

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НОЖЕЙ НА ПРОЦЕСС ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ В КУТТЕРАХ

А. Л. Желудков, С. В. Акуленко, К. К. Гуляев

Проанализировано влияние геометрических параметров куттерного ножа на процесс куттерования. Определены основные пути совершенствования конструкций рабочих органов машин для тонкого измельчения мясного сырья, что позволит повысить качество измельчаемого продукта и уменьшить затраты энергии на процесс куттерования. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния ножей при тонком измельчении мясного сырья в куттерах.

Введение

В мясной отрасли при производстве колбасных изделий широко применяется операция измельчения, которая оказывает существенное влияние на качество фарша и выход готового продукта. При конструировании мясорезущих машин и механизмов необходимо учитывать биологическое происхождение измельчаемого сырья, вид и количество добавок, а также особенности процесса куттерования.

Среди машин для тонкого измельчения мяса особое место занимают куттера. Рабочими органами куттера являются чаша и один или два ножевых вала с серповидными режущими ножами. На каждом валу устанавливается от трех до двенадцати ножей. Частота оборотов ножевого вала в современных куттерах фирм «Нагема», «Ласк», «Зейдельманн», «Кремер-Греббе» и др. составляет до 6000 оборотов в минуту. Чаша куттера вращается с частотой ориентировочно в сто раз меньше, чем ножевой вал.

Особенностью обработки мяса в куттере является совмещение процессов интенсивного резания и перемешивания мяса, находящегося в чаше. При этом в процессе куттерования значительно увеличивается поверхность контакта белков мышечной ткани и воды, что позволяет в наибольшей степени, по сравнению с другими измельчителями, использовать естественную влагосвязывающую способность мяса. В процессе куттерования происходит образование также специфического водно-жиро-белкового геля, который обеспечивает высокое качество колбасного фарша.

Качество колбасных изделий и их выход зависят от ряда факторов. Среди них решающее место принадлежит измельчению мяса в куттере и температурному режиму процесса. Причем на качество измельчения в значительной мере влияет форма ножей [1].

Основным требованием к любому режущему инструменту является сохранение остроты режущей части и геометрических форм рабочего органа в течение наиболее длительного времени, то есть инструмент должен обладать достаточной жесткостью и высокой износостойкостью. Конструктивные параметры режущих рабочих органов выбираются с учетом их работы, физического состояния разрезаемого материала, кинематики режущего органа и измельчаемого продукта, прочности и жесткости рабочего органа и других факторов.

Процесс резания при тонком измельчении мясного сырья осуществляют на высоких скоростях режущих рабочих органов куттеров. Он сопровождается выделением большого количества теплоты, что вызывает значительное повышение температуры сырья и приводит к денатурации белков, снижению водосвязывающей способности полуфабриката и изменению структурно-механических свойств продукта, что существенно снижает качество готовых

мясных изделий. Эти обстоятельства обуславливают необходимость точного расчета и контроля при производстве режущих инструментов с оптимальными геометрическими и механическими характеристиками.

Целью представленной работы является разработка конструкции куттерного ножа, применение которого позволит снизить прирост температуры сырья в процессе его измельчения, а также исследование его напряженно-деформированного состояния для оценки его работоспособности.

Результаты исследований и их обсуждение

Процесс резания в куттерах отечественного и зарубежного производств осуществляется серповидными ножами, режущая кромка которых выполнена в виде кривой, построенной по определенной спирали, при этом были исследованы: спираль Архимеда с уравнением $R = a \cdot \varphi$ и логарифмическая спираль с уравнением $R = a^{\varphi}$.

Для произвольной кривой лезвия [3], описываемой в полярной системе координат уравнением $R=R(\varphi)$, и ножа, вращающегося вокруг ее полюса, общее выражение коэффициента скольжения, известное из дифференциальной геометрии, будет иметь вид

$$K_{\beta} = R \cdot \frac{d\varphi}{dR}, \quad (1)$$

где φ – полярный угол;
 R – радиус-вектор точки лезвия, м.

Чтобы коэффициент скольжения не уменьшался по мере поворота лезвия, производная $\frac{d\varphi}{dR}$ должна уменьшаться не быстрее, чем растет радиус-вектор.

Выпуклое лезвие ножа, выполненное по Архимедовой спирали с уравнением $R = a \cdot \varphi$, не обеспечивает этого требования.

При анализе вышеприведенных спиралей [2], было выявлено, что постоянство коэффициента скольжения K_{β} можно достичь, очертив лезвие только логарифмической спиралью с уравнением

$$R = a^{\varphi}, \quad (2)$$

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

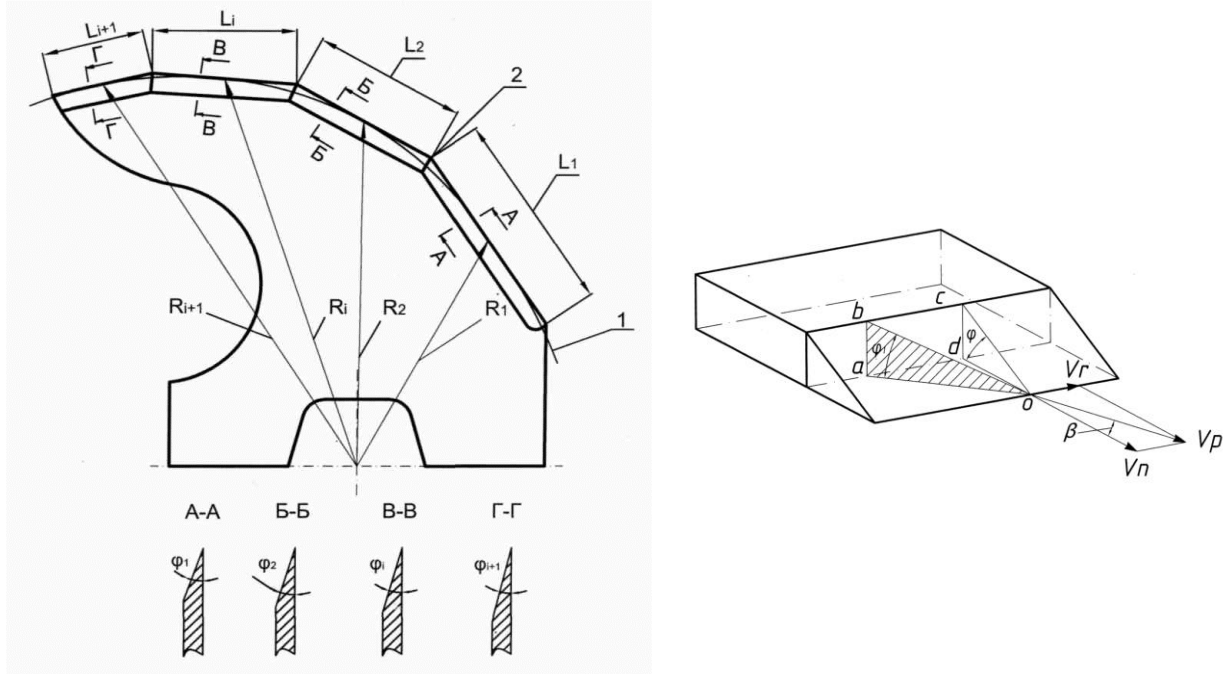
Основным недостатком ножей, выполненных по логарифмической спирали, является трудность выполнения заточки. Эта проблема решается путем выполнения режущей кромки ножа в виде ломаной линии с i -ым количеством прямолинейных участков по закону логарифмической спирали (рисунок 1а).

Благодаря очертанию лезвия ножа куттера логарифмической спиралью с уравнением $R = a^{\varphi}$, достигается постоянство угла резания по всей длине режущей кромки. Но из-за сложности выполнения ножей такой конструкции предлагается выполнить режущую кромку в виде ломаной линии, выполненной касательно к логарифмической спирали [5]. Это дает возможность получить постоянство угла резания в середине каждой режущей кромки, что, в свою очередь, обеспечивает равномерность измельчения продукта по всей длине режущей кромки, что позволяет повысить качество готового продукта, и, тем самым, повышает эффективность работы ножа куттера.

При этом целесообразно, чтобы длина L_i каждой режущей кромки определялась из выражения

$$L_i = L_{i-1} \cdot \frac{R_{i-1}}{R_i}, \quad (3)$$

где R_{i-1} – расстояние от оси вращения ножа до середины $(i-1)$ -ой режущей кромки, м;
 R_i – расстояние от оси вращения ножа до середины следующей режущей кромки, м.



1 – логарифмическая спираль

2 – режущая кромка

а) Схема куттерного ножа

б) Схема к определению трансформации угла заточки

Рисунок 1 – Схема куттерного ножа с режущей кромкой в виде ломаной линии, построенной по закону логарифмической спирали

Использование формулы (3) позволяет соотнести геометрические размеры куттерного ножа и, тем самым, уменьшает длину каждого следующего прямолинейного участка режущей кромки, что снижает гидравлическое сопротивление, а также затраты энергии на процесс куттерования. Это дополнительно улучшает качество готового продукта и повышает эффективность работы куттера.

Кроме того, при резании волокнистых материалов необходимо, чтобы давление в зоне контакта режущей кромки и продукта не уменьшалось с увеличением расстояния от оси вращения, а наоборот, увеличивалось. Этот эффект может быть достигнут за счет уменьшения угла заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения до режущей кромки, либо путем увеличения угла встречи режущей кромки с продуктом. При использовании ножа с серповидной режущей кромкой второй путь более практичен и осуществляется путем увеличения угла встречи по мере роста расстояния от оси вращения до режущей кромки. Однако это ведет к увеличению боковой поверхности ножа, что приводит к более интенсивному повышению температуры фарша во время процесса куттерования.

В то же время использование ножей с ломаной режущей кромкой позволяет уменьшать угол заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения до режущей кромки (рисунок 1а) [6].

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

На рисунке 1б представлена схема лезвия с углом заточки doc , равным φ . При проникновении лезвия в материал нормально, т.е. по направлению V_n , указанный угол будет равен замеренному статически. В случае, когда лезвие станет проникать в материал под некоторым углом β к нормали, т.е. в направлении V_p , угол заточки должен быть замерен на плоскости, проходящей через это направление, т.е. будет равен углу aob , равным φ_1 .

Закономерность изменения угла заточки φ_1 в зависимости от изменения угла β может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{ab}{ao}; & \operatorname{tg} \varphi &= \frac{dc}{do} = \frac{ab}{do}; \\ \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot ao &= \operatorname{tg} \varphi \cdot do; & \frac{do}{ao} &= \cos \beta. \end{aligned}$$

Выражаем $\operatorname{tg} \varphi_1$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta \quad (4)$$

Выражение (4) показывает закономерность изменения угла заточки φ_1 , в зависимости от изменения угла встречи β . Поэтому для уменьшения лобового сопротивления внедрения лезвия ножа в продукт необходимо выполнять режущую кромку с углом заточки, проходящим через плоскость aob .

Для оценки эффективности предложенных технических решений на базе куттера ФК-50 были проведены сравнительные испытания разработанных куттерных ножей с ломаной режущей кромкой и ножом с серповидной режущей кромкой, выпускаемых заводом-изготовителем. Результаты сравнительных испытаний представлены на рисунке 2.

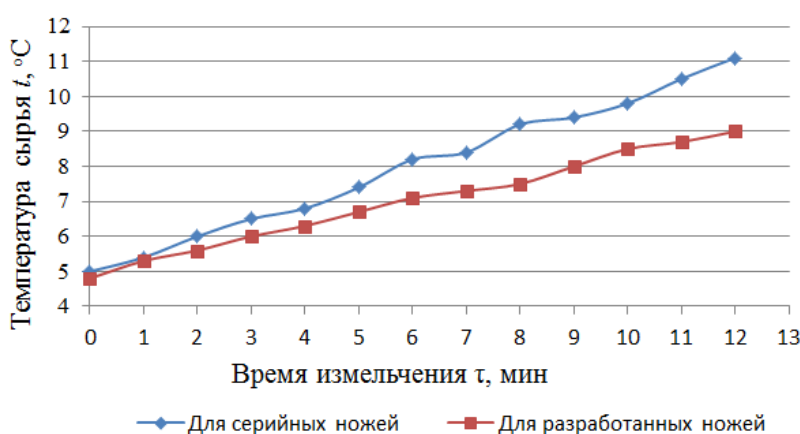


Рисунок 2 – Зависимость изменения температуры сыра от времени измельчения

Из графической зависимости, построенной по результатам непосредственных измерений, видно, что при использовании разработанных куттерных ножей температура измельчаемого сыра повышается медленнее, что подтверждает ранее сделанные предположения.

При работе ножей в куттерах происходит совмещение процессов резания, смятия и перемешивания мяса, находящегося в чаше. Такие ножи находятся в условиях сложного напря-

женного состояния [4]. По данным некоторых исследований давление q на плоскости серповидного ножа составляет 7,5 кПа.

Исследование напряженно-деформированного состояния ножа проводилось теоретически и экспериментально.

При теоретическом исследовании применяли метод конечных элементов с использованием пакета прикладных программ на ЭВМ. В этом случае была получена распечатка полей напряжения и деформаций по всей плоскости ножа. Из анализа полученных данных видно, что главные напряжения σ изменялись от нуля до 30 МПа в месте возле посадки на вал.

Для экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния использовались ножи новой конструкции с режущей кромкой в виде ломаной линии, выполненной касательно к логарифмической спирали, разработанные для куттера типа ФК-50.

Плоскость ножа разбивалась на 50 элементов (площадок), в которых определялись напряжения и деформация. Для проведения испытаний использовались тензодатчики с базой равной 5 мм. Тензодатчики с такой базой измерений являются высокоточными. Для измерения показаний использовалась цифровая тензостанция. Показания по каждому тензодатчику оценивались в среднем по результатам десяти испытаний.

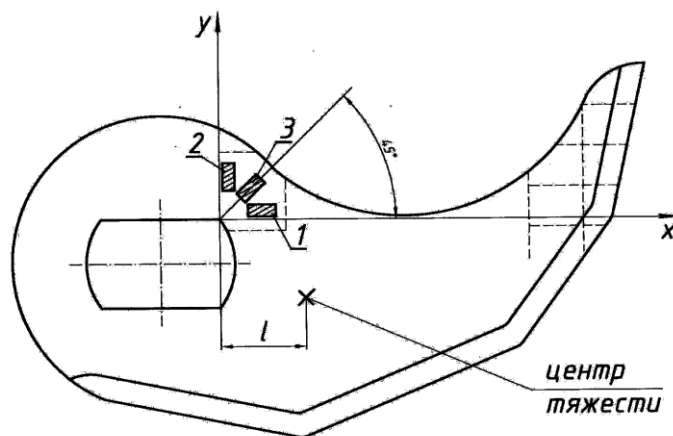
Очевидно, что создать равномерное давление 7,5 кПа на плоскости ножа в искусственных условиях весьма трудно. Поэтому исходили из следующих допущений. Прикладывали в центре тяжести ножа сосредоточенную нагрузку P равную 170 Н.

$$P = q \cdot S,$$

где S – площадь ножа, м²;

q – давление на плоскости ножа, Па.

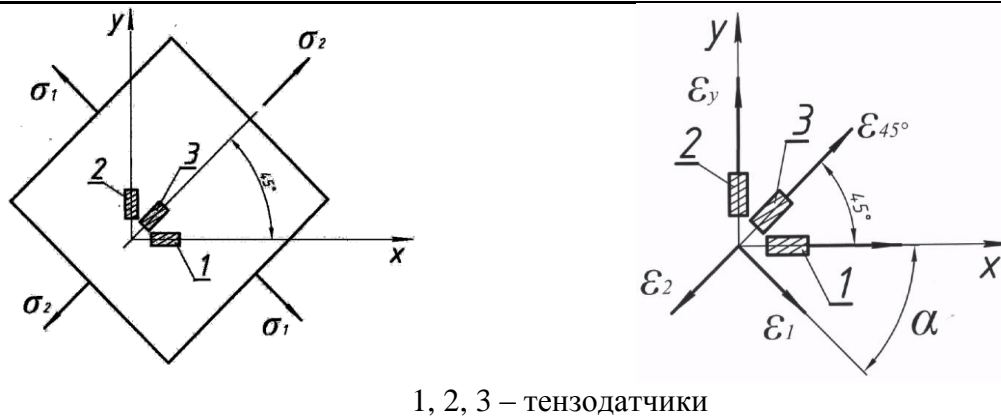
Из теоретических исследований напряженно-деформированного состояния куттерного ножа видно, что максимальное напряжение создается в месте посадки ножа на вал. Поэтому очевидно, что для определения максимальных напряжений тензодатчики необходимо располагать в опасной точке у посадочного отверстия. Схема расположения тензодатчиков представлена на рисунке 3.



1, 2, 3 – тензодатчики

Рисунок 3 – Схема расположения тензодатчиков на плоскости ножа

Очевидно, что в рассматриваемой точке необходимо определить три величины: главные напряжения σ_1 , σ_2 и угол α , который образует напряжение σ_1 с произвольно выбранной осью X (рисунок 4).



1, 2, 3 – тензодатчики

Рисунок 4 – Схема измерения напряжений и относительных деформаций в опасной точке

Для определения напряжения и относительных деформаций, связанных между собой, пользовались обобщенным законом Гука. Известно, что главное растягивающее напряжение определяется по формулам [4]:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2), \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1), \quad (6)$$

где μ – коэффициент Пуассона;
 E – модуль упругости, МПа;
 ε_1 и ε_2 – главные деформации, м.

Для определения главных деформаций использовали известные выражения из теории прочности:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2\cos 2\alpha}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2\cos 2\alpha}. \quad (8)$$

Угол α определяется из выражения

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_{45^\circ}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}. \quad (9)$$

По результатам испытаний получили следующие средние значения деформаций:

$$\varepsilon_x = 120 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_y = -40 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_{45} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Из выражения (9) получаем значение угла α :

$$\alpha = 3,56^\circ.$$

Из выражений (7) и (8) имеем:

$$\varepsilon_1 = 120,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_2 = -40,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Тогда по выражениям (5) и (6) получаем:

$$\sigma_1 = 23,82 \text{ МПа}; \quad \sigma_2 = -0,98 \text{ МПа}.$$

Сравнение теоретического и экспериментального исследований ножа дают основание для точной оценки напряженно-деформированного состояния режущего инструмента, что позволяет утверждать то, что ножи новой конструкции находятся в условиях равнопрочного состояния.

Заключение

На основании анализа геометрических факторов, влияющих на процесс куттерования мясного сырья, предложена конструкция куттерного ножа с ломаной режущей кромкой. Использование данной конструкции ножей позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с известными ножами:

- обеспечивается равномерность измельчения продукта по длине режущей кромки;
- за счет трансформации угла заточки снижается лобовое сопротивление внедрения лезвия ножа в продукт;
- уменьшение 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 роста температуры измельчаемого продукта.

Литература

- 1 Zheludkov, A. Analysis of working parts for machines intended for fine meat raw material cutting / A. Zheludkov, S. Akulenko, // Ukrainian food journal. – 2014. – Volume 3. – № 4. – P. 619 – 626.
- 2 Груданов, В. Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах / В. Я. Груданов. – Могилев.: МГУ им. А. А. Кулешова, 2006. – 288 с.
- 3 Груданов, В. Я. Новые куттерные ножи для измельчения мясного сырья / В. Я. Груданов, И. Д. Иванова, А. А. Бренч // Мясная промышленность. – 2003. – № 4 – С. 33–35.
- 4 Бояршинов, С.В. Основы строительной механики машин / С. В. Бояршинов. – М.: Машиностроение, 1973. – 455 с.
- 5 Нож куттера серповидный: пат. № 11597 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 02С 18/20 / В. Я. Груданов, А. А. Бренч, А. Л. Желудков; заявитель Могилевский гос. ун-т продовольствия. – № а20061055; заявл. 27.10.06; опубл. 30.04.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – №1. – С. 62.
- 6 Нож куттера: пат. № 11793 Респ. Беларусь, МПК (2006) В 02С 18/20, В 02С 18/20 / В. Я. Груданов, А. А. Бренч, А. Л. Желудков; заявитель Могилевский гос. ун-т продовольствия. – № а20070507; заявл. 04.05.07; опубл. 30.10.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – №2. – С. 59–60.

Поступила в редакцию 09.11.2018