

Научная статья
УДК 664.951

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КРОМКИ ФИГУРНОГО НОЖА ДЛЯ ПОРЦИОНИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Н.В. Самойлова¹, О.В. Агеев^{1,*}

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Аннотация. Показана актуальность аналитической оптимизации геометрии режущих органов для порционирования пищевых продуктов. Рассмотрены схемы ножей с фигурной и прямой наклонной кромками. Геометрия фигурной режущей кромки описана полиномом второго порядка. На базе выражений для безразмерных сил сопротивления формы выполнена постановка и решена задача поиска оптимального геометрического параметра ножа. Поставлена и решена задача оптимизации формы фигурной кромки по критерию минимального трения на боковых гранях режущего органа. Определены конструктивные виды фигурных кромок ножей с оптимальными конструктивными углами при различных заданных значениях полной высоты лезвия, высоты режущей кромки и длины лезвия. Направлением дальнейших исследований является оптимизация параметров ротационного резания пищевых материалов вращающимися рабочими органами.

Ключевые слова: пищевой материал; резание; порционирование; оптимизация; нож; лезвие; кромка.

Для цитирования: Самойлова Н.В., Агеев О.В. Оптимизация геометрии кромки фигурного ножа для порционирования пищевых продуктов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. №1. С. 16–28.

Original article

OPTIMIZATION OF THE GEOMETRY OF THE FIGURED KNIFE EDGE FOR FOOD PRODUCTS PORTIONING

N.V. Samojlova¹, O.V. Ageev^{1,*}

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Abstract. The relevance of analytical optimization of the geometry of cutting tools for food products portioning is shown. Schemes of knives with figured and straight inclined edges are considered. The geometry of the shaped cutting edge by a second-order polynomial is described. Based on expressions for dimensionless shape resistance forces, the problem of finding the optimal geometric parameter of a knife was formulated and solved. The problem of optimizing the shape of a curly edge according to the criterion of minimum friction by the side faces of the cutting element has been posed and solved. The design types of shaped knife edges with optimal constructive angles for various given values of the full height of the blade, the height of the cutting edge and the length of the blade have been determined. The direction of further research is optimization of the parameters of rotational cutting of food materials by rotating working tools.

Key words: food material; cutting; portioning; optimization; knife; blade; edge.

For citation: Samojlova N.V., Ageev O.V. Optimization of the geometry of the figured knife edge for food products portioning. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. V.10, No. 1, pp. 16–28.

Введение

Обязательным требованием при проектировании и конструировании технологического оборудования для порционирования пищевых продуктов является повышение его надежности и производительности. Увеличение загруженности и напряженности рабочих органов влияет на их надежность, так как рост скоростей относительных перемещений режущих инструментов и сырья, повышенные силовые воздействия быстрее исчерпывают первоначальные, заложенные на стадии изготовления ресурсы. Для отказа порционирующей машины в целом достаточно потери работоспособности лишь одного режущего органа.

Интенсификация рабочих режимов и напряженные рабочие условия создают предпосылки для особенно быстрого выхода из строя рабочих органов машин и узлов. В частности, в порционирующих машинах режущие рабочие органы являются теми деталями, долговечность которых измеряется малыми интервалами времени. Вклады в снижение долговечности вносят механическое, тепловое, химическое и другие виды взаимодействий поверхностного слоя инструментов с сырьем. В связи с этим требуется снижение силовых воздействий на рабочие органы с целью повышения их долговечности, которая равносильна не только повышению производительности, но и высвобождению значительных ресурсов рабочей силы, экономии сырья, материалов и энергии.

Наряду с этим, геометрические параметры режущих органов для порционирования существенно влияют на качество переработанного продукта, износостойкость и расход электроэнергии. Исследования, проведенные в течение ряда лет в пищевой отрасли, показали, что с увеличением углов заточки и ухудшением остроты лезвий наблюдается значительное снижение количества мышечного сока в готовых продуктах, приводящее к падению их качества. Со снижением сил сопротивления происходит улучшение условий резания: имеет место более полное перерезание волокон материала, уменьшается процесс перетирания мышечной ткани и смятия слоев, что сопровождается сохранением питательного сока в продукте. Одновременно с этим заметно снижается износ рабочих органов, и сокращаются расходы на их перезаточку, а также уменьшается простой оборудования. Улучшить процесс резания и управлять им возможно изменением формы лезвия.

При разработке рабочих органов для порционирования пищевых материалов особенностью постановки технической задачи по изменению формы лезвия является то, что из многих технически возможных вариантов должен быть найден самый экономичный. В такой постановке содержатся технико-экономические предпосылки для решения научных и инженерных задач в области порционирующих машин и оборудования.

Оптимизация – это выбор такого варианта управления процессом резания материала, при котором достигается экстремальное значение критерия, характеризующего качество управления. Под управлением процессом резания понимается задача выбора его параметров, направленная на поиск решения, удовлетворяющего требованиям ресурсо- и энергосбережения.

При построении оптимизационной модели математическим методом в заданной области параметров ищутся комбинации значений, соответствующие выбранному целевому критерию. Модели такого типа строятся главным образом по двум функциональным группам, которые связаны друг с другом задачами оптимизации: 1) целевой критерий (критерий оптимизации) формулируется как целевая функция, для которой должно находиться экстремальное значение; 2) область значений образуется крайними

граничными условиями (ограничениями), при этом внутри обозначенной ими области могут находиться экстремальные значения.

Применительно к процессу порционирования пищевых материалов целевая функция и ограничения должны быть представлены в зависимости от оптимизируемых величин. При оптимизации могут быть изменены конструктивные параметры режущего органа и технологические рабочие режимы, которыми считают скорость резания и угол подачи лезвия.

Целевая функция представляет собой аналитическую зависимость между критерием оптимизации и подлежащими оптимизации рабочими параметрами режущего органа и технологическими режимами. Ограничения (дополнительные условия) представляют собой аналитическую взаимосвязь между заданными конструктивными параметрами или технологическими условиями и подлежащими оптимизации рабочими параметрами. Такие дополнительные условия задаются техническими границами и задачами обработки сырья. Это означает, что не должно быть выхода за определенные верхние и нижние допустимые значения характеристик режущего органа.

Известно, что в результате относительного перемещения материала и микронеровностей ножа при резании возникает сила трения скольжения, лежащая в плоскости их касания. Деформационная (механическая) составляющая силы трения определяется характером деформирования тел и зависит от реологических характеристик сырья, микрогеометрии поверхностей, их взаимного расположения и так далее [1-3]. Адгезионная составляющая силы трения обусловлена межмолекулярным взаимодействием веществ и определяется свойствами контактирующих тел, а также особенностями фрикционного взаимодействия [4]. Величина силы трения непосредственно связана с шероховатостью поверхности рабочего органа.

Качество поверхности лезвия характеризуется степенью шероховатости, то есть высотой неровностей. Мера шероховатости зависит от радиуса закругления при вершине токарного резца, подачи инструмента в процессе точения, скорости резания металла, вспомогательного угла в плане, материала заготовки (марки нержавеющей стали), износа инструмента, жесткости системы «инструмент – заготовка – приспособление - станок», а также еще от ряда факторов.

Целью настоящей работы является аналитическое определение оптимальных геометрических параметров лезвия с криволинейной фигурной кромкой, при которых минимизируются силы вредных сопротивлений при порционировании пищевых материалов. Статья является продолжением исследований, выполненных в работах [5-7].

Постановка задачи и допущения

На рисунке 1 показаны схемы ножей с фигурной и прямой наклонной кромками. Определим оптимальный конструктивный параметр ножа с фигурной кромкой, при котором лезвие при движении в материале будет испытывать минимальное вредное сопротивление по сравнению с ножом, снабженным прямой наклонной кромкой.

Сформулируем классическую задачу оптимизации с ограничениями, учитывая, что форма фигурной кромки ножа описывается приведенной в работе [5] функцией (1). При заданном угле подъема θ определим угол входа β фигурного лезвия такой, что при таком же угле наклона β кромки прямолинейного ножа будет максимальной разность между безразмерными силами вредного сопротивления прямолинейного и фигурного ножей.

При исхоом наилучшем угле входа β и заданном угле подъема θ нож с фигурной кромкой будет наиболее эффективным при резании материала по сравнению с ножом, имеющим прямую кромку с таким же углом наклона β . Поиск наилучшего угла входа фигурного лезвия осложняется тем обстоятельством, что безразмерная сила вредного сопротивления ножа с прямой наклонной кромкой существенно нелинейно зависит от угла ее наклона (см. работу [5]).

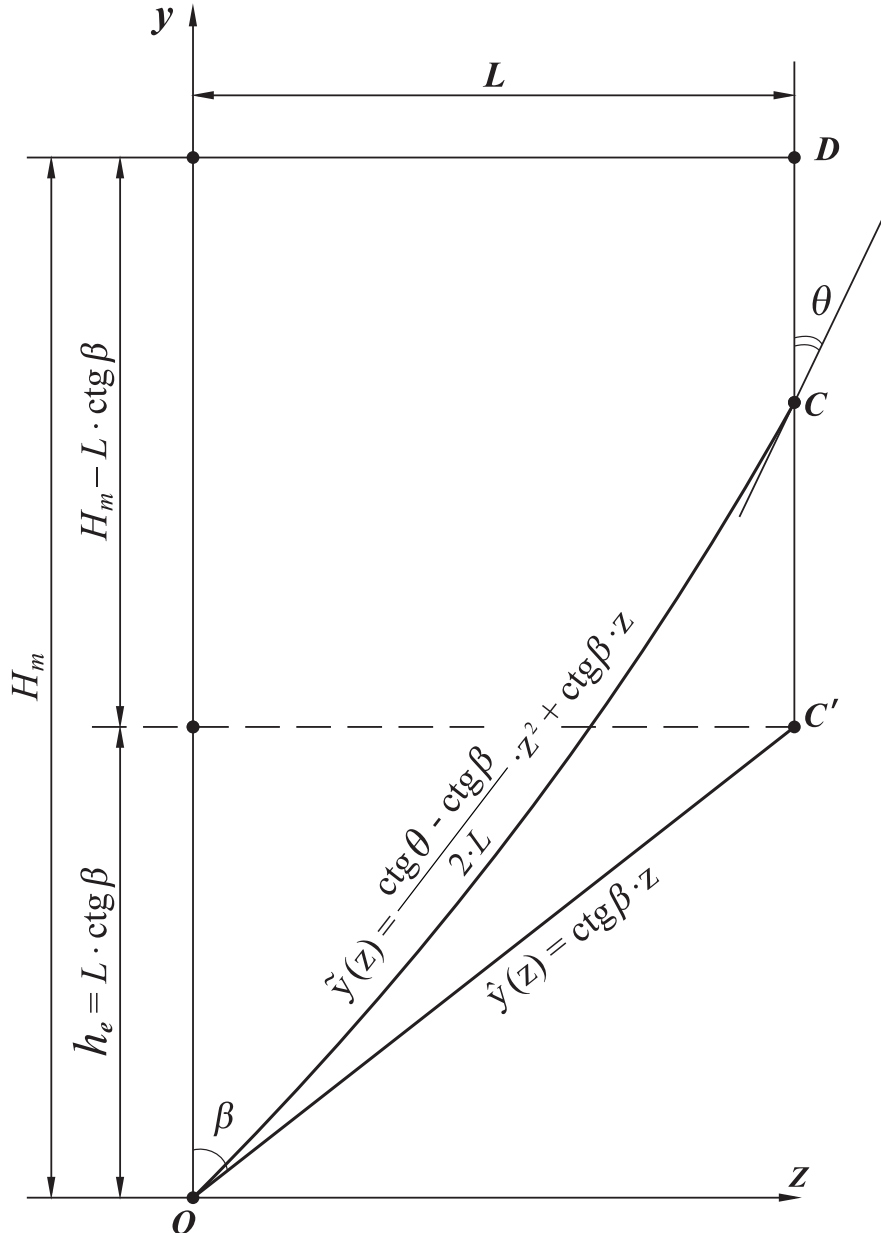


Рисунок 1 - Схемы ножей с фигурной и прямой наклонной кромками (OC и OC' – режущие кромки)

Примем в качестве целевой функции зависимость $\Delta \bar{F}_1(\beta) = \bar{F}_{1m}(\beta) - \bar{F}_{1m}(\beta)$, где безразмерные силы вредных сопротивлений прямого наклонного и фигурного лезвий $\bar{F}_{1m}(\beta)$ и $\bar{F}_{1m}(\beta)$ определяются следующими выражениями (см. работу [5]):

$$\bar{F}_{1m} = \bar{L} \cdot \frac{0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2 \beta}}; \quad (1)$$

$$\bar{F}_{1m} = \bar{L} \cdot [0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))] \cdot \frac{\text{arsh}(\text{ctg} \theta) - \text{arsh}(\text{ctg} \beta)}{\text{ctg} \theta - \text{ctg} \beta}, \quad (2)$$

где \bar{v} - безразмерная скорость ножа; e_{01} - мера эластичности материала; \bar{L} - безразмерная длина лезвия в плане; arsh - обозначение гиперболического арксинуса.

Оптимизационная задача состоит в определении решения $\beta = \beta_z$, доставляющего целевой функции глобальный максимум в допустимой области значений β , то есть $\Delta\bar{F}_1(\beta) \rightarrow \max$. Поскольку функция $\Delta\bar{F}_1(\beta)$ дважды дифференцируема по β , необходимое условие глобального максимума $d\Delta\bar{F}_1/d\beta = 0$ позволяет определить решение β_z . При этом дополнительными ограничениями оптимизационной задачи являются следующие условия: $0 < \beta < 90^\circ$; $0 < \theta < 90^\circ$.

Для определения оптимального угла входа β_z выразим разность между безразмерными силами вредного сопротивления прямого и фигурного ножей $\Delta\bar{F}_1(\beta)$ в функции угла β . Принимая во внимание выражения (1) и (2), получим искомую связь между целевой функцией и углом β :

$$\begin{aligned} \Delta\bar{F}_1 &= \bar{L} \cdot \frac{0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta}} - \\ &- \bar{L} \cdot [0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))] \cdot \frac{\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta)}{\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta} = \\ &= \bar{L} \cdot [0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))] \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta}} - \frac{\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta)}{\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку выражение $\bar{L} \cdot [0,5 + \bar{v} \cdot e_{01} \cdot (1 + \bar{v} \cdot (\exp(-1/\bar{v}) - 1))]$ представляет собой величину безразмерной силы сопротивления формы пластинчатого ножа с прямой горизонтальной кромкой (см. выражение (34) в работе [5]), которая не зависит от конструктивных углов β и θ , целевую функцию преобразуем к следующему виду:

$$\Delta\tilde{F}_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta}} - \frac{\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta)}{\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta}. \quad (4)$$

Определим первую производную целевой функции $\Delta\tilde{F}_1$ по углу входа β :

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\tilde{F}_1}{d\beta} &= \frac{\operatorname{ctg}\beta \cdot \operatorname{cosec}^2 \beta}{(\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta})^3} - \frac{\operatorname{cosec}^2 \beta}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \cdot (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)} + \\ &+ \frac{\operatorname{cosec}^2 \beta \cdot (\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta))}{(\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)^2} = \\ &= \operatorname{cosec}^2 \beta \cdot \left[\frac{(\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta))}{(\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)^2} + \frac{\operatorname{ctg}\beta}{(\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta})^3} - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \cdot (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\operatorname{cosec} \beta = 1/\sin \beta$.

Значение $\beta_z \in (0; 90^\circ)$, определяющее оптимальный угол входа лезвия, с учетом полученного выражения (5) и условия экстремума $\frac{d\Delta\tilde{F}_1}{d\beta} = 0$ найдем как корень следующего уравнения при заданном значении угла подъема θ :

$$\frac{(\operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\theta) - \operatorname{arsh}(\operatorname{ctg}\beta))}{(\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)^2} + \frac{\operatorname{ctg}\beta}{(\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta})^3} - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \beta} \cdot (\operatorname{ctg}\theta - \operatorname{ctg}\beta)} = 0. \quad (6)$$

Далее определим оптимальный геометрический параметр фигурного ножа по критерию минимальной силы трения. Согласно работам [8-10], величина силы трения

зависит от величины площади контакта шероховатой поверхности ножа с материалом. Поскольку площадь фигурного лезвия определяется геометрией режущей кромки, представляется возможным провести постановку и решение оптимизационной задачи по определению наилучших конструктивных параметров ножа, при которых сила трения будет минимальной с учетом заданных ограничений.

Пусть фигурное лезвие имеет полную высоту H_m и длину L (рисунок 1). Определим оптимальный угол подъема кромки θ_z такой, при котором сила трения при резании материала будет минимальной по сравнению с ножом, снабженным прямой наклонной кромкой, при таких же значениях полной высоты ножа H_m и угла входа β . Данное условие оптимизации означает, что при некотором оптимальном угле подъема θ_z разность между площадями прямолинейного и фигурного ножей должна быть минимальной.

Примем в качестве целевой функции зависимость $\Delta S(\theta) = \hat{S}(\theta) - \tilde{S}(\theta)$, где $\hat{S}(\theta)$ - площадь рабочей поверхности ножа с прямой наклонной кромкой, $\tilde{S}(\theta)$ - площадь рабочей поверхности ножа с фигурной кромкой. Оптимизационная задача состоит в определении решения $\theta = \theta_z$, доставляющего целевой функции глобальный минимум в допустимой области значений θ , то есть $\Delta S(\theta) \rightarrow \min$. Поскольку функция $\Delta S(\theta)$ дважды дифференцируема по θ , необходимое условие глобального максимума $d\Delta S/d\theta = 0$ позволяет найти искомое решение θ_z . При этом дополнительными ограничениями оптимизационной задачи являются следующие условия: $0 < \beta < 90^\circ$; $0 < \theta < 90^\circ$.

Площадь рабочей поверхности ножа с прямой наклонной кромкой и углом наклона β :

$$\hat{S}(\theta) = L \cdot (H_m - 0,5 \cdot L \cdot \text{ctg}\beta). \quad (7)$$

Площадь рабочей поверхности ножа с фигурной кромкой определяется следующим выражением:

$$\tilde{S}(\theta) = H_m \cdot L - \int_0^L \left(\frac{\text{ctg}\theta - \text{ctg}\beta}{2 \cdot L} \cdot z^2 + \text{ctg}\beta \cdot z \right) dz = L \cdot \left[H_m - \frac{1}{6} \cdot L \cdot (\text{ctg}\theta + 2 \cdot \text{ctg}\beta) \right]. \quad (8)$$

Для определения оптимального угла подъема θ_z находим разность $\Delta S(\theta)$ между площадями прямого и фигурного ножей в функции угла подъема θ :

$$\begin{aligned} \Delta S(\theta) &= L \cdot (H_m - 0,5 \cdot L \cdot \text{ctg}\beta) - L \cdot \left[H_m - \frac{1}{6} \cdot L \cdot (\text{ctg}\theta + 2 \cdot \text{ctg}\beta) \right] = \\ &= \frac{1}{6} \cdot L^2 \cdot (\text{ctg}\theta - \text{ctg}\beta). \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) демонстрирует, что разность рабочих площадей ножей различной формы не зависит от полной высоты лезвия H_m , однако зависит от длины ножа L и углов θ и β . Анализ показывает, что $\Delta S(\theta) \geq 0$ при $\angle\theta \leq \angle\beta$. Таким образом, наилучшим значением угла подъема согласно условию оптимизации является значение $\angle\theta = 0$. Однако величина угла подъема θ ограничена конструктивными параметрами ножа H_m и L . Следовательно, необходимо определить верхнее допустимое значение угла θ_{\max} , которое и будет являться оптимальным с учетом геометрических ограничений: $\theta_{\max} = \theta_z$.

При $z_c = L$ максимальное значение координаты $y(z_c)$ должно составлять величину H_m :

$$y(z_c) = H_m = \frac{\text{ctg}\theta_z - \text{ctg}\beta}{2} \cdot L + \text{ctg}\beta \cdot L. \quad (10)$$

С учетом (10) выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned}\frac{ctg\theta_z - ctg\beta}{2} \cdot L &= H_m - ctg\beta \cdot L; \\ \frac{1}{tg\theta_z} - ctg\beta &= \frac{2 \cdot (H_m - ctg\beta \cdot L)}{L}; \\ tg\theta_z &= \frac{1}{\frac{2 \cdot (H_m - ctg\beta \cdot L)}{L} + ctg\beta}; \\ tg\theta_z &= \frac{1}{2 \cdot \frac{H_m}{L} - ctg\beta}.\end{aligned}\tag{11}$$

В результате преобразований (11) получим выражение для оптимального угла подъема лезвия:

$$\theta_z = arctg \frac{1}{2 \cdot \frac{H_m}{L} - ctg\beta}.\tag{12}$$

Заметим, что значение угла входа β для ножа с прямой наклонной кромкой однозначно определяется его конструктивными параметрами: высотой режущей кромки $h_e = L \cdot ctg\beta$ и длиной лезвия L :

$$ctg\beta = \frac{h_e}{L}.\tag{13}$$

Тогда с учетом формулы (13) выражение (12) возможно представить в виде:

$$\theta_z = arctg \frac{L}{2 \cdot H_m - h_e}.\tag{14}$$

Результаты математического моделирования и их обсуждение

Аналитическое решение уравнения (6) является весьма трудоемким. В связи с этим, искомое решение найдем численным методом на ЭВМ. Численное решение уравнения (6) позволяет определить значения оптимального угла входа β_z , а также исследовать его зависимость от угла подъема θ , которая показана на рисунке 2. При значениях угла подъема θ ножа 15°; 30°; 45°; 60°; 75° значения оптимального угла входа β_z лезвия составляют 82,45°; 80,51°; 81,05°; 83,18°; 86,33°, соответственно. Таким образом, анализ показывает, что оптимальный угол входа β_z нелинейно и немонотонно зависит от значения задаваемого угла подъема θ лезвия. Согласно рисунку 2 минимальное значение оптимального угла входа $\beta_z^{\min} = 80,45^\circ$ достигается при характерном значении угла подъема $\theta = 33,20^\circ$.

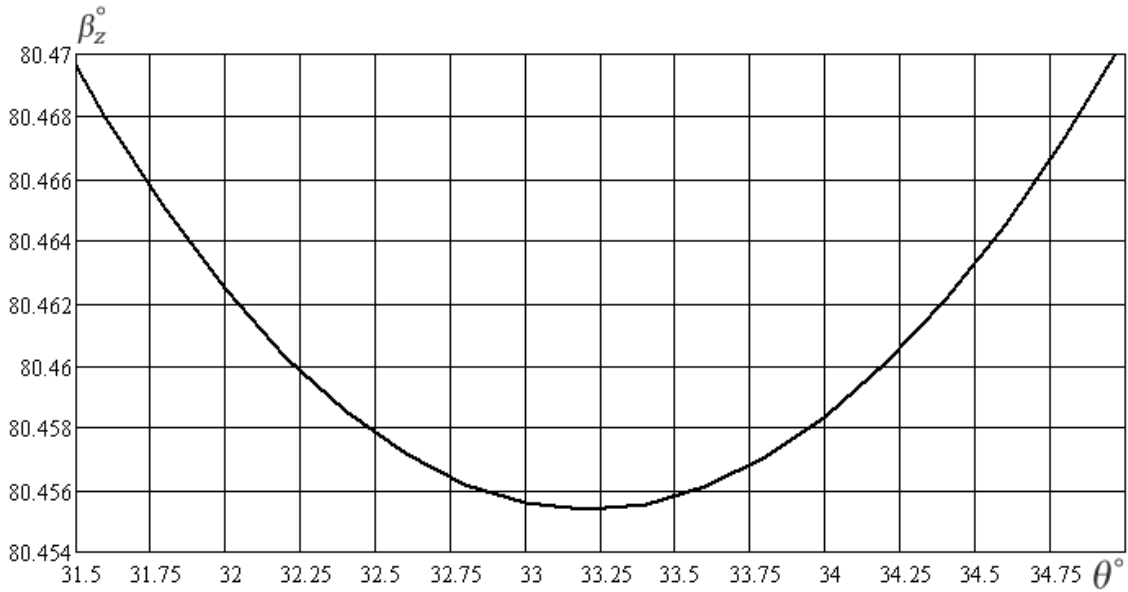


Рисунок 2 – Зависимость оптимального угла входа β_z фигурного лезвия от угла подъема θ

Конструктивные виды фигурной кромки ножа с минимальным оптимальным углом входа β_z^{\min} и соответствующим ему углом подъема при различных значениях длины лезвия показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 показаны зависимости значения оптимального угла подъема θ_z от угла входа β и полной высоты лезвия H_m , на рисунке 5 – от длины лезвия L и высоты режущей кромки h_e .

При значениях длины лезвия $L = 0,20$ м; полной высоты лезвия $H_m = 0,30$ м; угла входа $\beta = 35^\circ$; $\beta = 45^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\beta = 85^\circ$ значения оптимального угла подъема фигурной кромки составляют $\theta_z = 32,46^\circ$, $\theta_z = 26,56^\circ$, $\theta_z = 20,77^\circ$, $\theta_z = 18,95^\circ$ соответственно.

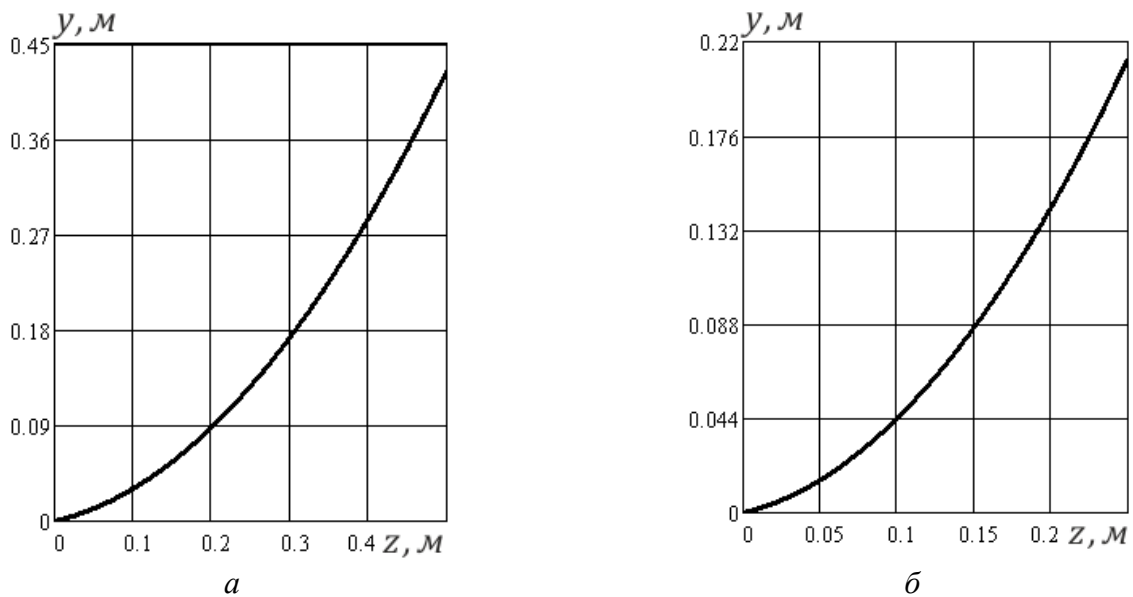


Рисунок 3 – Конструктивные виды фигурной кромки ножа с минимальным оптимальным углом входа: a – при $L = 0,5$ м; b – при $L = 0,25$ м

Конструктивные виды фигурной кромки ножа с оптимальным углом подъема θ_z при различных заданных значениях угла входа β , полной высоты лезвия H_m , высоты режущей кромки h_e и длины лезвия L показаны на рисунках 6 и 7.

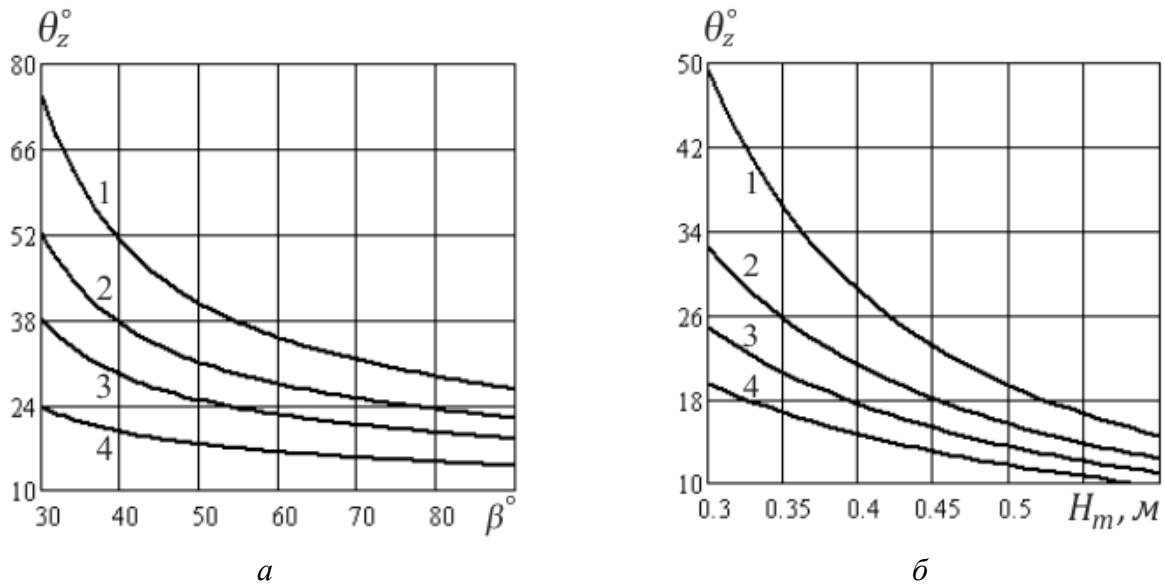


Рисунок 4 - Зависимости оптимального угла подъема θ_z фигурного ножа ($L = 0,20$ м):

- а* – от угла входа при различных значениях полной высоты лезвия:
 1 – $H_m = 0,20$ м; 2 – $H_m = 0,25$ м; 3 – $H_m = 0,30$ м; 4 – $H_m = 0,40$ м;
б – от полной высоты лезвия при различных значениях угла входа:
 1 – $\beta = 25^\circ$; 2 – $\beta = 35^\circ$; 3 – $\beta = 50^\circ$; 4 – $\beta = 80^\circ$

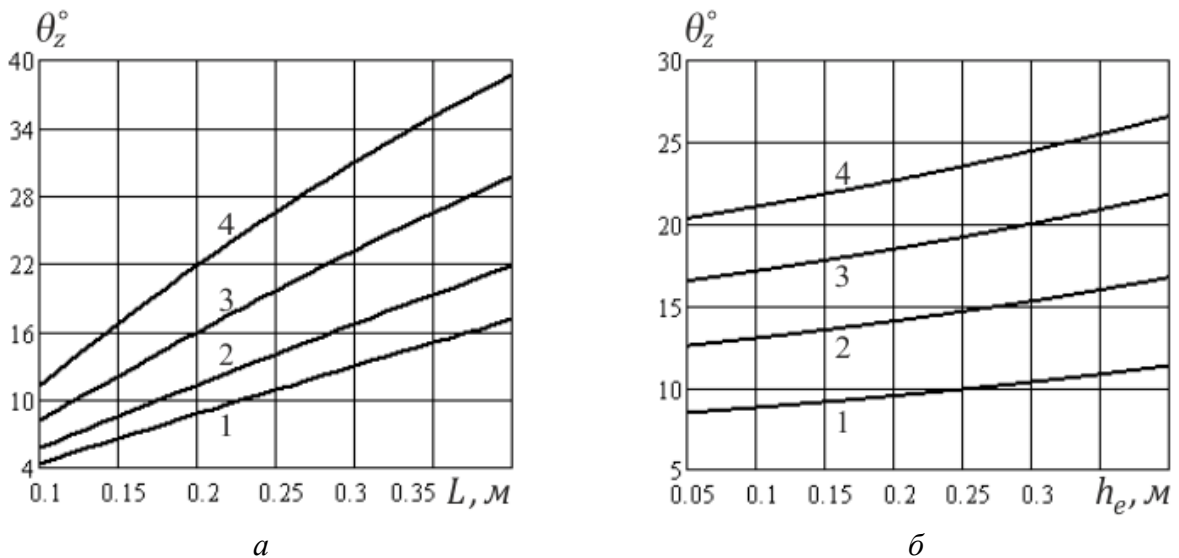


Рисунок 5 - Зависимости оптимального угла подъема фигурного ножа ($H_m = 0,70$ м):

- а* – от длины лезвия при различных значениях высоты режущей кромки:
 1 – $h_e = 0,1$ м; 2 – $h_e = 0,4$ м; 3 – $h_e = 0,7$ м; 4 – $h_e = 0,9$ м;
б – от высоты режущей кромки при различных значениях длины лезвия:
 1 – $L = 0,20$ м; 2 – $L = 0,30$ м; 3 – $L = 0,40$ м; 4 – $L = 0,50$ м

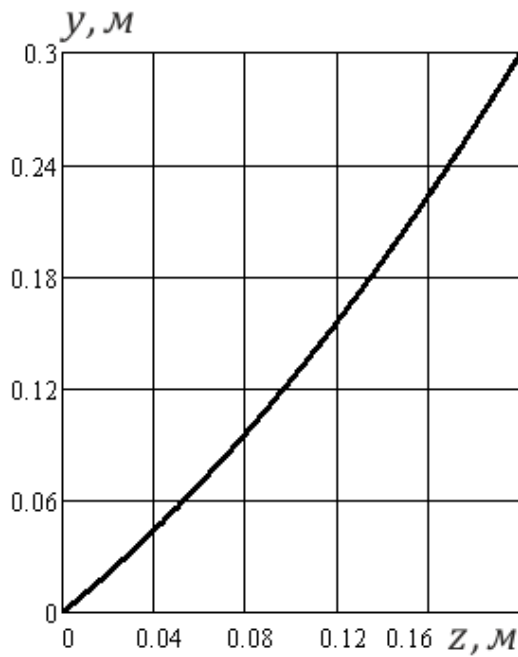
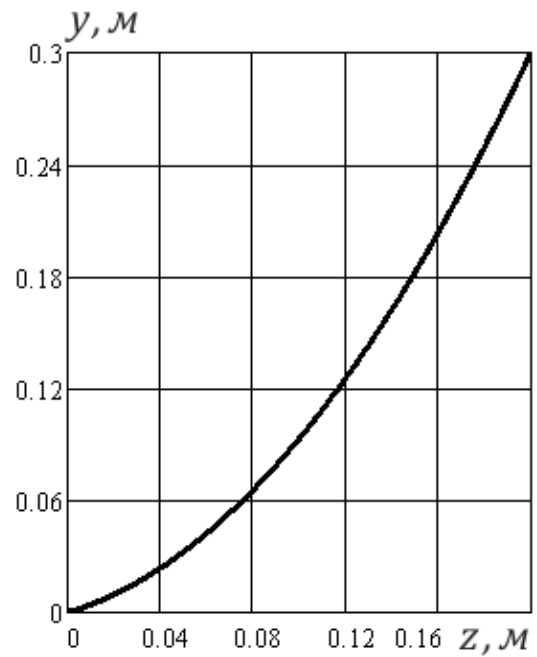
*a**б*

Рисунок 6 – Конструктивный вид фигурной кромки ножа с оптимальным углом подъема ($H_m = 0,30$ м; $L = 0,20$ м): *a* – при значениях: $\beta = 45^\circ$; $\theta_z = 26,56^\circ$;
б – при значениях: $\beta = 70^\circ$; $\theta_z = 20,77^\circ$

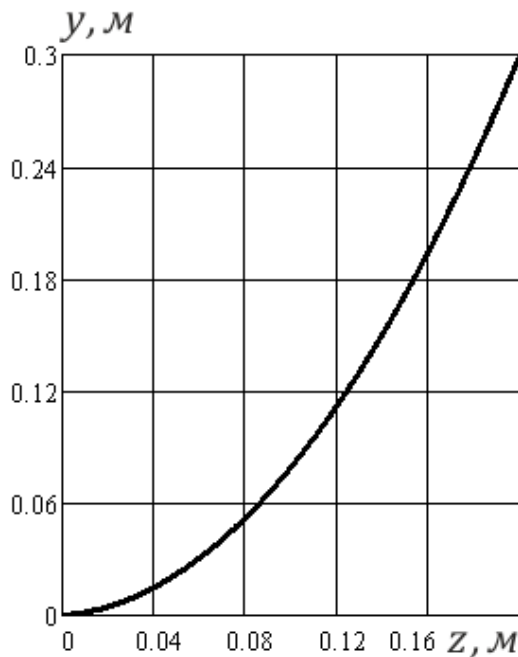
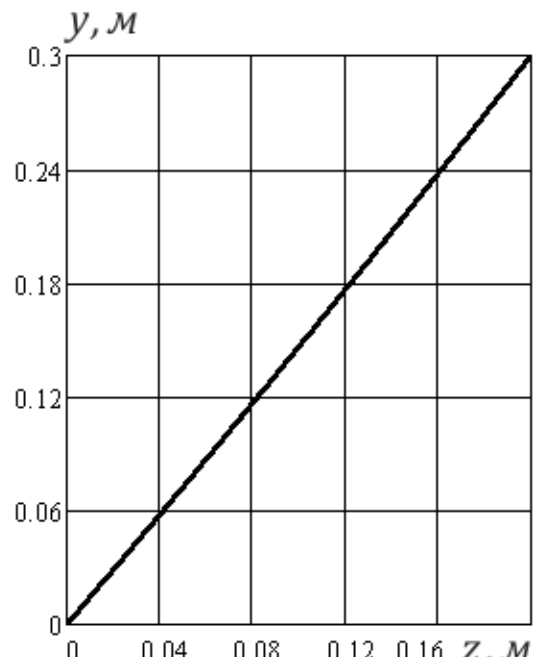
*a**б*

Рисунок 7 – Конструктивный вид фигурной кромки ножа с оптимальным углом подъема ($H_m = 0,30$ м; $L = 0,20$ м): *a* – при значениях: $\beta = 85^\circ$; $\theta_z = 18,95^\circ$;
б – при значениях: $\beta = 35^\circ$; $\theta_z = 32,46^\circ$

Выводы

1. Выполнена постановка задач аналитической оптимизации формы кромки фигурного лезвия для порционирования пищевых материалов по критериям минимальной

силы сопротивления формы и минимальной силы трения относительно ножа с прямой наклонной кромкой.

2. Разработана математическая модель для численного расчета оптимального угла входа фигурного лезвия с минимальной реактивной силой сопротивления, определена зависимость указанного оптимального угла от угла подъема ножа.

3. Установлены конструктивные виды фигурной кромки с минимальным оптимальным углом входа при различных заданных значениях длины лезвия.

4. Разработана математическая модель для расчета оптимального угла подъема фигурного лезвия с минимальным трением, определены основные зависимости указанного оптимального угла от угла входа ножа, полной высоты и длины лезвия, высоты режущей кромки ножа с прямой наклонной кромкой.

5. Установлены конструктивные виды фигурной кромки ножа с оптимальным углом подъема при различных заданных значениях угла входа, полной высоты лезвия, высоты режущей кромки и длины лезвия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.

2. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting. *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 307, 110648.

3. 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.

4. Malakizadi A., Hosseinkhani K., Mariano E. et al. Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. No. 88, pp. 3217-3232.

5. Самойлова Н.В., Агеев О.В. Математическое моделирование процесса резания рыбы ножом с фигурной криволинейной кромкой // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, № 3. С. 7-26.

6. 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.

7. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*. 2022. Vol. 15, 289.

8. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование деформационной силы трения ножа с различными параметрами шероховатости при резании рыбы // Известия КГТУ. 2019. № 54. С. 77-90.

9. Holl H.J., Meindlhumer M., Simader V., Schnurer D., Brandl A. Experimental investigation of friction reduction by superimposed vibrations. *Materials Today: Proceedings*. 2018. No. 5, pp. 26615-26621.

8. Spagnoli A., Terzano M., Brighenti R., Artoni F., Stähle P. The fracture mechanics in cutting: A comparative study on hard and soft polymeric materials. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. No. 148, pp. 554-564.

9. Voloski F.L.S., Tonello L., Ramires T., Reta G.G., Dewes C., Iglesias M., Mondadori R.G., Gandra E.A., da Silva W.P., Duval E.H. Influence of cutting and deboning operations on the microbiological quality and shelf life of buffalo meat. *Meat Science*. 2016. No. 116, pp. 207-212.

10. Ageev O.V., Jakubowski M., Giurgiulescu L. Mathematical simulation of deformation friction force during food material cutting. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2020. Vol. 12 (4), pp. 5-11.

REFERENCES

1. 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.

2. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting. *Journal of Food Engineering*, 2021. Vol. 307, 110648.

3. 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.

4. Malakizadi A., Hosseinkhani K., Mariano E. et al. Influence of friction models on FE simulation results of orthogonal cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. No. 88, pp. 3217-3232.

5. Samojlova N.V., Ageev O.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa rezaniya ryby nozhom s figurnoi krivolineinoi kromkoi* [Mathematical simulation of fish cutting process by knife with a figured edge]. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. Vol. 9, No. 3, pp. 7–26.

6. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samojlova 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 tehničeskogo universiteta*. 2019. No. 53, pp. 75-88.

7. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*, 2022. Vol. 15, 289.

8. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnoy sily treniya nozha s razlichnymi parametrami sherokhovatosti pri rezanii ryby* [Mathematical simulation of deformation friction force of knife with different parameters of roughness during fish cutting]. *Izvestija Kaliningradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2019. No. 54, pp. 77-90.

9. Holl H.J., Meindlhumer M., Simader V., Schnurer D., Brandl A. Experimental investigation of friction reduction by superimposed vibrations. *Materials Today: Proceedings*, 2018. No. 5, pp. 26615–26621.

8. Spagnoli A., Terzano M., Brighenti R., Artoni F., Stähle P. The fracture mechanics in cutting: A comparative study on hard and soft polymeric materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, No. 148, pp. 554-564.

9. Voloski F.L.S., Tonello L., Ramires T., Reta G.G., Dewes C., Iglesias M., Mondadori R.G., Gandra E.A., da Silva W.P., Duval E.H. Influence of cutting and deboning operations on the microbiological quality and shelf life of buffalo meat. *Meat Science*, 2016. No. 116, pp. 207-212.

10. Ageev O.V., Jakubowski M., Giurgiulescu L. Mathematical simulation of deformation friction force during food material cutting. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*. 2020. Vol. 12 (4), pp. 5-11.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самойлова Наталья Владимировна – преподаватель-исследователь, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: procyon@mail.ru)

Агеев Олег Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samojlova Natalia Vladimirovna – Lecturer Researcher, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: procyon@mail.ru)

Ageev Oleg Viatcheslavovich – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 25.01.2024; одобрена после рецензирования 01.02.2024, принята к публикации 06.02.2024.

The article was submitted 25.01.2024; approved after reviewing 01.02.2024; accepted for publication 06.02.2024.