

УДК 534.614-16:[641.51/.54:635-1/-2]  
OECD 02.11.JY

## Исследование волн упругих деформаций в пищевом продукте

Пильненко А.К.<sup>1</sup>, Заплетников И.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Доцент кафедры оборудования пищевых производств,

<sup>2</sup>Заведующий кафедрой оборудования пищевых производств,

<sup>1,2</sup>Донецкий национальный университет экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, Украина

### Аннотация

Излучение виброакустической характеристики оборудования зависит от обрабатываемого пищевого продукта. Скорость распространения волн упругих деформаций в пищевых продуктах является одним из основным параметром формирования виброакустического процесса излучения звуковых волн оборудованием.

В работе рассмотрены особенности распространения волн упругих деформаций в пищевом продукте. Получены аппроксимирующие выражения для определения величины скорости и ускорения ударных волн в пищевом продукте в зависимости от расстояния, физико-механических свойств продукта и от скорости и ускорения входящего удара груза с хорошей степенью статистической связи. Прохождение вибрационных волн через пищевой продукт специфичны для каждого продукта. Физико-механические свойства существенно влияют на скорость и ускорение прохождения ударной волны. Увеличение модуля упругости, удельной силы резания и плотности продукта приводит к повышению скорости и ускорению распространения ударной волны.

**Ключевые слова:** физико-механические свойства, волна упругих деформаций, пищевой продукт, скорость и ускорение, модуль упругости.

### *Study the waves elastic deformations in food product*

*Pilnenko A.K.<sup>1</sup>, Zapletnikov I.N.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Assistant professor,*

*<sup>2</sup>Professor,*

*<sup>1,2</sup>Donetsk National University of Economics and Trade  
named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk, Ukraine*

### **Abstract**

*Vibroacoustic characteristic of equipment depends on the processed food product. Elastic strain wave velocity in food is one of the main parameters of the formation of the vibra-acoustic process equipment.*

*Received approximating expressions for determining magnitude of velocity and acceleration of shock waves in a food product depending on the distance, physical and mechanical properties of the product. Physical and mechanical properties significantly affect on the speed and acceleration of the passage of the shock wave. Increase modulus of elasticity, specific cutting force and product density leads to an increase in speed and acceleration of the propagation of a shock wave.*

**Key words:** *physical and mechanical properties, wave of elastic deformations, food product, speed and acceleration, elastic modulus.*

## Введение

Механическая обработка пищевых продуктов происходит под давлением статистических (сжимающих) и динамических (ударных) нагрузках. Но наибольшее количество взаимодействий продукта и оборудования проходит под динамическими нагрузками - соударение с рабочими органами и т.д.

При литературном поиске по вопросу измельчения пищевых продуктов рассматриваются вопросы: - кинематики и динамики взаимодействия рабочих органов с продуктом, - влияния физико-механических свойств продуктов, трения, энергетические вопросы и др. Однако вопросами формирования, воздействия и излучения виброакустической характеристики (ВАХ), а именно вибрационной характеристики пищевых продуктов остаются без внимания.

При проектировании оборудования пищевых производств и моделировании процессов обработки пищевых продуктов используются данные основного параметра - механические характеристики пищевых продуктов. Скорость распространения волн упругих деформаций в пищевых продуктах является одним из основным параметром формирования виброакустического процесса излучения звуковых волн оборудованием.

Предварительные исследования излучения звука при резании пищевых продуктов показали [2, 3], что значения уровня звука по шкале А изменяются в пределах от 23 до 40 дБА, а уровни звукового давления в октавных полосах частот 63-8000 Гц в диапазоне от 15 до 45 дБ. На излучение звука существенно влияет толщина ножа и модуль упругости продукта [1, 2].

С точки зрения снижения уровня шума, излучаемого режущим оборудованием в производственных цехах пищевых производств, общественного питания это явление заслуживает основательного исследования как с технической, так и с экологической стороны.

Виброакустические характеристики ряда измельчительного (режущего) оборудования пищевых производств напрямую взаимосвязаны, зависят от вида продукта обработки.

Исследованиями установлено, что уровень шума, излучаемый оборудованием, зависит от физико-механических свойств обрабатываемого продукта, его модуля упругости, структуры, плотности, конструкции рабочего органа и др. [3, 4].

В таблице 1 приведены шумовая характеристика (ШХ) измельчительного оборудования предприятий питания только по характеристике А [3]. Это подтверждается расхождением ШХ при работе измельчительного оборудования пищевых производств при обработке продукта и без него. Величина расхождения колеблется от 2 до 13 дБА. Такие величины расхождения могут отрицательно влиять при заявлении ШХ заводом-изготовителем машин и контролем их в процессе эксплуатации санитарными службами.

Таблица 1

Шумовые характеристики измельчительного оборудования

Наименование оборудования, обрабатываемый продукт, страна-производитель	Уровень звуковой мощности, дБА		
	без нагрузки	под нагрузкой	отклонение
Машины измельчения сырых овощей			
МРО 50-200 (морковь, Беларусь)	70	78	+8
МРО-350 (морковь, Беларусь)	79	86	+7
"Гамма 5А" (капуста, Россия)	74	87	+13

Наименование оборудования, обрабатываемый продукт, страна-производитель	Уровень звуковой мощности, дБА		
	без нагрузки	под нагрузкой	отклонение
МРО 400-1000 (свекла, Беларусь)	84	89	+5
Robot Coupe CL-30(морковь, Франция)	77	79	+2
УКМ (картофель, Россия)	77	83	+5
МПР-350 (морковь, Беларусь)	76	89	+13
Протирочные машины:			
МП-800 (морковь вареная, Беларусь)	74	76	+2
МП-1000 (свекла вареная, Беларусь)	71	78	+7

В связи с тем, что процесс формирования ШХ машин является многофакторным, и первоисточником шума в машинах служат вибрационные процессы, целью работы является установление зависимостей уровня виброскорости и виброускорения от физико-механических свойств пищевых продуктов.

### 1. Методика проведения исследования

Все экспериментальные исследования были проведены в лаборатории виброакустики кафедры оборудования пищевых производств ГО ВПО "ДонНУЭТ", в реверберационной камере, в соответствии со стандартом [5]. Реверберационная камера соответствует IV типу. Объем реверберационной камеры 100 м<sup>3</sup>.

Для исследований прохождения волн упругих деформаций в пищевом продукте (картофель, свекла, морковь и т.д.) был применен маятниковый копер, который позволяет исследовать скорость и ускорение прохождения упругих волн деформации в пищевом продукте. Ось подвеса маятника посажена на подшипники скольжения. На палец надета стрелка, позволяющая отсчитывать по шкале угол подъема маятника. На этом же пальце имеется приспособление, которое дает возможность устанавливать маятник с отклонением под углами 30, 45 и 90 градусов от вертикали.

Скорость маятника в момент удара:

$$V_{\text{вх}} = \sqrt{2gh}, \text{ м/с} \quad (1)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  - высота центра массы маятника, м.

Закон сохранения импульса:

$$M \cdot V_{\text{вх}} = m \cdot u \rightarrow u = \frac{M \cdot V_{\text{вх}}}{m} = \frac{M\sqrt{2gh}}{m} \quad (2)$$

где  $m$  - масса тела, кг,  $M$  - масса груза, кг,  $V_{\text{вх}}$  - скорость маятника, м/с,  $u$  - скорость тела, м/с.

Скорость удара, в зависимости от угла отклонения маятника, колеблется в пределах от 1,15 до 3,13 м/с и определяется по формуле:

$$V_{\text{вх}} = \sqrt{2gl(1 - \cos \gamma)}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  - угол отклонения груза, градусы.

Центростремительное ускорение маятника:  $a = V^2/l$ , м/с<sup>2</sup>. Теоретические значения кинематических параметров установки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Кинематические параметры маятника

№	Длина $l$ , м	Масса $Q$ , кг	Угол отклонения $\gamma$ , град	Скорость груза $V$ , м/с	Ускорение груза, м/с <sup>2</sup>
1	0,5	0,1	30	1,15	2,63
2	0,5	0,1	45	1,7	5,75
3	0,5	0,1	90	3,13	19,6

Исходными пищевыми продуктами были выбраны свежие свекла ( $E = 8,0$  мПа), картофель ( $E = 7,1$  мПа), морковь ( $E = 5,8$ ), кабачок ( $E = 3,4$ ) и огурец ( $E = 2,7$ ) (табл. 3). Максимальное значение удельного усилия резания имеет свекла  $q = 880$  Н/м, а минимальное значение огурец  $q = 270$  Н/м. Расстояние от места крепления вибропреобразователя АР38 в продукте (длина продукта) до поверхности входящей ударной волны было  $L_{min} = 0,03$  м и  $L_{max} = 0,21$  м (табл. 1, 2). Продукт фиксировался в зажимном устройстве через вибродемпфирующую изоляцию.

Таблица 3

Механические свойства исследуемых продуктов

№	Продукт	Модуль упругости продукта, $E$ , мПа	Удельная сила резания, $q$ , Н/м	Плотность продукта, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	огурец	2,7	270	350
2	кабачок	3,4	350	580
3	морковь	5,8	590	600
4	картофель	7,1	740	700
5	свекла	8,0	880	800

В качестве целевой функции, характеризующей воздействие вибрационной волны на продукт, принимается уровень виброскорости  $V_{вых}$  и виброускорения  $a_{вых}$ .

## 2. Экспериментальная часть

Запись значений производилась на шумомере "Ассистент" 1-го класса точности. Определение значения скорректированного уровня виброускорения  $a_{вых}$  по коррекции  $W_h$  производилось по оси  $O_z$ . Результаты экспериментальных исследований изменения вибрационных характеристик (ВХ) при резании пищевых продуктов представлены в таблицах 4 и 5.

Увеличение модуля упругости пищевого продукта (овощей) приводит к повышению скорости и ускорению распространения ударной волны. Скорость волны возрастает с  $V_{вх} = 0,1$  м/с до  $V_{вых} = 0,16$  м/с, ускорение волны с  $a_{вх} = 2,07$  м/с<sup>2</sup> до  $a_{вых} = 3,19$  м/с<sup>2</sup>. Разница скорости волны на входе в продукт уменьшается с увеличением модуля упругости продукта. Отклонение скорости волны при модуле упругости  $E = 2,7$  мПа равно  $\Delta V = 1,6$  м/с, а при  $E = 8,0$  мПа разница скоростей  $\Delta V = 1,54$  м/с. На единицу длины продукта ( $L = 1$  см) скорость волны возрастает вместе с модулем упругости. Скорость на единицу длины продукта с  $\Delta V/L = 7,56$  (м/с)/м до  $\Delta V/L = 17,1$  (м/с)/м. На единицу длины продукта ( $L = 1$  см) ускорение волны возрастает вместе с модулем упругости. Ускорение на единицу длины продукта с  $\Delta a/L = 0,16$  (м/с<sup>2</sup>)/м до  $\Delta a/L = 0,28$  (м/с<sup>2</sup>)/м.

Таблица 4

Значения скорости ударной волны в пищевых продуктах

№	Модуль упругости продукта, $E$ , МПа	Длина продукта, $L$ , м	Скорость на входе в продукт, $V_{вх}$ , М/с	Скорость на выходе из продукта, $V_{вых}$ , М/с	Отклонение скорости волны, $\Delta V$ , М/с	Скорость на единицу длины продукта, $\Delta V/L$ , (М/с)/м
1	2,7	0,11	1,7	0,103	1,597	14,52
2	3,4	0,21	1,7	0,113	1,587	7,56
		0,05		0,095	1,605	32,1
3	5,8	0,16	1,7	0,149	1,551	9,7
		0,035		0,136	1,564	44,7
4	7,1	0,16	1,7	0,133	1,567	9,8
		0,06		0,087	1,613	26,9
5	8,0	0,09	1,7	0,16	1,54	17,1
		0,03		0,091	1,609	53,6

Графическая интерпретация результатов проведенных экспериментов представлена на рисунках 1-2.

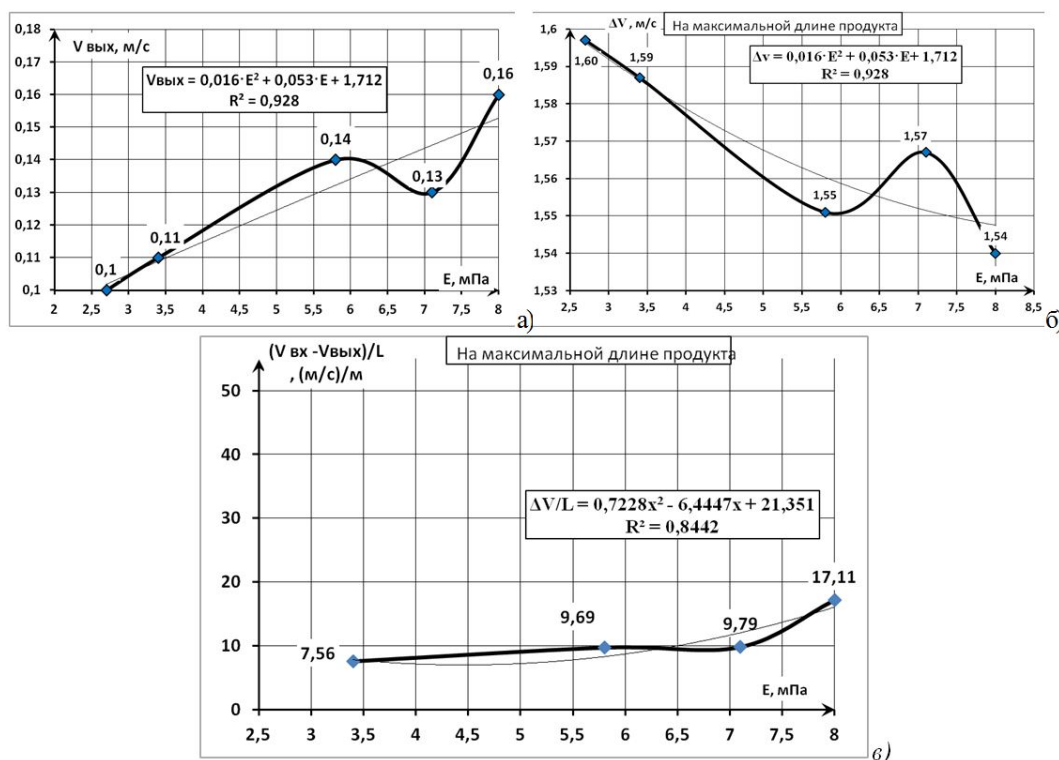


Рис. 1. Графики зависимостей скорости ударных волн: а) от физико-механических свойств пищевых продуктов; б) уменьшение скорости волны; в) удельное сопротивление ударной волны на единицу длины продукта

Таблица 5

Значения ускорения ударной волны в пищевых продуктах

№	Модуль упругости продукта, $E$ , мПа	Длина продукта, $L$ , м	Ускорение на входе в продукт, $a_{вх}$ , м/с <sup>2</sup>	Ускорение на выходе из продукта, $a_{вых}$ , м/с <sup>2</sup>	Отклонение ускорения волны, $\Delta a$ , м/с <sup>2</sup>	Ускорение волны на единицу длины продукта, $\Delta/L$ , (м/с <sup>2</sup> )/м
1	2,7	0,11	5,7	2,065	3,635	0,33
2	3,4	0,21	5,7	2,265	3,435	0,16
		0,05		1,905	3,795	0,76
3	5,8	0,16	5,7	2,985	2,715	0,17
		0,035		2,723	2,977	0,85
4	7,1	0,16	5,7	2,661	3,039	0,19
		0,06		1,738	3,962	0,66
5	8,0	0,09	5,7	3,19	2,51	0,28
		0,03		1,82	3,88	1,29

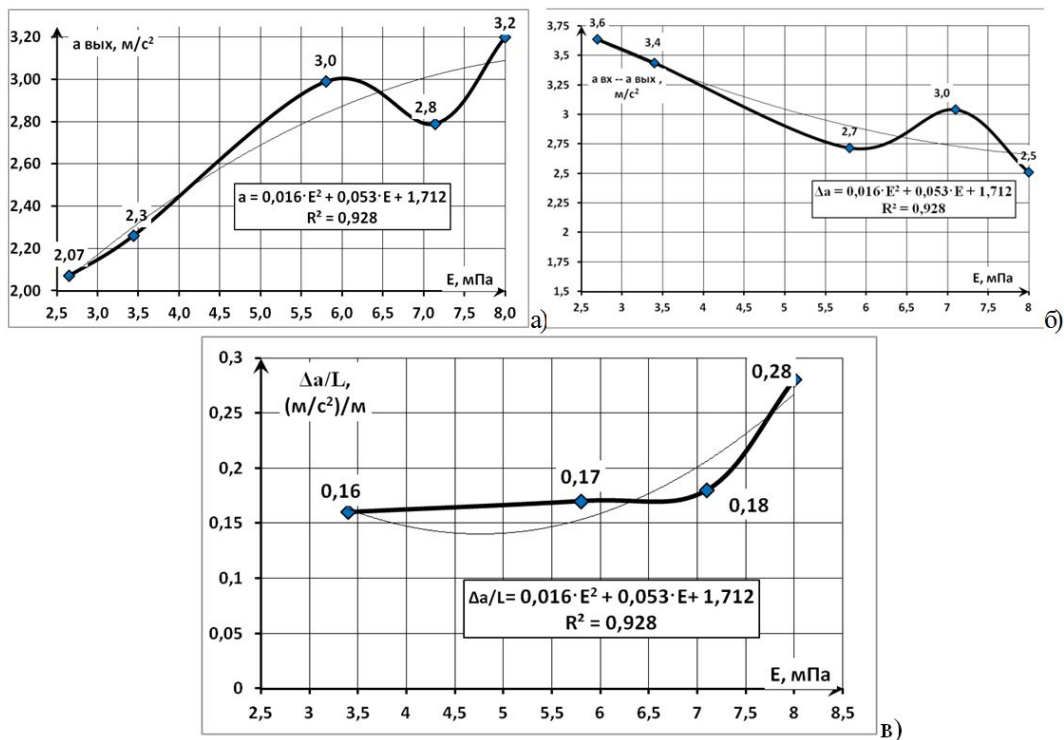


Рис. 2. Графики зависимости ускорения ударной волны а) от физико-механических свойств пищевых продуктов; б) уменьшение скорости волны; в) удельное сопротивление ударной волны на единицу длины продукта

## Заключение

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 скорости и ускорения ударных волн в пищевом продукте в зависимости от расстояния, физико-механических свойств продукта и от скорости и ускорения входящего удара груза

с хорошей степенью статистической связи.

Анализ полученных результатов показывает, что скорость и ускорение прохождения упругих волн через продукт возрастает в более упругих продуктах.

### Список литературы

1. Заплетников И.Н. Исследование шумовых характеристик процесса резания пищевых продуктов / И.Н. Заплетников, А.К. Пильненко // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНУЭТ, – 2016. - Вып. 33. – С. 92-100.
2. Пильненко А.К. Виброакустические свойства пищевых продуктов / А.К. Пильненко, И.Н. Заплетников, Н.И. Владыченко // Noise Theory and practice: Научный журнал ООО «Институт акустических конструкций» – СПб: ООО «Институт акустических конструкций», 2017. – Вып. 3. – № 4. – С. 14-20.
3. Заплетников И.Н. Виброакустика оборудования пищевых производств: монография. – Харьков: Изд-во НТМТ, 2015. – 542 с.
4. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. – 3-е изд. Переаб. – М.: Лотос, 2013. – 432 с.
5. ГОСТ Р 51400-99 (ИСО 3743-1-94, ИСО 3743-2-94). Шум машин. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. Технические методы для малых переносных источников шума в реверберационных полях в помещениях с жесткими стенами и в специальных реверберационных камерах.

### References

1. Zapletnikov I.N. Issledovanie shumovyih harakteristik protsessa rezaniya pischevyih produktov / I.N. Zapletnikov, A.K. Pilnenko // Oborudovanie i tehnologii pischevyih proizvodstv: temat. sb. nauch. trudov. – Donetsk: DonNUET, – 2016. - Vol. 33. – pp. 92-100.
2. Pilnenko A.K. Vibroakusticheskie svoystva pischevyih produktov / A.K. Pilnenko, I.N. Zapletnikov, N.I. Vladyichenko // Noise Theory and Practice: Scientific Journal «Institute of Acoustic Structures» - St.Petersburg: «Institute of Acoustic Structures», 2017. – Tom. 3.–№ 4. – pp. 14-20.
3. Zapletnikov I.N. Vibroakustika oborudovaniya pischevyih proizvodstv: monograph. – Kharkov: Publishing House of NTMT, 2015. – 542 p.
4. Ivanov N.I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borbyi s shumom: textbook. - 3rd ed. Pereab. - M .: Lotus, 2013. – 432 p.
5. GOST R 51400-99 (ISO 3743-1-94, ISO 3743-2-94). Shum mashin. Opredelenie urovney zvukovoy moschnosti istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu. Tehnicheskie metodyi dlya malyih perenosnyih istochnikov shuma v reverberatsionnyih polyah v pomescheniyah s zhestkimi stenami i v spetsialnyih reverberatsionnyih kamerah.