

УДК 637.531.45

В. Я. ГРУДАНОВ¹, А. А. БРЕНЧ¹, А. Л. ЖЕЛУДКОВ², В. М. ПОЗДНЯКОВ¹, Л. Т. ТКАЧЕВА¹

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,

²Могилевский государственный университет продовольствия

(Поступила в редакцию 17.02.2011)

Введение. Важнейшим элементом машин для тонкого измельчения мясного сырья является куттерный нож, от конфигурации, заточки, жесткости, прочности которого зависит качество выполнения технологической операции. Геометрические параметры режущего органа, как показала исследования [1, 2], существенно влияют на процесс измельчения.

Для повышения эффективности процесса куттерования важно рационально выбрать оптимальные конструктивные параметры рабочих органов, обеспечивающие равномерность измельчения продукта с заданной степенью измельчения, сохраняя его пищевую и биологическую ценность, при минимальных потерях продукта и энергозатратах.

Результаты теоретических исследований. Разрезанию материала на части под воздействием лезвия предшествует процесс предварительного сжатия им продукта до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения σ_p . Момент возникновения последнего определяется значением усилия $P_{кр}$, прикладываемого к ножу и преодолевающего некоторые сопротивления, возникающие в продукте. При анализе силового воздействия лезвия с продуктом усилие $P_{кр}$ становится наиболее важным объектом исследований. Схема сил взаимодействия лезвия с продуктом представлена на рис. 1.

При углублении лезвия в слой продукта толщиной h на величину $h_{сж}$, когда на его режущей кромке возникает разрушающее контактное напряжение σ_p , начинается процесс резания. На нож действуют следующие силы: $P_{рез}$ – сопротивление разрушению продукта под кромкой лезвия; N – нормальная сила, действующая на фаску лезвия, которая является суммой проекций сил $P_{об}$ и $P_{сж}$ ($P_{об}$ – сила обжатия продуктом, $P_{сж}$ – сила сопротивления слоя продукта сжатию фаской лезвия); P_1 – сила давления измельчаемого продукта на боковую поверхность ножа, а также силы трения, возникающие в результате взаимодействия ножа с продуктом;

$$N = P_{сж} \sin \beta + P_{об} \cos \beta, \tag{1}$$

где β – угол заточки ножа, град.

От нормальной силы N на фаске лезвия возникает сила трения

$$T_2 = Nf, \tag{2}$$

где f – коэффициент трения продукта о лезвие.

От силы P_1 на грани лезвия возникает сила трения

$$T_1 = P_1 f. \tag{3}$$

Вертикальная составляющая силы трения T_2' равна

$$T_2' = T_2 \cos \beta. \tag{4}$$

Подставив значение T_2 в (4), получим

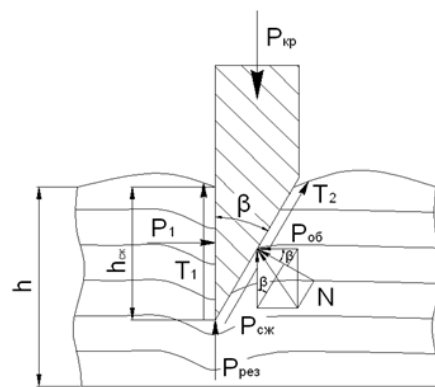


Рис. 1. Схема сил взаимодействия лезвия с продуктом

$$T_2' = (P_{сж} \sin \beta + P_{об} \cos \beta) f \cos \beta. \quad (5)$$

Преобразуем полученное выражение таким образом:

$$T_2' = \left(P_{сж} \frac{1}{2} \sin 2\beta + P_{об} \cos^2 \beta \right) f. \quad (6)$$

В момент начала резания критическая сила $P_{кр}$, приложенная к куттерному ножу, должна преодолеть сумму всех сил, действующих в вертикальном направлении:

$$P_{кр} = P_{рез} + P_{сж} + T_1 + T_2'. \quad (7)$$

Силу $P_{рез}$ можно представить как произведение площади кромки лезвия $F_{кр}$ на разрушающее контактное напряжение σ_p , которое является параметром, присущим данному виду продукта:

$$P_{рез} = F_{кр} \sigma_p = \delta \Delta l \sigma_p. \quad (8)$$

Здесь δ – толщина кромки лезвия, м; Δl – длина лезвия, м.

Рассмотрим действие элементарных сил $dP_{сж}$ и $dP_{об}$ на фаску лезвия при внедрении ее в слой продукта со стороны элементарных вертикального и горизонтального столбиков, выделенных из слоя продукта.

Элементарную силу сжатия $dP_{сж}$, действующую со стороны столбика площадью dF , длиной, равной единице, и шириной dx , можно представить в виде

$$dP_{сж} = \sigma dF, \quad (9)$$

где σ – напряжение сжатия, Па.

Схема к определению усилий $P_{сж}$ и $P_{об}$ представлена на рис. 2.

Относительное сжатие $\varepsilon_{сж}$ вертикального столбика в пределах фаски на расстоянии x от вершины лезвия определяется по выражению:

$$\varepsilon_{сж} = \frac{h_{сж}}{h}. \quad (10)$$

Примем для упрощения задачи

$$\varepsilon_{сж} = \frac{\sigma}{E}, \quad (11)$$

где E – модуль упругости продукта, Па.

Выразим напряжение сжатия σ :

$$\sigma = \varepsilon_{сж} E. \quad (12)$$

Площадь dF , на которую действует сила $dP_{сж}$, можно представить в виде:

$$dF = \Delta l dh_{сж} \operatorname{tg} \beta. \quad (13)$$

Получаем выражение

$$dP_{сж} = \varepsilon_{сж} E \Delta l dh_{сж} \operatorname{tg} \beta. \quad (14)$$

Подставив значение $\varepsilon_{сж}$ в (14), получим

$$dP_{сж} = E \operatorname{tg} \beta \Delta l \frac{h_{сж}}{h} dh_{сж}. \quad (15)$$

Интегрируем выражение (15)

$$P_{сж} = \frac{E \operatorname{tg} \beta \Delta l}{h} \int_0^{h_{сж}} h_{сж} dh_{сж} = \frac{E \operatorname{tg} \beta \Delta l}{2h} h_{сж}^2. \quad (16)$$

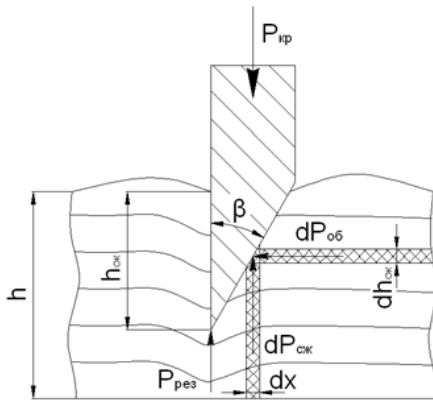


Рис. 2. Схема к определению усилий $P_{сж}$ и $P_{об}$

Таким образом, необходимая сила $P_{\text{сж}}$ для сжатия слоя фаской ножа находится в квадратичной зависимости от величины $h_{\text{сж}}$.

Если в горизонтальном направлении относительная деформация равна ε , то элементарная сила обжатия

$$dP_{\text{об}} = \varepsilon E \Delta l dh_{\text{сж}}. \quad (17)$$

Выразим относительную деформацию ε через относительную деформацию в вертикальном направлении:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{сж}} \mu, \quad (18)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Подставляя значение $\varepsilon_{\text{сж}}$ в формулу (18), получаем

$$\varepsilon = \frac{h_{\text{сж}}}{h} \mu. \quad (19)$$

Элементарная сила, действующая со стороны горизонтального столбика:

$$dP_{\text{об}} = \mu \frac{h_{\text{сж}}}{h} E \Delta l dh_{\text{сж}}. \quad (20)$$

Сила, обжимающая фаску:

$$P_{\text{об}} = \frac{\mu E \Delta l}{h} \int_0^{h_{\text{сж}}} h_{\text{сж}} dh_{\text{сж}} = \frac{\mu E \Delta l}{2h} h_{\text{сж}}^2. \quad (21)$$

Сила давления измельчаемого продукта на боковую поверхность ножа

$$P_1 = \frac{\pi^3 R_0^2 n_{\text{ч}}^2 F_{\text{р}} \rho}{450}, \quad (22)$$

где R_0 – радиус центральной оси чаши, м; $n_{\text{ч}}$ – частота вращения чаши, мин^{-1} ; $F_{\text{р}}$ – площадь боковой поверхности ножа, м^2 ; ρ – плотность измельчаемого продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Подставляя значения всех сил, противодействующих величине $P_{\text{кр}}$, получаем значение последней для лезвия длиной $\Delta l = 1$:

$$P_{\text{кр}} = \delta \sigma_{\text{р}} + \frac{E \text{tg} \beta}{2h} h_{\text{сж}}^2 + \frac{\pi^3 R_0^2 n_{\text{ч}}^2 F_{\text{р}} \rho}{450} f + f \left(\frac{1}{4} \sin 2\beta \frac{E \text{tg} \beta}{h} h_{\text{сж}}^2 + \frac{\mu E}{2h} h_{\text{сж}}^2 \cos^2 \beta \right). \quad (23)$$

Преобразуя выражение (23), находим критическую силу

$$P_{\text{кр}} = \delta \sigma_{\text{р}} + \frac{\pi^3 R_0^2 n_{\text{ч}}^2 F_{\text{р}} \rho}{450} f + \frac{E}{2h} h_{\text{сж}}^2 (\text{tg} \beta + f (\sin^2 \beta + \mu \cos^2 \beta)). \quad (24)$$

Данная формула характеризует взаимодействие лезвия с продуктом при рубящем резании (наиболее простой случай).

При резании со скольжением для учета влияния скользящей составляющей силы $P_{\text{кр}}$ перейдем к понятию трансформации угла заточки.

При движении лезвия нормально относительно своей режущей кромки определение величины угла заточки β производится исходя из обычного представления о геометрии лезвия в статическом состоянии. Нетрудно убедиться, что в процессе резания со скольжением угол резания β меняет свое значение – уменьшается в зависимости от угла резания τ . Таким образом, переходя от представления о статической геометрии лезвия к представлению о его кинематической геометрии, мы сталкиваемся с явлением трансформации угла заточки.

Схема лезвия с углом заточки дос , равным β , представлена на рис. 3. При проникновении лезвия в материал по направлению V_n указанный угол будет равен углу, замеренному статически. В случае, когда лезвие станет проникать в материал под некоторым углом τ к нормали, т. е.

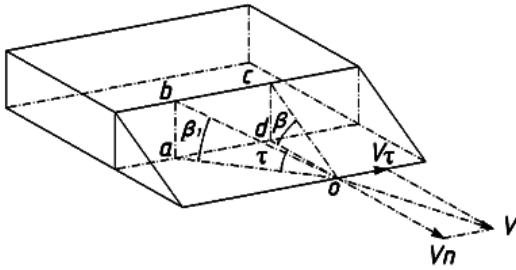


Рис. 3. Схема к определению трансформации угла заточки

Выражаем $\operatorname{tg}\beta_1$:

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \operatorname{tg}\beta \cos\tau.$$

Выражаем β_1 :

$$\beta_1 = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta \cos\tau). \quad (25)$$

Формула (25) показывает закономерность изменения угла заточки β в зависимости от изменения угла резания τ . Анализируя полученное выражение, можно сделать вывод: если, исходя из условий прочности лезвия, необходимо принять большую величину угла β , а по условиям резания это невозможно, то с увеличением исходного угла заточки β должен быть увеличен угол τ .

Подставим зависимость (24) в выражение для нахождения $P_{\text{кр}}$:

$$P_{\text{кр}} = \delta\sigma_p + \frac{\pi^3 R_0^2 n_q^2 F_p \rho}{450} f + \frac{E}{2h} h_{\text{сж}}^2 [\operatorname{tg}\beta \cos\tau + f \sin^2(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta \cos\tau)) + \mu \cos^2(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta \cos\tau))] + \frac{E}{2h} h_{\text{сж}}^2 [\operatorname{tg}\beta \cos\tau + f \sin^2(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta \cos\tau)) + \mu \cos^2(\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\beta \cos\tau))].$$

Данное выражение характеризует основную взаимосвязь между наиболее важными конструктивными (τ, β, δ, F_p), физико-механическими ($E, \mu, \rho, f, \sigma_p$) и некоторыми режимными ($n_q, h, h_{\text{сж}}$) параметрами, управляющими процессом резания.

Новое направление в конструировании куттерных ножей. Куттерные ножи, режущая кромка которых описана кривыми второго порядка, широко применяются на мясоперерабатывающих предприятиях. Наиболее распространенными вариантами данных кривых, применяемых при изготовлении куттерных ножей, являются спираль Архимеда, логарифмическая спираль и эвольвента круга.

При анализе вышеприведенных спиралей было выявлено, что постоянства угла резания по всей длине режущей кромки можно достичь, очертив лезвие логарифмической спиралью с уравнением

$$R = a^\varphi, \quad (26)$$

где R – радиус-вектор спирали, м; a – постоянный коэффициент; φ – полярный угол, рад.

Ножи с подобным профилем лезвия хорошо разрезают соединительную ткань. Однако основным недостатком ножей, выполненных по логарифмической спирали, является трудность изготовления и эксплуатации (сложность перезаточки). Частично эта проблема решается путем выполнения режущей кромки ножа в виде ломаной линии с изменяющимся углом заточки каждого последующего участка режущей кромки.

Принципиально-конструктивная схема такого ножа показана на рис. 4. Нож куттера состоит из лезвия 2 с режущей кромкой в виде ломаной линии 3. Угол заточки φ каждого участка режущей кромки определен таким образом:

$$\varphi_{i+1} = \frac{R_i}{R_{i+1}} \varphi_i. \quad (27)$$

Здесь φ_i – угол заточки i -го участка режущей кромки, град; φ_{i+1} – угол заточки последующего участка режущей кромки, град; R_i – расстояние от оси вращения ножа куттера до середины i -го участка режущей кромки, м; R_{i+1} – расстояние от оси вращения ножа куттера до середины последующего участка режущей кромки, м.

Куттер с использованием предложенного ножа работает следующим образом: нож, посаженный ступицей 1 на вал, измельчает режущей кромкой 3 лезвия 2 мясное сырье. Благодаря тому, что угол заточки каждого участка режущей кромки уменьшается с увеличением расстояний от оси вращения ножа куттера до середины каждого участка режущей кромки и определен выражением (27), давление в зоне контакта режущей кромки и продукта растет с увеличением расстояния от оси вращения ножа куттера до режущей кромки. Это обеспечивает равномерность измельчения продукта по всей длине режущей кромки и позволяет повысить качество готового продукта и эффективность работы ножа куттера. Данная конструкция ножа защищена патентами Республики Беларусь на изобретение [3, 4]. Дальнейшее совершенствование конструкции куттерного ножа возможно сочетанием ломаной линии режущей кромки, выполненной по форме дуги логарифмической спирали определенной длины. Принципиально-конструктивная схема такого ножа представлена на рис. 5.

Нож куттера состоит из ступицы 1 и лезвия 2 с режущей кромкой 3. Верхняя часть режущей кромки выполнена в виде ломаной линии, а нижняя часть выполнена по форме дуги логарифмической спирали, длина L (м) которой определена из выражения

$$L = R_k \frac{\sqrt{1 + \ln^2 a}}{\ln a} - R_n \frac{\sqrt{1 + \ln^2 a}}{\ln a}. \quad (28)$$

Здесь R_n – расстояние от оси вращения ножа куттера до начала дуги логарифмической спирали, м; R_k – расстояние от оси вращения ножа куттера до конца дуги логарифмической спирали, м; a – аргумент натурального логарифма.

При этом длина каждого прямолинейного участка L_i (м) ломаной линии следующая:

$$L_i = \sqrt{R_i^2 + R_{i+1}^2 + 2R_i R_{i+1} \cos \varphi_i}, \quad (29)$$

где R_i – расстояние от оси вращения ножа куттера до начала i -го прямолинейного участка ломаной линии, м; R_{i+1} – расстояние от оси вращения ножа куттера до конца i -го прямолинейного участка ломаной линии, м; φ_i – угол между R_i и R_{i+1} , град; i – порядковый номер прямолинейного участка ломаной линии ($i = 1, \dots, m$; m – количество прямолинейных участков ломаной линии).

Выполнение нижней части режущей кромки по форме дуги логарифмической спирали, длина которой определена из выражения (28), и верхней части режущей кромки в виде ломаной

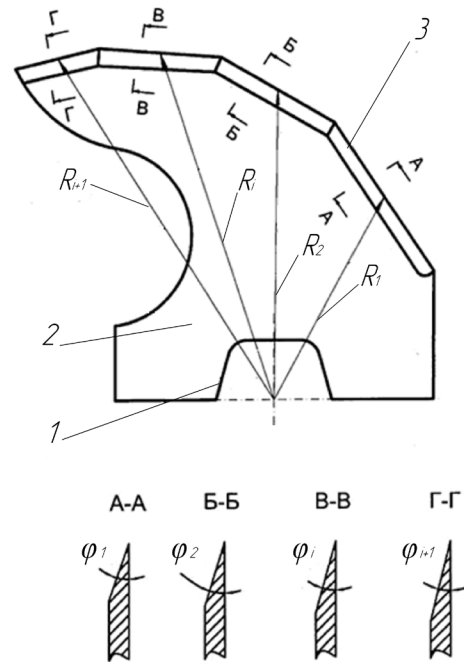


Рис. 4. Принципиально конструктивная схема куттерного ножа с изменяющимся углом заточки по длине режущей кромки: 1 – ступица; 2 – лезвие; 3 – режущая кромка

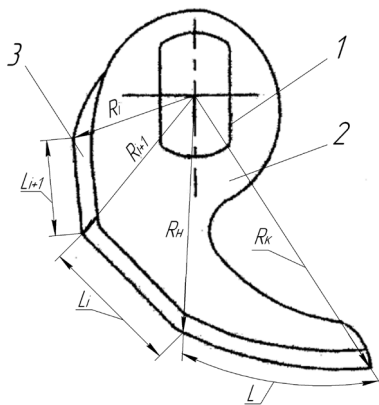


Рис. 5. Принципиально конструктивная схема куттерного ножа с ломаной режущей кромкой, выполненной по логарифмической спирали: 1 – ступица; 2 – лезвие; 3 – режущая кромка

линии, длина каждого прямолинейного участка которой определена из формулы (29), позволяет создать необходимое усилие с преобладанием нормальной составляющей силы резания для перерезания мышечной ткани мясного сырья. При этом дополнительное усилие будут создавать вершины ломаной линии, что обеспечивает равномерность измельчения сырья и позволяет повысить качество готового продукта.

В результате анализа влияния геометрических параметров ножа куттера на процесс резания была разработана документация на новые конструкции куттерных ножей и изготовлены их опытные образцы (рис. 6). Учитывая, что рецептуры и технологии изготовления разных сортов и видов колбасных изделий требуют использования различного вида сырья, можно рекомендовать применение следующих куттерных ножей.

При производстве вареных колбас высших сортов используют сырье, содержащее в основном мышечные ткани. Соединительная ткань и другие более прочные включения присутствуют в незначительном объеме. Это создает хорошие условия для резания сырья куттерным ножом, где преобладает нормальная составляющая силы резания. Однако присутствие соединительной ткани даже в незначительном объеме обуславливает наличие касательной составляющей силы резания. Угол резания для ножей данной конструкции составляет 35–55°.

Как было отмечено, при резании волокнистых материалов необходимо, чтобы давление в зоне контакта режущей кромки и продукта росло с увеличением расстояния от оси вращения до режущей кромки. Поэтому в данном варианте куттерного ножа угол заточки режущей кромки на самом удаленном от оси вращения прямолинейном участке режущей кромки составляет 15°. У посадочного отверстия ножа угол заточки режущей кромки увеличивается до 24°. Шаг изменения угла заточки, начиная от наиболее удаленного от оси вращения ножа прямолинейного участка режущей кромки, составляет 3°.

Вареные колбасы, сосиски, сардельки II сорта изготавливают из более жесткого мясного сырья, имеющего много соединительных тканей. При его обработке необходимы нормальная сила резания для измельчения мышечной ткани и касательная составляющая, обеспечивающая измельчение соединительной ткани. Угол резания для ножей данной конструкции составляет 50–75°.



Рис. 6. Фотографии опытных образцов куттерных ножей с углом резания в середине прямолинейного участка режущей кромки:
а – 45°; *б* – 55°; *в* – 65°

С целью уменьшения боковой поверхности ножа разработана его конструкция с ломаной режущей кромкой с углом резания 40–65°.

Заключение. Впервые определена математическая зависимость критической силы резания от конструктивных, физико-механических и режимных параметров, управляющих процессом резания мясного сырья куттерным ножом. Установлена закономерность изменения угла заточки в зависимости от варьирования угла резания и условий прочности лезвия.

На основе теоретических исследований были разработаны новые конструкции куттерных ножей, обладающие рядом преимуществ по сравнению с серийно выпускаемыми:

обеспечение равномерности измельчения продукта по длине режущей кромки и по всей высоте (глубине) чаши куттера;

снижение угла заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения ножа до прямолинейного участка режущей кромки позволяет уменьшить длину режущей кромки, что приводит к уменьшению боковой поверхности ножа и снижению темпа роста температуры обрабатываемого продукта;

использование ступенчатой заточки режущей кромки сокращает время перезаточки ножей (конструктивные особенности ножа позволяют перезатачивать только ту часть режущей кромки, которая подвергается наибольшему износу).

Литература

1. П е л е е в А. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. М., 1971.
2. Р е з н и к Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М., 1975.
3. Г р у д а н о в В. Я., Ж е л у д к о в А. Л., Б р е н ч А. А. Нож куттера. Пат. № 11793 РБ.
4. Ж е л у д к о в А. Л., Г р у д а н о в В. Я., Б р е н ч А. А. Нож куттера. Пат. № 12967 РБ.

V. Ya. GRUDANOV, A. A. BRENCH, A. L. GHELUDKOV, V. M. POZDNYAKOV, L. T. TKACHEVA

SUBSTANTIATION OF CONSTRUCTIVE AND GEOMETRICAL PARAMETERS OF CUTTING TOOLS FOR THIN CRUSHING OF MEAT RAW MATERIALS

Summary

A mathematical model of introduction of a knife blade in a product, characterising the basic interrelation of the constructive and physic-mechanical parameters of operating process of cutting is described. New designs of cutters knives are described.