

УДК 539.375.5

ПОДХОД К РАСЧЁТУ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ОСТРОТЫ НОЖА ПРИ РЕЗАНИИ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Агеев

APPROACH TO COMPUTATION OF MINIMUM ACCEPTABLE KNIFE SHARPNESS DURING FOOD MATERIALS CUTTING

O.V. Ageev

Аннотация. Показана необходимость расчета минимально допустимой остроты ножа при резании пищевых материалов. На основе выражения для силы полезного сопротивления предложены модели для определения размерной и безразмерной минимально допустимой остроты, при которой сохраняется прочность режущей кромки при разрушении структурных волокон продукта. Установлены зависимости безразмерной остроты от структурно-реологических свойств материала, конструктивных и прочностных характеристик ножа, угла боковой подачи и скорости резания. Минимально допустимая острота лезвия немонотонно зависит от угла заточки ножа при углах боковой подачи менее 15° , что демонстрирует существование наилучшего угла заточки, при котором острота является минимальной. Показано, что с увеличением угла боковой подачи и скорости резания безразмерная острота лезвия монотонно возрастает.

Ключевые слова: резание; разрушение; вязкоупругость; острота; лезвие; кромка.

Abstract: The necessity of computation the minimum permissible knife sharpness during food materials cutting has been shown. Based on the expression for the useful resistance force, models for determining the dimensional and dimensionless minimum permissible sharpness at which the cutting edge strength is preserved during the destruction of the product structural filaments have been proposed. The dependences of dimensionless sharpness on the structural and rheological properties of the material, the structural and strength characteristics of the knife, the angle of lateral feed and cutting speed have been established. The minimum permissible sharpness of the blade monotonically depends on the angle of knife sharpening at side feed angles of less than 15° , which demonstrates the existence of the best angle of sharpening at which the sharpness is minimal. It is shown that with an increase in the lateral feed angle and cutting speed, the dimensionless sharpness of the blade monotonously increases.

Key words: cutting; fracture, viscoelasticity, sharpness, blade, edge.

Введение

Конструктивная форма ножа во многом определяет характер резания пищевых материалов и качество поверхности среза. С уменьшением радиуса скругления режущей кромки, называемого остротой ножа, величина силы, необходимой для разрушения волокон, существенно снижается. Данное обстоятельство означает, что при прочих равных условиях для резания продукта к ножу с меньшей остротой фаски потребуется приложить меньшую движущую силу. Таким образом, для обеспечения энергосбережения и повышения качества поверхности среза следует доводить остроту режущего органа до минимально возможного значения. Вместе с тем, очевидно, что заточка лезвия до очень малой остроты ограничена прочностью фаски ножа вблизи ее вершины.

В практической деятельности известны режущие инструменты с остротой порядка нескольких десятков ангстрем. Однако применение лезвия с такой предельно малой остротой в производственных целях при производстве пищевых продуктов представляется нереальным и крайне нежелательным по причине неизбежного разрушения (отламывания) части фаски вследствие ее ограниченной прочности.

В процессе резания линия движения лезвия в материале (направление резания) зачастую отклонена от передней наклонной грани ножа на некоторый угол, называемый углом боковой подачи материала. Это приводит к тому, что возникает изгибающее усилие, действующее на режущую кромку со стороны волокон мышечной ткани, которое может стать причиной отламывания части фаски. Следовательно, лезвие должно иметь некоторую минимально допустимую остроту, удовлетворяющую критерию контактной прочности, при которой не наступает разрушение лезвия. При проектировании режущих органов существует настоятельная необходимость расчета указанного конструктивного параметра ножа.

Исследование геометрических параметров режущих органов технологического оборудования представляет собой актуальное научное направление и является предметом пристального внимания в России и за рубежом. В работе [1] проанализирован процесс погружения дискового ножа в пищевой материал. В статьях [2, 3] выполнено математическое моделирование сил нормального контактного давления на наклонные и боковые грани ножа. В публикации [4] исследован процесс восстановительной деформации материала и образования присоединенной каверны при резании. В работе [5] получены математические модели, позволяющие рассчитать силы сопротивления формы ножа. В работе [6] проанализированы закономерности процесса резания пищевых продуктов и определены реактивные силы сопротивления. В статье [7] установлено влияние угла заточки лезвия на параметры указанного процесса. В работе [8] выполнено численное моделирование процесса разрушения вязкоупругого продукта режущими органами с различной геометрией. В исследовании [9] разработан подход к определению оптимальных форм кромок ножей при скользящем резании. В работе [10] предложена методика оптимизации формы профиля ножа при резании пищевого материала.

Однако, несмотря на ценность известных работ, в настоящее время отсутствует аналитическое решение задачи по определению минимально допустимой остроты ножа при резании пищевых продуктов. Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей рассчитать указанный параметр, а также установить его зависимости от структурно-реологическими свойств продукта, конструктивных характеристик ножа, угла боковой подачи материала и скорости резания.

Математическое моделирование силы, действующей на режущую кромку

Проведем постановку и решение задачи по определению указанной минимально допустимой остроты. Будем считать абсолютно острым ножом такой режущий орган, у которого режущая кромка имеет форму геометрической линии. Нож, который имеет закругление по поверхности, соединяющей передние наклонные грани, будем считать реальным ножом. Рассмотрим абсолютно острый элементарный нож с вершиной O' , имеющий половинный угол заточки α и движущийся в материале с постоянной скоростью v (рис. 1). Угол между передней наклонной гранью и направлением резания, он же угол боковой подачи материала, обозначим ψ_F . Угол между осью ножа и направлением составляет $\psi_F + \alpha$. На режущую кромку абсолютно острого ножа ($\rho = 0$) действует сила полезного сопротивления P_1 , обусловленная поперечным изгибом волокон вязкоупругого слоя.

Из рис. 1 видим, что вектор силы полезного сопротивления \vec{P}_1 направлен под углом $\psi_F + \alpha$ к оси лезвия противоположно вектору скорости ножа \vec{v} . Указанная сила является векторной суммой двух ее составляющих: осевой \vec{P}_1^n , направленной вдоль оси ножа, и перпендикулярной \vec{P}_1^τ , направленной по нормали к указанной оси. Под действием перпендикулярной составляющей \vec{P}_1^τ лезвие испытывает поперечный изгиб. В результате в критическом сечении $a - a$, которое находится на критическом расстоянии y_ρ от вершины режущей кромки, происходит отламывание фаски ножа. Найдем указанное расстояние y_ρ , связанное с

прочностными характеристиками и геометрией лезвия, определяющее критическую остроту ножа ρ_z^{cr} , при которой наступает разрушение части режущей кромки.

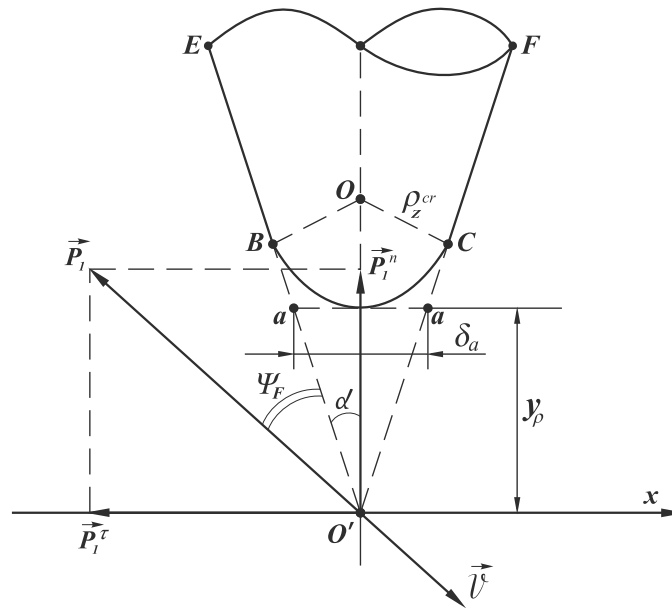


Рис. 1. Схема нагружения фаски ножа силой полезных сопротивлений

Выражения для составляющих силы полезного сопротивления выглядят следующим образом:

$$P_1^\tau = P_1 \cdot \sin(\psi_F + \alpha); \quad (1)$$

$$P_1^n = P_1 \cdot \cos(\psi_F + \alpha). \quad (2)$$

В критическом сечении $a - a$ сила P_1^τ создает изгибающий момент:

$$M_a = P_1^\tau \cdot y_\rho. \quad (3)$$

Определим критическое напряжение изгиба в фаске ножа:

$$\sigma_a = \frac{M_a}{W_a} = \frac{P_1^\tau \cdot y_\rho}{(4 \cdot l_k \cdot \delta_a^2) / 6} = 1,5 \cdot \frac{P_1^\tau \cdot y_\rho}{l_k \cdot \delta_a^2}, \quad (4)$$

где W_a — осевой момент сопротивления фаски в прямоугольном сечении $a - a$; δ_a — половинная толщина фаски в этом же сечении; l_k — длина режущей кромки.

Из рис. 1 следует, что

$$\delta_a = y_\rho \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Подставим (1) и (5) в выражение (4):

$$\sigma_a = 1,5 \cdot \frac{P_1^r \cdot y_\rho}{l_k \cdot y_\rho^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} = 1,5 \cdot \frac{P_1 \cdot \sin(\psi_F + \alpha)}{l_k \cdot y_\rho \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (6)$$

Из (6) выразим расстояние, на котором происходит отламывание части фаски:

$$y_\rho = 1,5 \cdot \frac{P_1 \cdot \sin(\psi_F + \alpha)}{\sigma_a \cdot l_k \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (7)$$

Из рис. 1 также видим, что $\sin \alpha = \frac{\rho_z^{cr}}{\rho_z^{cr} + y_\rho}$, что позволяет выразить критическую

остроту ножа в следующем виде:

$$\rho_z^{cr} = \frac{y_\rho \cdot \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}. \quad (8)$$

Разработана математическая модель, позволяющая определить силу полезного сопротивления резанию в следующем виде [10]:

$$P_1 = \frac{\xi \cdot l_k \cdot h_d^3}{2 \cdot l_a^3} \cdot \left(\frac{e_{01}}{k} \cdot \exp(k \cdot h_{cr}) + h_{cr} - \frac{e_{01}}{k} \right), \quad (9)$$

где E_0 – мгновенный модуль упругости материала (модуль Юнга); E_1 – запаздывающий (высокоэластичный) модуль упругости; η – коэффициент динамической вязкости материала; $e_{01} = E_0/E_1$ – мера эластичности; α – половинный угол заточки передней кромки ножа; l_k – длина режущей кромки ножа; v – скорость ножа; $\xi = \frac{E_0 \cdot E_1}{E_0 + E_1} = \frac{E_0}{1 + e_{01}}$ (длительный модуль

упругости); $k = -\frac{E_0 + E_1}{\eta \cdot v}$; h_{cr} – критическая глубина погружения ножа, при котором происходит разрушение волокон вязкоупругого слоя и начинается собственно процесс резания; h_d – толщина деформируемой вязкоупругой зоны материала; l_m – половинная длина деформируемой вязкоупругой зоны материала.

Подставим в (8) выражения (7) и (9), откуда находим

$$\rho_z^{cr} = 0,75 \cdot \frac{\xi \cdot h_d^3 \cdot \sin(\psi_F + \alpha) \cdot \sin \alpha}{l_m^3 \cdot \sigma_a \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)} \cdot \left(\frac{e_{01}}{k} \cdot \exp(k \cdot h_{cr}) + h_{cr} - \frac{e_{01}}{k} \right). \quad (10)$$

В соответствии с практическими требованиями по изгибной прочности, минимально допустимая острота ножа должна превышать критическую остроту на 5%:

$$\rho_z = 0,7875 \cdot \frac{\xi \cdot h_d^3 \cdot \sin(\psi_F + \alpha) \cdot \sin \alpha}{l_m^3 \cdot \sigma_a \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)} \cdot \left(\frac{e_{01}}{k} \cdot \exp(k \cdot h_{cr}) + h_{cr} - \frac{e_{01}}{k} \right). \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что минимально допустимая острота ножа определяется структурно-реологическими свойствами продукта (E_0 , E_1 , e_{01} , η , h_d , l_m , h_{cr}), характеристиками ножа (α , σ_a), углом боковой подачи материала ψ_F , а также скоростью резания v .

Введем безразмерную глубину погружения режущей кромки, безразмерную скорость резания и безразмерную остроту лезвия:

$$\begin{aligned}\bar{h}_u &= \frac{h}{h_{cr}}; h = \bar{h}_u \cdot h_{cr}; \bar{v}_u = \frac{v}{h_{cr}} \cdot \frac{\eta}{(E_0 + E_1)} = \frac{v}{h_{cr}} \cdot \frac{1}{T_\sigma}; v = \bar{v}_u \cdot \frac{h_{cr} \cdot (E_0 + E_1)}{\eta} = \bar{v}_u \cdot h_{cr} \cdot T_\sigma; \\ \bar{\rho} &= \frac{\rho}{h_{cr}}; \rho = \bar{\rho} \cdot h_{cr}; h_d = \bar{h}_d \cdot h_{cr}; l_m = \bar{l}_m \cdot h_{cr}; l_a = \bar{l}_a \cdot h_{cr},\end{aligned}\quad (12)$$

где $T_\sigma = (E_0 + E_1)/\eta$ – скорость релаксации материала; $1/T_\sigma = \eta/(E_0 + E_1)$ – характерное время релаксации; h_{cr}/v – время погружения режущей кромки ножа на критическую глубину h_{cr} , при которой начинается разрушение волокон материала. Таким образом, безразмерная скорость ножа \bar{v}_u – это отношение характерного времени релаксации материала ко времени начала разрушения материала при погружении лезвия в продукт со скоростью v .

Выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned}k &= -\frac{E_0 + E_1}{\eta \cdot v} = -\frac{(E_0 + E_1) \cdot \eta}{\eta \cdot \bar{v}_u \cdot h_{cr} \cdot (E_0 + E_1)} = -\frac{1}{\bar{v}_u \cdot h_{cr}}; \frac{1}{k} = -\bar{v}_u \cdot h_{cr}; \\ \exp(k \cdot h) &= \exp\left(-\frac{1}{\bar{v}_u \cdot h_{cr}} \cdot \bar{h}_u \cdot h_{cr}\right) = \exp\left(-\frac{\bar{h}_u}{\bar{v}_u}\right); \frac{e_{01}}{k} = -\bar{v}_u \cdot e_{01} \cdot h_{cr}; \frac{e_{01}}{k^2} = \bar{v}_u^2 \cdot e_{01} \cdot h_{cr}^2.\end{aligned}\quad (13)$$

С учетом (12), (13) выразим минимально допустимую остроту ножа из (11) через безразмерные величины:

$$\rho_z = 0,7875 \cdot \frac{\xi \cdot h_d^3 \cdot h_{cr} \cdot \sin(\psi_F + \alpha) \cdot \sin \alpha}{l_m^3 \cdot \sigma_a \cdot \text{tg}^2 \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)} \cdot \left(1 + \bar{v}_u \cdot e_{01} - \bar{v}_u \cdot e_{01} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\bar{v}_u}\right)\right). \quad (14)$$

С учетом обозначения $\rho_z = 0,7875 \cdot \frac{\xi \cdot h_{cr}}{\sigma_a}$ введем безразмерную минимально допустимую остроту ножа:

$$\bar{\rho}_z = \frac{h_d^3 \cdot \sin(\psi_F + \alpha) \cdot \sin \alpha}{l_m^3 \cdot \text{tg}^2 \alpha \cdot (1 - \sin \alpha)} \cdot \left(1 + \bar{v}_u \cdot e_{01} - \bar{v}_u \cdot e_{01} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\bar{v}_u}\right)\right). \quad (15)$$

Результаты моделирования

Разработанная математическая модель (15) позволяет варьировать геометрическими параметрами ножа, структурно-реологическими свойствами продукта и скоростью резания для исследования зависимостей безразмерной минимально допустимой остроты от указанных параметров. На рис. 2 показаны зависимости безразмерной минимально допустимой остроты ножа от безразмерной скорости ножа при различных значениях половинного угла заточки и угла боковой подачи. На рис. 3 изображены зависимости указанной остроты от половинного угла заточки ножа при различных значениях меры эластичности материала и отношения \bar{h}_d/\bar{l}_m , на рис. 4 – при различных значениях безразмерной скорости и угла боковой подачи. На контурном графике рис. 5 представлены зависимости минимально допустимой остроты ножа от половинного угла заточки ножа и угла боковой подачи, на контурном графике рис. 6 – от безразмерной скорости и меры эластичности материала.

Обсуждение результатов

Рис. 2 показывает, что с повышением безразмерной скорости резания минимально допустимая острота лезвия монотонно увеличивается и стремится к предельному значению. Согласно рис. 2,а при значениях меры эластичности материала 5; отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине деформируемого слоя 0,01; угла боковой подачи 10° ; половинного угла заточки 5° ; 8° ; 15° ; 30° предельные значения безразмерной минимально допустимой остроты составляют $1,936 \cdot 10^{-5}$; $1,517 \cdot 10^{-5}$; $1,233 \cdot 10^{-5}$; $1,157 \cdot 10^{-5}$, соответственно. Согласно рис. 2,б при значениях меры эластичности материала 5; отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине деформируемого слоя 0,01; половинного угла заточки 10° ; угла боковой подачи 2° ; 8° ; 15° ; 30° предельные значения безразмерной минимально допустимой остроты составляют $8,428 \cdot 10^{-6}$; $1,253 \cdot 10^{-5}$; $1,713 \cdot 10^{-5}$; $2,606 \cdot 10^{-5}$ соответственно.

Рис. 3 демонстрирует, что зависимость резания минимально допустимой остроты лезвия от половинного угла заточки при определенных значениях угла боковой подачи имеет немонотонный характер с явно выраженными минимумами. Увеличение меры эластичности материала приводит к существенному росту указанной безразмерной остроты, а увеличение отношения \bar{h}_d/\bar{l}_m приводит к ее снижению. Согласно рис. 3,а при значениях безразмерной скорости 50; угла боковой подачи 5° , отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине слоя 0,01; меры эластичности материала 3; 5; 8; 12, значения минимумов безразмерной минимально допустимой остроты составляют $6,571 \cdot 10^{-6}$; $9,849 \cdot 10^{-6}$; $1,476 \cdot 10^{-5}$; $2,132 \cdot 10^{-5}$, соответственно.

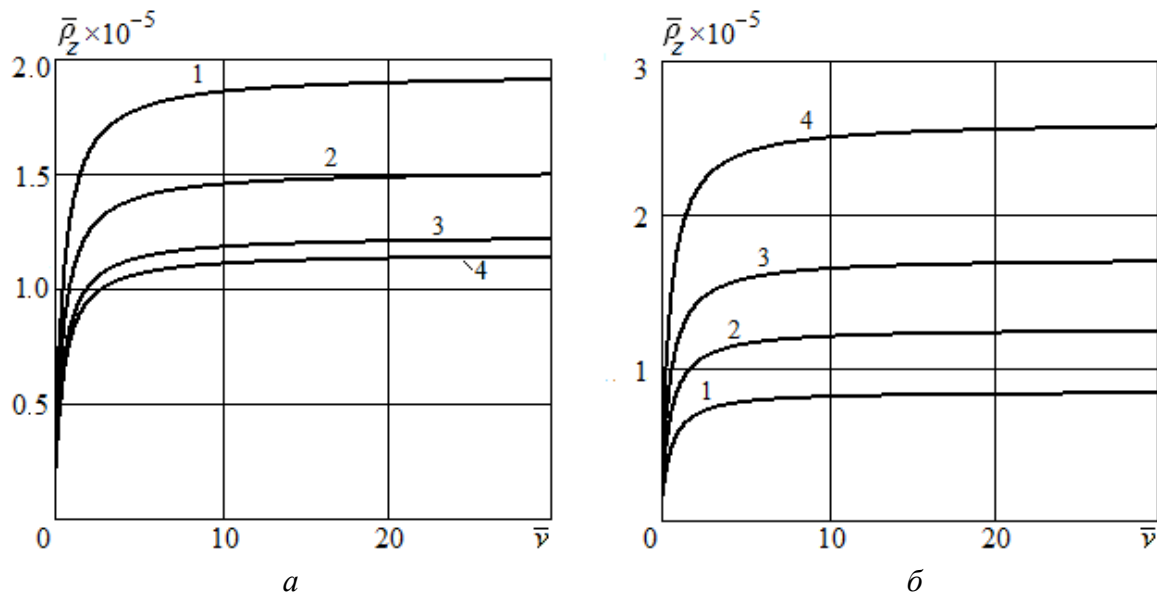


Рис. 2. Зависимость безразмерной минимально допустимой остроты ножа от безразмерной скорости ножа ($e_{01} = 5$; $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$):

а – при различных значениях половинного угла заточки ($\psi_F = 10^\circ$):

1 – $\alpha = 5^\circ$; 2 – $\alpha = 8^\circ$; 3 – $\alpha = 15^\circ$; 4 – $\alpha = 30^\circ$;

б – при различных значениях угла боковой подачи ($\alpha = 10^\circ$):

1 – $\psi_F = 2^\circ$; 2 – $\psi_F = 8^\circ$; 3 – $\psi_F = 15^\circ$; 4 – $\psi_F = 30^\circ$

Согласно рис. 3,б при значениях безразмерной скорости 50; угла боковой подачи 5° , меры эластичности материала 5; отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине

слоя 0,001; 0,005; 0,01; 0,02, значения минимумов безразмерной минимально допустимой остроты составляют $9,849 \cdot 10^{-9}$; $1,231 \cdot 10^{-6}$; $9,849 \cdot 10^{-6}$; $7,879 \cdot 10^{-5}$, соответственно.

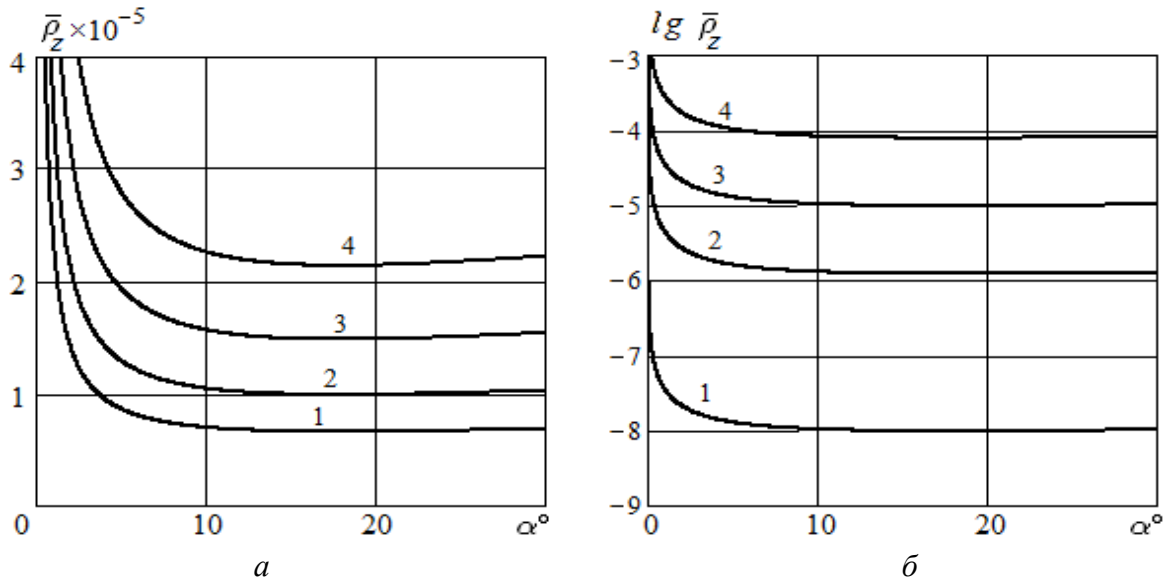


Рис. 3. Зависимость безразмерной минимально допустимой остроты ножа от половинного угла заточки ножа ($\bar{v}_u = 50$; $\psi_F = 5^\circ$):

a – при различных значениях меры эластичности материала ($\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$):

1 – $e_{01} = 3$; 2 – $e_{01} = 5$; 3 – $e_{01} = 8$; 4 – $e_{01} = 12$;

б – при различных значениях отношения \bar{h}_d/\bar{l}_m ($e_{01} = 5$):

1 – $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,001$; 2 – $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,005$; 3 – $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$; 4 – $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,02$

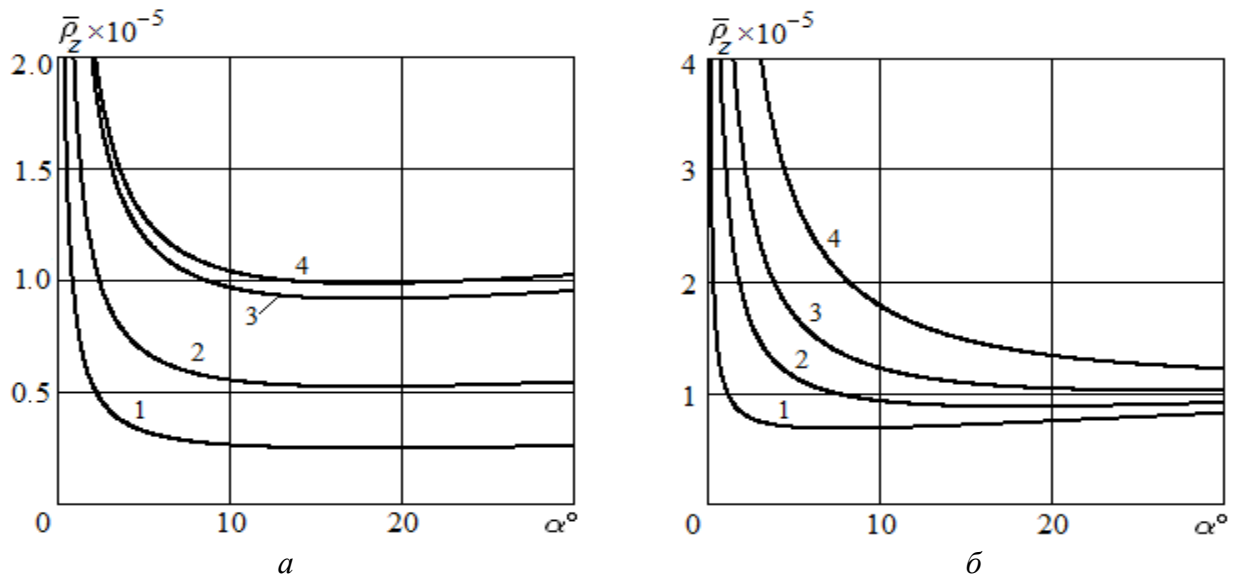


Рис. 4. Зависимость безразмерной минимально допустимой остроты ножа от половинного угла заточки ножа ($e_{01} = 5$; $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$):

a – при различных значениях безразмерной скорости ($\psi_F = 5^\circ$):

1 – $\bar{v}_u = 0,1$; 2 – $\bar{v}_u = 0,5$; 3 – $\bar{v}_u = 3$; 4 – $\bar{v}_u = 50$;

б – при различных значениях угла боковой подачи ($\bar{v}_u = 3$):

1 – $\psi_F = 1^\circ$; 2 – $\psi_F = 5^\circ$; 3 – $\psi_F = 10^\circ$; 4 – $\psi_F = 20^\circ$

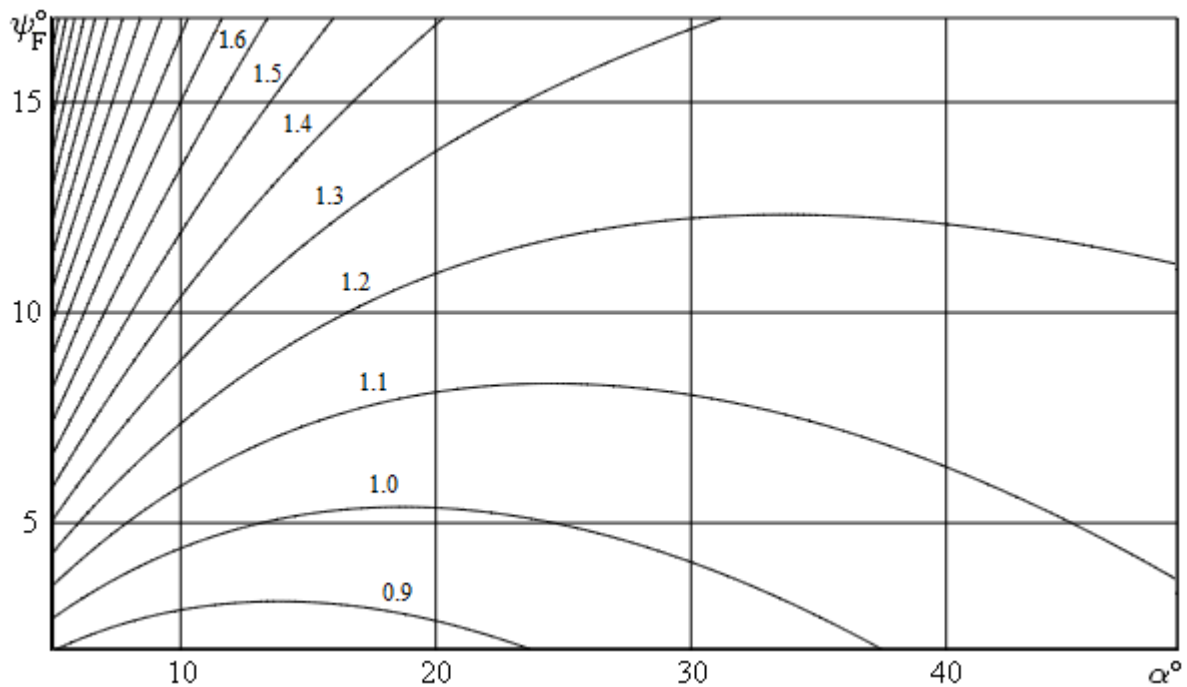


Рис. 5. Зависимость безразмерной минимально допустимой остроты ножа от половинного угла заточки ножа и угла боковой подачи, $\times 10^{-5}$
($\bar{v}_u = 50$; $e_{01} = 5$; $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$)

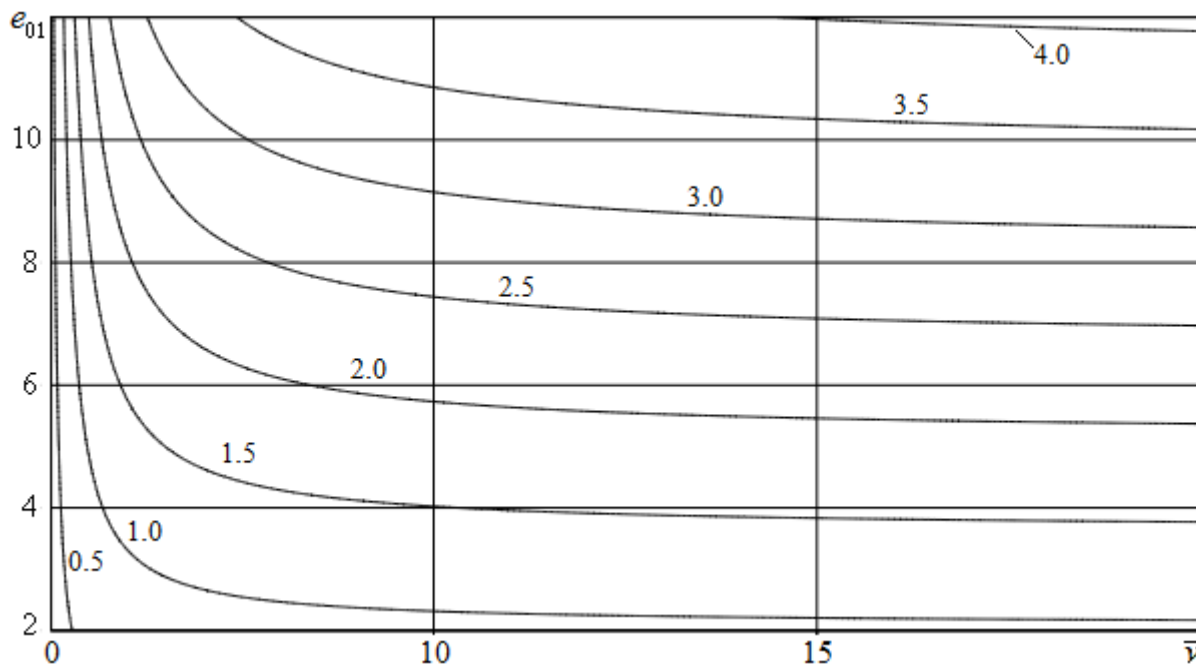


Рис. 6. Зависимость безразмерной минимально допустимой остроты ножа от безразмерной скорости и меры эластичности материала, $\times 10^{-5}$
($\alpha = 5^\circ$; $\psi_F = 10^\circ$; $\bar{h}_d/\bar{l}_m = 0,01$)

Рис. 4 иллюстрирует, что увеличение безразмерной скорости резания и угла боковой подачи приводит к росту минимально допустимой остроты лезвия. Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 4,б, при углах боковой подачи материала выше 15° минимальное значение указанной безразмерной остроты достигается на верхней границе допустимых значений половинного угла заточки ножа. Согласно рис. 4,а при значениях угла

боковой подачи 5° , отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине слоя 0,01; меры эластичности материала 5; безразмерной скорости 0,1; 0,5; 3; 50 значения минимумов безразмерной минимально допустимой остроты составляют $2,483 \cdot 10^{-6}$; $5,233 \cdot 10^{-6}$; $8,693 \cdot 10^{-6}$; $9,849 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Согласно рис. 4,б при значениях безразмерной скорости 3; отношения безразмерной толщины к безразмерной ширине слоя 0,01; меры эластичности материала 5; значениях угла боковой подачи 1° ; 5° ; 10° значения минимумов безразмерной минимально допустимой остроты составляют $7,617 \cdot 10^{-6}$; $9,849 \cdot 10^{-6}$; $1,147 \cdot 10^{-5}$ соответственно.

Контурный график на рис. 5 также показывает немонотонный характер зависимости минимально допустимой остроты лезвия от половинного угла заточки при углах боковой подачи менее 15° . С увеличением угла боковой подачи указанная безразмерная острота монотонно возрастает. Контурный график на рис. 6 демонстрирует монотонные зависимости указанной безразмерной остроты от безразмерной скорости и меры эластичности материала.

Заключение

Разработанные математические модели создают практическую основу для выбора конструктивной остроты режущей кромки, при которой сохраняется целостность режущего органа. Установленные закономерности позволяют научно обоснованно управлять геометрической формой лезвия с целью снижения энергетических потерь при резании пищевых материалов и повышения качества поверхности среза, а также сократить затраты на замену и перезаточку ножей технологического оборудования. Дальнейшим направлением исследований является постановка и решение задачи по определению наилучшего угла заточки ножа, при котором минимальной допустимая острота ножа принимает наименьшее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумов В.А., Агеев О.В., Фатыхов Ю.А. Моделирование процесса погружения дискового ножа в пищевой материал при резании // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. № 2(32). С. 18–28.
2. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А., Самойлова Н.В. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на наклонные грани ножа при резании рыбы // Известия Калининградского государственного технического университета. 2017. № 47. С. 80–96.
3. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на боковые грани ножа при резании пищевых материалов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. № 4. С. 27-42.
4. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование процесса восстановительной деформации материала и образования присоединенной каверны при резании рыбы // Известия Калининградского государственного технического университета. 2018. № 48. С. 61-78.
5. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А., Самойлова Н.В. Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа без боковых граней при резании рыбы // Известия КГТУ. 2019. № 53. С. 75-88.
6. Schuldt S., Schneider Y., Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. Journal of Food Engineering. 2018. No. 230, pp. 55-62.
7. Spagnoli A, Brighenti R, Terzano M, Artoni F. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019. No. 101, pp. 200-206.

8. Pagani M, Perego U. Explicit dynamics simulation of blade cutting of thin elastoplastic shells using «directional» cohesive elements in solid-shell finite element models. *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*. 2015. No. 285, pp. 515-541.
9. Atkins T. Prediction of sticking and sliding lengths on the rake faces of tools using cutting forces. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. No. 91, pp. 33-45.
10. Агеев О.В., Фатыхов Ю.А., Иванова Е.Е. Оптимизация формы профиля ножа для ресурсосберегающей первичной обработки рыбы // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2020. № 1 (373). С. 77-80.

REFERENCES

1. Naumov V.A., Ageev O.V., Fatykhov Yu.A., *Modelirovanie protsessa pogruzheniya diskovogo nozha v pishchevoi material pri rezanii* [Simulation of an elementary knife immersion depth into a material at cutting of fish]. *Processy i apparaty pishhevyykh proizvodstv*. 2017. No. 2(32), pp. 18-28.
2. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samoilo N.V. *Matematicheskoe modelirovanie sil normal'nogo kontaktnogo davleniya na naklonnye grani nozha pri rezanii ryby* [Mathematical simulation of forces of normal contact pressure of inclined knife edges during fish processing]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. No. 47, pp. 80-96.
3. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie sil normal'nogo kontaktnogo davleniya na bokovye grani nozha pri rezanii pishhevyykh materialov* [Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on side knife edges during cutting of food materials]. *Processy i apparaty pishhevyykh proizvodstv*. 2017. No. 4(34), pp. 27-42.
4. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie processa vosstanovitel'noj deformatsii materiala i obrazovaniya prisoedinennoj kaverny pri rezanii ryby* [Mathematical simulation of the material strain recovery process and attached cavity formation while cutting the fish]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018. No. 48, pp. 61-78.
5. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samoilo N.V. *Matematicheskoe modelirovanie sily soprotivleniya formy dvukhkromochnogo nozha bez bokovykh graney pri rezanii ryby* [Mathematical simulation of profile resistance force of double-edged knife without side edges during fish cutting]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2019. No. 53, pp. 75-88.
6. Schuldt S, Schneider Y, Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. *Journal of Food Engineering*. 2018, No. 230, pp. 55-62.
7. Spagnoli A, Brighenti R, Terzano M, Artoni F. Cutting resistance of soft materials: effects of blade inclination and friction. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019. No. 101, pp. 200-206.
8. Pagani M., Perego U. Explicit dynamics simulation of blade cutting of thin elastoplastic shells using «directional» cohesive elements in solid-shell finite element models. *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*. 2015. No. 285, pp. 515-541.
9. Atkins T. Prediction of sticking and sliding lengths on the rake faces of tools using cutting forces. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015. No. 91, pp. 33-45.
10. Ageev O.V., Fatykhov Yu.A., Ivanova E.E. *Optimizatsiya formy profilya nozha dlya resursosberegayushchey pervichnoy obrabotki ryby* [Optimization of the knife profile for resource-saving primary fish processing]. *News of institutes of higher education. Food technology*. 2020. No. 1(373), pp. 77-80.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Агеев Олег Вячеславович

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пищевых и холодильных машин, член-корреспондент Международной академии холода,

E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Ageev Oleg Viacheslavovich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, Associate Professor of Food and Refrigerating Mashines Department, Candidate of Technical Science, Member of International academy of refrigeration,

E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
236022, Калининград, Советский пр., 1, КГТУ, ГУК, каб. 245. Агеев О.В.