

Научная статья

УДК 621.01:637.5.02

DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-4-51-68

Подход к математическому моделированию процесса вибрационного резания пищевых материалов

О.В. Агеев*, Н.В. Самойлова

*Калининградский государственный технический университет
Россия, Калининград, *oleg.ageev@klgtu.ru*

Аннотация. Разрабатывали комплекс математических моделей процесса виброрезания пищевых материалов. Проведен анализ известных работ в области вибрационного резания пищевых продуктов. Рассмотрена схема внедрения ножа с прямолинейной режущей кромкой в вязкоупругий материал при вибрационном резании. Проанализирован эффект кинематической трансформации элементарного ножа при наложении продольных колебаний. Разработаны математические модели для определения виброскорости элементарного ножа и угла виброрезания. Определены основные зависимости угла виброрезания от частоты колебаний, амплитуды и скорости подачи ножа. Разработаны математические модели для определения размерной и безразмерной сил сопротивления формы ножа, изменяющихся при виброрезании по гармоническому закону. Установлены основные зависимости указанных сил от частоты колебаний, амплитуды и скорости подачи лезвия. Разработаны математические модели для определения среднего угла виброрезания и средней безразмерной силы сопротивления формы, установлены их основные зависимости от частоты колебаний, амплитуды и скорости подачи ножа. Рассмотрен процесс виброрезания с наложением полигармонических колебаний, включающих две гармоники: основную и высшую. Разработаны математические модели для определения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы. Установлены основные зависимости указанного угла и безразмерной силы от номера высшей гармоники и скорости подачи ножа. Предложены математические модели для определения среднего угла виброрезания и средней безразмерной силы сопротивления формы при наложении полигармонических колебаний с двумя гармониками. Раскрыты основные зависимости указанных угла и безразмерной силы от номера высшей гармоники и скорости подачи ножа. Показано, что средние значения угла виброрезания и безразмерной силы существенно сокращаются с наложением на режущий орган вибраций с более высокими гармониками при постоянной суммарной частоте колебаний, что приводит к заметному сокращению энергетических затрат на резание и улучшению качества поверхности среза.

Ключевые слова: предварительная обработка сырья; виброрезание пищевого материала; математическое моделирование; виброскорость; нож; реология; вязкоупругость

Original article

Mathematical simulation of vibration cutting process for food materials

Oleg V. Ageev*, Natalia V. Samojlova

*Kaliningrad State Technical University
Kaliningrad, Russia, *oleg.ageev@klgtu.ru*

Abstract. The purpose of the paper is to develop a complex of mathematical models for vibration cutting process of food materials. An analysis of the research papers on vibration cutting of food products has been performed. A scheme for knife penetration with a straight cutting edge into a viscoelastic material during vibration is considered. The effect of kinematic transformation of an elementary knife when applying longitudinal vibrations is analyzed. Mathematical models for determining the vibration velocity of an elementary knife and the vibration cutting angle have been developed. The main dependences of the vibration cutting angle on the vibration frequency, amplitude, and feed speed of the knife have been calculated. Mathematical models for determining the dimensional and dimensionless resistance forces of the knife shape, which change during vibration cutting according to the harmonic law, have been developed. The main dependences of these forces on the vibration frequency, amplitude, and blade feed speed have been calculated. Mathematical models for determining the average vibration cutting angle and the average dimensionless shape resistance force have been developed; the main dependencies on the vibration frequency, amplitude and feed rate of the knife have been determined. The process of vibration cutting with the imposition of polyharmonic vibrations, including the fundamental and higher harmonics, is considered. Mathematical models for determining the vibration cutting angle and dimensionless shape resistance force have been developed. The main dependences of the indicated angle and dimensionless force on the number of the highest harmonic and the knife feed speed have been calculated. Mathematical

models for determining the average vibration cutting angle and the average dimensionless shape resistance force when polyharmonic vibrations with two harmonics are applied are proposed. The main dependences of the indicated angle and dimensionless force on the number of the highest harmonic and the knife feed speed have been calculated. The average values of the vibration cutting angle and dimensionless force are significantly reduced with the imposition of vibrations with higher harmonics on the cutting body at a constant total vibration frequency, which leads to a noticeable reduction in energy costs for cutting and an improvement in the quality of the cut surface.

Keywords: pretreatment of raw materials; vibration cutting food material; math modeling; vibration speed; knife; rheology; viscoelasticity

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования процесса порционирования пищевых продуктов является резание материала вибрирующим рабочим органом. Это позволяет повысить производительность порционирующего оборудования, снизить энергетические затраты на резание, улучшить качество поверхности среза с сокращением отходов, упростить конструкции режущих узлов машин. При вибрационном резании возможны три способа наложения колебаний на режущий орган при его движении в материале, показанные на рисунке 1.

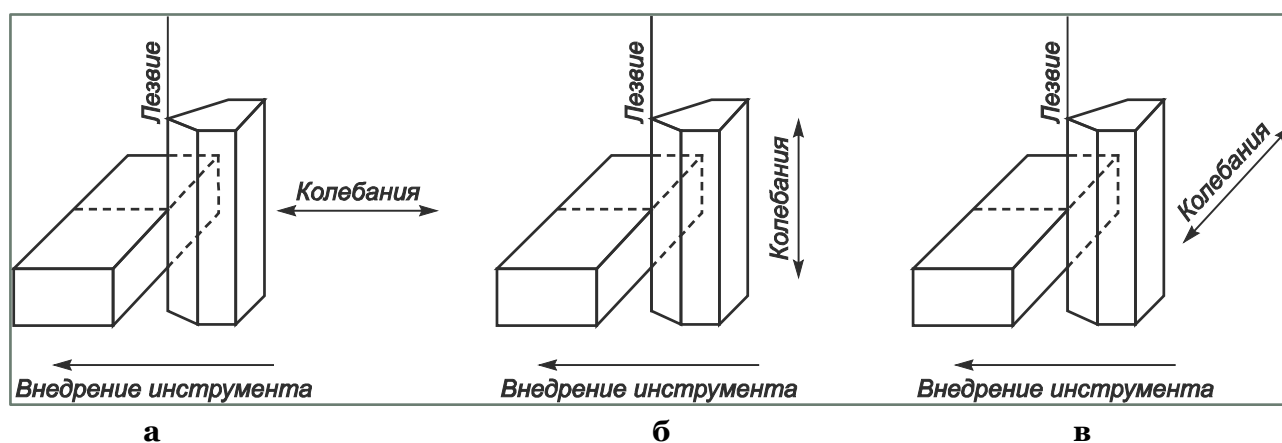


Рисунок 1 – Схемы вибрационного резания пищевых материалов: а – вибрационное резание с наложением колебаний по направлению подачи; б – вибрационное резание с продольным наложением колебаний; в – вибрационное резание с поперечным наложением колебаний

Figure 1. Schemes of vibration cutting of food materials: а – vibration cutting with imposition of vibrations along the feed direction; б – vibration cutting with longitudinal imposition of vibrations; в – vibration cutting with lateral imposition of vibrations

В машиностроении находят применение различные способы возбуждения колебаний при вибрационном резании: магнестрикционный, пьезоэлектрический, центробежный, электромагнитный, электродинамический, кинематический, гидравлический и пневматический. Анализ показывает, что в мехатронном порционирующем оборудовании пищевых производств наиболее эффективным является использование магнестрикционного и пьезоэлектрического способов, поскольку они позволяют обеспечить непосредственную связь вибровозбудителей с электронными управляющими устройствами, а также необходимую частоту колебаний. Следует отметить, что в вибротранспортных и виброориентирующих устройствах пищевых линий целесообразно применение кинематических принудительных вибровозбуждающих систем.

Имеющийся в пищевой отрасли опыт показывает, что вибрационное резание проявляет высокую эффективность при обработке вязкоупругих, хрупких, липких, пластичных и полидисперсных материалов со сложной структурой. Это объясняется тем, что при действии вибрации на вязкоупругие и многофазные среды в них наблюдаются специфические явления, которые в основном связаны с диссипацией энергии на микро- и макроуровнях. Наложение колебаний на режущий орган приводит к снижению прочностных, вязкостных и фрикционных характеристик разрезаемого материала. Сложность виброреологических явлений, возникающих при данном виде обработки, демонстрируют

следующие обстоятельства. Следствием действия вибрации является значительное ускорение механической усталости материала. В местах концентрации напряжений у твердых материалов часть рассеянной в них энергии уходит на развитие микротрещин в волокнах, имеющих нарушение структуры. Такие трещины ускоренно развиваются и являются новыми концентраторами напряжений, в результате чего наблюдается разрушение материала при усилиях, значительно меньших, чем предел прочности, часто даже ниже предела упругости.

Кроме того, при действии вибрации в материале наблюдается виброползучесть. При наложении колебаний на режущий орган процесс ползучести протекает значительно интенсивнее. Это показывает, что подбирая вибрационные воздействия определенным образом, возможно как усиливать действие невибрационных сил, так и ослаблять его. Таким образом, многие технологические процессы в пищевых системах, происходящие под действием внешних сил невибрационной природы, могут быть значительно интенсифицированы. Более того, специфические свойства вибрационных сил (неоднородность распределения в объеме сплошной среды, возможность управления путем изменения воздействий, избирательное действие на движение отдельных элементов сред) формируют условия для создания новых технологических процессов.

Процессы вибрационного резания материалов исследовались в пищевой отрасли отечественными и зарубежными учеными. Вопросы применения вибраций при обработке сахарной свеклы рассматривал в своей диссертации В.И. Руденко [1], который установил, что при наложении колебаний частотой от 3 до 20 Гц и амплитудой от 0,7 до 5,2 мм усилия резания снижаются на 40%.

Т.В. Чижикова изучала вибрационное резание шпика [2] и определила, что силы сопротивлений, действующие на лезвие с наложением колебаний, снижаются по сравнению с силами при резании без вибраций. В результате экспериментов определен наилучший диапазон температур для режима виброрезания шпика, в котором обеспечиваются оптимальные параметры процесса: чистота поверхности среза, минимальные затраты энергии и отсутствие смятия материала. Данный диапазон находится в пределах от -2 до $+2^{\circ}\text{C}$. Наряду с этим, было экспериментально установлено, что имеется некоторая характерная скорость колебаний режущего органа, выше которой мощность резания шпика практически не изменяется.

Процесс вибрационного резания мясных продуктов пластинчатыми ножами исследовался в диссертации Г.А. Каргиной [3] на базе экспериментальной установки, в которой применялся кинематический вибровозбудитель колебаний ножа. В результате работ было показано, что наложение колебаний на лезвие, изготовленное из металлической ленты с прямой кромкой, приводит к снижению усилий резания полукопченой, сырокопченой и вареной продукции.

Продвижением в теоретической интерпретации закономерностей вибрационного резания стала кандидатская диссертация И.Н. Лебедева [4]. Им изучен процесс образования поверхности раздела при вибрационном резании, рассмотрены структурно-механические свойства пищевых продуктов при вибрационной нагрузке, установлены оптимальные параметры режимов вибрационного резания ряда пищевых продуктов, разработаны практические рекомендации по выбору параметров режущих узлов измельчающих машин и аппаратов вибрационного действия и предложены новые конструкции и устройства для виброрезания пищевых продуктов.

Интерес представляют результаты В.И. Ивашова и соавторов [5, 6] по виброрезанию трубчатой кости, полученной при переработке мясного сырья. Эксперименты по виброрезанию бедренной кости крупного рогатого скота показали, что с увеличением параметров вибрации пластинчатого ножа силы сопротивлений существенно сокращаются. Анализ показал, что наложение вибраций при резании трубчатых костей повысил выход ценного белкового сырья на мясоперерабатывающем производстве за счет снижения энергозатрат и снижения количества отходов.

Вопросы вибрационного резания хлеба рассматривали Р.В. Иминов, В.А. Арет, С.А. Громцев [7]. В результате исследований получены эмпирические модели, связывающие усилия виброрезания с частотой колебаний режущего органа для различных видов продукции. Отмечено, что эмпирические модели, хотя и описывают основные тенденции изменения сил сопротивлений, однако не позволяют раскрыть физическую механику процесса. Показано, что применение вибраций рабочих органов приводит к существенному сокращению усилий резания, а также улучшению качества поверхности

готового продукта. Экспериментальным путем определены оптимальные параметры процесса: амплитуда колебаний, частота и угол наклона ножевого приспособления.

Процесс вибрационного резания пищевых материалов активно изучается за рубежом. М. J. King в результате исследования виброрезания мясных продуктов [8, 9] установил, что наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент сопровождается значительным снижением сил сопротивления, образованием слоя смазки в зоне резания и сокращением сил трения, что в конечном счете привело к заметному уменьшению энергозатрат при обработке.

S. Zahn и соавторы в ходе экспериментов вибрационного резания хлебопекарных изделий [10] показали, что усилия резания при использовании ультразвуковых колебаний существенно снижаются, качество нарезанных продуктов улучшается с увеличением амплитуды вибраций. Установлено, что хороший эффект достигается при резании высокопластичных продуктов с низкой скоростью подачи и наложении ультразвука на лезвие. Суммарная работа резания при этом возрастает при увеличении скорости подачи и уменьшении амплитуды колебаний.

Y. Schneider и соавторы исследовали ультразвуковое резание различных пищевых продуктов [11]. G. Arnold и соавторы [12], а также A. Lebar и соавторы [13] изучали виброрезание различных видов сыра. Данные ученые показали, что потребляемая мощность непосредственно связана с частотой, амплитудой и скоростью подачи вибрирующих режущих органов. Заметное влияние оказывает структура продукта. Работа резания при обработке более жирных материалов заметно ниже в сравнении с обезжиренными продуктами. При виброрезании более шероховатых образцов сила трения возрастает.

S. Schuldt и соавторы [14, 15] проанализировали влияние колебаний на процесс резания мясных продуктов, а также установили влияние скорости внедрения режущего органа в пищевой материал и геометрии ножей на усилия, возникающие при разделении продукта на части. Экспериментальный анализ процесса резания рыбного сырья проведен в работах [16, 17].

На основании анализа вышеперечисленных работ можно выделить общие моменты, характерные для вибрационного резания пищевых продуктов. Высокочастотные колебания режущей кромки изменяют параметры процесса резания и режим разрушения материалов. Ряд авторов полагает, что увеличение скорости деформирования слоев материала в области режущей кромки резко повышает жесткость ткани и приводит к переходу режима разрушения из пластичного в хрупкий. За счет этого снижаются сила резания и нагрев, улучшается качество среза и продлевается срок службы рабочего органа. Вместе с тем ряд исследователей отмечает, что требуемое соотношение скорости виброрезания и качества продукта может быть достигнуто при оптимизации частоты вибрации, амплитуды колебаний и скорости подачи. Это положительно сказывается на ресурсосбережении и увеличении долговечности лезвия.

Несмотря на ценность известных работ и обширные экспериментальные исследования в данной области науки, до настоящего времени отсутствуют аналитические математические описания процесса вибрационного резания, позволяющие раскрыть физическую механику явления. Требуется теоретическое изучение причин, которые приводят к снижению усилий резания при наложении колебаний на рабочий орган. В связи с этим, целью настоящей статьи является разработка комплекса математических моделей процесса виброрезания пищевого материала и создание теоретической основы для оптимизации параметров колебаний с целью обеспечения ресурсосбережения и улучшения качества готового продукта.

Математическое моделирование параметров виброрезания

Рассмотрим процесс внедрения прямолинейного ножа в материал в нормальном относительно кромки направлении. На рабочий орган со стороны материала в данном случае действует система сил, подробно проанализированная в работах [18–20]. Лезвие при этом перемещается равномерно и прямолинейно, а материал находится в условиях стесненного сжатия. Механическое поведение пищевой среды будем описывать реологической моделью Максвелла–Томсона (моделью стандартного вязкоупругого тела).

Выделим в ноже с прямолинейной горизонтальной кромкой элементарный нож AA_1B_1 , бесконечно малой длиной dz и конструктивным углом заточки α при вершине A (рисунок 2). При отсутствии

вибрации лезвия элементарный нож погружается в материал с постоянной скоростью подачи v_n в направлении, нормальном к режущей кромке. При наложении колебаний частотой ω на рабочий орган в соответствии с рисунком 1б элементарный нож получает дополнительное движение с переменной виброскоростью v_s в направлении, параллельном кромке. Вследствие этого движение элементарного ножа в материале осуществляется с результирующей скоростью v . При этом плоскость элементарного ножа отклоняется на угол $\gamma_s = \angle A_1AA_2 = \angle B_1AB_2$ в сторону, противоположную направлению скольжения режущей кромки.

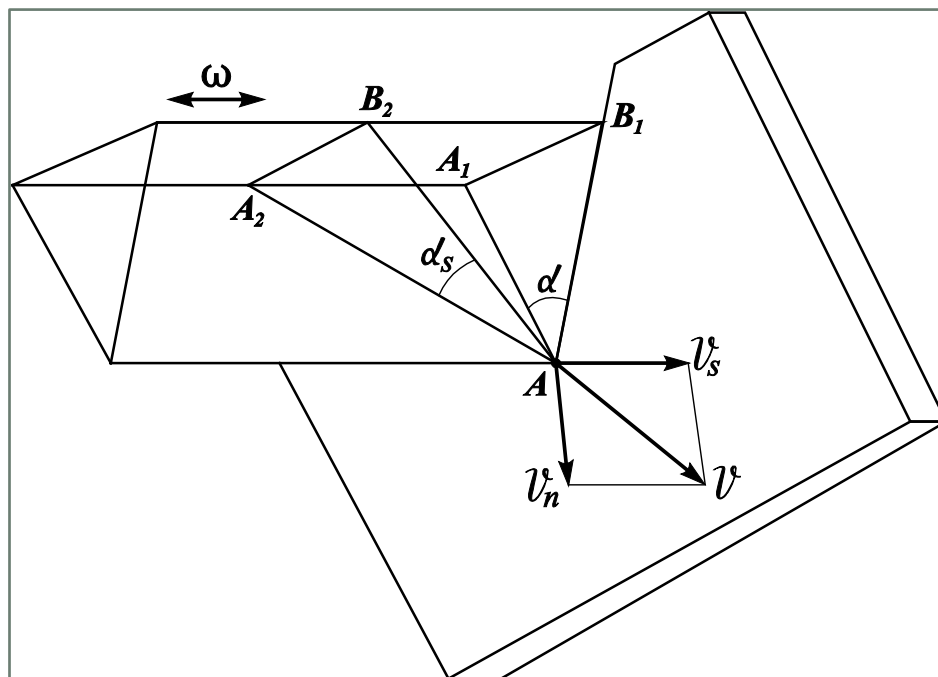


Рисунок 2 – Схема внедрения ножа с прямолинейной режущей кромкой в вязкоупругий материал при вибрационном резании

Figure 2. Scheme for penetration of a knife with a straight cutting edge into a viscoelastic material during vibration cutting

В результате форма элементарного ножа трансформируется из треугольника AA_1B_1 в треугольник AA_2B_2 . Одновременно угол заточки элементарного ножа кинематически трансформируется и приобретает величину фактического угла резания, который назовем углом виброрезания α_s .

Угол γ_s будем называть углом виброскольжения элементарного ножа, а отношение $k_s = \frac{v_s}{v_n} = \text{tg}(\gamma_s)$ – коэффициентом виброскольжения. Поскольку угол между векторами \vec{v}_s и \vec{v}_n составляет 90° , согласно рисунку 2 результирующая скорость элементарного ножа равна $v = \sqrt{v_n^2 + v_s^2}$. Из треугольников AA_1B_1 и AA_2B_2 найдем выражение для тангенса угла виброрезания элементарного ножа

$$\text{tg}\alpha_s = \text{tg}\alpha \cdot \cos\gamma_s = \frac{\text{tg}\alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + v_s^2}}. \quad (1)$$

Для определения угла виброрезания и вредной силы сопротивления формы необходимо установить закон изменения виброскорости v_s во времени. Пусть на лезвие накладываются гармонические колебания, при которых координата вершины элементарного ножа зависит от времени t следующим образом

$$a(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где $a(t)$ – виброперемещение, м;

A – амплитуда колебаний, м;

ω – циклическая (угловая) частота, рад/с;

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{(2 \cdot \pi)}{T};$$

f – частота, Гц;

T – период колебаний, с.

При гармонических колебаниях виброскорость также изменяется во времени по синусоидальному закону с той же частотой, что и виброперемещение

$$v_s(t) = \frac{da(t)}{dt} = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t). \tag{3}$$

Подставим выражение (3) в формулу (1) и получим

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + (\omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t))^2}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)}}. \tag{4}$$

Результаты моделирования параметров виброрезания и их обсуждение

На рисунке 3 показаны зависимости виброперемещения элементарного ножа от времени при различных значениях частоты колебаний, на рисунке 4 – зависимости виброскорости от времени. На рисунках 5 и 6 приведены зависимости угла виброрезания от времени при различных значениях частоты и амплитуды колебаний, а также скорости подачи.

Рисунки 3 и 4 показывают, что между максимумами виброперемещения и виброскорости имеется фазовый сдвиг, составляющий $T/4$ с. С повышением частоты колебаний при постоянной амплитуде максимальное значение виброскорости возрастает, что усиливает кинематическую трансформацию элементарного ножа.

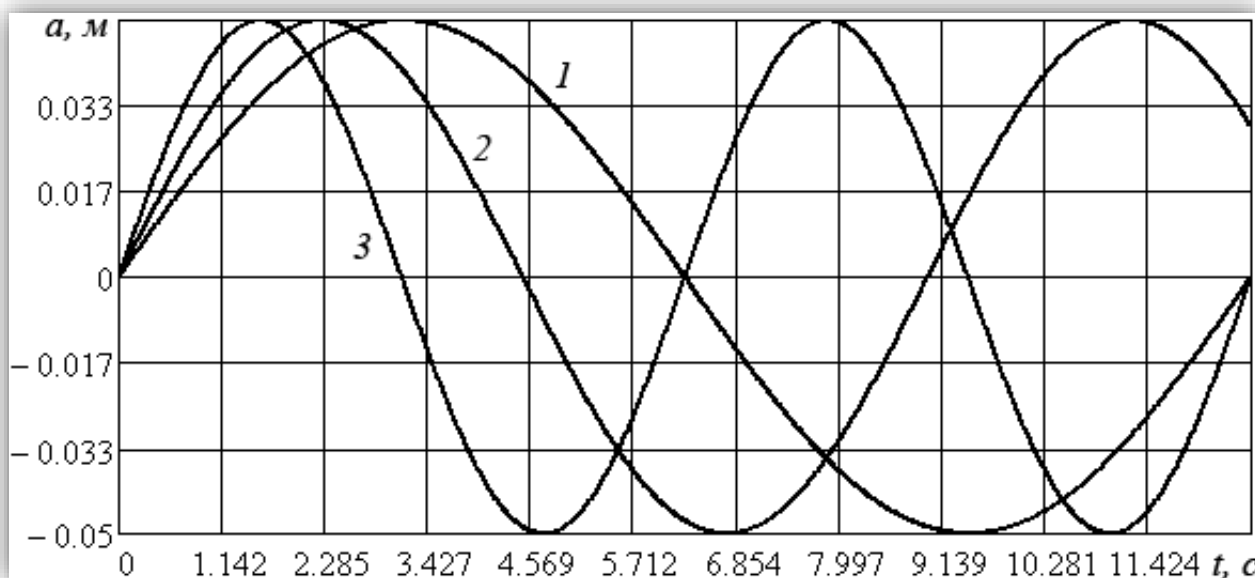


Рисунок 3 – Зависимости виброперемещения элементарного ножа от времени при различных значениях циклической частоты колебаний ($A = 0,05$ м): 1 – $\omega = 0,5$ рад/с, $T = 12,566$ с; 2 – $\omega = 0,7$ рад/с, $T = 8,976$ с; 3 – $\omega = 1$ рад/с, $T = 6,283$ с

Figure 3. Dependences of vibration displacement of an elementary knife on time at different values of the cyclic frequency of vibration ($A = 0,05$ m): 1 – $\omega = 0,5$ rad/s, $T = 12,566$ s; 2 – $\omega = 0,7$ rad/s, $T = 8,976$ s; 3 – $\omega = 1$ rad/s, $T = 6,283$ s

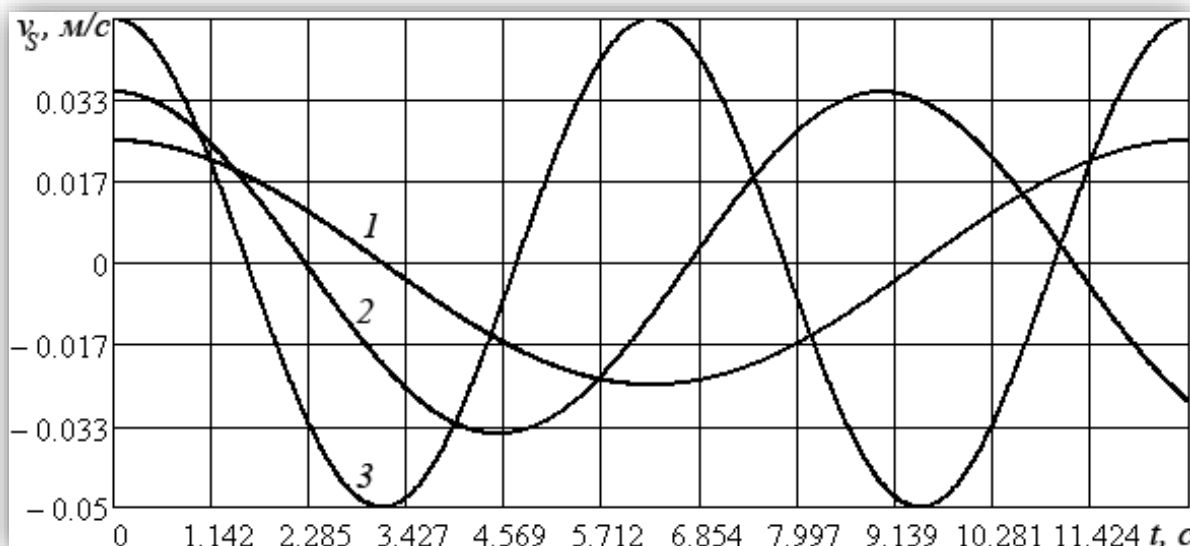
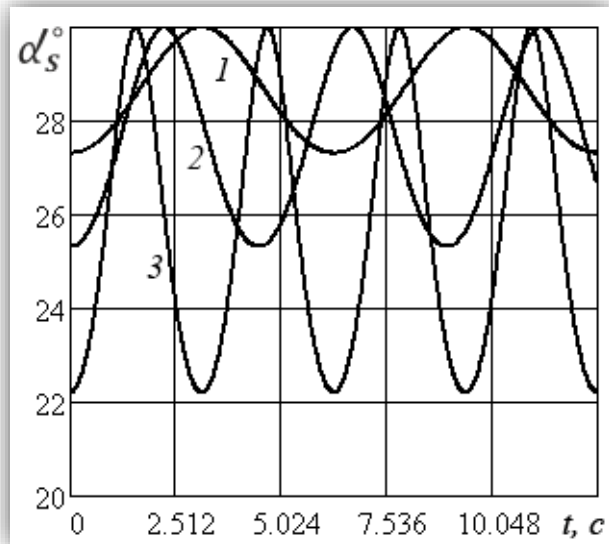


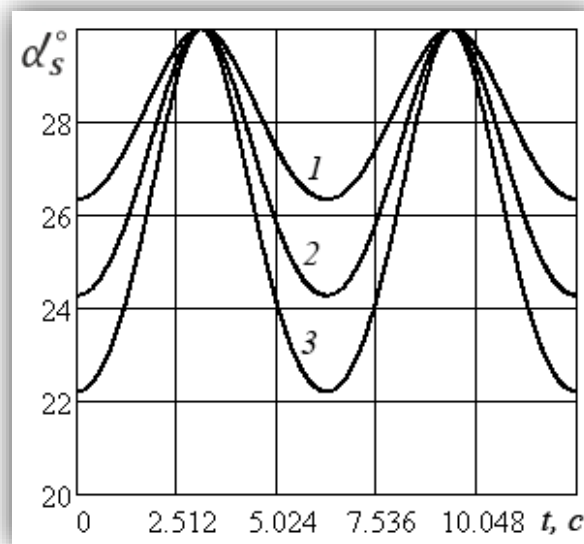
Рисунок 4 – Зависимости виброскорости элементарного ножа от времени при различных значениях циклической частоты колебаний ($A = 0,05$ м): 1 – $\omega = 0,5$ рад/с, $T = 12,566$ с; 2 – $\omega = 0,7$ рад/с, $T = 8,976$ с; 3 – $\omega = 1$ рад/с, $T = 6,283$ с

Figure 4. Dependences of the vibration velocity of an elementary knife on time at different values of the cyclic frequency of vibration ($A = 0.05$ m): 1 – $\omega = 0.5$ rad/s, $T = 12.566$ s; 2 – $\omega = 0.7$ rad/s, $T = 8.976$ s; 3 – $\omega = 1$ rad/s, $T = 6.283$ s

Рисунок 5 иллюстрирует, что значение угла виброрезания изменяется во времени по синусоидальному закону от значения конструктивного угла заточки α до некоторого минимума. Примечательно, что величина данного минимума угла находится в зависимости от частоты и амплитуды колебаний.



а



б

Рисунок 5 – Зависимости угла виброрезания от времени ($\alpha = 30^\circ$; $v_n = 0,05$ м/с): а – при различных значениях циклической частоты колебаний ($A = 0,05$ м): 1 – $\omega = 0,5$ рад/с; 2 – $\omega = 0,7$ рад/с; 3 – $\omega = 1$ рад/с; б – при различных значениях амплитуды колебаний ($\omega = 0,5$ рад/с): 1 – $A = 0,06$ м; 2 – $A = 0,08$ м; 3 – $A = 0,10$ м

Figure 5. Dependence of vibration cutting angle on time ($\alpha = 30^\circ$; $v_n = 0.05$ m/s): а – at different values of the cyclic frequency of vibrations ($A = 0.05$ m): 1 – $\omega = 0.5$ rad/s; 2 – $\omega = 0.7$ rad/s; 3 – $\omega = 1$ rad/s; б – at different of vibrations' amplitude ($\omega = 0.5$ rad/s): 1 – $A = 0.06$ m; 2 – $A = 0.08$ m; 3 – $A = 0.10$ m

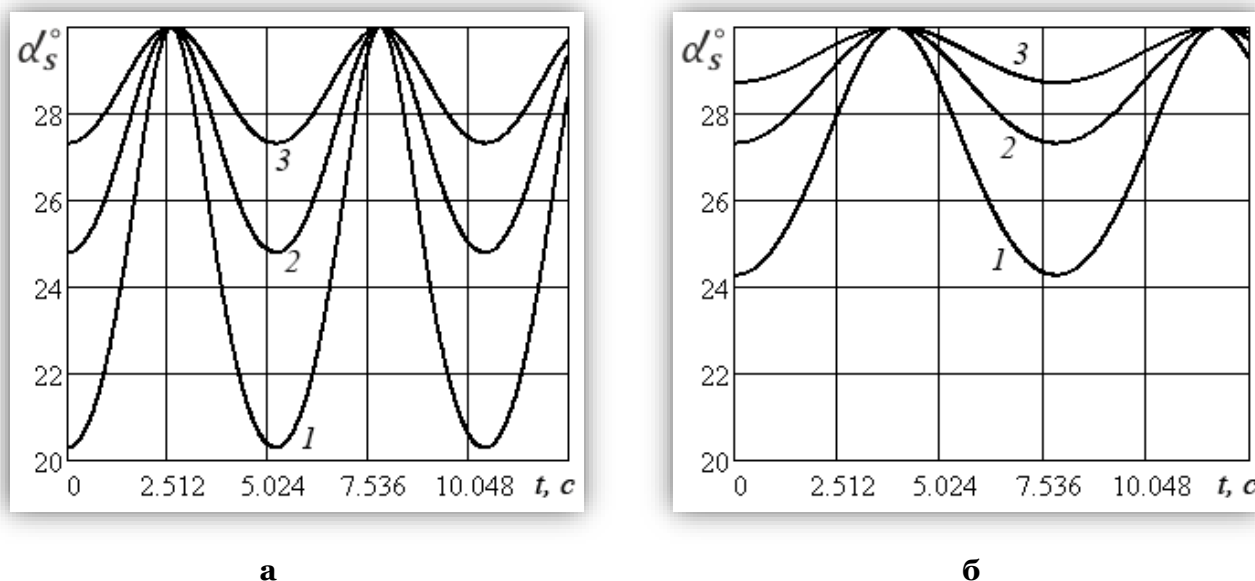


Рисунок 6 – Зависимости угла виброрезания от времени ($\alpha = 30^\circ$; $A = 0,05$ м): а – при различных значениях скорости подачи ($\omega = 0,6$ рад/с): 1 – $v_n = 0,025$ м/с, 2 – $v_n = 0,04$ м/с, 3 – $v_n = 0,06$ м/с; б – при различных значениях скорости подачи ($\omega = 0,4$ рад/с): 1 – $v_n = 0,025$ м/с, 2 – $v_n = 0,04$ м/с, 3 – $v_n = 0,06$ м/с
 Figure 6. Dependence of vibration cutting angle on time ($\alpha = 30^\circ$; $A = 0,05$ м): а – at different values of the knife feed speed ($\omega = 0,6$ рад/с): 1 – $v_n = 0,025$ м/с, 2 – $v_n = 0,04$ м/с, 3 – $v_n = 0,06$ м/с; б – at different values of the knife feed speed ($\omega = 0,4$ рад/с): 1 – $v_n = 0,025$ м/с, 2 – $v_n = 0,04$ м/с, 3 – $v_n = 0,06$ м/с

С повышением частоты и амплитуды минимальное значение угла виброрезания снижается, что означает существенное усиление эффекта кинематического заострения элементарного ножа при вибрации. Рисунок 6 демонстрирует, что увеличение скорости подачи лезвия при постоянных параметрах колебаний приводит к снижению эффекта кинематического заострения элементарного ножа. Это означает, что при повышении скорости подачи, например, для обеспечения высокой производительности, необходимо увеличивать частоту и амплитуду колебаний для поддержания эффекта кинематической трансформации режущего органа.

Математическое моделирование сил сопротивления при вибрационном резании

Очевидно, что установленный выше эффект кинематического заострения элементарного ножа должен приводить к снижению силы вредного сопротивления при вибрационном резании. Сила сопротивления формы пластинчатого ножа без наложения колебаний определяется выражением (8) в статье [18]. Подставим полученное выше выражение (4) в известную формулу для силы сопротивления формы ножа

$$F_{1s} = \frac{L \cdot \xi \cdot \text{tg}^2 \alpha \cdot v_n^2}{l \cdot (v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t))} \cdot \left[\frac{h_m^2}{2} + \frac{\xi \cdot \eta \cdot v_n}{E_1^2} \cdot \left(h_m + \frac{1 - \exp(k \cdot h_m)}{k} \right) \right], \quad (5)$$

где $\xi = \frac{E_0 \cdot E_1}{E_0 + E_1} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{E_1}}$;

E_0 – мгновенный модуль упругости материала;

E_1 – запаздывающий модуль упругости материала;

η – коэффициент динамической вязкости материала;

L – длина лезвия;

α – угол заточки ножа;

h_m – высота фаски ножа;

l – длина материала в недеформированном состоянии;

$$k = -\frac{E_0 + E_1}{\eta \cdot v}$$

Принимая во внимание выражения (4) и (5), для режима виброрезания запишем

$$F_{1S} = F_{1m}^{\text{пласт}} \cdot \frac{v_n^2}{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)}, \quad (6)$$

где $F_{1m}^{\text{пласт}}$ – сила сопротивления формы ножа без наложения вибраций.

Введем безразмерную силу сопротивления формы ножа \bar{F}_{1S} при виброрезании с учетом $F_{1S} = F_{1m}^{\text{пласт}} \cdot \bar{F}_{1S}$

$$\bar{F}_{1S} = \frac{v_n^2}{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) показывают, что сила сопротивления при вибрационном резании будет меньше соответствующей силы при резании без наложения колебаний за счет кинематической трансформации угла заточки элементарного ножа: $0 < F_{1S} \leq F_{1m}^{\text{пласт}}$; $0 < \bar{F}_{1S} \leq 1$. Из выражений (6) и (7) также следует, что при отсутствии вибраций, т. е. при $\omega = 0$ будут справедливы равенства $F_{1S} = F_{1m}^{\text{пласт}}$; $\bar{F}_{1S} = 1$. Кроме того, в моменты времени, при которых $\cos(\omega \cdot t) = 0$, указанные размерная и безразмерная силы также будут достигать своих максимумов $F_{1S} = F_{1m}^{\text{пласт}}$; $\bar{F}_{1S} = 1$, а угол заточки элементарного ножа будет равен при этом конструктивному углу заточки: $\alpha_S = \alpha$. Очевидно, указанные максимумы сил сопротивлений формы имеют место в такие моменты времени, при которых $v_S = 0$, что наглядно иллюстрирует рисунок 4.

Поскольку повышение частоты и амплитуды колебаний приводит к снижению минимальных значений угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы, должна снижаться мощность резания, которая затрачивается на преодоление сил вредных и полезных сопротивлений. Для оценки снижения энергетических затрат на резание продукта и суммарного повышения качества поверхности среза при наложении вибраций определим средние значения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы за период колебания $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$. Используя операцию осреднения по времени t на отрезке T , запишем следующую формулу для тангенса среднего угла виброрезания

$$\text{tg} \bar{\alpha}_S = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (\text{tg} \alpha_S) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{\text{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)}} dt = \frac{\text{tg} \alpha \cdot v_n}{T} \cdot \int_0^T \frac{1}{\sqrt{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)}} dt. \quad (8)$$

Выражение для средней безразмерной силы сопротивления формы за период колебания с учетом формулы (7) выглядит следующим образом

$$\bar{F}_{1S} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \bar{F}_{1S} dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{v_n^2}{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)} dt = \frac{v_n^2}{T} \cdot \int_0^T \frac{1}{v_n^2 + \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t)} dt. \quad (9)$$

Результаты моделирования сил сопротивления и их обсуждение

Выражение (9) позволяет исследовать зависимости безразмерной силы сопротивления формы при виброрезании от параметров процесса. На рисунке 7 приведены зависимости безразмерной силы сопротивления формы от времени при различных значениях частоты и амплитуды колебаний. Рисунок 7 демонстрирует, что значение указанной силы изменяется во времени по синусоидальному закону от своего максимального значения $\bar{F}_{1S} = 1$ до некоторого минимума. Заметим, что величина данного минимума силы находится в зависимости от частоты и амплитуды колебаний.

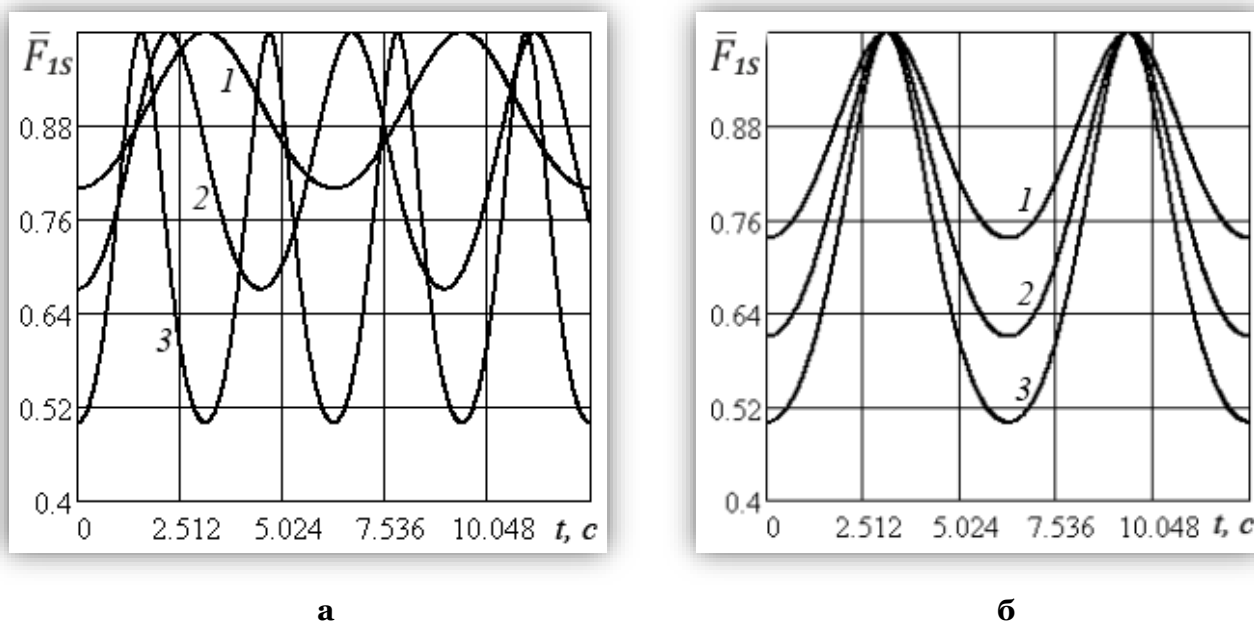
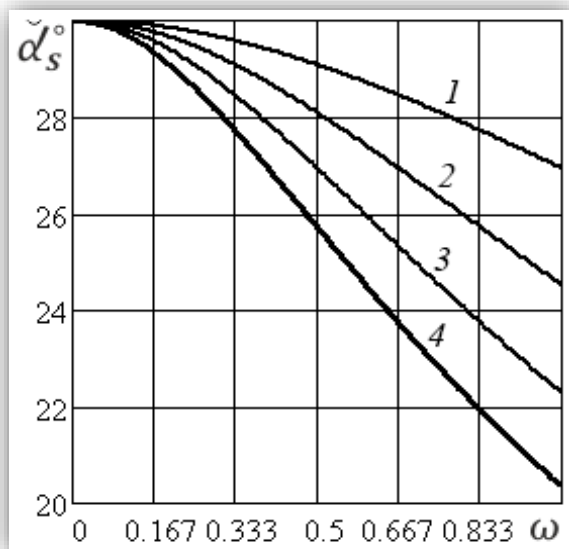


Рисунок 7 – Зависимости безразмерной силы сопротивления формы от времени ($\alpha = 30^\circ$; $v_n = 0,05$ м/с): а – при различных значениях циклической частоты колебаний ($A = 0,05$ м): 1 – $\omega = 0,5$ рад/с, 2 – $\omega = 0,7$ рад/с, 3 – $\omega = 1$ рад/с; б – при различных значениях амплитуды колебаний ($\omega = 0,5$ рад/с): 1 – $A = 0,06$ м, 2 – $A = 0,08$ м, 3 – $A = 0,10$ м

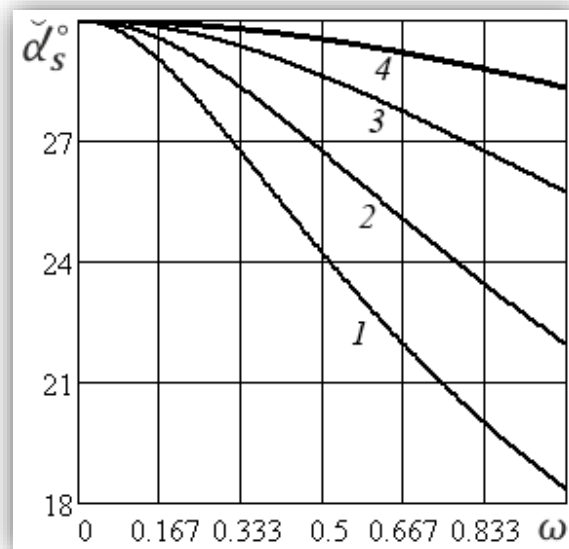
Figure 7. Dependence of the dimensionless shape resistance force on time ($\alpha = 30^\circ$; $v_n = 0.05$ м/с): а – at different values of the cyclic frequency of vibrations ($A = 0.05$ м): 1 – $\omega = 0.5$ рад/с, 2 – $\omega = 0.7$ рад/с, 3 – $\omega = 1$ рад/с; б – at different of values of vibrations' amplitude ($\omega = 0.5$ рад/с): 1 – $A = 0.06$ м; 2 – $A = 0.08$ м; 3 – $A = 0.10$ м

Поскольку выражения (8) и (9) приводят к эллиптическим интегралам, средние значения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы за период колебания целесообразно определить численным методом на ЭВМ. На рисунке 8а показаны зависимости среднего угла виброрезания от частоты колебаний при различных значениях амплитуды, на рисунке 8б – при различных значениях скорости подачи ножа. На рисунке 9а приведены зависимости средней безразмерной силы сопротивления от частоты при различных значениях амплитуды, на рисунке 9б – при различных значениях скорости подачи ножа.

Анализ рисунка 8 показывает, что при наложении вибраций ($\omega > 0$) средний угол виброрезания элементарного ножа всегда меньше конструктивного угла заточки. С увеличением частоты колебаний указанный угол нелинейно монотонно понижается. Рисунок 9 демонстрирует, что средняя безразмерная сила сопротивления формы при наложении колебаний всегда меньше единицы и нелинейно монотонно снижается при повышении частоты вибрации. Это говорит о том, что энергетические затраты на преодоление сил сопротивлений при вибрационном резании всегда меньше соответствующих затрат при резании без вибраций. Кроме того, улучшается качество поверхности среза вследствие кинематического заострения лезвия.



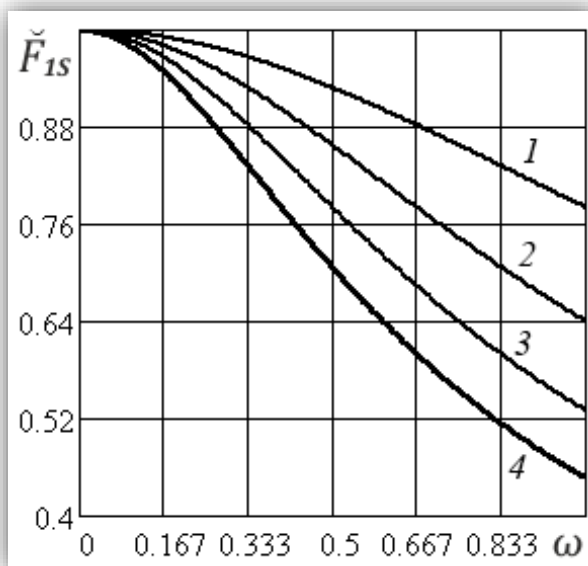
а



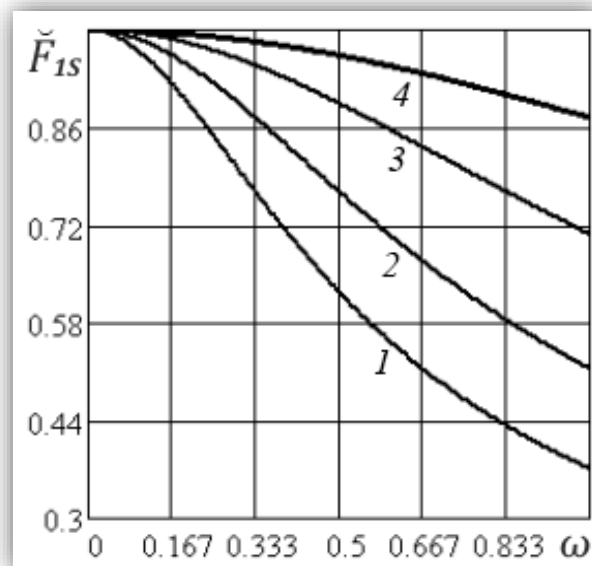
б

Рисунок 8 – Зависимости среднего угла виброрезания от циклической частоты колебаний ($\alpha = 30^\circ$):
 а – при различных значениях амплитуды ($v_n = 0,05$ м/с): 1 – $A = 0,04$ м; 2 – $A = 0,06$ м; 3 – $A = 0,08$ м; 4 – $A = 0,10$ м;
 б – при различных значениях скорости подачи ($A = 0,05$ м): 1 – $v_n = 0,02$ м/с; 2 – $v_n = 0,03$ м/с; 3 – $v_n = 0,05$ м/с;
 4 – $v_n = 0,09$ м/с

Figure 8. Dependence of the average vibration cutting angle on the cyclic vibration frequency ($\alpha = 30^\circ$):
 а – at different values of the amplitude ($v_n = 0.05$ m/s): 1 – $A = 0.04$ m; 2 – $A = 0.06$ m; 3 – $A = 0.08$ m; 4 – $A = 0.10$ m;
 б – at different values of the knife feed speed ($A = 0.05$ m): 1 – $v_n = 0.02$ m/s; 2 – $v_n = 0.03$ m/s; 3 – $v_n = 0.05$ m/s;
 4 – $v_n = 0.09$ m/s



а



б

Рисунок 9 – Зависимости средней безразмерной силы сопротивления от циклической частоты колебаний ($\alpha = 30^\circ$): а – при различных значениях амплитуды ($v_n = 0,05$ м/с): 1 – $A = 0,04$ м, 2 – $A = 0,06$ м, 3 – $A = 0,08$ м, 4 – $A = 0,10$ м; б – при различных значениях скорости подачи ($A = 0,05$ м): 1 – $v_n = 0,02$ м/с; 2 – $v_n = 0,03$ м/с; 3 – $v_n = 0,05$ м/с; 4 – $v_n = 0,09$ м/с

Figure 9. Dependences of the average dimensionless resistance force on the cyclic frequency of oscillations ($\alpha = 30^\circ$):
 а – at different values of the amplitude ($v_n = 0.05$ m/s): 1 – $A = 0.04$ m, 2 – $A = 0.06$ m, 3 – $A = 0.08$ m, 4 – $A = 0.10$ m;
 б – at different values of the knife feed speed ($A = 0.05$ m): 1 – $v_n = 0.02$ m/s, 2 – $v_n = 0.03$ m/s, 3 – $v_n = 0.05$ m/s,
 4 – $v_n = 0.09$ m/s

Математическое моделирование процесса вибрационного резания с различными формами колебаний

Исследуем зависимости угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления от формы периодических колебаний. Для этого рассмотрим процесс резания пищевого материала при наложении на режущий орган полигармонических колебаний. Такие колебания могут быть представлены в виде суммы двух и более гармонических колебаний с частотами, находящимися между собой в рациональном соотношении. Пусть виброперемещение элементарного ножа описывается следующей полигармонической функцией с двумя гармониками

$$\tilde{a}(t) = 0,5 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t) + 0,5 \cdot A \cdot \sin(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t), \tag{10}$$

где \tilde{k} – рациональное число, являющееся номером гармоники; $\tilde{k} = 2, 3, \dots n$. Первое слагаемое в выражении (10) является первой гармоникой. Вторая компонента колебаний с номером $\tilde{k} > 1$ является высшей гармоникой. Поскольку \tilde{k} является рациональным числом, и обратная величина $\frac{1}{\tilde{k}}$ представляет собой несократимую дробь, то функция (10) является периодической функцией с циклической частотой ω .

Виброскорость элементарного ножа при полигармонических колебаниях определяется выражением $\tilde{v}_s(t) = \frac{d\tilde{a}(t)}{dt} = 0,5 \cdot \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t) + 0,5 \cdot \tilde{k} \cdot \omega \cdot A \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t) = 0,5 \cdot \omega \cdot A \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))$. $\tag{11}$

Подставим выражение (11) в формулу (1) и определим тангенс угла виброрезания элементарного ножа при полигармонических колебаниях

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \tilde{\alpha}_s &= \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + \tilde{v}_s^2}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + [0,5 \cdot \omega \cdot A \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))]^2}} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2}}. \end{aligned} \tag{12}$$

Выражение для безразмерной силы сопротивления формы при полигармонических вибрациях ножа с учетом формулы (12) имеет вид

$$\tilde{F}_{1s} = \frac{v_n^2}{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2}. \tag{13}$$

Принимая во внимание (12), получим выражение для тангенса среднего угла виброрезания

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \hat{\alpha}_s &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (\operatorname{tg} \tilde{\alpha}_s) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{\sqrt{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2}} dt = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot v_n}{T} \cdot \int_0^T \frac{1}{\sqrt{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2}} dt. \end{aligned} \tag{14}$$

Выражение для средней безразмерной силы сопротивления формы при наложении полигармонических колебаний с учетом формулы (13) выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \hat{F}_{1s} &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \tilde{F}_{1s} dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{v_n^2}{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2} dt = \\ &= \frac{v_n^2}{T} \cdot \int_0^T \frac{1}{v_n^2 + 0,25 \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot (\cos(\omega \cdot t) + \tilde{k} \cdot \cos(\tilde{k} \cdot \omega \cdot t))^2} dt. \end{aligned} \tag{15}$$

Результаты математического моделирования процесса вибрационного резания с различными формами колебаний и их обсуждение

На рисунке 10 показаны зависимости виброперемещения элементарного ножа от времени при различных значениях номера гармоники \tilde{k} , на рисунке 11 – зависимости виброскорости от времени. На рисунке 12а изображены зависимости угла виброрезания от времени при различных значениях \tilde{k} . На рисунке 12б показаны зависимости угла виброрезания от номера гармоники \tilde{k} при различных значениях скорости подачи ножа. На графиках для сравнения приведены параметры колебательного процесса в соответствии с формулой (2) при $\tilde{k} = 1$.

Рисунок 10 иллюстрирует, что при увеличении номера гармоники \tilde{k} амплитуда суммарного колебания элементарного ножа с частотой ω либо снижается, либо не изменяется. Амплитудный спектр колебаний при повышении \tilde{k} заметно изменяется за счет изменения формы высшей гармоники.

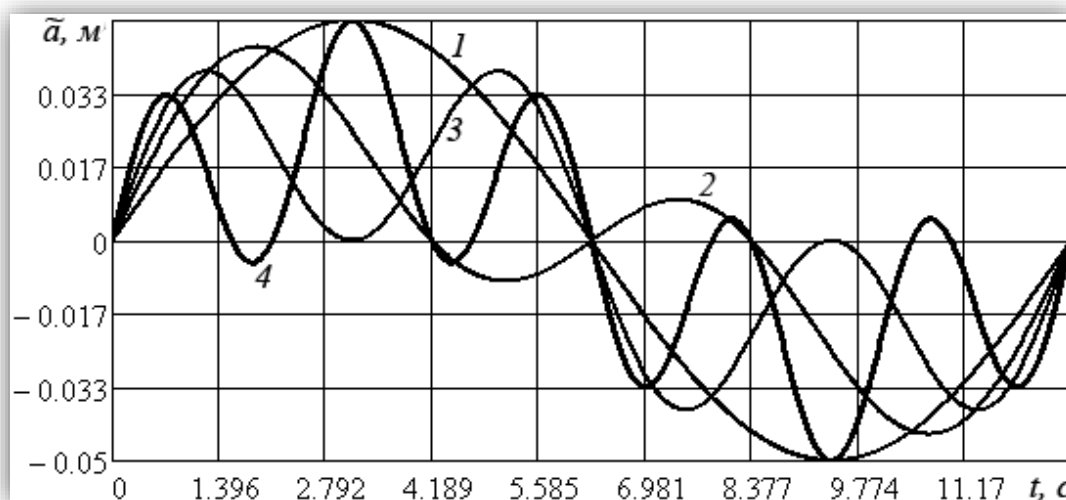


Рисунок 10 – Зависимости виброперемещения элементарного ножа от времени при различных значениях номера гармоники \tilde{k} ($A = 0,05$ м; $\omega = 0,5$ рад/с): 1 – $\tilde{k} = 1$ (одна гармоника); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; 4 – $\tilde{k} = 5$
 Figure 10. Dependences of vibration displacement of an elementary knife on time for different values of the harmonic number \tilde{k} ($A = 0.05$ m; $\omega = 0.5$ rad/s): 1 – $\tilde{k} = 1$ (one harmonics); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; 4 – $\tilde{k} = 5$

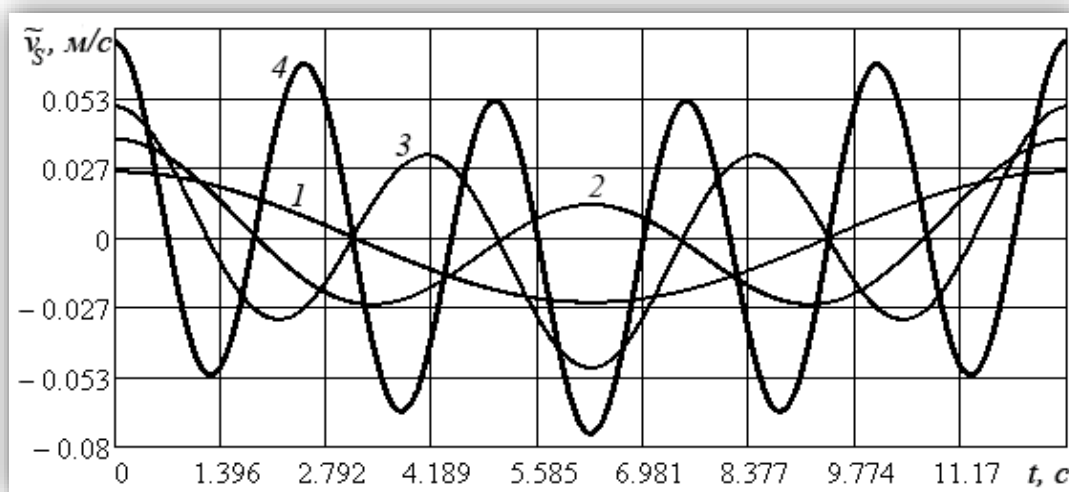


Рисунок 11 – Зависимости виброскорости элементарного ножа от времени при различных значениях номера гармоники \tilde{k} ($A = 0,05$ м; $\omega = 0,5$ рад/с): 1 – $\tilde{k} = 1$ (одна гармоника); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; 4 – $\tilde{k} = 5$
 Figure 11. Dependences of the vibration velocity of an elementary knife on time for different values of the harmonic number \tilde{k} ($A = 0.05$ m; $\omega = 0.5$ rad/s): 1 – $\tilde{k} = 1$ (one harmonics); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; 4 – $\tilde{k} = 5$

Рисунок 11 показывает, что вибросторность элементарного ножа при увеличении номера гармоники \tilde{k} существенно возрастает при постоянной частоте ω результирующих колебаний.

Рисунок 12а демонстрирует, что с увеличением номера высшей гармоники минимальное значение угла виброрезания существенно снижается. Согласно рисунку 12б, при повышении \tilde{k} и $t = T$ угол виброрезания значительно уменьшается, причем при наложении высоких гармоник ($\tilde{k} > 7$) указанный угол снижается более чем в 2 раза.

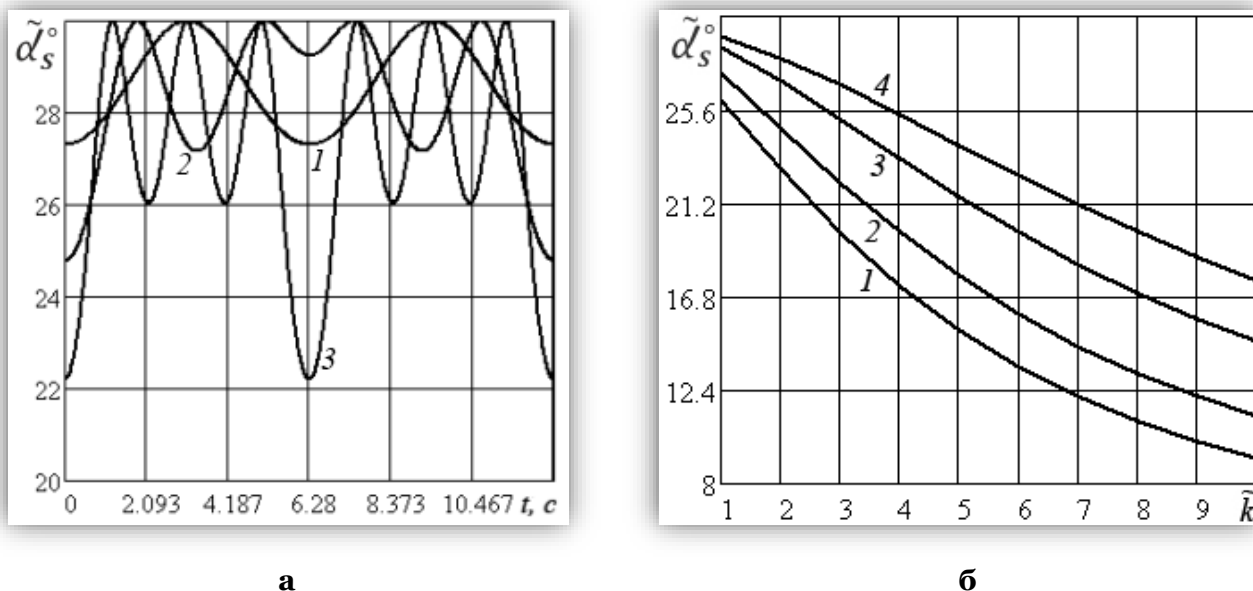


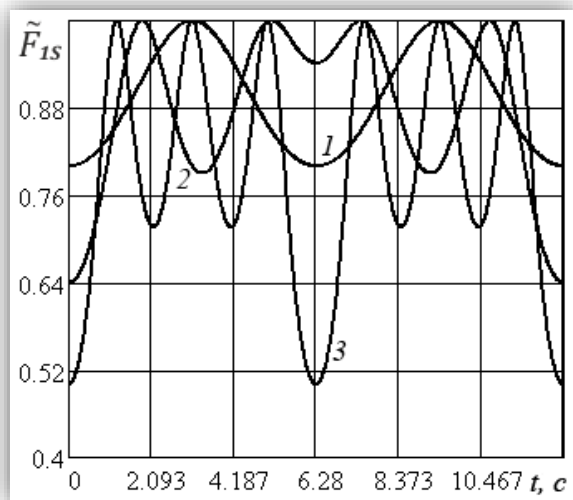
Рисунок 12 – Зависимости угла виброрезания ($\alpha = 30^\circ$; $A = 0,05 \text{ м}$; $\omega = 0,5 \text{ рад/с}$): а – от времени при различных значениях \tilde{k} ($v_n = 0,05 \text{ м/с}$): 1 – $\tilde{k} = 1$ (одна гармоника); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; б – от параметра \tilde{k} при различных значениях скорости подачи ножа ($t = T$): 1 – $v_n = 0,04 \text{ м/с}$; 2 – $v_n = 0,05 \text{ м/с}$; 3 – $v_n = 0,07 \text{ м/с}$; 4 – $v_n = 0,09 \text{ м/с}$
 Figure 12. Dependencies of vibration cutting angle ($\alpha = 30^\circ$; $A = 0.05 \text{ m}$; $\omega = 0.5 \text{ rad/s}$): а – on time at different values of \tilde{k} ($v_n = 0.05 \text{ m/s}$): 1 – $\tilde{k} = 1$ (one harmonics); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; б – on \tilde{k} at different values of the knife feed speed ($t = T$): 1 – $v_n = 0.04 \text{ m/s}$; 2 – $v_n = 0.05 \text{ m/s}$; 3 – $v_n = 0.07 \text{ m/s}$; 4 – $v_n = 0.09 \text{ m/s}$

Выражение (13) позволяет исследовать зависимости безразмерной силы сопротивления формы при различных значениях номера гармоники \tilde{k} . На рисунке 13а показаны зависимости указанной силы от времени при различных значениях \tilde{k} . На рисунке. 13б приведены зависимости безразмерной силы от номера гармоники \tilde{k} при различных значениях скорости подачи ножа.

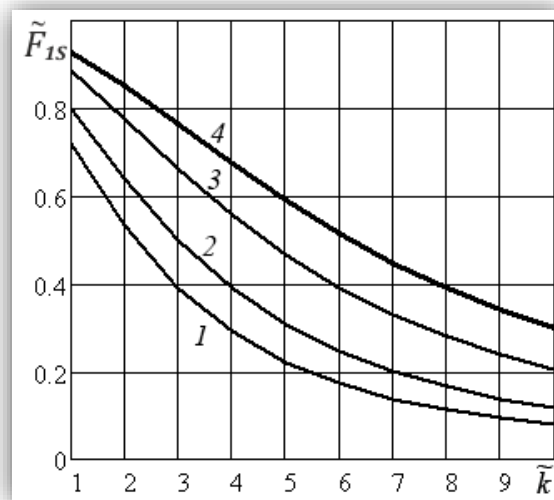
Рисунок 13 иллюстрирует, что безразмерная сила сопротивления формы с увеличением номера высшей гармоники существенно снижается в несколько раз. Это говорит о значительном сокращении энергетических затрат на резание и улучшение качества среза при наложении на режущий орган вибраций с более высокими гармониками. Для оценки мощности резания при наложении полигармонических колебаний определим средние значения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы за период колебания при наложении полигармонических колебаний.

Средние значения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы за период колебания также определим численным методом на ЭВМ. На рисунке 14а показаны зависимости от параметра \tilde{k} среднего угла виброрезания при различных значениях скорости подачи, на рисунке 14б – зависимости средней безразмерной силы сопротивления.

Рисунок 14 демонстрирует, что средние значения угла виброрезания и безразмерной силы сопротивления формы при наложении полигармонических колебаний нелинейно монотонно снижаются, что влечет существенное сокращение мощности, затрачиваемое на преодоление сил сопротивлений. Теоретические выводы, полученные при анализе моделей (8), (9), (14), (15), хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований различных авторов, отмеченных выше.



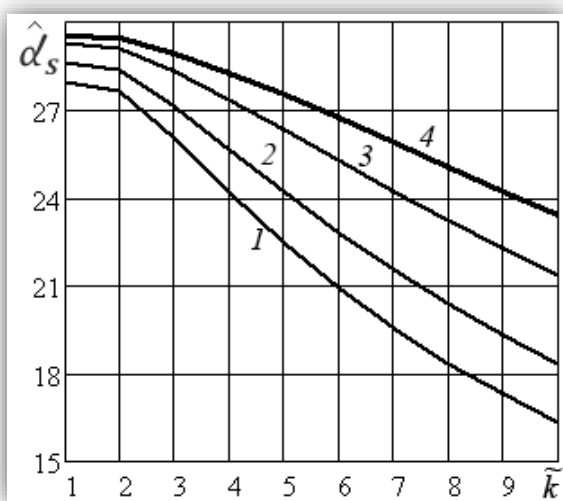
а



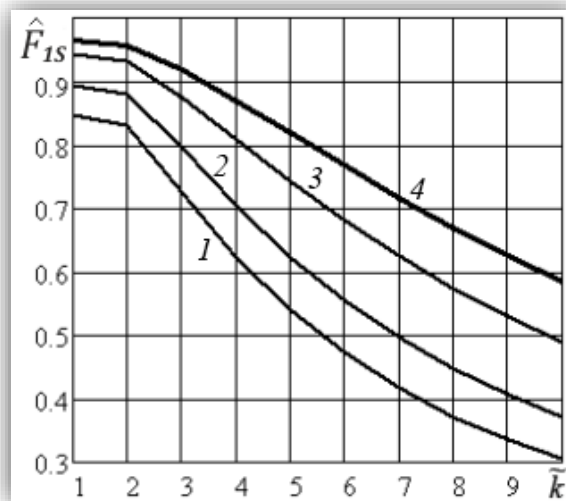
б

Рисунок 13 – Зависимости безразмерной силы сопротивления формы ($A = 0,05 \text{ м}$; $\omega = 0,5 \text{ рад/с}$):
 а – от времени при различных значениях \tilde{k} ($v_n = 0,05 \text{ м/с}$): 1 – $\tilde{k} = 1$ (одна гармоника); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$;
 б – от \tilde{k} при различных значениях скорости подачи ножа ($t = T$): 1 – $v_n = 0,04 \text{ м/с}$; 2 – $v_n = 0,05 \text{ м/с}$;
 3 – $v_n = 0,07 \text{ м/с}$; 4 – $v_n = 0,09 \text{ м/с}$

Figure 13. Dependences of the dimensionless shape resistance force ($A = 0.05 \text{ m}$; $\omega = 0.5 \text{ rad/s}$): а – on time at different values of \tilde{k} ($v_n = 0.05 \text{ m/s}$): 1 – $\tilde{k} = 1$ (one harmonics); 2 – $\tilde{k} = 2$; 3 – $\tilde{k} = 3$; б – on \tilde{k} at different values of the knife feed speed ($t = T$): 1 – $v_n = 0.04 \text{ m/s}$; 2 – $v_n = 0.05 \text{ m/s}$; 3 – $v_n = 0.07 \text{ m/s}$; 4 – $v_n = 0.09 \text{ m/s}$



а



б

Рисунок 14 – Влияние номера гармоники \tilde{k} полигармонических колебаний на процесс виброрезания ($A = 0,05 \text{ м}$; $\omega = 0,5 \text{ рад/с}$) при различных значениях скорости подачи: а – зависимости среднего угла виброрезания от \tilde{k} ($\alpha = 30^\circ$); б – зависимости средней безразмерной силы сопротивления формы от \tilde{k} : 1 – $v_n = 0,04 \text{ м/с}$;
 2 – $v_n = 0,05 \text{ м/с}$; 3 – $v_n = 0,07 \text{ м/с}$; 4 – $v_n = 0,09 \text{ м/с}$

Figure 14. The influence of the harmonic number \tilde{k} of polyharmonic vibrations on the vibration cutting process ($A = 0.05 \text{ m}$; $\omega = 0.5 \text{ rad/s}$) at different feed speed: а – dependencies of vibration cutting average angle on \tilde{k} ($\alpha = 30^\circ$); б – dependencies of average dimensionless shape resistance force on \tilde{k} : 1 – $v_n = 0.04 \text{ m/s}$; 2 – $v_n = 0.05 \text{ m/s}$; 3 – $v_n = 0.07 \text{ m/s}$; 4 – $v_n = 0.09 \text{ m/s}$

Следует отметить, что теория деформирования вязкоупругих материалов прогнозирует – под действием периодических нагрузок такие тела нагреваются и меняют свои свойства. Скорость ползучести волокон в них резко возрастает, и в слоях материала под воздействием вибрации может произойти «тепловое» разрушение. Однако данный аспект выходит за рамки рассмотрения настоящей работы

Заключение

Рассмотрена схема внедрения ножа с прямолинейной режущей кромкой в вязкоупругий материал при вибрационном резании. Проанализирован эффект кинематической трансформации элементарного ножа при наложении продольных колебаний.

Угол виброрезания элементарного ножа изменяется во времени по гармоническому закону. Определены основные теоретические зависимости угла виброрезания от частоты колебаний, амплитуды и скорости подачи ножа, которые показывают, что средние значения указанного угла и силы сопротивления существенно снижаются с увеличением частоты и амплитуды колебаний. Это ведет к сокращению энергетических затрат при вибрационном резании и улучшению поверхности среза.

Средние значения угла виброрезания и безразмерной силы существенно сокращаются с наложением на режущий орган вибраций с более высокими гармониками при постоянной суммарной частоте колебаний, что приводит к заметному сокращению энергетических затрат на резание и улучшению качества поверхности среза.

Полученные теоретические описания процесса вибрационного резания пищевых продуктов, согласуются с экспериментальными результатами различных авторов, что создает практическую основу для дальнейшего развития теории виброрезания пищевых материалов и оптимизации процесса обработки пищевых материалов.

Литература

1. Руденко В.И. Исследования вибрационного резания корнеплодов и разработка новых эффективных резок для пищевой промышленности: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1971. 140 с.
2. Чижикова Т.В. Исследование процесса резания шпика вибрирующим лезвием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1972. 118 с.
3. Каргина Г.А. Исследование вибрационных электромагнитных машин для резки пищевых продуктов в предприятиях общественного питания и разработка методики их расчета: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1961. 106 с.
4. Лебедев И.Н. Исследование вибрационного резания пищевых продуктов с целью интенсификации процесса и улучшения его качества: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1981. 135 с.
5. Каповский Б.Р., Ивашов В.И., Кожевникова О.Е., Захаров А.Н. Опытное определение производительности процесса измельчения замороженных мясных блоков методом фрезерования // Все о мясе. 2016. № 6. С. 22–24.
6. Ivashov V.I., Kapovsky B.R., Plyasheshnik P.I., Pchelkina V.A., Iskakova E.L., Nurmukhanbetova D. Mathematical simulation of one-stage grinding of products frozen in blocks // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2018. V. 5, no. 431, pp. 48–65. DOI: 10.32014/2018.2518-170X.9
7. Арет В.А., Иминов Р.В., Антуфьев В.Т., Громцев С.А. Исследование ресурсосберегающего процесса нарезки хлеба // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 1. С. 9.
8. King M.J. Fracture energy during slicing of frozen meat by a vibrating knife. *Meat Science*, 1997, V. 46, no. 4, pp. 387–399. DOI: 10.1016/S0309-1740(97)00033-8
9. King M.J. Slicing frozen meat with an oscillating knife. *Meat Science*. 1999, V. 51, no. 3, pp. 261–269. DOI: 10.1016/S0309-1740(98)00132-6
10. Zahn S., Schneider Y., Rohm H. Ultrasonic cutting of foods: Effects of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2006, V. 7, no. 4, pp. 288–293. DOI: 10.1016/j.ifset.2006.04.004
11. Schneider Y., Zahn S., Rohm H. Power requirements of the high-frequency generator in ultrasonic cutting of foods. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 86, no. 1, pp. 61–67. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.09.024
12. Arnold G., Zahn S., Legler A., Rohm H. Ultrasonic cutting of foods with inclined moving blades. *Journal of Food Engineering*. 2011, V. 103, no. 4, pp. 394–400. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.009
13. Lebar A., Blatnik O., Junkar M., Orbanic H. Vibration assisted cutting of gouda cheese. *Czech Journal of Food Sciences*. 2012, V. 30, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.17221/190/2009-CJFS

14. Schuldt S., Schneider Y., Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. *Journal of Food Engineering*. 2018, V. 230, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024
15. Schuldt S., Arnold G., Kowalewski J., Schneider Y., Rohm H. Analysis of the sharpness of blades for food cutting. *Journal of Food Engineering*. 2016, V. 188, pp. 13–20. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.04.022
16. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the efficiency of food material cutting during inclined and shear movements of knife. *Materials*. 2022. V. 15, no. 1, article 289. DOI: 10.3390/ma15010289
17. 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, V. 307, article 110648. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110648
18. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*. 2019, V. 40, no. 6, pp. 580–587. DOI: 10.3103/S1068366619060023
19. Ageev O.B., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование сил полезного сопротивления при резании охлажденных пищевых продуктов // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 70–82. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-70-82
20. Ageev O.B., 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.

References

1. Rudenko V.I. Research of vibration cutting of root crops and development of new efficient cutting machines for the food industry. *Candidate's thesis*. Kiev, 1971. (In Russian)
2. Chizhikova T.V. Research of the process of cutting bacon with a vibrating blade. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 1972. (In Russian)
3. Kargina G.A. Research of vibration electromagnetic machines for cutting food products in public catering establishments and development of methods for their calculation. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 1961. (In Russian)
4. Lebedev I.N. Research of vibration cutting of food products to intensify the process and improve its quality. *Candidate's thesis*. Kiev, 1981. (In Russian)
5. Kapovskiy B.R., Ivashov V.I., Kogevnikova O.E., Zakharov A.N. The experimental determination of crushing by milling process performance for frozen meat blocks. *Vse o Myase*. 2016, no. 6, pp. 22–24. (In Russian)
6. Ivashov V.I., Kapovskii B.R., Plyasheshnik P.I., Pchelkina V.A., Iskakova E.L., Nurmukhanbetova D. Mathematical simulation of one-stage grinding of products frozen in blocks. *Izvestiya Natsional'noi Akademii Nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya Geologii i Tekhnicheskikh Nauk*. 2018, V. 5, no. 431, pp. 48–65. DOI: 10.32014/2018.2518-170X.9
7. Aret V.A., Iminov R.V., Antuf'ev V.T., Gromtsev S.A. Research on resource-saving bread slicing process. *Processes and Food Production Equipment*. 2012, no. 1, p. 9. (In Russian)
8. King M.J. Fracture energy during slicing of frozen meat by a vibrating knife. *Meat Science*. 1997, V. 46, no. 4, pp. 387–399. DOI: 10.1016/S0309-1740(97)00033-8
9. King M.J. Slicing frozen meat with an oscillating knife. *Meat Science*. 1999, V. 51, no. 3, pp. 261–269. DOI: 10.1016/S0309-1740(98)00132-6
10. Zahn S., Schneider Y., Rohm H. Ultrasonic cutting of foods: Effects of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2006, V. 7, no. 4, pp. 288–293. DOI: 10.1016/j.ifset.2006.04.004
11. Schneider Y., Zahn S., Rohm H. Power requirements of the high-frequency generator in ultrasonic cutting of foods. *Journal of Food Engineering*. 2008, V. 86, no. 1, pp. 61–67. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.09.024
12. Arnold G., Zahn S., Legler A., Rohm H. Ultrasonic cutting of foods with inclined moving blades. *Journal of Food Engineering*. 2011, V. 103, no. 4, pp. 394–400. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.009
13. Lebar A., Blatnik O., Junkar M., Orbanic H. Vibration assisted cutting of gouda cheese. *Czech Journal of Food Sciences*. 2012, V. 30, no. 1, pp. 1–8.
14. Schuldt S., Schneider Y., Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. *Journal of Food Engineering*. 2018, V. 230, pp. 55–62. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.02.024
15. Schuldt S., Arnold G., Kowalewski J., Schneider Y., Rohm H. Analysis of the sharpness of blades for food cutting. *Journal of Food Engineering*. 2016, V. 188, pp. 13–20. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.04.022
16. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the efficiency of food material cutting during inclined and shear movements of knife. *Materials*. 2022. V. 15, no. 1, article 289. DOI: 10.3390/ma15010289
17. 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, V. 307, article 110648. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110648
18. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*. 2019, V. 40, no. 6, pp. 580–587. DOI: 10.3103/S1068366619060023
19. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Mathematical simulation of effective resistance forces during cutting of chilled food products. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020, no. 3, pp. 70–82. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-3-70-82. (In Russian)
20. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Mathematical modeling of the deformation strength of the knife with different parameters of roughness when cutting fish. *Izvestiya KGTU*. 2019, no. 54, pp. 77–90. (In Russian)

Информация об авторах

Олег Вячеславович Агеев – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования
Наталья Владимировна Самойлова – преподаватель-исследователь

Information about the authors

Oleg V. Ageev, D. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Process Equipment Engineering
Natalia V. Samojlova, Lecturer and Researcher

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 15.11.2023

Одобрена после рецензирования 13.12.2023

Принята к публикации 15.12.2023

The article was submitted 15.11.2023

Approved after reviewing 13.12.2023

Accepted for publication 15.12.2023