

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КУТТЕРОВАНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НОЖЕЙ

А.А. Бренч, А.Л. Желудков

Определены основные пути совершенствования конструкций рабочих органов машин для тонкого измельчения мясного сырья. Получены математические уравнения зависимости удельной энергоёмкости процесса куттерования, реологических и структурно-механических свойств мясного фарша от режимных и конструктивных особенностей куттера. На основе полученных зависимостей разработаны новые конструкции куттерных ножей, и экспериментально доказаны их преимущества по сравнению с серийно-выпускаемыми. На основе статистического анализа процесса тонкого измельчения мясного сырья в куттере определены оптимальные режимы куттерования для различных конструкций ножей.

Введение

В перерабатывающей промышленности значительное место занимает мясная отрасль. При производстве колбасных изделий широко применяются процессы первичного и тонкого измельчения мясного сырья, которые существенно влияют на качество получаемых изделий, энергозатраты и конечную себестоимость готовой продукции.

Процесс резания при тонком измельчении мясного сырья выполняют на высоких скоростях режущих рабочих органов куттеров. Он сопровождается выделением большого количества теплоты, что вызывает значительное повышение температуры сырья и может привести к денатурации белков, изменению водосвязывающей способности и структурно-механических свойств продукта и к существенному снижению качества мясных изделий. Эти обстоятельства обуславливают необходимость правильного расчета продолжительности куттерования и выполнения режущих инструментов с оптимальными геометрическими и механическими характеристиками. При тонком измельчении частицы фарша должны связывать такое количество воды, которое превращает их в однородную гомогенную массу, обладающую определенными структурно-механическими свойствами. От правильности выполнения этой операции зависят конечные энергозатраты, выход и качество готовой продукции.

Результаты исследований процесса куттерования

На мясоперерабатывающих предприятиях республики Беларусь в основном эксплуатируются куттеры зарубежного производства. При этом измельчение мясного сырья осуществляется ножами с криволинейной режущей кромкой. При такой форме ножей достигается необходимое качество измельчения за счет высокого коэффициента скольжения, однако ножи криволинейной формы имеют весьма существенные недостатки: высокая стоимость изготовления; требуется сложное заточное оборудование при высокой квалификации обслуживающего персонала; завышенный расход металла при раскрое листовой стали. При этом криволинейная форма лезвия не обеспечивает постоянного значения угла скольжения по длине режущей кромки. Данные обстоятельства обуславливают экономическую зависимость отечественных предприятий от зарубежных фирм-производителей оборудования.

В то же время криволинейная форма ножей до настоящего времени не имеет достаточного теоретического и экспериментального обоснования, а сама конструкция ножей нуждается в значительной дополнительной доработке, что и определяет актуальность диссертационной работы.

Цель работы – повышение качества куттерования мясного сырья на основе создания

новых конструкций рабочих органов куттеров, работающих при минимальных энергозатратах и оптимальных технологических режимах.

Для определения оптимальных режимов измельчения мяса в куттерах с различными геометрическими характеристиками конструкций ножей необходимо изучить зависимости реологических свойств продукта от влаго- и жиросодержания, степени измельчения, растворимости белков, дисперсного состава фарша, энергетические характеристики процесса, а также выход и качество готовых изделий от продолжительности измельчения.

Качество процесса измельчения колбасного фарша зависит от структурно-механических свойств, которые характеризуются величиной предельного напряжения сдвига, величиной поверхности частиц фарша, динамической вязкостью и потерями жидкости при термообработке.

В процессе куттерования колбасного фарша также изменяются дисперсный состав и эффективный диаметр частиц фарша, при этом постепенно исчезает поперечная исчерченность волокон, фарш уплотняется, а частицы трудно отличить друг от друга. Во время куттерования изменяются и физико-химические свойства, в частности, растворимость белков, водосвязывающая способность, реологические характеристики и прочность структурной сетки фарша.

Особенностью обработки мяса в куттерах является совмещение процессов интенсивного резания, смятия и перемешивания мяса, находящегося в чаше. При воздействии куттерных ножей на мясное сырье значительно увеличивается поверхность контакта белков мышечной ткани и воды, что позволяет использовать (в отличие от других способов) естественную влагосвязывающую способность мяса, при этом происходит образование специфического водно-жиро-белкового геля, что и обеспечивает высокое качество колбасного фарша.

Детальное изучение процесса куттерования, включающее влияние геометрических и конструктивных характеристик рабочих органов, существенно влияющих не только на качество измельчения и приготовления фарша, но и на энергетические характеристики куттеров, до настоящего времени не проводилось.

Процесс тонкого измельчения мясного сырья в куттерах отечественного и зарубежного производств осуществляется серповидными ножами, режущая кромка которых выполнена в виде кривой, построенной по спирали.

Однако при измельчении мяса в куттерах в основном наблюдаются процессы резания, смятия и взбивания фарша на высоких скоростях (от 1000 до 6000 об/мин) и исчезает существенная разница между рубящим и скользящим резанием. Поэтому лезвие ножа может быть выполнено в виде прямой линии, совпадающей с радиусом его вращения. В этом случае будет иметь место рубящее резание, однако соединительная ткань в мясе более чем в 100 раз прочнее мышечной и жировой и чтобы ее измельчить, необходим хотя бы минимальный угол наклона лезвия ножа к радиусу его вращения в пределах $10...25^{\circ}$.

На основе полученной расчетной модели куттерного ножа разработаны новые конструкции куттерных ножей (прямой, прямой с внутренними режущими кромками и треугольный).

Прямой нож имеет два лезвия, по одному с каждой стороны относительно его продольной оси, причем обе стороны симметричны и лезвия наклонены под углом 16° к этой оси (радиусу вращения). На конце ножа исключено торцевое окружное лезвие, т.е. торец ножа не затачивается – в зазоре между ним и чашей практически исключается процесс измельчения.

Здесь необходимо также отметить, что прямые ножи, по сравнению с серповидными, имеют меньшую площадь трения с фаршем, так как средняя боковая поверхность прямого ножа, контактирующая с фаршем за один оборот, значительно меньше, чем поверхность серповидного в тех же условиях. Этот нож имеет ряд очевидных преимуществ по отношению к серийному серповидному ножу: уменьшается процент отходов металла за счет

более рационального раскроя и существенно упрощается его изготовление; увеличивается долговечность ножа за счет двух режущих кромок; упрощается перезаточка режущих кромок.

Боковая поверхность ножа, контактирующая с фаршем, а от этого зависит динамика нагрева сырья, может быть уменьшена, если прямой нож сделать с внутренними режущими кромками. В этом случае значительно увеличивается общая длина лезвия, а площадь контакта с сырьем уменьшается. Кроме того, можно высказать предположение, что при такой форме ножа будет интенсифицироваться процесс измельчения фарша за счет дополнительной турбулизации потока.

Разработана также конструкция треугольного ножа с режущей кромкой, наклоненной под углом 21° относительно его продольной оси.

Таким образом, разработано три варианта куттерных ножей, каждый из которых имеет преимущества и недостатки, удельные значения которых можно определить только при проведении экспериментальных исследований.

Для этого спланирован и реализован полный факторный эксперимент, соответствующий греко-латинскому квадрату.

На основе проведенного анализа для экспериментальных исследований процесса куттерования были выбраны следующие характеристики:

- обобщенная характеристика куттерного ножа ($\Psi = \frac{k_{\beta} \cdot L_{\text{общ}} \cdot b}{F_p}$, где k_{β} - коэффициент скольжения; $L_{\text{кр}}$ – длина режущей кромки, м; b – толщина ножа, м; F_p – площадь боковой поверхности ножа, м^2)
- частота вращения чаши ($n_{\text{ч}}$, об/мин)
- коэффициент заполнения чаши (K_3)
- время куттерования ($T_{\text{кут}}$, мин)
- прирост температуры фарша в процессе куттерования (Δt , $^{\circ}\text{C}$)
- предельное напряжение сдвига (Θ , Па)
- удельная энергоёмкость куттера (N , Вт/кг)

Режимно-конструктивными параметрами работы куттера выбраны обобщенная характеристика куттерного ножа (Ψ), частота вращения ($n_{\text{ч}}$, об/мин) и коэффициент заполнения чаши (K_3).

Для серийного серповидного ножа $\Psi = 0,0866$; для прямого $\Psi = 0,0183$; для треугольного $\Psi = 0,0186$; для прямого с внутренними режущими кромками $\Psi = 0,0278$. Частота вращения чаши изменялась в пределах от 6 до 12 об/мин, а коэффициент заполнения от 0,4 до 0,7. Основными технологическими параметрами фарша, изменяющимися во время куттерования, выбраны предельное напряжение сдвига (Θ , Па) и прирост температуры фарша (Δt , $^{\circ}\text{C}$). Данные параметры изменялись при времени куттерования ($T_{\text{кут}}$, мин) от 2 до 8 минут. Удельная энергоёмкость куттера (N , Вт/кг) выбрана основным энергетическим параметром, характеризующим работу куттера.

Для проведения экспериментальных исследований разработан и изготовлен стенд, который основывается на базе промышленного куттера марки ФК (объем чаши 50 литров) и контрольно-измерительных приборов, позволяющий определять влияние режимно-конструктивных параметров куттера на удельную энергоёмкость и технологические характеристики фарша во время куттерования.

В связи с ценностью мяса как объекта исследований, его непродолжительного срока хранения, а также его больших объемов в повторяющихся экспериментах, использовалось модельное тело. При этом за основу была принята трехкомпонентная система (вода - бентонитовая глина - опилки) с добавлением кальцинированной соды. Получаемая при этом система по своей структуре адекватна мясному фаршу.

После обработки результатов эксперимента получена графическая зависимость прироста температуры от управляемых переменных: обобщенной характеристики куттерного

ножа (Ψ); времени куттерования (T_k), частоты вращения (n_c) и коэффициента заполнения чаши (K_3), представленная на рис. 1.

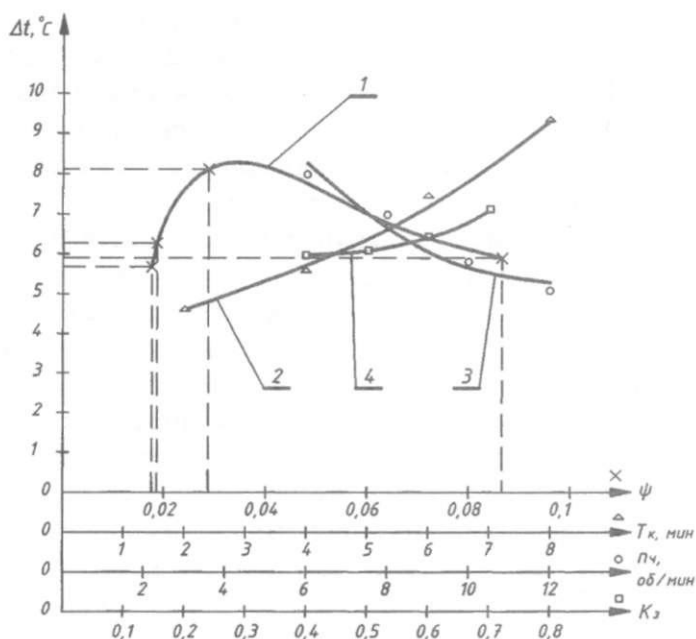


Рисунок 1 - Зависимость прироста температуры от управляемых переменных 1 – Ψ ; 2 – T_k , 3 – n_c , 4 – K_3

Полученный график позволяет наглядно оценить степень влияния режимно-конструктивных параметров куттера на прирост температуры обрабатываемого сырья в процессе куттерования.

Для прогнозирования и расчетов основных технологических характеристик обрабатываемого сырья после обработки экспериментальных данных получено уравнение, позволяющее определять прирост температуры во время куттерования:

$$\Delta t = 13,26 \cdot \Psi^{-0,0672} \cdot T_{\text{кут}}^{0,5443} \cdot n_c^{-0,681} \cdot K_3^{0,4448},$$

где Ψ - обобщенная характеристика куттерного ножа;

$T_{\text{кут}}$ - время куттерования, мин;

n_c - частота вращения чаши, об/мин;

K_3 - коэффициент заполнения чаши.

После анализа значимости влияния каждого входного параметра на прирост температуры по показателю степени было получено следующее уравнение:

$$\Delta t = 13,26 \cdot T_{\text{кут}}^{0,5443} \cdot n_c^{-0,681} \cdot K_3^{0,4448},$$

Для графического отражения влияния конструктивных параметров куттера на реологические свойства обрабатываемого сырья была построена зависимость предельного напряжения сдвига от управляемых переменных Ψ , T_k , n_c и K_3 , рис. 2.

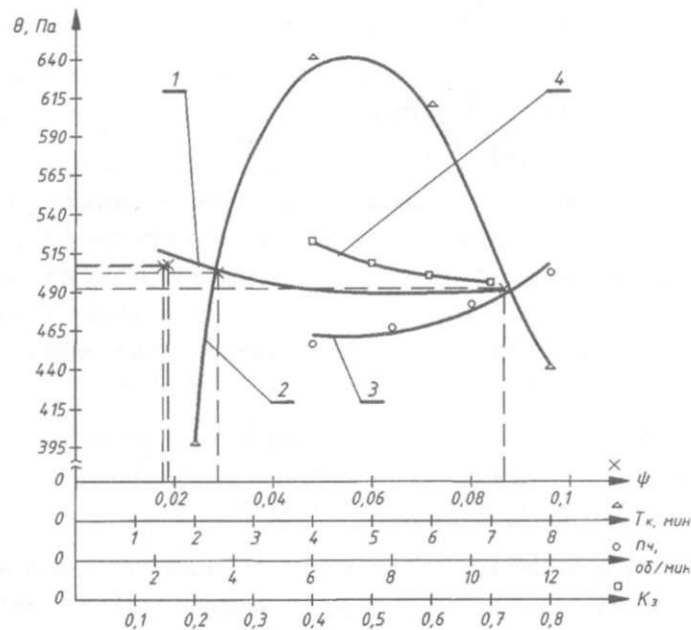


Рисунок 2 - Зависимость предельного напряжения сдвига от управляемых переменных 1 – Ψ ; 2 – T_k , 3 – $n_{ч}$, 4 – K_3

На рис. 3 представлена зависимость удельной энергоёмкости куттера (N , Вт/кг), выбранная основным энергетическим параметром, характеризующим работу куттера, от Ψ , T_k , $n_{ч}$ и K_3 .

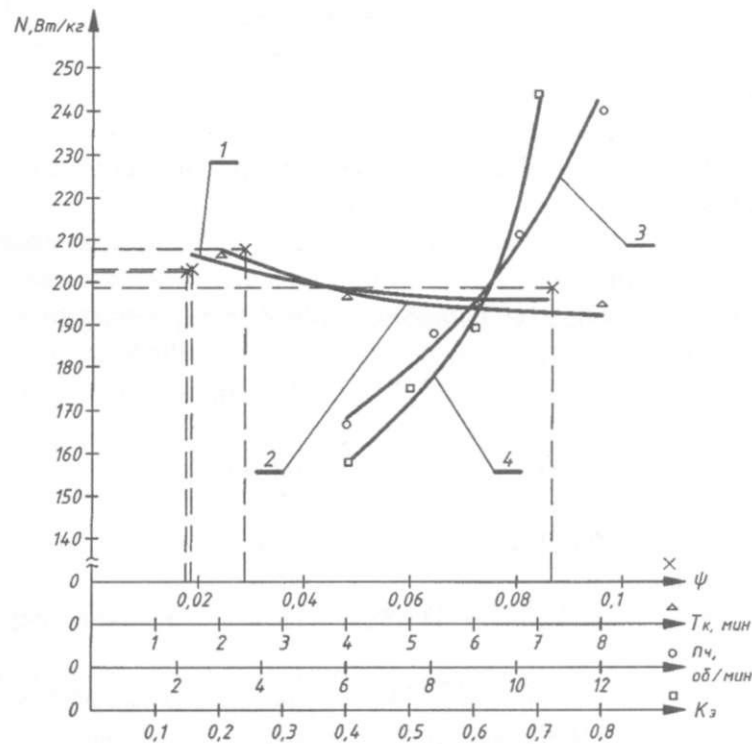


Рисунок 3 - Зависимость удельной энергоёмкости куттера от управляемых переменных 1 – Ψ ; 2 – T_k , 3 – $n_{ч}$, 4 – K_3

Предельное напряжение сдвига Θ , как основная реологическая характеристика фарша, имеет определяющее значение при получении готового продукта высокого качества. При обработке полученных экспериментальных данных получена зависимость предельного напряжения сдвига конструктивных параметров куттера:

$$\Theta = 326,7 \cdot \Psi^{-0,0006} \cdot T_{\text{кут}}^{0,142} \cdot n_{\text{ч}}^{0,1088} \cdot K_3^{-0,0287}.$$

После анализа значимости влияния каждого входного параметра на предельное напряжение сдвига по показателю степени было получено следующее уравнение:

$$\Theta = 326,7 \cdot T_{\text{кут}}^{0,142} \cdot n_{\text{ч}}^{0,1088}.$$

Комплексные исследования структурно-механических и технологических характеристик фарша при куттеровании позволили научно обоснованно подойти к расчету, осуществлению и прогнозированию этого процесса с целью получения готовых продуктов высокого качества.

Уравнение для определения удельной энергоёмкости процесса куттерования имеет вид

$$N = 110,4 \cdot \Psi^{-0,0049} \cdot T_{\text{кут}}^{-0,0224} \cdot n_{\text{ч}}^{0,5171} \cdot K_3^{0,7366}.$$

После анализа значимости влияния каждого входного параметра на удельную энергоёмкость по показателю степени было получено следующее уравнение

$$N = 110,4 \cdot n_{\text{ч}}^{0,5171} \cdot K_3^{0,7366}.$$

Оптимизация процесса тонкого измельчения мясного сырья связана с получением расчетных и графических закономерностей, позволяющих определить влияние конструктивных параметров рабочих органов машин для тонкого измельчения мясного сырья на основные параметры исследуемого сырья во время куттерования.

Для решения поставленной задачи оптимизации режимов куттерования воспользовались интерполяцией по Лагранжу, чтобы получить $n+1$ табличных точек (x_i, y_i) , где $i = 0, 1, \dots, n$, с использованием полученных экспериментальных данных.

После того как был получен набор $n+1$ точек (x_i, y_i) , воспользовались кубическими сплайнами $q_1(x), q_2(x), \dots, q_m(x)$, где $m = n - 2$, для аппроксимации кривой $y = f(x)$ в интервале $x_0 \leq x \leq x_n$ построения экспериментальных зависимостей. Для каждой конструкции ножа были получены по 9 кубических полиномов:

Для прямого ножа ($\Psi = 0,0183$):

$y = \Delta t(T_{\text{кут}}) = -0,2875x^3 + 3,9375x^2 - 15,075x + 21,4$ – прирост температуры сырья (Δt) от времени куттерования ($T_{\text{кут}}$);

$y = \Delta t(K_3) = 1333,3x^3 - 2055x^2 + 1037,2x - 165,8$ - прирост температуры сырья (Δt) от коэффициента заполнения чаши (K_3);

$y = \Delta t(n_{\text{ч}}) = -0,1667x^3 + 4,8625x^2 - 46,358x + 149,7$ - прирост температуры сырья (Δt) от частоты вращения чаши ($n_{\text{ч}}$);

$y = \Theta(T_{\text{кут}}) = 6,5208x^3 - 127,38x^2 + 735,17x - 632$ – предельное напряжение сдвига (Θ) от времени куттерования ($T_{\text{кут}}$);

$y = \Theta(K_3) = -22,646x^3 + 609,5x^2 - 5291,9x + 15303$ – предельное напряжение сдвига (Θ) от коэффициента заполнения чаши (K_3);

$y = \Theta(n_{\text{ч}}) = 181167x^3 - 299700x^2 + 161738x - 27902$ – предельное напряжение сдвига (Θ) от частоты вращения чаши ($n_{\text{ч}}$);

$y = N(T_{\text{кут}}) = 7,4417x^3 - 104,39x^2 + 437,31x - 333,3$ – удельная энергоёмкость куттера (N) от времени куттерования ($T_{\text{кут}}$);

$y = N(K_3) = 1,825x^2 - 7,74x + 122,66$ – удельная энергоёмкость куттера (N) от коэффициента заполнения чаши (K_3);

$y = N(n_{\text{ч}}) = -6400x^3 + 11290x^2 - 6982x + 1690,5$ – удельная энергоёмкость куттера (N) от частоты вращения чаши ($n_{\text{ч}}$).

Для преобразования полученной системы уравнений в уравнение общего вида были рассчитаны коэффициенты, для определения которых были использованы экспериментальные данные. Учитывалось, то обстоятельство, что $\Delta t = f(T_{\text{кут}}, n_{\text{ч}}, K_3)$, т.е. $\Delta t = A_{\Delta t} \cdot T_{\text{кут}} \cdot n_{\text{ч}} \cdot K_3$. Таким образом, для ножа с $\Psi = 0,0183$: $A_{\Delta t} = 0,3277$; $A_{\Theta} = 0,3334$; $A_N = 0,3332$.

Аналогично были получены зависимости для всех экспериментальных конструкций

куттерных ножей.

Используя полученные уравнения, с помощью составленной на ЭВМ программы в среде визуальной разработки Delphi, были выбраны оптимальные режимы куттерования.

Для серийного серповидного ножа ($\Psi = 0,0866$) наилучшими условиями куттерования являются: время обработки $T_{\text{кут}} = 6,3$ мин, коэффициент заполнения чаши $K_3 = 0,5$, частота вращения чаши $n_{\text{ч}} = 10$ об/мин; при этом предельное напряжение сдвига $\Theta = 629$ Па, прирост температуры $\Delta t = 7,01$ °С и удельный расход энергии на процесс $20,1$ Вт·ч/кг.

Для прямого ножа ($\Psi = 0,0183$) наилучшими условиями куттерования являются: время обработки $T_{\text{кут}} = 6$ мин, коэффициент заполнения чаши $K_3 = 0,5$, частота вращения чаши $n_{\text{ч}} = 10$ об/мин; при этом предельное напряжение сдвига $\Theta = 633,5$ Па, прирост температуры $\Delta t = 6$ °С и удельный расход энергии на процесс $16,5$ Вт·ч/кг.

Для треугольного ножа ($\Psi = 0,0186$) наилучшими условиями куттерования являются: время обработки $T_{\text{кут}} = 5,2$ мин, коэффициент заполнения чаши $K_3 = 0,5$, частота вращения чаши $n_{\text{ч}} = 10$ об/мин; при этом предельное напряжение сдвига $\Theta = 632$ Па, прирост температуры $\Delta t = 6,4$ °С и удельный расход энергии на процесс 17 Вт·ч/кг.

Для прямого ножа с внутренними режущими кромками ($\Psi = 0,0278$) наилучшими условиями куттерования являются: время обработки $T_{\text{кут}} = 4,1$ мин, коэффициент заполнения чаши $K_3 = 0,5$, частота вращения чаши $n_{\text{ч}} = 10$ об/мин; при этом предельное напряжение сдвига $\Theta = 638$ Па, прирост температуры $\Delta t = 8$ °С и удельный расход энергии на процесс $21,4$ Вт·ч/кг.

Заключение

На основе разработанной расчетной модели, предложены новые конструкции куттерных ножей (прямой, треугольный и прямой с внутренними режущими кромками).

Получены зависимости удельной энергоемкости процесса куттерования, технологических свойств мясного фарша от режимных и конструктивных особенностей куттера.

На основе статистического анализа процесса тонкого измельчения мясного сырья в куттере поставлена и решена задача оптимизации, позволяющая определить оптимальные режимы куттерования для различных конструкций куттерных ножей.

Результаты сравнительных испытаний серийных и новых конструкций ножей на ОАО «Ошмянский мясокомбинат» доказывают возможность внедрения в производство и правильность выводов, сделанных по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

1. Пелеев, А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности/ А.И. Пелеев. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 519 с.
2. Бакунц, Г.В. Эффективность использования прямых ножей в куттерах/ Г.В. Бакунц, Г.Г. Вартамян // Мясная индустрия СССР. – 1987. – №8. – С. 28-30.
3. Горбатов, А.В. Реология мясных и молочных продуктов/ А.В. Горбатов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
4. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов/ А.А. Соколов [и др.]; под общ. ред. А.А. Соколова. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 496 с.
5. Даурский, А.Н. Резание пищевых материалов / А.Н. Даурский, Ю.А. Мачихин – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.
6. Клименко, М.Н. Развитие теории процесса резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12/ М.Н. Глименко. – М., 1990. – 460 л.
7. 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.
8. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента/ Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 151 с.

Поступила в редакцию 04.05.2006