

## Теоретико-экспериментальные исследования устройства для разрушения скорлупы кедровых орехов

П.В. Бырдин<sup>a</sup>, В.А. Вовк<sup>b</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

<sup>a</sup>byrdin\_pavel@mail.ru, <sup>b</sup>victor-vovk@mail.ru

Статья получена 16.12.2016, принята 22.01.2017

*Кедровый орех является уникальным природным продуктом, одним из перспективных видов растительного сырья, содержащего полноценные белки, микро- и макроэлементы, комплекс жирных кислот и витаминов. В целях совершенствования технологии переработки кедровых орехов, на основе анализа технологического оборудования было разработано более производительное, по сравнению с существующими аналогами, устройство для разрушения скорлупы кедровых орехов. Принцип его работы заключается в подаче ореха в полость между пластиной и вращающимся диском с комбинированной поверхностью и создании сжимающей силы, которая разрушает скорлупу ореха. В статье представлены результаты теоретических исследований сил, действующих на орех в процессе его разрушения в устройстве. Установлено, что угловое ускорение  $\omega^2$  рабочего органа устройства зависит от регулируемых параметров — массы  $m_d$  и радиуса  $r_d$  диска, угла наклона поверхности диска  $\alpha$  и угла наклона пластины  $\beta$  — и нерегулируемого параметра, силы разрушения скорлупы кедрового ореха. Представлены результаты экспериментальных исследований, проводимых с целью определения усилия разрушения скорлупы кедрового ореха. Согласно схеме эксперимента, кедровый орех подвергался статическому сжатию до разрушения скорлупы, при этом снимались с электронных весов и фиксировались значения усилия сжатия. Полученные значения подвергались статистической обработке с целью выявления характера распределения. Было установлено, что распределение значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха описывается нормальным законом. В результате проведенных исследований было определено среднее значение силы разрушения скорлупы кедрового ореха, которое составило 76,5 Н.*

**Ключевые слова:** кедровый орех; уникальный продукт; устройство; угловое ускорение; скорлупа ореха; сила разрушения.

## Theoretical and experimental studies of the device designed for pine nut shell destruction

P.V. Byrdin<sup>a</sup>, V.A. Vovk<sup>b</sup>

Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup>byrdin\_pavel@mail.ru, <sup>b</sup>victor-vovk@mail.ru

Received 16.12.2016, accepted 22.01.2017

*The pine nut is a unique natural product and one of the most promising types of plant material, which contains native proteins, micro and macro elements and a complex of fatty acids and vitamins. To improve pine nut processing technology, the more productive device for pine nut shell destruction, in comparison with already-existing ones, has been developed on the base of technological equipment analysis. The principle of the device is to supply the nut into the hole between the plate and the rotating disk with a composite surface and create a compressive force breaking the nut shell. The article presents the results of theoretical studies of the forces operating on the nut in a destruction process. It is found that angular acceleration  $\omega^2$  of the working body of the device is dependent on: the adjustable parameters – mass  $m_d$  and disc radius  $r_d$ , tilt angle of the disc surface  $\alpha$  and inclination angle of the plate  $\beta$ ; and the unregulated parameter – breakout force of pine nut shell. The results of the experimental studies, conducted with the aim of determining breaking forces of pine nut shell destruction, are represented. According to the experiment scheme, pine nuts are subjected to static compression until the shell fracture happens, and, at the same time the values of compression force are taken and recorded from electronic scales. To identify the nature of distribution, the obtained values have been statistically processed. It is found that distribution of force values of pine nut shell destruction are described with normal law. As a result of the research, the average value of the force breaking the pine nut shell, which is equal to 76,5 N, has been determined.*

**Keywords:** pine nut; unique product; device; angular acceleration; pine nut shell; the power of destruction.

### Введение

Кедровые орехи — это ценнейший пищевой продукт [1–3], который по калорийности, питательности и усвояемости превосходит мясо, хлеб, яйца, сливки и др. В состав кедровых орехов входят органические вещества — жиры, белки, углеводы в виде крахмала и сахара, органические

кислоты, дубильные вещества, витамины, а также минеральные вещества. В состав скорлупы, помимо клетчатки, входят красящие вещества, лигнин, незначительное количество дубильных веществ, белки и жиры. Ядро кедрового ореха — это богатейший источник жира и витаминов. Биологическая ценность ядер кедровых орехов обуслов-

лена высоким содержанием витаминов В<sub>1</sub> и Е. Ценным элементом кедровых семян являются липоиды, особенно фосфотида. Общее их содержание составляет в среднем около 1,3 %, что выше, чем у целого ряда масличных культур, и равноценно сое — наиболее богатому источнику фосфатидов среди растительного сырья [4–6]. Кроме того, в ядрах кедровых орехов содержится значительное количество минеральных веществ, а высокое содержание жира (растительного масла), богатого витаминами, позволяет получать в результате переработки высококачественное кедровое масло для пищевых, медицинских и технических целей. [7].

**Постановка задачи.** По оценкам специалистов, средний ежегодный биологический урожай кедровых орехов на территории Сибири и Дальнего Востока составляет порядка 1 млн т, в наиболее урожайные годы — 1,6 млн т. Более 90 % этих ресурсов сосредоточено в Западной и Восточной Сибири [8; 9]. Этот факт свидетельствует о том, что разработка рациональной технологии переработки кедровых орехов может быть экономически выгодной и перспективной задачей [10–13]. В связи с этим был проведен патентный поиск и разработано устройство для разрушения скорлупы кедрового ореха [14–18]. Общий вид устройства представлен на рис. 1.

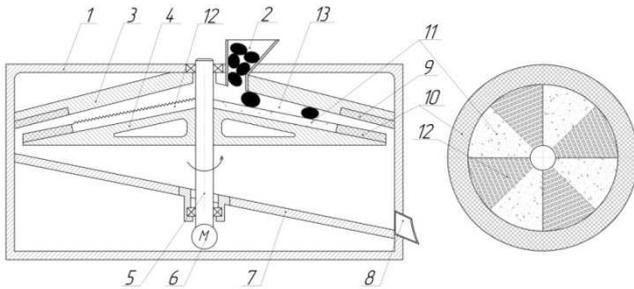


Рис. 1. Устройство для извлечения ядер кедровых орехов

Устройство для очистки кедровых орехов от скорлупы содержит корпус 1 с загрузочным бункером 2 и металлической крышкой 3, конусообразный диск 4, установленный на валу 5 с приводом от мотора 6, направляющую 7 и выпускной патрубок 8. Металлическая крышка конусообразной формы 3 с резиновым кольцом 9 на внутренней поверхности жестко установлена в корпусе 1. Диск 4 имеет расположенное на конусообразной поверхности резиновое кольцо 10, а также последовательно чередующиеся сектора 11 с абразивным покрытием и сектора 12 с металлическими выступами. Диск 4 установлен в корпусе 1 на валу 5 таким образом, что образующийся зазор 13 между крышкой 3 и конусообразной поверхностью диска уменьшается по направлению от центра диска 4 к его краю. Направляющая 7 выполнена в форме эллипса и жестко установлена в корпусе 1 устройства под острым углом к горизонту таким образом, что ее нижняя часть сообщается с выпускным патрубком 8.

Устройство для очистки кедровых орехов от скорлупы работает следующим образом. При включении мотора 6 крутящий момент передается на вал 5 и конусообразный диск 4, установленный в корпусе 1. Кедровые орехи из загрузочного бункера 2 поступают в зазор 13 между не-

подвижной металлической крышкой 3 и конусообразным диском 4. Орех, находящийся в зазоре 13, под действием центробежных и гравитационных сил продвигается по конусообразному диску 4 и подвергается попеременному воздействию сектора 11 с абразивным покрытием и сектора 12 с металлическими выступами, что приводит к постепенному уменьшению толщины скорлупы и последующему ее разрушению. Далее орех, попадая в область между резиновым кольцом 10 диска 4 и резиновым кольцом 9 крышки 3, сжимается из-за уменьшения зазора 13, что приводит к полному разрушению скорлупы. После этого под действием центробежной силы орех и очищенная скорлупа попадают на направляющую 7 и высыпаются из корпуса 1 через выпускной патрубок 8.

**Методика исследований.** Составим схему сил [19–21], действующих на орех в процессе работы устройства (рис. 2).

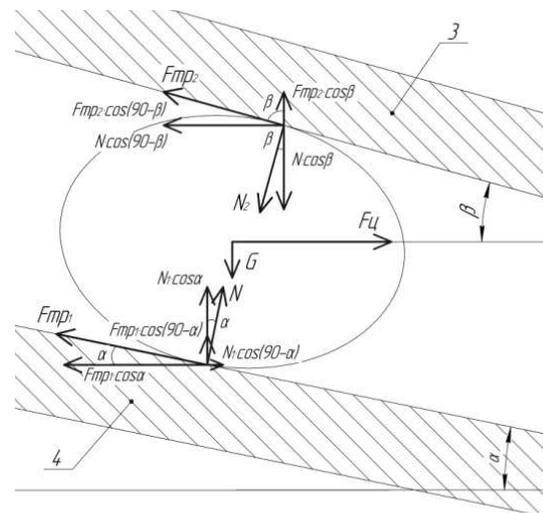


Рис. 2. Схема сил, действующих на орех:  $F_{тр1}$  — сила трения со стороны поверхности рабочего диска;  $F_{тр2}$  — сила трения со стороны поверхности крышки;  $N_1$  — сила со стороны конусообразного диска;  $N_2$  — сила со стороны крышки;  $F_{ц}$  — центробежная сила

По рис. 2 составим уравнение действия сил по оси X:

$$\Sigma F_x = 0; F_{ц} + N_1 \cos(90 - \alpha) - F_{тр1} \cos \alpha - N_2 \cos(90 - \beta) - F_{тр2} \cos(90 - \beta) = 0. \quad (1)$$

Из (1) выразим  $F_{ц}$ :

$$F_{ц} = F_{тр1} \cos \alpha - N_1 \cos(90 - \alpha) + (N_2 + F_{тр2}) \cos(90 - \beta). \quad (2)$$

Силу трения, действующую на орех во время движения в устройстве со стороны конусообразного диска, определим как:

$$F_{тр1} = N_1 \cdot \frac{(k_{абр} + k_{мет})}{2}, \quad (3)$$

где  $k_{абр}$  — коэффициент трения абразивной поверхности (1,6);  $k_{мет}$  — коэффициент трения металлической поверхности (0,3).

Тогда:

$$F_{mp1} = N_1 \frac{(1,6 + 0,3)}{2} = 0,95N_1. \quad (4)$$

Силу трения, действующую на орех во время движения в устройстве со стороны крышки, определим как:

$$F_{mp2} = N_2 k_{мет} = 0,3N_2. \quad (5)$$

Подставим результаты вычисления (4) и (6) в выражение (2), получим:

и, преобразовав, будем иметь:

$$(6)$$

Полагая, что:

$$(7)$$

где  $m_{д}$  — масса рабочего диска;  $r_{д}$  — радиус рабочего диска;  $\omega$  — угловое ускорение, приравняем (6) и (7) и, выразив  $\omega$ , получим:

$$\omega^2 = \frac{N_1 (0,95 \cos \alpha - \cos(90 - \alpha)) + 1,3N_2 \cos(90 - \beta)}{m_{д} r_{д}}. \quad (8)$$

При условии разрушения скорлупы ореха суммарное воздействие сил  $F_{mp1}$  и  $F_{mp2}$  должно быть больше критической силы разрушения  $F_{кр}$ , следовательно

С учетом вышесказанного преобразуем выражение (8), получим:

$$\omega^2 = \frac{F_{кр}}{2 m_{д} r_{д}} [0,95 \cos \alpha - \cos(90 - \alpha) + 1,3 \cos(90 - \beta)]$$

и тогда будем иметь выражение, определяющее угловое ускорение конусообразного диска:

$$\omega = \sqrt{\frac{F_{кр}}{2 m_{д} r_{д}} [0,95 \cos \alpha - \cos(90 - \alpha) + 1,3 \cos(90 - \beta)]} \quad (9)$$

Проанализировав выражение (9), сделаем вывод о том, что  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $r_{д}$  — регулируемые параметры, определяющиеся конструкцией устройства;  $F_{кр}$  — нерегулируемый параметр, зависящий от прочности скорлупы кедрового ореха.

Далее с целью определения усилия разрушения скорлупы кедрового ореха были проведены лабораторные исследования.

В лабораторных условиях, с помощью настольных электронных весов «Massa-K» и механического пресса, был проведен эксперимент по определению усилия разрушения кедровых орехов при статическом сжатии.

Принципиальная схема лабораторных исследований и экспериментальная установка представлены на рис. 3.

В процессе эксперимента на весы 1 помещался кедровый орех 2, на который постепенно оказывалось давление механическим прессом 3. Значения с электронного циферблата весов снимались и фиксировались покадровой видеосъемкой. После разрушения скорлупы ореха давление механическим прессом прекращалось, а показатель веса в момент разрушения, зафиксированный видеокamerой, записывался. Далее эксперимент повторялся. В конце эксперимента, при ручном подсчете значений сил разрушения, была выявлена генеральная совокупность (рис. 4), которая в дальнейшем исследовалась на определение характера распределения.

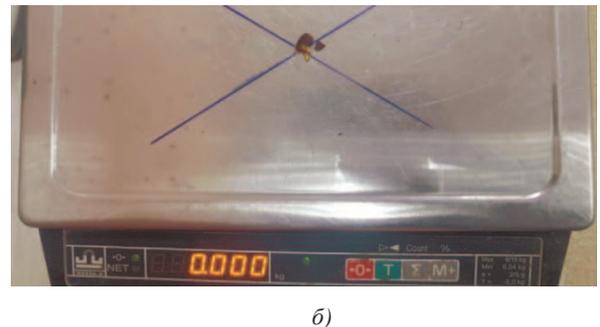
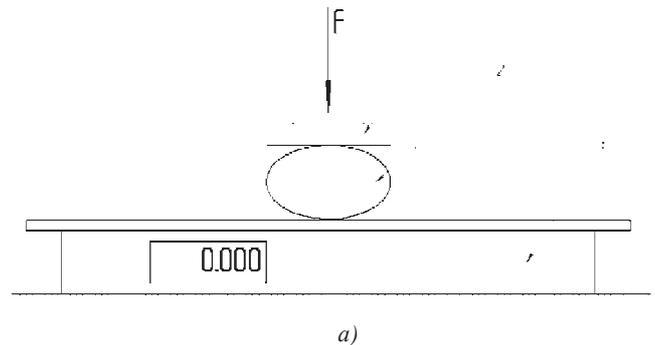


Рис. 3. Экспериментальные исследования: а) принципиальная схема экспериментальных исследований: 1 — весы электронные настольные «Massa-K»; 2 — орех кедровый; 3 — механический пресс; б) экспериментальная установка

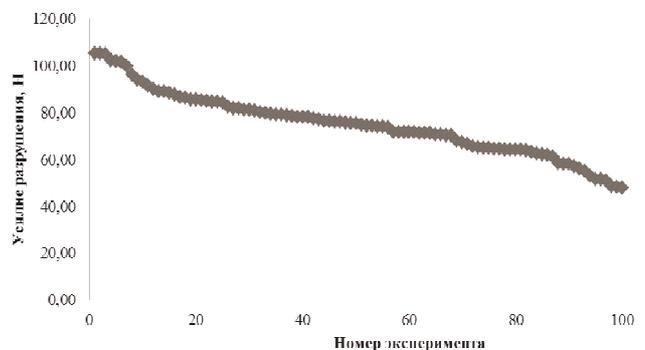


Рис. 4. Статистический ряд значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха

На основании полученных данных построен график распределения значений силы разрушения (рис. 5).

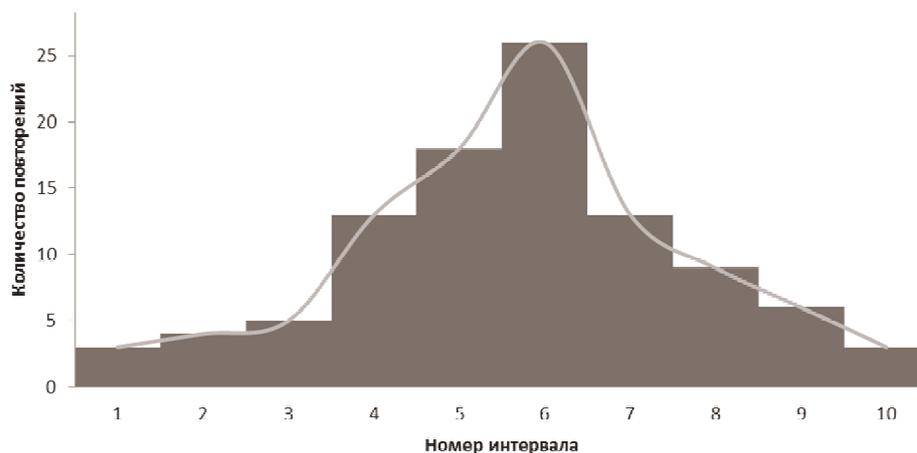


Рис. 5. График плотности распределения значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха

На основании построенного графика (рис. 5) выдвинем гипотезу о нормальном распределении значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха. Для

подтверждения или опровержения данной гипотезы проведем проверку по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$ . Результаты проверки представлены в таблице.

*Результаты расчета экспериментальных значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха*

№ интервала	Нижняя граница интервала	Верхняя граница интервала	$m_i$	$X_{ср.инт.}$	$m^*$	$S$	$P_i$	$mT$
1	47,24	50,62	3	48,930	78,1	12,88	0,018	1,8
2	50,62	57,45	4	54,035			0,037	3,7
3	57,45	63,83	5	60,640			0,081	8,1
4	63,83	70,21	13	67,020			0,138	13,8
5	70,21	76,59	18	73,400			0,186	18,6
6	76,59	83,42	26	80,005			0,195	19,5
7	83,42	89,80	13	86,610			0,161	16,1
8	89,80	96,18	9	92,990			0,103	10,3
9	96,18	102,56	6	99,370			0,052	5,20
10	102,56	105,36	3	103,96			0,029	2,90

$$\chi^2_{рас.} = 5,13$$

Табличный критерий согласия Пирсона  $\chi^2_{таб.}$ , определенный по таблице П. 4 [2] при уровне значимости  $q = 0,05$  и числе степеней свободы  $f = 7$ , составит:

$$\chi^2_{таб.} = 14,1$$

$$5,13 < 14,1$$

### Основные выводы

Тождество выполняется, следовательно, гипотеза о нормальном распределении значений силы разрушения скорлупы кедрового ореха подтверждается. Исходя из результатов исследований, делаем вывод, что среднее значение силы разрушения скорлупы кедрового ореха равно 76,5 Н.

### Литература

1. Gölge E., Ova G. The effects of food irradiation on quality of pine nut kernels // Radiation Physics and Chemistry. 2008. Т. 77, № 3. С. 365-369.

2. Mikkelsen A.T., Jessen F., Ballin N.Z. Species determination of pine nuts in commercial samples causing pine nut syndrome // Food Control. 2014. Т. 40, № 1. С. 19-25.

3. Köbler H., Monakhova Y.B., Kuballa T., Tschiersch C., Lachenmeier D.W., Vancutsem J., Thielert G., Mohring A. Nuclear magnetic resonance spectroscopy and chemometrics to identify pine nuts that cause taste disturbance // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. Т. 59, № 13. С. 6877-6881.

4. Adhikari P., Zhu X.-M., Gautam A., Shin J.-A., Hu J.-N., Lee J.-Y., Lee K.-T., Akoh C.C. Scaled-up production of zero-trans margarine fat using pine nut oil and palm stearin // Food Chemistry. 2010. Т. 119, № 4. С. 1332-1338.

5. Wang H., Zu G., Yang L., Zu Y.-G., Zhang Z.-H., Y. Zhang Y., Zhang L., Wang H.-Z. Effects of heat and ultraviolet radiation on the oxidative stability of pine nut oil supplemented with carnosic acid // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. Т. 59, № 24. С. 13018-13025.

6. Zhao T., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim Y. Lipase-catalyzed production of pinolenic acid concentrate from pine nut oil using a recirculating packed bed reactor // Journal of Food Science. 2012. Т. 77, № 2. С. 267-271.

7. Ефремов А.А. Перспективы малотоннажной переработки кедровых орехов в продукты пищевого и технического назначения // Химия растительного сырья. 1998. № 3. С. 83-86.

8. Дагвалдай, И.В. Исследование биохимического состава кедровых орехов, произрастающих в таежных зонах республики Тыва // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий. 2015. Т. 1, № 19. С. 14-15.

9. Егорова Е.Ю., Позняковский В.М. Пищевая ценность кедровых орехов Дальнего Востока // Изв. высших учебных заведений. Пищевая технология. 2010. № 4. С. 21-24.

10. Субботина М.А., Лобова Т.В. Совершенствование технологии подготовки кедровых орехов к извлечению масла // Техника и технология пищевых производств. 2011. Т. 4, № 23. С. 1-4.

11. Zhilin A.A., Fedorov A.V. Acousto-convective drying of pine nuts // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Т. 87, № 4. С. 908-916.

12. Fardin-Kia A.R., Handy S.M., Rader J.I. Characterization of pine nuts in the U.S. market, including those associated with "Pine mouth", by GC-FID // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012. Т. 60, № 10. С. 2701-2711.

13. Özcan M.M., Kanbura G., Dağdelen A., Kara H.H. The effect of microwave and roasted processing on the fatty acid composition of oils extracted from stone pine (pinus pinea) nuts // Rivista Italiana delle Sostanze Grasse. 2013. Т. 90, № 4. С. 265-269.

14. Бырдин П.В., Михальский Д.В., Борейкина Е.М. Устройство для шелушения кедровых шишек с их предварительной термической обработкой: пат. 2491010 Рос. Федерация № 201147697/13; заяв. 23.11.11; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24.

15. Невзоров В.Н., Корнеев С.В. Устройство для извлечения ядер кедрового ореха: пат. 2332913 Рос. Федерация № 2006145690/13; заяв. 21.12.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 25.

16. Невзоров В.Н., Куриленко Н.И., Голубев И.В. Устройство для разрушения скорлупы кедрового ореха: пат. 2339280 Рос. Федерация № 2007118869/13; заяв. 21.05.07; опубл. 27.11.08, Бюл. № 33.

17. Невзоров В.Н., Куриленко Н.И. Устройство для разрушения скорлупы кедровых орехов: пат. 2350231 Рос. Федерация № 2008102306/13; заяв. 21.01.08; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

18. Невзоров В.Н., Холопов В.Н., Самойлов В.А., Голубев И.В. Устройство для разрушения скорлупы ореха: пат. 128462 Рос. Федерация № 2012150256/13; заяв. 23.11.12; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15.

19. Бырдин П.В., Медведева О.И., Михальский Д.В. Теоретические аспекты шелушения термообработанных кедровых шишек // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 6. С. 207-212.

20. Бырдин П.В., Медведева О.И., Михальский Д.В. Теоретические исследования устройства для извлечения ореха из кедровой шишки // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 6. С. 139-143.

21. Бырдин П.В., Холопов В.Н., Невзоров В.Н. Модернизация технологического оборудования для заготовки и транспортировки недревесного растительного сырья // АПК России. 2015. № 74. С. 118-123.

4. Adhikari P., Zhu X.-M., Gautam A., Shin J.-A., Hu J.-N., Lee J.-Y., Lee K.-T., Akoh C.C. Scaled-up production of zero-trans margarine fat using pine nut oil and palm stearin // Food Chemistry. 2010. Т. 119, № 4. P. 1332-1338.

5. Wang H., Zu G., Yang L., Zu Y.-G., Zhang Z.-H., Y. Zhang Y., Zhang L., Wang H.-Z. Effects of heat and ultraviolet radiation on the oxidative stability of pine nut oil supplemented with carnosic acid // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. Т. 59, № 24. P. 13018-13025.

6. Zhao T., Yoon S.W., Kim I.-H., Kim B.H., Kim C.-T., Kim Y. Lipase-catalyzed production of pinolenic acid concentrate from pine nut oil using a recirculating packed bed reactor // Journal of Food Science. 2012. Т. 77, № 2. P. C267-C271.

7. Efremov A.A. Prospects for small-scale processing of pine nuts in food products and technical application // Khimiya rastitel'nogo syr'ya (Chemistry of plant raw material). 1998. № 3. P. 83-86.

8. Dagvaldai I.V. The study of biochemical composition of pine nuts, which grow in the taiga zone of the Republic of Tuva // Ekologiya Yuzhnoi Sibiri i sopredel'nykh territorii. 2015. Т. 1, № 19. P. 14-15.

9. Егорова Е.Ю., Позняковский В.М. Nutritional value of pine nuts Far East // Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya. 2010. № 4. P. 21-24.

10. Subbotina M.A., Lobova T.V. Improving the technology of preparation of pine nuts to extract oil // Food Processing: Techniques and Technology. 2011. Т. 4, № 23. P. 1-4.

11. Zhilin A.A., Fedorov A.V. Acousto-convective drying of pine nuts // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Т. 87, № 4. P. 908-916.

12. Fardin-Kia A.R., Handy S.M., Rader J.I. Characterization of pine nuts in the U.S. market, including those associated with "Pine mouth", by GC-FID // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2012. Т. 60, № 10. P. 2701-2711.

13. Özcan M.M., Kanbura G., Dağdelen A., Kara H.H. The effect of microwave and roasted processing on the fatty acid composition of oils extracted from stone pine (pinus pinea) nuts // Rivista Italiana delle Sostanze Grasse. 2013. Т. 90, № 4. P. 265-269.

14. Byrdin P.V., Mikhail'skii D.V., Boreikina E.M. A device for peeling pine cones with their pre-heat treatment: пат. 2491010 Рос. Федерация № 201147697/13; заяв. 23.11.11; опубл. 27.08.13, Бюл. № 24.

15. Nevzorov V.N., Korneev S.V. A device for extracting the nuclei of cedar nuts: пат. 2332913 Рос. Федерация № 2006145690/13; заяв. 21.12.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 25.

16. Nevzorov V.N., Kurilenko N.I., Golubev I.V. The device for breaking the shell of pine nuts: пат. 2339280 Рос. Федерация № 2007118869/13; заяв. 21.05.07; опубл. 27.11.08, Бюл. № 33.

17. Nevzorov V.N., Kurilenko N.I. The device for breaking the shell of pine nuts: пат. 2350231 Рос. Федерация № 2008102306/13; заяв. 21.01.08; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

18. Nevzorov V.N., Kholopov V.N., Samoilov V.A., Golubev I.V. The device for breaking a nut shell: пат. 128462 Рос. Федерация № 2012150256/13; заяв. 23.11.12; опубл. 27.05.13, Бюл. № 15.

19. Byrdin P.V., Medvedeva O.I., Mikhail'skii D.V. Theoretical aspects of the peeling of heat-treated pine cones // The Bulletin of KrasGAU. 2013. № 6. P. 207-212.

20. Byrdin P.V., Medvedeva O.I., Mikhail'skii D.V. Theoretical studies of the device for extracting walnut cedar cones // The Bulletin of KrasGAU. 2010. № 6. P. 139-143.

21. Byrdin P.V., Kholopov V.N., Nevzorov V.N. Modernization of technological equipment for harvesting and transportation of non-wood plant raw material // Agro-Industrial Complex of Russia. 2015. № 74. P. 118-123.

### References

1. Gölge E., Ova G. The effects of food irradiation on quality of pine nut kernels // Radiation Physics and Chemistry. 2008. Т. 77, № 3. P. 365-369.

2. Mikkelsen A.T., Jessen F., Ballin N.Z. Species determination of pine nuts in commercial samples causing pine nut syndrome // Food Control. 2014. Т. 40, № 1. P. 19-25.

3. Köbler H., Monakhova Y.B., Kuballa T., Tschiersch C., Lachenmeier D.W., Vancutsem J., Thielert G., Mohring A. Nuclear magnetic resonance spectroscopy and chemometrics to identify pine nuts that cause taste disturbance // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011. Т. 59, № 13. P. 6877-6881.