большинства продуктов возрастает, и затем снижается. Уменьшение силы происходит за счёт уменьшения деформирования продукта под кромкой ножа при высоких скоростях. Это характерно для всех вязко-упруго-пластичных продуктов.

Для относительно твёрдых и хрупких продуктов силы резания непрерывно возрастает при увеличении скорости ножа.

Скорость ножа необходимо выбирать при условии снижения усилия резания и деформации продукта. Например, для резания хлеба – это более 6 м/с, твёрдого сыра – более 3 м/с (рис.2).

**Резание продуктов, которые имеет оболочку.** Сила резания, а также качество поверхности среза зависит от расположения оболочки относительно движения ножа. Оболочка в продукте может располагаться на входе или выходе ножа, а также в середине. Примеры продуктов с оболочкой – хлеб, который состоит из мякиша и корки. Мясо, в котором есть кости и жилистые ткани. Овощи и фрукты, которые имеют

поверхность ножа действует большое давление, и возникает значительная сила трения. Экспериментально подтверждено, что наибольшее сопротивление движению ножа возникает при его максимальном приближении к оболочке. Такую закономерность объясняет экспоненциальная зависимость прочности адгезии  $P_{ad}$  от времени резания (формула 16).

При резании многослойного продукта необходимо вначале разрезать тонкую прочную оболочку, а потом – остальной объем продукта. Так снижаем силу резания, повышаем качество среза, повышаем срок службы ножа.

Научная новизна проведенных исследований - это разработка группы математических моделей. Модели позволяют определить непосредственно силу резания для продуктов с разными структурно-механическими свойствами. Это было невозможным до настоящего времени, потому что процесс характеризовался удельной работой резания и другими характеристиками, которые не раскрывали его физической сути.

### **ВЫВОДЫ.**

Использование полученных результатов позволяет снизить затраты энергии, уменьшить деформацию (смятие) продукта и повысить качество среза.

### **ЛИТЕРАТУРА.**

[1] Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. - М.: Машиностроение, 1975. - 311с.

[2] Guts Viktor. Modelling of food product cutting / Viktor Guts, Oleksiy Gubenia, Stefan Stefanov, Wilhelm Hadjiiski // 10th International conference "Research and development in mechanical industry – 2010", Donji Milanovac, Serbia, 10-16 september 2010. Volume 2. – P.1100-1105.

[3] Гуць В. Определение усилия резания продуктов с разными структурно-механическими свойствами / В. Гуць. А. Губеня // Научни трудове на УХТ, том 57, свитък 2. – Пловдив – 2010. - С. 411-416

[4]Gubenia O., Guts V. Modeling of cutting of food products / EcoAgroTourism. - 2010. - N1. – P. 67-71.

[5] А. Губеня, С. Стефанов, В. Теличкун, В. Хаджийски. Усъвършенстване на конструкцията и режимите на работа на машина за рязане на хляб Русенски университет «Ангел Кънчев». Начни трудове. Том 48. 2009. С. 186-189.

### **Для контактов:**

Виктор Гуць, д.т.н., профессор, заведующий кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Национальный университет пищевых технологий, Украина.

Алексей Губеня – к.т.н., доцент, кафедра «Машины и аппараты пищевых и фармацевтических производств», Национальный университет пищевых технологий, Украина, gubena@meta.ua

**Доклад был рецензирован.**

