

УДК 621.565:664.95

## Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа при резании охлажденной рыбы

Канд. техн. наук **О. В. АГЕЕВ**<sup>1</sup>, д-р техн. наук **В. А. НАУМОВ**,  
д-р техн. наук **Ю. А. ФАТЫХОВ**

<sup>1</sup>oleg.ageev@klgtu.ru

Калининградский государственный технический университет

*Описаны реологические свойства мышечной ткани рыбы с помощью модели Максвелла-Томсона. На основе энергетического подхода сила сопротивления формы двухкромочного ножа интерпретирована как деформационная сила трения на макроскопическом масштабном уровне при условии гладкости поверхности граней. С использованием нормальных контактных давлений на наклонные грани разработаны математические модели для размерной и безразмерной сил сопротивления формы двухкромочного ножа. Установлена зависимость размерной силы от реологических свойств охлажденной рыбы. Показано, что использование двухкромочного ножа обеспечивает существенное снижение сил вредных сопротивлений и сокращение энергетических затрат на резание рыбы при низких температурах с условием монотонности изменения реологических характеристик мышечной ткани. Зависимость силы от скорости резания является немонотонной с явно выраженным максимумом. Безразмерная сила сопротивления определена как составляющая размерной силы, характеризующая высокоэластичную составляющую относительной деформации. Показана зависимость безразмерной силы от безразмерной скорости резания и меры эластичности мышечной ткани. При длинах боковой грани 34; 103; 171; 240 мм максимумы силы составляют 0,464; 0,551; 0,583; 0,601 Н, соответственно. При значениях мгновенного модуля упругости 1,5·10<sup>5</sup>; 2·10<sup>5</sup>; 2,5·10<sup>5</sup>; 3·10<sup>5</sup> Н/м<sup>2</sup>, максимумы указанной силы составляют 0,538; 0,719; 0,899; 1,080 Н, соответственно. При безразмерных длинах ножа 1,5; 3; 5; 8 максимум безразмерной силы составляет 0,931; 1,124; 1,218; 1,280, соответственно. При значениях меры эластичности 2; 4; 8; 15 максимумы безразмерной силы составляют 1,124; 1,902; 3,458; 6,176, соответственно.*

**Ключевые слова:** рыба, резание, сила, сопротивление, форма, нож, грань, реология, вязкоупругость.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.02.2019, принята к печати 09.04.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-62-71

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Агеев О. В., Наумов В. А., Фатыхов Ю. А. Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа при резании охлажденной рыбы // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 62–71.

## Mathematical simulation of profile resistance force for double-edged knife during chilled fish cutting

Ph. D. **O. V. AGEEV**<sup>1</sup>, D. Sc. **V. A. NAUMOV**, D. Sc. **J. A. FATYKHOV**

<sup>1</sup>oleg.ageev@klgtu.ru

Kaliningrad State Technical University

*The rheological properties of fish muscular tissue are described by Maxwell-Thomson model. On the basis of the energy approach the profile resistance force of double-edged knife has been interpreted as deformational force of friction at the macroscopic scale level provided that the surfaces of the faces are smooth. Using the normal contact pressures on the inclined faces, mathematical models for dimensional and dimensionless profile resistance forces of the double-edged knife has been developed. The dependence of the dimensional force on the rheological properties of chilled fish has been established. It has been shown, that the use of double-edged knife provides a significant reduction of the harmful resistances forces and a reduction of the energy consumption during fish cutting at low temperatures with the monotony changes of the muscle tissue rheological characteristics. The dependence of the force on the cutting speed is non-monotonic with a pronounced maximum. The dimensionless force has been defined as a component of the dimensional force, which characterizes the highly-elastic component of the relative deformation. The dependence of the dimensionless force on the dimensionless cutting speed and measure of the muscle tissue elasticity has been shown. With side edge lengths of 34; 103; 171; and 240 mm force maximums are 0.464; 0.551; 0.583; and 0.601 N, respectively. When the values of instantaneous modulus of elasticity are 1.5·10<sup>5</sup>; 2·10<sup>5</sup>; 2.5·10<sup>5</sup>; and 3·10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> the maximums of the specified force are*

0.538; 0.719; 0.899; and 1.080 N, respectively. With dimensionless knife lengths of 1.5; 3; 5; and 8 maximum dimensionless force is 0.931; 1.124; 1.218; and 1.280, respectively. With the values of elasticity measure of 2; 4; 8; and 15 dimensionless force maximums are 1.124; 1.902; 3.458; and 6.176, respectively.

**Keywords:** fish, cutting, force, resistance, profile, knife, edge, rheology, viscoelasticity.

#### Article info:

Received 10/02/2019, accepted 09/04/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-62-71

Article in Russian

#### For citation:

Ageev O. V., Naumov V. A., Fatykhov J. A. Mathematical simulation of profile resistance force for double-edged knife during chilled fish cutting. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 2. p. 62–71.

### Введение

В настоящее время резание охлажденной рыбы является основным технологическим процессом при первичной обработке сырья. Резание осуществляется ножами различных видов, которые приводятся в движение автоматизированным электроприводом. От величины механического воздействия на мышечную ткань рыбы существенно зависит качество готовой продукции, поскольку при силовых нагрузках снижается влагоудерживающая способность материала, теряется эластичность и прочность тканей, возрастают потери массы при хранении, увеличивается содержание азота летучих оснований, ухудшаются органолептические оценки качества мяса. Вместе с вытекающим мышечным соком при холодильной обработке рыбы теряются вкусовые и питательные вещества (белки, азотистые и минеральные вещества). Для обеспечения ресурсосбережения при резании рыбы необходимо тщательно проанализировать силы, приложенные к лезвию со стороны объекта обработки.

Оптимизация характеристик режущих рабочих органов с точки зрения снижения сопротивления определяется мерами, направленными на снижение одной или нескольких его составляющих [1]. Для обеспечения ресурсосбережения необходимо минимизировать силы полезного и вредного сопротивлений. Выбору метода снижения силы вредного сопротивления должен предшествовать анализ ее составляющих — силы сопротивления формы и силы трения [2]. Перечисленные составляющие являются определяющими силами для всех типов ножей.

В связи с этим, математическое моделирование процесса разрушения пищевых материалов режущей кромкой и исследование сил сопротивлений является актуальным научным направлением и привлекает внимание исследователей. Изучению закономерностей резания пищевых продуктов с вязкоупругими свойствами посвящен ряд научных работ в России и за рубежом. В работах [3, 4] установлена экспериментальная зависимость между силой сопротивления разрушения волокнистого материала и скоростью движения ножа. В статье [5] проанализировано влияние угла заточки лезвия на параметры указанного процесса. В работе [6] исследованы закономерности высокоскоростной обработки вязкоупругих материалов в широком диапазоне скоростей: от 0,001 м/с до 10 м/с. Статья [7] описывает конечно-элементное моделирование процесса разрушения вязкоупругого продукта. Авторами

работ [8, 9] показан подход к определению оптимальной геометрии ножа путем минимизации нормальной составляющей результирующего сопротивления (максимизации «скользящего» резания).

Однако, несмотря на ценность известных работ, в настоящее время отсутствует аналитическое описание сил вредных сопротивлений, действующих на рабочий орган при резании охлажденной рыбы, а также недостаточно исследована их зависимость от температуры сырья. Вместе с тем для оптимизации геометрии ножа по критерию минимального сопротивления резанию необходимо математическое моделирование сил, действующих на его грани.

В работах [10, 11] обоснован выбор реологических моделей мышечной ткани рыбы. Рассмотрены дифференциальные уравнения моделей с их решениями для трех различных условий нагружения. Изложены результаты экспериментальных испытаний мышечной ткани ставриды, скумбрии, сардинеллы атлантической на прямую ползучесть, релаксацию и обратную ползучесть. Установлено, что мышечная ткань рыбы до разрушения проявляет ограниченное свойство текучести под нагрузкой, релаксирует при постоянной нагрузке до равновесного состояния, полностью восстанавливается при полной разгрузке. Показано, что результатам проведенных экспериментальных испытаний приближенно соответствует трехэлементная реологическая модель Максвелла — Томсона (стандартное вязкоупругое тело). Модель Бюргерса более точно описывает кинетику деформации и напряжения в ограниченных периодах времени нагружения, однако в целом расходится с результатами экспериментов.

В работе [12] показано, что физико-механические свойства рыбы существенно зависят от температуры. Таким образом, параметры вышеуказанных реологических моделей являются переменными величинами, влияющими на силу сопротивления резанию. Установлено, что с понижением температуры рыбного сырья, значения модулей упругости и коэффициента динамической вязкости мышечной ткани заметно возрастают [12]. Это объясняется усилением связей в воднобелково-солевых прослойках в результате увеличения вязкости растворителя, ростом внутримолекулярного и межмолекулярного взаимодействия, а также упрочнением кристаллов жира и увеличением плотности тканевых соков. Отметим, что указанная зависимость справедлива при монотонном изменении реологических параметров сырья и отсутствии переходных явлений в области криоскопической температуры.

### Постановка задачи

Целью математического моделирования является определение силы сопротивления формы двухкромочного ножа, возникающей при резании охлажденной рыбы, а также установление ее зависимостей от реологических параметров сырья и геометрии ножа.

Согласно современным представлениям трибологии [13, 14] интерпретируем силу сопротивления формы как деформационную силу трения на макроскопическом масштабном уровне. На этом уровне следует решать задачу определения силы трения скольжения штампа (ножа как абсолютно твердого гладкого тела), внедренного в деформированный вязкоупругий материал (разрезанную мышечную ткань рыбы). На этом уровне шероховатость поверхности ножа не учитывается, поскольку определяющей является геометрическая форма профиля лезвия.

На микроскопическом уровне при определении сил трения учитывается шероховатость поверхности ножа, в связи с чем, на данном уровне следует решать задачу определения деформационной силы трения при скольжении штампа другого вида по деформируемому вязкоупругому материалу с учетом образования микроскопических менисков жидкости в области контакта.

Задачу нахождения деформационной силы трения при скольжении ножа по вязкоупругому материалу на макроскопическом уровне (силы сопротивления формы) целесообразно решать на основе энергетического подхода. Такой подход является наиболее общим и основан на определении потерь энергии, обусловленных вязкоупругой деформацией материала. Энергетический подход подробно рассмотрен в работах [15, 16], которые отличаются ясностью постановки и конструктивными результатами. Указанный подход справедлив для штампа произвольной формы, что позволяет применять его к ножам с различными профилями.

### Математическое моделирование

Согласно энергетическому подходу, при скольжении штампа, диссипация энергии в вязкоупругом материале происходит за счет вязкого трения в демпфере элемента Кельвина — Фойгта модели Максвелла — Томсона [10]. Воспользуемся результатами работ [15, 16] для определения силы сопротивления формы ножа при резании рыбы.

В [15] удельная деформационная сила трения штампа при скольжении по вязкоупругому основанию определена в следующем виде:

$$F = \int_a^b [g'(y) \cdot p(y)] dy + \frac{1}{2 \cdot E_0} \cdot [p^2(b) - p^2(a)], \quad (1)$$

где  $p(y)$  — нормальное контактное давление на штамп со стороны материала;  $g(y)$  — функция, определяющая геометрию штампа (форму профиля ножа);  $g'(y)$  — производная указанной функции;  $a, b$  — координаты по оси  $(O, y)$  крайних точек штампа произвольной формы;  $E_0$  — мгновенный модуль упругости материала (модуль Юнга). Функция  $g(y)$  определяет разность координат точки профиля штампа с координатой  $y$  и точки профиля с нулевой координатой, так что  $g(0)=0$ .

Таким образом, на основе уравнения (1) представляется возможным определить силу сопротивления формы, используя величину нормального контактного давления материала в точках соответствующей грани лезвия. Применим данное уравнение для определения силы сопротивления формы двухкромочного ножа.

Для этого рассмотрим движение в мышечной ткани рыбы элементарного ножа, изображенного на рис. 1. Центр подвижной декартовой системы координат помещим в точку  $O$ .

В квазистатической постановке считаем, что в любой момент времени нож находится в состоянии равновесия. При резании лезвие совершает в материале прямолинейное равномерное движение. Материал находится в условиях стесненного сжатия по оси  $Ox$ , а резание осуществляется без сжатия материала в направлении движения ножа по оси  $Oy$  (высота образца материала много больше его ширины). На рис. 1 обозначены:  $\vec{p}_2$  — нормальное контактное давление горизонтального элементарного волокна  $dy$  в точке  $A$  передней наклонной грани ножа (нормальное к направлению движения ножа);  $\vec{q}_2$  — встречное сопротивление материала движению точки  $A$ , обусловленное деформацией указанного волокна по оси  $Ox$ ;  $\vec{\sigma}_2$  — контактное давление материала на переднюю наклонную грань в точке  $A$ ,  $\vec{p}_3$  — нормальное контактное давление на боковую грань ножа со стороны элементарного волокна  $dy$ ;  $\vec{p}_5$  — нормальное контактное давление горизонтального элементарного волокна  $dy$  в точке  $I$  задней наклонной грани ножа;  $\vec{q}_5$  — попутное контактное давление в точке  $I$  задней наклонной грани

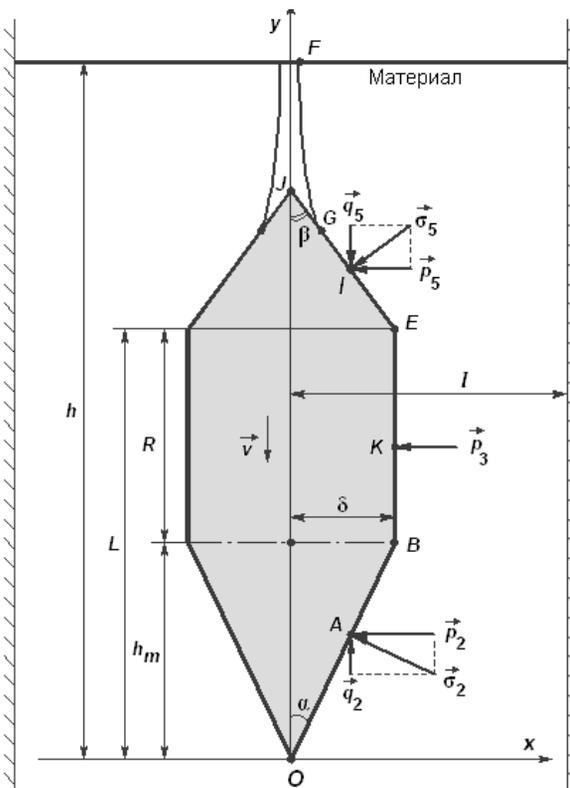


Рис. 1. Схема движения двухкромочного ножа при резании охлажденной рыбы  
Fig. 1. The scheme of double-edged knife movement during chilled fish cutting

ножа;  $\vec{\sigma}_5$  — контактное давление материала на заднюю наклонную грань в точке  $I$ .

Введем следующие обозначения:  $E_0$  — мгновенный модуль упругости мышечной ткани рыбы (модуль Юнга);  $E_1$  — запаздывающий (высокоэластический) модуль упругости мышечной ткани рыбы;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости мышечной ткани рыбы;  $e_{01}=E_0/E_1$  — мера эластичности мышечной ткани рыбы;  $l_k$  — длина кромки лезвия;  $L$  — высота ножа;  $\delta$  — половинная толщина ножа;  $\alpha$  — половинный угол заточки передней кромки ножа;  $\beta$  — половинный угол заточки задней кромки ножа;  $h_m$  — высота передней наклонной грани;  $l$  — ширина материала;  $v$  — скорость ножа;

$$\xi = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} = \frac{E_0}{1 + E_0 / E_1} \text{ — квазистатический модуль}$$

$$\text{упругости; } k = -\frac{E_0 + E_1}{\eta v}; \mu = 1 - \exp\left(\frac{k\delta}{\text{tg}\alpha}\right);$$

$$\chi = \frac{\xi \cdot \eta \cdot v \cdot \mu \cdot \text{tg}\alpha}{E_1^2 \delta}; \tau = 1 + \chi \cdot \exp\left[k\left(L - \frac{\delta}{\text{tg}\alpha}\right)\right];$$

$\hat{F}_1$  — размерная сила сопротивления формы ножа;

$\bar{F}_1$  — безразмерная сила сопротивления формы.

Правая половина двухкромочного (обуюдоострого) ножа (рис. 1) имеет две крайние контактные точки: точку  $O(0,0)$  и точку  $G(\delta - y_G/\text{tg}\beta, y_G)$ , а также две угловые точки  $B(\delta, h_m)$  и  $E(\delta, L)$ . Таким образом, в выражении (1)  $a=0, b=y_G$ . В связи с этим, сила сопротивления формы двухкромочного ножа согласно (1) определяется следующим выражением:

$$\hat{F}_1 = l_k \cdot \left( \int_0^{y_G} \hat{g}'(y) \cdot p(y) dy + \frac{1}{2 \cdot E_0} \cdot [p^2(0) - p^2(y_G)] \right). \quad (2)$$

Запишем граничные условия контакта ножа с материалом в следующем виде:

$$p(0) = 0; p(y_G) = 0. \quad (3)$$

Представим интеграл в выражении (2) в виде суммы интегралов. Тогда с учетом (3) выражение (2) имеет следующий вид:

$$\hat{F}_1 = l_k \cdot \left( \int_0^{h_m} \hat{g}'(y) \cdot p_2(y) dy + \int_{h_m}^L \hat{g}'(y) \cdot p_3(y) dy + \int_L^{y_G} \hat{g}'(y) \cdot p_5(y) dy \right). \quad (4)$$

Форма профиля двухкромочного ножа с задней на-

клонной гранью определяет вид функции  $\hat{g}(y)$ :

$$\hat{g}(y) = \begin{cases} \text{tg}\alpha \cdot y, & y \in (0, h_m) \\ \delta, & y \in (h_m, L) \\ -y \cdot \text{tg}\beta, & y \in (L, y_G). \end{cases} \quad (5)$$

Следовательно,

$$\hat{g}'(y) = \begin{cases} \text{tg}\alpha, & y \in (0, h_m) \\ 0, & y \in (h_m, L) \\ -\text{tg}\beta, & y \in (L, y_G). \end{cases} \quad (6)$$

С учетом (6) получим из (4):

$$\hat{F}_1 = l_k \cdot \left( \int_0^{h_m} (\text{tg}\alpha \cdot p_2(y)) dy - \int_L^{y_G} (\text{tg}\beta \cdot p_5(y)) dy \right). \quad (7)$$

Подставим в выражение (7) выражения для нормальных контактных давлений  $p_2(y)$  и  $p_5(y)$  на переднюю и заднюю наклонные грани и координаты  $y_G$  крайней точки контакта  $G$ , полученные в работах [17, 18] путем последовательного решения дифференциального уравнения первого порядка модели Максвелла–Гомсона в областях  $OB, BE, EG$ :

$$\hat{F}_1 = \frac{l_k \xi \text{tg}^2 \alpha}{l} \cdot \int_0^{h_m} \left\{ y + \frac{\xi \eta v}{E_1^2} \cdot (1 - \exp(ky)) \right\} dy - \frac{l_k \xi \text{tg}^2 \beta}{l} \cdot \int_L^{y_G} \left\{ h_\beta \chi \exp(kR) - \frac{e_{01}}{k} + L \right\} \exp(k[y - L]) - y + h_\beta + \frac{e_{01}}{k} dy. \quad (8)$$

Используем формулу Ньютона — Лейбница и получим выражение для силы сопротивления формы двухкромочного ножа:

$$\hat{F}_1 = \frac{l_k \xi \text{tg}^2 \alpha}{l} \cdot \left\{ \frac{h_m^2}{2} + \frac{\xi \eta v}{E_1^2} \cdot \left( h_m + \frac{1 - \exp(kh_m)}{k} \right) \right\} - \frac{l_k \xi \text{tg}^2 \beta}{l} \cdot \left\{ \frac{h_\beta (\tau - 1) - \frac{e_{01}}{k} + L}{k} \cdot (\exp(k[y_G - L]) - 1) + \left( h_\beta + \frac{e_{01}}{k} \right) (y_G - L) - \frac{y_G^2 - L^2}{2} \right\}. \quad (9)$$

Введем безразмерную скорость ножа  $\bar{v}$ :

$$\bar{v} = \frac{v}{h_m} \cdot \frac{\eta}{(E_0 + E_1)} = \frac{v}{h_m} \cdot \frac{1}{T_\sigma};$$

$$v = \bar{v} \frac{h_m \cdot (E_0 + E_1)}{\eta} = \bar{v} \cdot h_m \cdot T_\sigma. \quad (10)$$

где  $T_\sigma = (E_0 + E_1)/\eta$  — скорость релаксации материала;  $1/T_\sigma = \eta/(E_0 + E_1)$  — характерное время релаксации;  $h_m/v$  — время контакта элементарного волокна  $dy$  с наклонной гранью высотой  $h_m$  при движении ножа в материале со скоростью  $v$ . Безразмерная скорость ножа — это

отношение характерного времени релаксации материала ко времени контакта горизонтального элементарного волокна с наклонной гранью ножа.

Выполнив промежуточные преобразования, выразим силу сопротивления формы двухкромочного ножа через безразмерную скорость ножа  $\bar{v}$ :

$$\hat{F}_1 = \frac{\delta^2 l_k \xi}{l} \cdot \left[ \frac{1}{2} + \bar{v} (1 + (\exp(-1/\bar{v}) - 1)\bar{v}) e_{01} \right] - \frac{1}{t_{\alpha\beta}^2} \cdot \left\{ e_{01} \cdot \bar{v} \cdot t_{\alpha\beta} \cdot \left[ \exp\left(\frac{-1}{\bar{v}}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{R_0}{\bar{v}}\right) - e_{01} \bar{v} - \bar{L} \right\} \cdot \left[ \exp\left(\frac{\bar{L} - \bar{y}_G}{\bar{v}}\right) - 1 \right] \bar{v} + \left( t_{\alpha\beta} - e_{01} \bar{v} \right) \left( \bar{y}_G - \bar{L} \right) - \frac{\bar{y}_G^2 - \bar{L}^2}{2} \right\}. \quad (11)$$

Тогда, с учетом  $\hat{F}_1 = F_0 \cdot \bar{F}_1$ ;  $F_0 = (\delta^2 l_k \xi)/l$ ;

$\xi = E_0/(1 + e_{01})$  выражение для безразмерной силы сопротивления формы двухкромочного ножа имеет следующий вид:

$$\bar{F}_1 = \hat{F}_1/F_0 = \left[ 0,5 + \bar{v} e_{01} \cdot (1 + (\exp(-1/\bar{v}) - 1)\bar{v}) \right] - \frac{1}{t_{\alpha\beta}^2} \left\{ [t_{\alpha\beta} (1 - \tau) - e_{01} \bar{v} - \bar{L}] \left[ \exp\left(\frac{\bar{L} - \bar{y}_G}{\bar{v}}\right) - 1 \right] \bar{v} + (t_{\alpha\beta} - e_{01} \bar{v}) (\bar{y}_G - \bar{L}) - \frac{\bar{y}_G^2 - \bar{L}^2}{2} \right\}. \quad (12)$$

Разработанные математические модели (9), (12) позволяют варьировать размерной и безразмерной скоростями ножа, реологическими характеристиками материала, половинными углами заточки кромок и половинными толщинами ножа для исследования зависимостей размерных и безразмерных сил сопротивления формы от указанных параметров. Ниже приведены результаты математического моделирования сил сопротивления формы двухкромочного ножа.

### Результаты и обсуждение

Результат математического моделирования интерпретирован графически. На рис. 2 показаны зависимости силы сопротивления формы двухкромочного ножа от скорости движения ножа в материале при различных реологических свойствах рыбы. На рис. 3 приведены зависимости силы от скорости резания при различных половинных углах заточки задних наклонных граней. На рис. 4 показано влияние длины боковой грани ножа и коэффициента динамической вязкости материала на зависимость силы сопротивления формы от скорости резания, на рис. 5 — влияние мгновенного и запаздывающего модулей упругости. На рис. 6 изображены зависимости безразмерной координаты крайней точки контакта  $G$  и безразмерной силы сопротивления формы двухкромочного ножа от безразмерной скорости резания при различных значениях безразмерной длины ножа,

на рис. 7 — при различных значениях отношения тангенсов углов заточки и меры эластичности. На рис. 8 изображены зависимости безразмерной силы сопротивления формы от безразмерной скорости и меры эластичности.

Проанализируем влияние различных параметров на размерную и безразмерную силы сопротивления формы двухкромочного (обоюдоострого) ножа. Как видно из представленных на рис. 2 графиков, с увеличением скорости указанная сила возрастает до определенного максимума, после чего снижается и асимптотически стремится к нулевому значению. Рис. 2 показывает, что с монотонным ростом упругих и вязких свойств материала (увеличением жесткости и снижением эластичности рыбы) максимум силы существенно увеличивается и достигается при очень малых скоростях резания. При дальнейшем повышении скорости ножа, кривые линии пересекаются, а характер зависимости силы от реологических характеристик рыбы меняется на противоположный — с монотонным увеличением жесткости материала, сила снижается. Это позволяет заключить, что при наличии у ножа задних наклонных граней обеспечивается существенное снижение силы сопротивления и затрат энергии при резании.

Немонотонные зависимости силы от скорости резания могут быть объяснены в соответствии со следующими представлениями о преобразовании вязкоупругой энергии материала в кинетическую энергию ножа. При раздвижении материала передними наклонными гранями (фаской) ножа в деформированной мышечной ткани рыбы аккумулируется вязкоупругая энергия. После контакта материала с боковыми гранями и релаксации напряжений указанная энергия, за вычетом тепловых потерь, преобразуется в механическую энергию за счет обратной ползучести материала, контактирующего с задними наклонными гранями ножа на участке  $EG$ . Таким образом, на задние наклонные грани при резании действует вязкоупругая реактивная сила, направленная попутно с движением ножа, что приводит к существенному

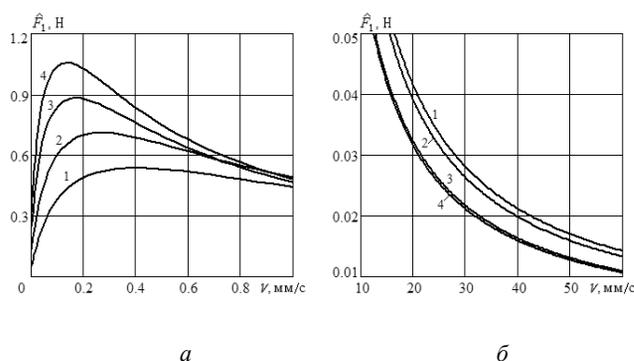


Рис. 2. Зависимость силы сопротивления формы двухкромочного ножа от скорости резания при различных реологических свойствах материала ( $\alpha = 5^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$ ;  $\delta = 3$  мм;  $l = 50$  мм;  $L = 120$  мм): а — при малых скоростях резания; б — при больших скоростях резания. 1 —  $E_0 = 1,5 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $E_1 = 0,1 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>; 2 —  $E_0 = 2 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $E_1 = 0,3 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>; 3 —  $E_0 = 2,5 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $E_1 = 0,6 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>; 4 —  $E_0 = 3 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $E_1 = 0,8 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>

Fig. 2. Dependence of the resistance force of the double-edged knife profile on the cutting speed at different rheological properties of the material ( $\alpha = 5^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$ ;  $\delta = 3$  mm;  $l = 50$  mm;  $L = 120$  mm): а — at low cutting speeds; б — at high cutting speeds

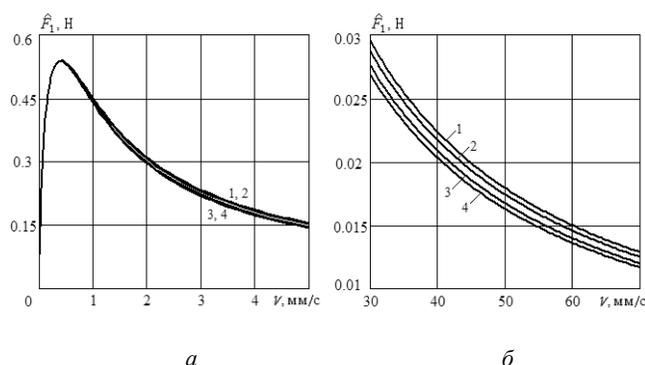


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления формы от скорости резания при различных половинных углах заточки  $\beta$  задней наклонной грани ( $E_0=1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $e_{01}=15$ ;  $\delta=3 \text{ мм}$ ): а — при малых скоростях резания; б — при больших скоростях резания. 1 —  $\beta=5^\circ$ ; 2 —  $\beta=7^\circ$ ; 3 —  $\beta=15^\circ$ ; 4 —  $\beta=50^\circ$

Fig. 3. The dependence of the profile resistance force on the cutting speed at different sharpness half-angle  $\beta$  of the back inclined edge ( $E_0=1.5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $e_{01}=15$ ;  $\delta=3 \text{ mm}$ ): а — at low cutting speeds; б — at high cutting speeds

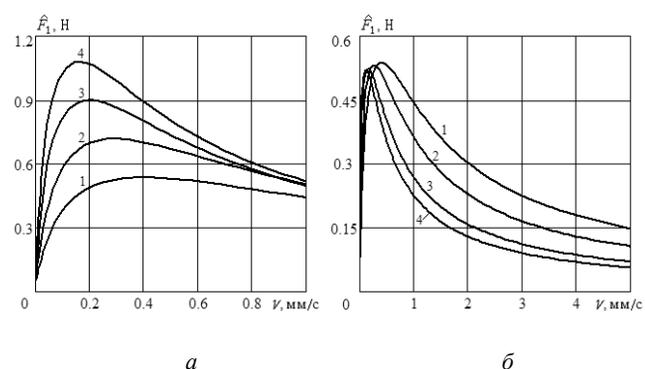


Рис. 5. Зависимость силы сопротивления формы от скорости резания при различных значениях модулей упругости материала ( $\delta=3 \text{ мм}$ ;  $\alpha=5^\circ$ ;  $\eta=2,5 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ) а — при различных значениях мгновенного модуля упругости: 1 —  $E_0=1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 2 —  $E_0=2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 3 —  $E_0=2,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 4 —  $E_0=3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; б — при различных значениях запаздывающего модуля упругости: 1 —  $E_1=0,1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 2 —  $E_1=0,3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 3 —  $E_1=0,6 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ; 4 —  $E_1=0,8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$

Fig. 5. The dependence of the profile resistance force on the cutting speed at different values of elasticity modulus ( $\delta=3 \text{ mm}$ ;  $\alpha=5^\circ$ ;  $\eta=2.5 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ) а — at different values of the instantaneous elasticity modulus: 1 —  $E_0=1.5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 2 —  $E_0=2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 3 —  $E_0=2.5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 4 —  $E_0=3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; б — at different values of the delayed elasticity modulus: 1 —  $E_1=0.1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 2 —  $E_1=0.3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 3 —  $E_1=0.6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ; 4 —  $E_1=0.8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

снижению результирующей силы сопротивления формы. Вместе с тем, как показывают результаты моделирования, указанная результирующая сила теоретически не может достигать нулевого значения вследствие невозможности полного контакта материала с задними наклонными гранями, что является следствием релаксации напряжений при контакте материала с гранями ножа. Это предполагает формирование в материале присоединенной каверны (участок  $GF$  материала на рис. 1).

Графики, представленные на рис. 3, показывают, что половинный угол заточки задней наклонной грани оказывает влияние на силу сопротивления формы лишь при

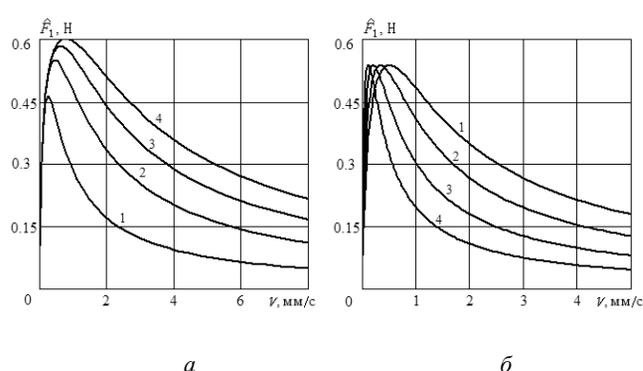


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления формы от скорости резания ( $\delta=3 \text{ мм}$ ;  $\alpha=5^\circ$ ;  $\beta=15^\circ$ ;  $t_{a\beta}=0,327$ ;  $E_0=1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $e_{01}=15$ ). а — при различных размерных длинах  $R$  боковой грани ножа: 1 —  $R=34 \text{ мм}$  ( $\bar{R}=R/h_m=1$ ); 2 —  $R=103 \text{ мм}$  ( $\bar{R}=3$ ); 3 —  $R=171 \text{ мм}$  ( $\bar{R}=5$ ); 4 —  $R=240 \text{ мм}$  ( $\bar{R}=7$ ); б — при различных значениях коэффициента динамической вязкости материала: 1 —  $\eta=2 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ; 2 —  $\eta=3 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ; 3 —  $\eta=5 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ ; 4 —  $\eta=9 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$

Fig. 4. The dependence of the profile resistance force on the cutting speed ( $\delta=3 \text{ mm}$ ;  $\alpha=5^\circ$ ;  $\beta=15^\circ$ ;  $t_{a\beta}=0.327$ ;  $E_0=1.5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $e_{01}=15$ ). а — at different dimensional lengths  $R$  of knife side edge: 1 —  $R=34 \text{ mm}$  ( $\bar{R}=R/h_m=1$ ); 2 —  $R=103 \text{ mm}$  ( $\bar{R}=3$ ); 3 —  $R=171 \text{ mm}$  ( $\bar{R}=5$ ); 4 —  $R=240 \text{ mm}$  ( $\bar{R}=7$ ); б — at different values of dynamic viscosity coefficient: 1 —  $\eta=2 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ; 2 —  $\eta=3 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ; 3 —  $\eta=5 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ; 4 —  $\eta=9 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$

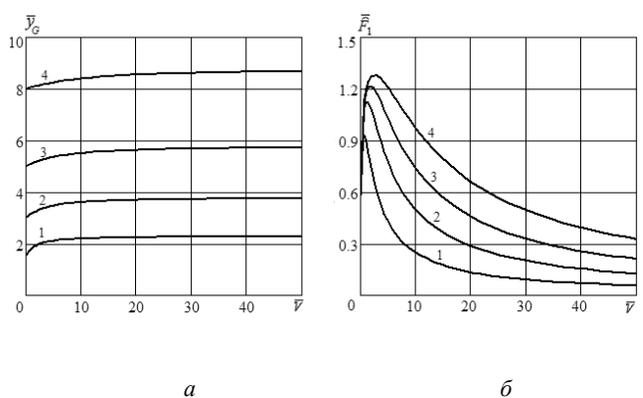


Рис. 6. Зависимости безразмерной координаты крайней точки контакта  $G$  (а) и безразмерной силы сопротивления формы (б) от безразмерной скорости резания при различных значениях безразмерной длины ножа ( $t_{a\beta}=0,8$ ;  $e_{01}=2$ ): 1 —  $\bar{L}=1,5$ ; 2 —  $\bar{L}=3$ ; 3 —  $\bar{L}=5$ ; 4 —  $\bar{L}=8$

Fig. 6. The dependencies of the dimensionless coordinate of the extreme contact point  $G$  (а) and the dimensionless profile resistance force (б) on the dimensionless cutting speed at different values of the knife dimensionless length ( $t_{a\beta}=0.8$ ;  $e_{01}=2$ ): 1 —  $\bar{L}=1.5$ ; 2 —  $\bar{L}=3$ ; 3 —  $\bar{L}=5$ ; 4 —  $\bar{L}=8$

больших скоростях ножа на нисходящих участках кривых. С увеличением указанного угла сила незначительно снижается. Малое снижение силы объясняется тем, что с увеличением половинного угла заточки задней наклонной грани сокращается площадь контакта материала с ножом (координата  $y_G$  точки  $G$  уменьшается) и снижается сила нормального контактного давления. При этом одновре-

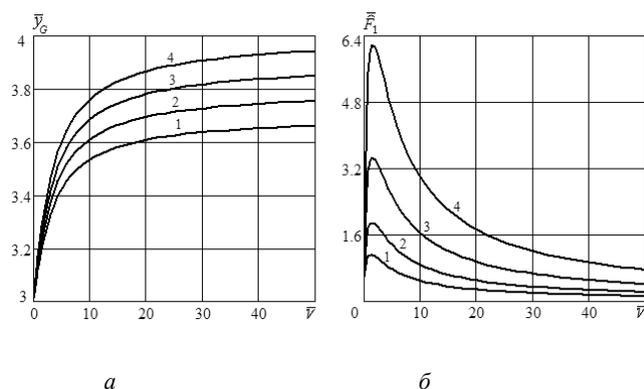


Рис. 7. Зависимости безразмерной координаты крайней точки контакта  $G$  (а) и безразмерной силы сопротивления формы (б) от безразмерной скорости резания ( $\bar{L} = 3$ ).

а:  $e_{01} = 2$ ; 1 —  $t_{af} = 0,7$ ; 2 —  $t_{af} = 0,8$ ; 3 —  $t_{af} = 0,9$ ; 4 —  $t_{af} = 1$ ;  
 б:  $t_{af} = 0,8$ ; 1 —  $e_{01} = 2$ ; 2 —  $e_{01} = 4$ ; 3 —  $e_{01} = 8$ ; 4 —  $e_{01} = 15$

Fig. 7. The dependencies of the dimensionless coordinate of the extreme contact point  $G$  (a) and the dimensionless profile resistance force (b) on the dimensionless cutting speed ( $\bar{L} = 3$ ).

а:  $e_{01} = 2$ ; 1 —  $t_{af} = 0,7$ ; 2 —  $t_{af} = 0,8$ ; 3 —  $t_{af} = 0,9$ ; 4 —  $t_{af} = 1$ ;  
 б:  $t_{af} = 0,8$ ; 1 —  $e_{01} = 2$ ; 2 —  $e_{01} = 4$ ; 3 —  $e_{01} = 8$ ; 4 —  $e_{01} = 15$

менно увеличивается проекция на ось  $Oy$  вязкоупругой реактивной силы, действующей на заднюю наклонную грань (вычитаемое в выражении (9)). Результаты моделирования показывают, что с изменением половинного угла увеличение проекции реактивной силы на направление движения ножа незначительно преобладает над сокращением площади контакта. Кроме того, на площадь контакта материала с задней наклонной гранью основное влияние оказывает мгновенно-упругая составляющая относительной деформации мышечной ткани, в то время как высокоэластичная составляющая влияет преимущественно на формирование присоединенной каверны.

Наряду с этим, рис. 4, а демонстрирует, что высота боковой грани ножа оказывает существенное влияние на силу сопротивления формы. При увеличении длины боковой грани, указанная сила и ее максимумы возрастают, поскольку процесс релаксации напряжений в элементарном волокне при его контакте с боковой гранью протекает более длительно, в результате чего диссипативные потери вязкоупругой энергии в материале повышаются. При длинах боковой грани 34; 103; 171; 240 мм максимумы силы составляют 0,464; 0,551; 0,583; 0,601 Н, соответственно.

Рис. 4, б показывает, что заметное влияние на силу сопротивления формы оказывает коэффициент динамической вязкости материала. Увеличение вязкости материала способствует более быстрому достижению максимума силы, причем значение максимума не изменяется. Усиление вязких свойств мышечной ткани сопровождается существенным снижением силы сопротивления при росте скорости ножа. Это сопровождается увеличением жесткости материала и объясняется сокращением диссипативных потерь в материале при релаксации напряжений, благодаря чему большее количество вязкоупругой энергии сохраняется в материале и превращается в механический вид, сообщая ножу кинетическую энергию и снижая результирующую силу сопротивления.

Анализируя графики на рис. 5, а, отметим, что с увеличением мгновенного модуля упругости максимумы

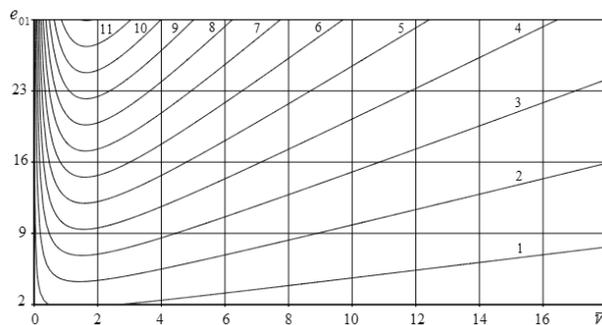


Рис. 8. Безразмерная сила сопротивления формы двухкромочного ножа ( $\bar{L} = 3$ ,  $t_{af} = 0,8$ )

Fig. 8. Dimensionless resistance force of the double-edged knife profile ( $\bar{L} = 3$ ,  $t_{af} = 0,8$ )

силы сопротивления формы двухкромочного ножа существенно возрастают, но при высоких скоростях с повышением мгновенного модуля упругости сила снижается. При значениях мгновенного модуля упругости  $1,5 \cdot 10^5$ ;  $2 \cdot 10^5$ ;  $2,5 \cdot 10^5$ ;  $3 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> максимумы указанной силы составляют 0,538; 0,719; 0,899; 1,080 Н, соответственно. В то же время, как показывает рис. 5, б, с увеличением запаздывающего (высокоэластичного) модуля упругости понижаются как максимумы силы при малых скоростях, так и значения силы при высоких скоростях резания. При значениях запаздывающего модуля упругости  $0,1 \cdot 10^5$ ;  $0,3 \cdot 10^5$ ;  $0,6 \cdot 10^5$ ;  $0,8 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> максимумы указанной силы составляют 0,538; 0,531; 0,524; 0,520 Н, соответственно. Результаты моделирования, представленные на рис. 2, 5, показывают, что процесс преобразования вязкоупругой энергии в кинетическую энергию ножа существенно зависит от скорости резания. При больших скоростях резания усиление мгновенно-упругих, высокоэластичных и вязких свойств материала приводит к заметному снижению силы сопротивления формы двухкромочного ножа. Следует отметить, что сила сопротивления ножа с прямым обухом при увеличении жесткости материала возрастает. Таким образом, при резании охлажденного рыбного сырья использование ножа с задними наклонными гранями обеспечивает сокращение затрат энергии на преодоление сил вредных сопротивлений при условии монотонной зависимости реологических свойств материала от температуры.

Рис. 6 иллюстрирует, что увеличение безразмерной длины ножа ожидаемо приводит к увеличению безразмерной координаты крайней точки контакта  $G$  на задней наклонной грани, а также к возрастанию безразмерной силы сопротивления формы. Причиной этого также является диссипативное рассеивание вязкоупругой энергии материала при релаксации напряжений в области контакта элементарных волокон с боковой гранью ножа. Это позволяет заключить, что сокращение размерной и безразмерной длин боковой грани ножа приводит к существенному снижению размерной и безразмерной сил сопротивления соответственно. При безразмерных длинах ножа 1,5; 3; 5; 8 максимум безразмерной силы составляет 0,931; 1,124; 1,218; 1,280, соответственно.

Вместе с тем, рис. 7, а демонстрирует, что положение точки  $G$  зависит от отношения тангенсов половинных углов заточки передней и задней наклонных граней.

К тому же, изменение отношения тангенсов указанных углов на величину безразмерной силы влияния не оказывает. Результаты моделирования, представленные на рис. 7, б показывают, что увеличение меры эластичности материала приводит к увеличению безразмерной силы. При этом безразмерная координата точки  $G$  практически не изменяется. Таким образом, усиление высокоэластических свойств материала характеризуется ростом безразмерной силы сопротивления формы. При значениях меры эластичности 2; 4; 8; 15 максимумы безразмерной силы составляют 1,124; 1,902; 3,458; 6,176, соответственно. Контурный график на рис. 8 также показывает, что с увеличением безразмерной скорости безразмерная сила асимптотически стремится к нулевому значению, а с увеличением меры эластичности возрастает.

Вышеизложенное позволяет заключить, что математическая модель силы сопротивления формы двухкромочного ножа имеет энтропийный характер. Раздвижение материала передней наклонной гранью приводит к статистически менее вероятному распределению конформаций макромолекул в волокнах, то есть к снижению энтропии. При контакте с задними наклонными гранями мышечная ткань разгружается и самопроизвольно проявляет обратную ползучесть, возвращаясь к наиболее вероятному распределению конформаций. В результате энтропия возрастает, ножу сообщается кинетическая энергия, а результирующая сила сопротивления формы снижается. Вместе с тем, величина силы сопротивления формы связана с размером присоединенной каверны. Результаты моделирования показывают, чем меньше максимальный поперечный размер присоединенной каверны при движении в материале данного ножа, тем меньше сила сопротивления формы, действующая на такой нож. Сокращение размера присоединенной каверны обеспечивается за счет снабжения ножа задними наклонными гранями, однако необходимо учитывать, что на указанных гранях дополнительно действуют микроскопические силы трения.

### Выводы

На основании проведенного моделирования, можно сделать следующие выводы.

1. Сила сопротивления формы двухкромочного ножа существенно зависит от реологических свойств рыбы — модулей упругости и коэффициента динамической вязко-

сти. С понижением температуры сырья и увеличением его жесткости указанная сила существенно снижается при средних и высоких скоростях резания. Поскольку сила сопротивления формы однокромочного ножа с прямым обухом возрастает при охлаждении и монотонном увеличении жесткости рыбы, использование двухкромочного ножа обеспечивает существенное снижение сил вредных сопротивлений и сокращение энергетических затрат на резание. Таким образом, для резания рыбы при низких температурах целесообразно применять двухкромочные (ободоострые) ножи с малыми боковыми гранями.

2. Зависимость силы сопротивления формы двухкромочного ножа от скорости резания является немонотонной с явно выраженным максимумом. Указанная сила с ростом скорости асимптотически стремится к нулевому значению, что отличает ее от силы сопротивления однокромочного ножа, которая при тех же условиях монотонно возрастает и асимптотически стремится к своему предельному значению.

3. Безразмерная сила сопротивления формы характеризует относительный вклад высокоэластичной относительной деформации в суммарную упругоэластичную относительную деформацию материала. При охлаждении рыбы мера эластичности и безразмерная сила сокращаются. При повышении температуры сырья мера эластичности и безразмерная сила соответственно возрастают как показатели высокоэластичных свойств материала.

4. Влияние на силу сопротивления формы оказывает геометрия ножа. Половинные углы заточки передней и задней наклонных граней влияют на высокоэластическую составляющую указанной силы, что обуславливает целесообразность установки и решения задачи оптимизации профиля ножа по критерию минимальной силы вредного сопротивления. Половинная толщина ножа влияет на мгновенно-упругую и высокоэластичную составляющие силы сопротивления.

4. Направлением дальнейших исследований является математическое моделирование второй составляющей вредного сопротивления — микроскопической силы трения на гранях ножа. Это позволит в совокупности с рассмотренной силой сопротивления формы определить результирующую силу вредного сопротивления резанию охлажденной рыбы.

### Литература

1. Ageev O. V., Fatykhov Yu. A. Совершенствование технологического оборудования для первичной обработки рыбы: опыт, проблематика, системный подход: монография. Калининград: Изд-во КГТУ, 2015. 261 с.
2. Ageev O. V. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на наклонные грани ножа при резании рыбы / О. В. Агеев, В. А. Наумов, Ю. А. Фатыхов, Н. В. Самойлова // Известия КГТУ. 2017. № 47. С. 80–96.
3. Dowgiallo A. Cutting force of fibrous materials. // *Journal of Food Engineering*. 2005. no. 66. pp. 57–61.
4. Boisly M, Schuldt S, Kaestner M. G, Schneider Y, Rohm H. Experimental characterisation and numerical modelling of cutting processes in viscoelastic solids. // *Journal of Food Engineering*, 2016, no. 191, pp. 1–9.

### References

1. Ageev O. V., Fatykhov Yu. A. Perfection of technological equipment for primary fish processing: experience, problems, system approach: monograph. Kaliningrad, Izdatel'stvo KGTU, 2015, 261 p. (in Russian)
2. Ageev O. V., Naumov V. A., Fatykhov Yu. A., Samoilova N. V. Mathematical simulation of forces of normal contact pressure of inclined knife edges during fish processing. *Izvestija KGTU*, 2017, no. 47, pp. 80–96. (in Russian)
3. Dowgiallo A. Cutting force of fibrous materials. *Journal of Food Engineering*, 2005, no. 66, pp. 57–61.
4. Boisly M, Schuldt S, Kaestner M. G, Schneider Y, Rohm H. Experimental characterisation and numerical modelling of cutting processes in viscoelastic solids. *Journal of Food Engineering*, 2016, no. 191, pp. 1–9.

5. Schuldt S, Arnold G, Kowalewski J, Schneider Y, Rohm H. Analysis of the sharpness of blades for food cutting. // *Journal of Food Engineering*, 2016, no. 188, pp. 13–20.
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. 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.
8. Atkins T. Optimum blade configurations for the cutting of soft solids. // *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, no. 73, pp. 2523–2531.
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. Выбор и идентификация реологической модели структурно-механических свойств мышечной ткани рыбы / О. В. Агеев, Ю. А. Фатыхов, Н. В. Самойлова // *Известия Калининградского государственного технического университета*. 2018. № 49. С. 75–91.
11. Агеев О. В. Анализ соответствия реологических моделей структурно-механическим свойствам рыбы / О. В. Агеев, В. А. Наумов, Ю. А. Фатыхов, Н. В. Самойлова // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2018. № 2 (36). С. 34–43. DOI 10.17586/2310-1164-2018-11-2-34-43.
12. Маслова Г. В. Реология рыбы и рыбных продуктов / Г. В. Маслова, А. М. Маслов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 214 с.
13. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
14. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Berlin, Springer Verlag GmbH, 2017, 391 p.
15. Солдатенков И. А. К расчету деформационной составляющей силы трения для стандартного вязкоупругого основания. // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 1. С. 12–21.
16. Солдатенков И. А. Расчет трения индентора с фрактальной шероховатостью о вязкоупругое основание. // *Трение и износ*. 2015. Т. 36. № 3. С. 257–262.
17. Агеев О. В. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на боковые грани ножа при резании пищевых материалов / О. В. Агеев, В. А. Наумов, Ю. А. Фатыхов // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2017. № 4. С. 27–42. DOI: 10.17586/2310-1164-2017-10-4-27-42.
18. Агеев О. В. Математическое моделирование сил нормально-го контактного давления на грани двухромбического ножа при резании рыбы / О. В. Агеев, В. А. Наумов, Ю. А. Фатыхов, Н. В. Самойлова // *Известия КГТУ*. 2018. № 50. С. 81–102.
5. Schuldt S, Arnold G, Kowalewski J, Schneider Y, Rohm H. Analysis of the sharpness of blades for food cutting. *Journal of Food Engineering*, 2016, no. 188, pp. 13–20.
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. 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.
8. Atkins T. Optimum blade configurations for the cutting of soft solids. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, no. 73, pp. 2523–2531.
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., Samojlova N. V. Selection and identification of rheological model of the structural-mechanical properties of muscular fish tissue. *Izvestija Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2018, no. 49, pp. 75–91. (in Russian)
11. Ageev O. V., Naumov V. A., Fatykhov Yu. A., Samojlova N. V. Correspondence of rheological models to the structural-mechanical properties of fish. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija: Processy i apparaty pishhevyyh proizvodstv*, 2018, no. 2 (36), pp. 34–43. (in Russian)
12. Maslova G. V. Rheology of fish and fish products. Moscow, Legkaja i pishhevaja promyshlennost', 1981, 214 p. (in Russian)
13. Goryacheva I. G. Mechanics of frictional interaction. Moscow, Nauka, 2001, 478 p. (in Russian)
14. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Berlin, Springer Verlag GmbH, 2017, 391 p.
15. Soldatenkov I. A. On calculation of deformation component of friction force for standard viscoelastic foundation. *Trenie i iznos*, 2008, no. 1, vol. 29, pp. 12–21. (in Russian)
16. Soldatenkov I. A. Calculation of friction force for indenter with fractal roughness in sliding on viscoelastic foundation. *Trenie i iznos*, 2015, no. 3, vol. 36, pp. 257–262. (in Russian)
17. Ageev O. V., Naumov V. A., Fatykhov Yu. A. Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on side knife edges during cutting of food materials. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija: Processy i apparaty pishhevyyh proizvodstv*, 2017, no. 4 (34), pp. 27–42. (in Russian)
18. Ageev O. V., Fatykhov Yu. A., Samojlova N. V. Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on the facets of double-edge knife during fish cutting. *Izvestija KGTU*, 2018, no. 50, pp. 81–102. (in Russian)

**Сведения об авторах**

**Агеев Олег Вячеславович**

к. т. н., доцент, доцент кафедры пищевых и холодильных машин Калининградского государственного технического университета, 236022 Россия, Калининград, Советский пр., 1, oleg.ageev@klgtu.ru, ORCID ID: 0000-0003-3035-6238, РИНЦ ID: 511340.

**Наумов Владимир Аркадьевич**

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования Калининградского государственного технического университета, 236022 Россия, Калининград, Советский пр., 1, van-old@rambler.ru

**Фатыхов Юрий Адгамович**

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой пищевых и холодильных машин Калининградского государственного технического университета, 236022, Россия, Калининград, Советский пр., 1, elina@klgtu.ru

**Information about authors**

**Ageev Oleg Viatcheslavovich**

Ph. D., associate professor of the Department of Food and Refrigeration Machines of Kaliningrad State Technical University, 236022 Russia, Kaliningrad, Sovetskii av., 1, elina@klgtu.ru, ORCID ID: 0000-0003-3035-6238.

**Naumov Vladimir Arkadieievich**

D. Sc., professor, chair of the Department of Water Resources and Water Management of Kaliningrad State Technical University, 236022 Russia, Kaliningrad, Sovetskii av., 1, van-old@rambler.ru

**Fatykhov Yuriy Adgamovich**

D. Sc., professor, chair of the Department of Food and Refrigeration Machines of Kaliningrad State Technical University, 236022, Russia, Kaliningrad, Sovetskii av., 1, elina@klgtu.ru



**26–28 февраля 2020 года**

**АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ ЮГА РОССИИ** – это специализированный форум, направленный на демонстрацию сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов для производства и переработки сельхозпродукции.

**РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «ИНТЕРАГРОМАШ»:**

- Сельскохозяйственная техника и запчасти
- Автоматизация

**РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ «АГРОТЕХНОЛОГИИ»:**

- Растениеводство
- Оборудование для хранения и переработки сельхозпродукции
- Животноводство
- Оборудование для животноводства
- Услуги для АПК

**В ПРОГРАММЕ ФОРУМА:**

- Проведение в рамках форума ежегодного Аграрного конгресса юга России, в рамках которого проходит три большие тематические конференции, посвященные вопросам растениеводства, животноводства и с/х технике.
- Проведение Предпосевного совещания для муниципальных районов области с участием Губернатора РО.
- Презентации и демонстрации от участников форума.

**Организатор:**

КВЦ «ДонЭкспоцентр»  
тел.: (863) 268-77-68

**Место проведения:**

КВЦ «ДонЭкспоцентр»  
г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, 30

**Руководитель проекта – Демченко Алла**

Тел.: (863) 268-77-14  
E-mail: [inter@donexpocentre.ru](mailto:inter@donexpocentre.ru)

<http://www.interagromash.net/index.html>