

УДК 534-16, 534.642

ОЕСD 01.03.АА

Виброакустические свойства пищевых продуктов

Пильненко А.К.¹, Заплетников И.Н.², Владыченко Н.И.³¹ Доцент кафедры оборудования пищевых производств,² Профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств³ Магистрант кафедры оборудования пищевых производств^{1, 2, 3} Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, ул. Щорса, 31

Аннотация

Исследования физико-механических свойств пищевых продуктов посвящено много работ. Исследованиям виброакустических свойств пищевых продуктов уделено недостаточное внимание. Особенно это касается вибрационных характеристик. Целью работы является исследование процесса прохождения вибрационных волн по пищевым продуктам, возникающим от воздействия режущих инструментов различной конструкции. В качестве вибрационной характеристики (ВХ) принят скорректированный уровень виброускорения. Приведена методика исследований и описание экспериментального стенда. Измерения проводились аттестованным прибором «Ассистент». В результате получена графическая интерпретация распространения вибрационной волны по свежим овощным продуктам для прямолинейной и зубчатой режущей кромки. Получены эмпирические выражения результатов эксперимента. Закономерности прохождения вибрационных волн через пищевые продукты специфичны для каждого продукта, что создает предпосылки для диагностики пищевых продуктов.

Ключевые слова: резание, пищевой продукт, лезвие ножа, уровень виброускорения, физико-механические свойства.

Vibro-acoustic properties of food products

Pilnenko A.K.¹, Zapletnikov I.N.², Vladychenko N.I.³¹ Candidate of technical sciences of the Department of Food Production Equipment,² Professor, Head of the Department of Food Production Equipment³ Master of the Department of Food Production Equipment,^{1, 2, 3} Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhaila Tugan-Baranovsky, Donetsk, Shchorsa Ul., 31

Abstract

Research vibroacoustic properties of food products paid to insufficient attention. Purpose of work is an study of the process transmission of vibrational waves by food products from the impact of cutting tools various designs. It is resulted research methodology and description experimental stand. Received graphic interpretation propagation of a vibration wave on fresh vegetable products for rectilinear and dentate cutting edge. Received empirical expressions results of the experiment. Regularities of passage vibrational waves through food products are specific for each product, which creates the prerequisites for diagnostics of food products.

Key words: cutting, food product, blade of knife, the level of vibration acceleration, physical and mechanical properties.

*E-mail: pilnenko_a@mail.ru (Пильненко А.К.), obladn@kaf.donnuet.education (Заплетников И.Н.), nikita-vladychenko@yandex.ua (Владыченко Н.И.)

Введение

Существует довольно много разнообразных методов и средств для изучения физико-механических свойств пищевых продуктов. Исследованиями этих свойств занимались Ребиндер П.А., Горбатов А.В., Мачихин С.А., Николаев Б.А., Рогов И. А. и другие. Некоторые из этих исследователей остановились на разработке простых и удобных в эксплуатации приборов, а другие применяли относительно сложные установки, преимущественно для динамических исследований с применением тензометрии, скоростной киносъемки, электроизмерительной и другой аппаратуры. Все исследования направлены на определение отдельных факторов, относящихся к физико-механическим свойствам. А вот исследования возникновения, распространения и формирования виброакустических свойств пищевых продуктов в комплексном процессе измельчения, а именно в процессе резания лезвием ножа не исследовалось. В связи с этим, возникает необходимость разработки методики исследования, проведения экспериментальных исследований виброакустических свойств пищевых продуктов в процессе резания.

1. Основная часть

Мякоть пищевых продуктов имеет клеточное строение, растительные клетки имеют довольно жесткие стенки. Клеточные стенки – оболочки бывают толщиной от десятых долей микрона до десятков микрон и состоят в основном из целлюлозы. Целлюлоза, как и вообще клеточная оболочка в целом, обладает упругими свойствами, которые можно выразить модулем упругости. Модуль упругости для чистой целлюлозы равен 10^4 МПа. Но в клеточную оболочку помимо целлюлозы входят и другие компоненты, поэтому модуль упругости у нее ниже и составляет около 700 МПа [1, 2].

Внутри клетки существует определенное гидростатическое давление, называемое тургорным. Из-за этого давления в клеточной оболочке возникают напряжения, которые зависят от физиологического состояния растений. При этих довольно больших напряжениях и давлениях относительная деформация оболочки не велика (порядка нескольких процентов). Из этого следует, что оболочка растительных клеток довольно прочная и хорошо приспособлена в условиях нагружения сохранять размеры клеток [2, 3].

Сопrotивление клеток деформированию и разрушению зависит от сложных процессов, протекающих внутри мякоти клубня продукта, что в свою очередь зависит от физического состояния клубня продукта, вида и режима механического нагружения, условий испытания, среды и т.д.

В настоящее время оценку прочности производят при использовании теории прочности, основанной на методах механики сплошной среды. Применение такой теории прочности требует значительно меньше информации о материале, чем микроскопические или атомистические теории и формулируются удобными для практического применения критериями [2, 3].

Деформируемое тело в механике сплошных сред рассматривается как сплошная среда с непрерывным распределением вещества. Предполагается, что частицы тела обладают одинаковыми свойствами. Однако такой подход к строению и свойствам тел, в частности, клубней овощей, не соответствует действительности, так как в природе все является неоднородным. Неоднородность объясняется клеточным строением материала, местными нарушениями постоянства химического состава, наличием инородных примесей, микротрещин и другими дефектами, влияющими на местные возмущения поля напряжений. Но в силу статистических законов

относительные перемещения точек реального тела можно считать практически совпадающими с перемещениями соответствующих точек однородной модели. Чем меньше относительные размеры дефектов, тем больше оснований считать приемлемыми методы механики сплошной среды, оперирующей с усредненными характеристиками механических свойств материала.

В действительности изотропны только аморфные тела, сельскохозяйственные продукты, такие как растительные материалы, вообще обладают большей или меньшей степени волокнистостью и, следовательно, неоднородны по строению. Но это относится, в основном, к стеблям и листьям. Что же касается таких продуктов, как клубни, то решая задачи, например, контактной прочности, особенностями клеточного строения можно пренебречь, считая их изотропными [3].

Следовательно, при анализе условий разрушения тканей клубней овощей можно, с достаточной достоверностью, пользоваться законом Гука. В связи с тем, что нагрузка при деформации воспринимается мякотью клубня, а кожура лишь распределяет ее на большую площадь, все прочностные, упругие и пластические свойства клубня можно изучать, исследуя процесс деформации мякоти.

В клубне овощей при ударе, как показывает В.Г. Гагаулина [4] возникают волны, содержащие две компоненты: вертикальную, распространяющуюся вглубь в виде волны сжатия и горизонтальную, распространяющуюся по поверхности клубня во все стороны от контактной площади в виде волны расширения. Вертикальная компонента волны сжатия, хотя и быстро затухает, вызывает разрушения мякоти клубня, что подтверждается микро структурным анализом срезов. Горизонтальная же составляющая волны распространяется только по внешнему слою клубня, что объясняется разной плотностью наружных слоев клубня и сердцевины. В результате удара возникает сложное поле давлений, изменяющееся не только от точки к точке, но и в каждой точке со временем. К тому же поле напряжений еще усложняется из-за отражения волны сжатия от граничных поверхностей, которыми являются наружные оболочки, сосудистые пучки, границы (стенки) клеток и крахмальные зерна. Когда все волны накладываются друг на друга, это вызывает микроструктурные изменения, то есть возникают пластические волны, действие которых можно наблюдать и анализировать [4].

В процессе резания пищевых продуктов от их физико-механических свойств зависят нагрузки на рабочие органы машин и всю конструкцию. Кроме того, величина нагрузок и закономерности их изменения влияют на надежность и долговечность машины и её виброакустические характеристики [5], которые в свою очередь влияют на качество конструкции и конкурентоспособность изделия.

Первые эксперименты по установлению взаимосвязи излучения звука и резанием пищевых продуктов были проведены в ДонНУЭТ в 2014-2015 гг [6]. Однако, зависимости процессов измельчения пищевых продуктов с вибрационными характеристиками до настоящего времени не установлены [7].

Целью работы является установление зависимостей уровня виброускорения от физико-механических свойств пищевых продуктов в процессе резания.

2. Экспериментальная часть

Исходными пищевыми продуктами были выбраны свежие картофель, свекла, морковь, кабачок. Физико-механические характеристики продуктов представлены в таблице 1. Максимальное значение удельного усилия резания имеет свекла $q=900$ Н/м, минимальное значение кабачок $q=300$ Н/м [1]. Модуль упругости максимум у свеклы $E=4,0$ МПа, минимум имеет кабачок $E=1,7$ МПа. Площадь поперечного среза пищевого

продукта варьировалась от $S_{\min}=12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – морковь, $S_{\max}=63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – свекла. Расстояние от вибропреобразователя АР38 до поперечного среза изменялось с шагом $l_1=0,02 \text{ м}$, интервал расстояния для кабачка от 0,03 м до 0,22 м, для моркови от 0,07 м до 0,20 м, для картофеля от 0,02 м до 0,09 м, для свеклы от 0,03 до 0,11 м.

Таблица 1

Исходные данные экспериментального исследования виброускорения пищевых продуктов

Продукт	Модуль упругости Е, МПа	Площадь поперечного среза $S \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$	Длина продукта $L \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2$
Кабачок	300	38	22
Морковь	600	13	20
Картофель	700	46	9
Свекла	900	63	11

Продукт фиксировался в зажимном устройстве через вибродемпфирующую изоляцию. Рабочим инструментом в процессе резания были ножи с прямолинейной и зубчатой режущей кромкой. Угол заточки прямолинейного ножа $\alpha=12^{\circ}$. Высота и шаг профиля режущей кромки зубчатого ножа $h=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, количество зубьев на 0,01 м длины режущей кромки равно $t=5$, угол при вершине зубьев 30° . Процесс резания был скользящий (рис.1).

В качестве целевой функции, характеризующей воздействие вибрационной волны на продукт, принимается уровень виброускорения. Запись значений скорректированного уровня виброускорения (УВ) производилась на шумомере «Ассистент» 1-го класса точности. Вибропреобразователь (ВП) АР38 крепился с помощью шпильки на противоположной поверхности продукта. Определение значения скорректированного уровня виброускорения по коррекции W_h производилось по оси O_z .

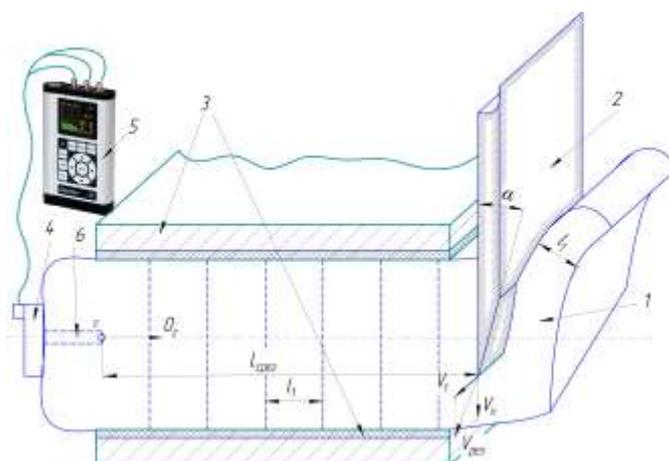


Рис. 1. Схема исследования виброускорения пищевых продуктов в процессе резания ножами с прямолинейной и зубчатой режущей кромкой: 1 – продукт; 2 – нож; 3 – зажимное устройство; 4 – вибропреобразователь АР38; 5 – виброшумомер «Ассистент»; 6 – шпилька крепления вибропреобразователя

При резании ножом с прямолинейной режущей кромкой максимальное значение уровня виброускорения составило: для кабачка – $3,23 \text{ м/с}^2$, для моркови – $1,16 \text{ м/с}^2$; для картофеля – $1,32 \text{ м/с}^2$; для свеклы – $1,43 \text{ м/с}^2$. При резании ножом с зубчатой режущей кромкой максимальное значение УВ составило: для кабачка –

0,71 м/с², для моркови – 0,95 м/с²; для картофеля – 1,12 м/с²; для свеклы – 2,79 м/с². При уменьшении длины среза в процессе резания картофеля с $l_{max}=0,09$ м до $l_{min}=0,03$ м с интервалом $\Delta l=0,06$ м, значение УВ увеличилось с минимального $a_{min}=0,22$ м/с² до максимального $a_{max}=1,0$ м/с², увеличилось на $\Delta a=0,78$ м/с².

Уровень виброускорения при резании зубчатой режущей кромкой составил $\Delta a=0,49\dots 1,34$ м/с². Эти значения ниже, чем при резании прямолинейной режущей кромкой ножа $\Delta a=0,78\dots 2,5$ м/с². Это обусловлено постоянным и непрерывным контактом зубьев режущей кромки ножа с волокнами продукта, т.е. осуществляется процесс перепиливания волокон продукта зубьями ножа и формируются постоянные упругие волны в структуре продукта.

Графики изменения виброускорения по длине продукта представлены на рисунках 2, 3, 4. Уравнения аппроксимации графиков в виде полинома второй степени приведены в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость уровня виброускорения пищевых продуктов в процессе резания

Продукт	Режущей кромки ножа	Формула	b	c	d	Достоверность аппроксимации функции R^2
Кабачок	прямая	$a(l)=b \cdot l^2+c \cdot l+d$	0,0017	-0,188	3,47	0,98
	зубчатая		-0,0002	-0,021	0,768	0,94
Морковь	прямая		0,0052	-0,279	3,87	0,91
	зубчатая		-0,071	0,112	0,424	0,85
Картофель	прямая		0,013	-0,254	1,6	0,97
	зубчатая		0,0245	-0,36	1,54	0,93
Свекла	прямая		0,021	-0,44	2,51	0,92
	зубчатая		0,039	-0,657	3,08	0,74

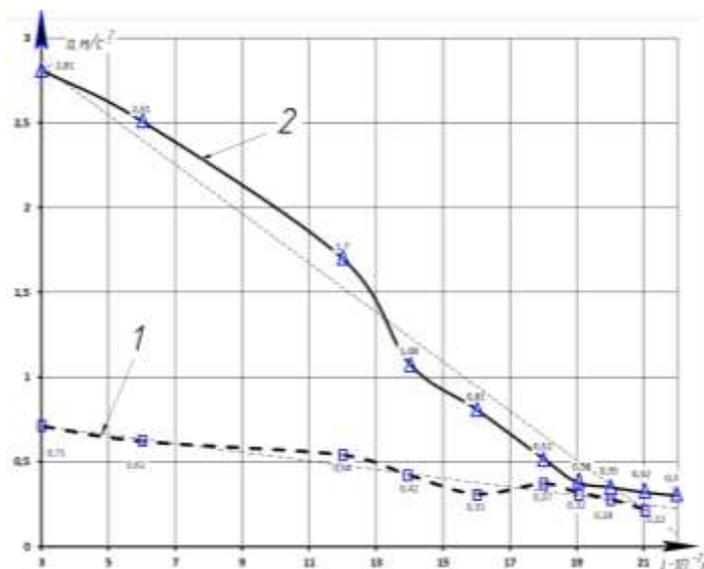


Рис. 2. Изменения уровня виброускорения кабачка в процессе резания: 1 – прямолинейная форма режущей кромки; 2 – зубчатая режущая кромка

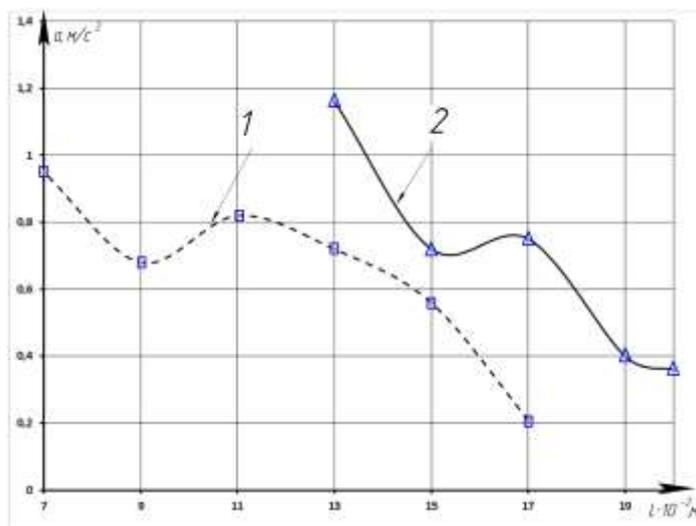


Рис. 3. Изменения уровня виброускорения моркови в процессе резания: 1 – прямолинейная форма режущей кромки; 2 – зубчатая режущая кромка

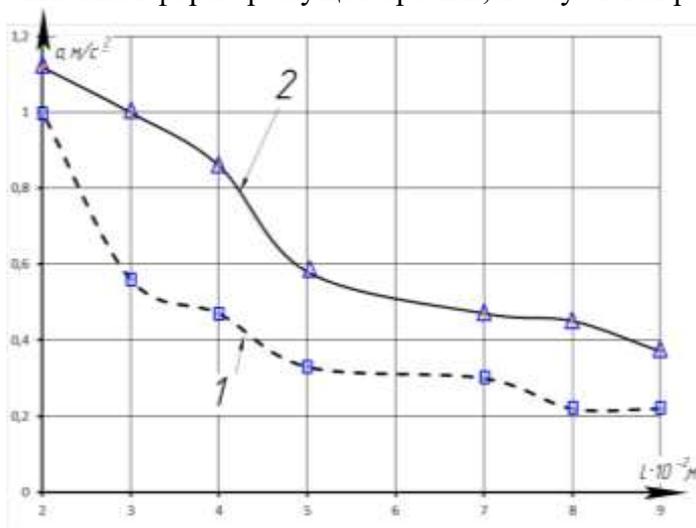


Рис. 4. Изменения уровня виброускорения картофеля в процессе резания: 1 – прямолинейная форма режущей кромки; 2 – зубчатая режущая кромка

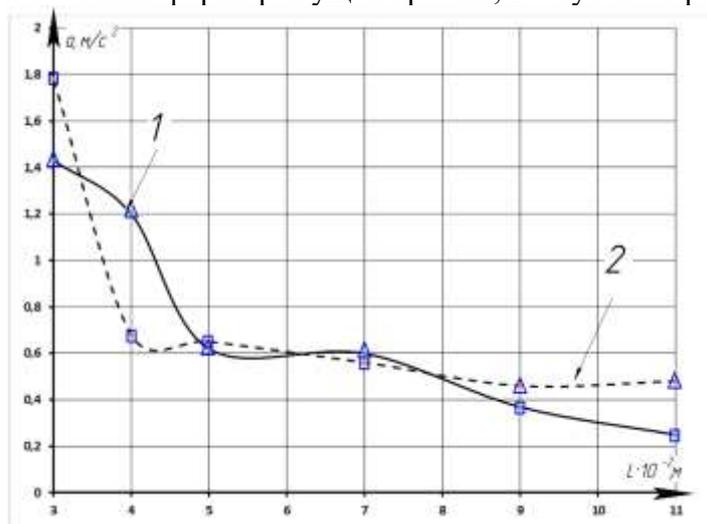


Рис. 5. Изменения уровня виброускорения свеклы в процессе резания: 1 – прямолинейная форма режущей кромки; 2 – зубчатая режущая кромка

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. При резании овощных пищевых продуктов возникают вибрационные волны, распространяющиеся от места внедрения лезвия в продукт до конца продукта. С увеличением расстояния внедрения режущей кромки от вибродатчика величина виброускорения снижается. Эта закономерность имеет место при различной конструкции режущего инструмента.

Величина виброускорения зависит от конструкции режущей кромки. Она существенно отличается на малых расстояниях от вибродатчика до поверхности резания продукта. Это явление характерно для продуктов с низким модулем упругости (рис. 2). У продуктов с высоким модулем упругости (свекла) (рис. 5) кривые изменения виброускорения с учетом возможных погрешностей, практически совпадают. Значит, конструкция режущих лезвий оказывает незначительное влияние на прохождение вибрационных волн по продукту с высокими значениями модуля упругости.

Закономерности прохождения вибрационных волн через пищевой продукт специфичны для каждого продукта, что создает предпосылки для диагностики продуктов.

В работе получены аппроксимирующие выражения для определения величины виброускорения в зависимости от расстояния между рабочим органом и вибродатчиком с хорошей степенью статистической связи.

Список литературы

1. Мачихин, Ю.А. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник/ Ю.А. Мачихин. – М.: Агропромиздат. – 1990. 271 с.
2. Заводнов, С.В. Исследование взаимодействия клубней картофеля с рабочими органами сельскохозяйственных машин: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 2002. – 20 с.
3. Заводнов, В.С. Исследование физико-механических свойств овощей и фруктов и условий их перевозки в сельском хозяйстве: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М., 1968. – 20 с.
4. Гагаулина, В.Г. Разрушение семян сельскохозяйственных культур волнами напряжений / В.Г. Гагаулина, В.В. Гагаулин // Вопросы земледельческой механики. Тезисы докл. Всесоюзной научной конф. по совр. проблемам землед. механ. ВАСХНИЛ. ВИМ. – М., 1978.
5. Заплетников, И.Н. Расчет и трансформация шумовых характеристик пищевого оборудования [монография] / И.Н. Заплетников, И.С. Севаторова. – Харьков: ФЛП Мезина В.В., 2017. – 242 с.
6. Заплетников, И.Н. Процессы излучения звука при резании пищевых продуктов / И.Н. Заплетников, А.К. Пильненко // Noise Theory and Practice: Научный журнал ООО «Институт акустических конструкций» – СПб: ООО «Институт акустических конструкций», 2015. – Том 1. – №2. – 89 с. – С. 2-9.
7. Заплетников, И.Н. Измельчение растительного сырья [монография] / И.Н. Заплетников, А.В. Шеина. – Харьков: Водный спектр Джи-Ем-Пи, 2016. – 205 с.