

6. Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Trubitsyn N.V., Tarkivskiy V.Ye. Primeneniye inertsiyal'noy navigatsii dlya opredeleniya buksovaniya sel'skokhozyaystvennykh traktorov [Applying inertial navigation to determine the slippage of farm tractors]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*, 2018; 1(28): 8-23. (in Rus.).

7. MPU-9250. Product Specification. Revision 1.1. [Electronic resource]. URL: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/> (Access date 01.04.2018). (in Rus.).

8. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Chislennyye metody nelineynoy fil'tratsii dlya obrabotki signalov i izmereniy [Numerical methods of nonlinear filtering for processing signals and measurements]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2016; 4: 64-98. (in Rus.).

9. Kudryavtseva I.A. Analiz effektivnosti rasshirenogo fil'tra Kalmana, sigma-tochechnogo fil'tra Kalmana

i sigma-tochechnogo fil'tra chastits [Analysing the efficiency of the extended Kalman filter, the Kalman sigma-point filter and the sigma-point particle filter]. *Nauchnyy Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2016; 224 (2): 43-51. (in Rus.).

10. Sebastian O.H. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays [Electronic resource]. URL: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf (Access date 01.04.2018).

11. Conway J.Ch., Smith D.A. O kvaternionakh i oktavakh, ob ikh geometrii, arifmetike i simmetriyakh [On quaternions and octaves, their geometry, arithmetics and symmetries]. Moscow, MTSNMO, 2009: 184. (in Rus.).

The paper was received on April 5, 2018

УДК 631.361.022

DOI 10.26897/1728-7936-2018-5-20-24

ПАСТУХОВ АЛЕКСАНДР ГЕННАДИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор

E-mail: pastukhov_ag@mail.ru

БАХАРЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: baharevdn_82@mail.ru

Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 308503, ул. Вавилова, 1, пос. Майский, Белгородский район, Белгородская область, Российская Федерация

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА ФАСОННОГО ШИПА И ЗЕРНА КУКУРУЗЫ В МОЛОТИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Для эффективного обмолота початков кукурузы рабочие органы современных молотильных устройств комплектуются стальными шипами различной формы. Конструкционные параметры данных шипов обоснованы экспериментально, без предшествующих теоретических исследований. Предлагается конструкция нового фасонного шипа молотильного устройства для початков кукурузы, полученного на основании анализа конструктивных особенностей биологических прототипов шипов и отличающегося от широко распространенного круглого шипа кривизной рабочей поверхности. В качестве биологических прототипов были приняты жвалы амбарных вредителей (элементы ротового аппарата насекомых, поедающих зерно кукурузы). Проведено 3D-моделирование контакта оболочки зерна кукурузы со стальными шипами существующей круглой формы и шипами новой фасонной формы. Установлено, что площадь контакта круглого шипа и оболочки зерна кукурузы представляет собой эллипсоид, а площадь контакта нового фасонного шипа и оболочки зерна кукурузы – сложную фигуру, состоящую из эллипсоида и эллиптического параболоида. Проведены теоретические исследования, в результате которых получены выражения для определения объемов оболочки зерна, вдавленной внутрь круглым и фасонным шипом. Проанализированы области контакта зерна с круглым и фасонным шипом по размеру площади контакта и глубине проникновения шипа в зерно. Установлено относительное равенство вдавливаемых объемов оболочки зерна как круглым, так и фасонным шипом и выявлена значительная разница в размерах площади контакта: для круглого шипа площадь контакта с оболочкой зерна кукурузы составляет 3,12 мм², а нового фасонного шипа – 5,17 мм². Следовательно, при использовании фасонных шипов новой конструкции обмолачивающая сила распределяется по большей области, что снизит вероятность нанесения зерну макро- и микроповреждений.

Ключевые слова: зерно кукурузы, обмолот, фасонный шип, биологический прототип, деформация зерна.

Введение. Переработка урожая кукурузы начинается с обмолота. При обмолоте зерно получает макро- и микроповреждения [1-4]. Через поврежде-

ния к внутренним тканям зерна проникают различные микроорганизмы и грибки, которые ухудшают семенные, продовольственные или фуражные свой-

ства зерна. Проблема минимизации повреждений зерна при обмолоте кукурузы требует дальнейших научных исследований. Теоретико-экспериментальный метод решения данной проблемы привел к появлению большого количества молотильных устройств, принципиально отличающихся по конструкции и принципу обмолота. Многообразие конструкций молотильных устройств указывает на то, что единая теория обмолота кукурузы еще до конца не сформирована. Разработка общей концепции создания эффективных рабочих органов молотильных устройств для кукурузы требует всестороннего изучения явлений, возникающих в зоне непосредственного контакта зерна и рабочего органа.

Цель исследования – теоретическая оценка влияния кривизны поверхности шипа молотильного устройства на размеры поверхности его контакта с зерном кукурузы в процессе обмолота.

Методы исследования. В исследовании были использованы методы математического анализа, 3D-моделирования, методологические основы бионики и методология системного анализа.

Результаты и обсуждение. Любое молотильное устройство для початков кукурузы воздействует на зерно обмолачивающими шипами, штифтами или билами, изготовленными из прочных материалов. В связи с этим научный интерес представляет контакт рабочего органа молотильного устройства (например, шипа или штифта) непосредственно с поверхностью зерна кукурузы в процессе обмолота.

Существует научно обоснованная теория, описывающая взаимодействие двух контактирующих тел, выполненных из прочных материалов (контактная задача теории упругости Герца) [5]. Взяв за основу контактную задачу теории упругости, можно предположить, что стальной шип деформирует оболочку зерна на ограниченном участке, образуя при этом область контакта. Возникает научная необходимость в моделировании данной области контакта для понимания явлений, влияющих на ее размер, глубину вдавливания шипа в зерно и распределение нагрузки в пределах изучаемой области. На основании данных, приведенных в [6], были исследованы биологические прототипы шипов молотильных устройств для кукурузы. В качестве биологических прототипов

были приняты жвалы амбарных вредителей [6, 7]. Кроме того, обосновано значение масштабного множителя линейного преобразования размеров жвал. Примеры отмасштабированных жвал амбарных вредителей представлены на рисунке 1.

В результате анализа конструкций жвал был предложен новый фасонный шип молотильного устройства. В существующих конструкциях молотильных устройств для початков кукурузы наибольшее распространение получили шипы квадратной, круглой и фасонной формы (рис. 2). Доказано, что фасонная конструкция стального шипа наиболее эффективна [1, 2, 7].

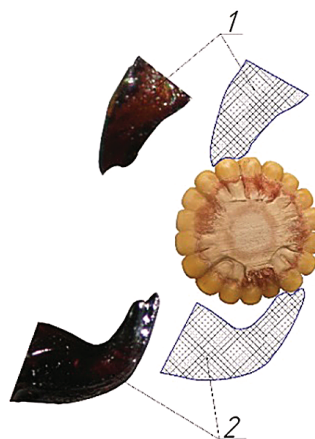


Рис. 1. Сопоставление форм рабочих органов насекомых (амбарных вредителей) и зерна в початке кукурузы: 1 – жвала зернового точильщика; 2 – жвала большого темного хрущака

Новый фасонный шип позволяет в сравнении с круглым и существующим фасонным шипом получить большую область контакта (рис. 3). Размер области контакта обусловлен кривизной рабочей поверхности шипа. У существующего фасонного шипа рабочая поверхность является параболоидом вращения, а у нового – образуется в результате вращения квадратичной кривой Безье, задаваемой полиномом Бернштейна [7].

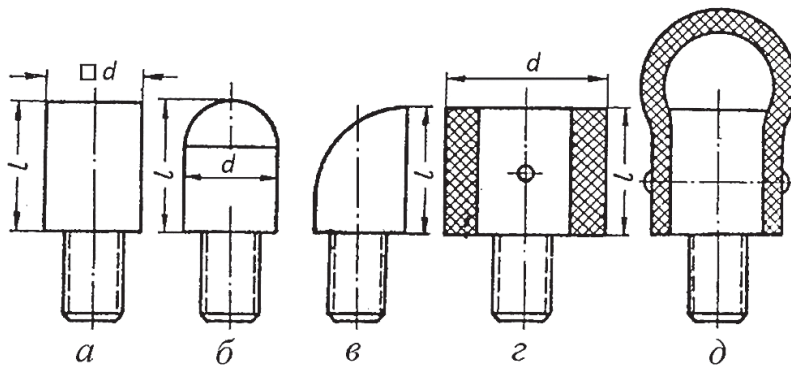


Рис. 2. Формы шипов: а – квадратные ($l = 20 \dots 50$ мм); б – круглые ($d = 20 \dots 40$ мм; $l = 20 \dots 50$ мм); в – фасонные; г, д – покрытые резиной

Чем больше область контакта, тем по большей поверхности распределена обмолочивающая сила, следовательно, тем меньше вероятность образования макро- и микрповреждений. Однако плоскостная оценка пятна контакта неполноценна, на что также указывает теория Герца. Здесь важна не только площадь контакта, но и глубина проникновения шипа в зерно. Известно, что, проникая в тело зерна на глубину 0,45 мм посредством удара, шип приводит зерно к границе прочностных свойств [8]. Если рассматривать процесс контакта зерна и нового шипа в трехмерном пространстве, то видно, что поверхность контакта не является эллиптической. Поэтому, анализируя конструкции различных шипов, необходимо при равной максимально допустимой глубине проникновения в тело зерна (0,45 мм) сравнивать объемы вдавленной внутрь зерна оболочки совместно с анализом размеров области контакта. На рисунке 4 представлены проекции области контакта зерна кукурузы и предложенного шипа на горизонтальную и фронтальную плоскости.

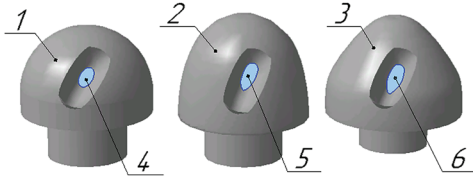


Рис. 3. Модель взаимодействия шипов с зерном кукурузы: 1 – круглый шип; 2 – существующий фасонный шип; 3 – новый фасонный шип; 4, 5, 6 – области контакта зерна с шипами изучаемых конструкций

Как следует из рисунка 4, в области контакта можно выделить три участка различной формы и глубины проникновения в оболочку зерна кукурузы.

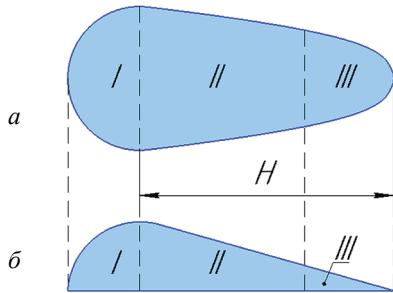


Рис. 4. Схема области контакта нового (фасонного) шипа и зерна кукурузы: а – горизонтальная проекция; б – фронтальная проекция

Тело I – эллипсоид (рис. 5), который определяется уравнением [9, 10]:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} + \frac{z^2}{C^2} = 1, \quad (1)$$

где A, B, C – полуоси эллипсоида; x, y, z – соответствующие переменные.

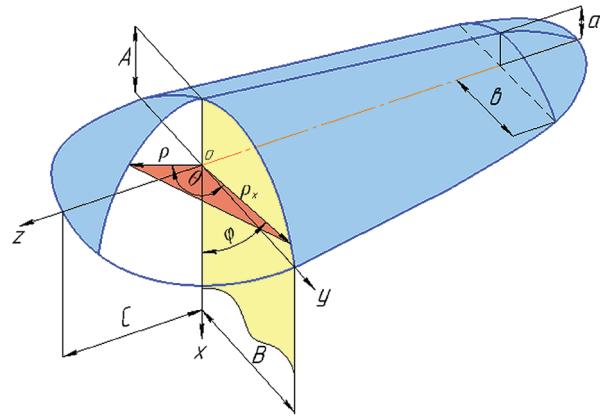


Рис. 5. Параметры пятна контакта

Тело II совместно с телом III – эллиптический параболоид (рис. 4 и 5), который определяется уравнением [9, 10]:

$$\frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} = z; \quad 2p = \frac{A^2}{H}; \quad 2q = \frac{B^2}{H}; \quad z = H, \quad (2)$$

где p и q – фокальные параметры главных парабол эллиптического параболоида.

Объем эллипсоида V_I определяется тройным интегралом [10]:

$$V_I = \int dV = \iiint_V dx dy dz. \quad (3)$$

Сделаем замены и определимся с пределами интегрирования. Связь между декартовыми и сферическими координатами описывается формулами [9, 10]:

$$x = A\rho\cos\varphi\sin\theta; \quad y = B\rho\sin\varphi\sin\theta; \quad z = C\rho\cos\theta,$$

где ρ – радиус-вектор; θ и φ – углы, характеризующие положение радиус-вектора ρ .

При переходе в сферическую систему координат рассчитаем якобиан [10]:

$$\begin{aligned} dx dy dz &= d\rho d\varphi d\theta \cdot \Delta, \quad (4) \\ \Delta &= \begin{vmatrix} A\rho\cos\varphi\sin\theta & -A\rho\sin\varphi\sin\theta & A\rho\cos\varphi\cos\theta \\ B\rho\sin\varphi\sin\theta & B\rho\cos\varphi\sin\theta & B\rho\sin\varphi\cos\theta \\ C\cos\theta & 0 & C\rho\sin\theta \end{vmatrix} = \\ &= ABC\rho^2\sin\theta d\rho d\varphi d\theta. \end{aligned}$$

При $0 \leq \rho \leq 1$ (относительный параметр), $0 \leq \varphi \leq \pi$, $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ получим

$$\begin{aligned} V_I &= \iiint_V ABC\rho^2\sin\theta d\rho d\varphi d\theta = \\ &= ABC \int_0^\pi d\varphi \int_0^1 d\rho \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho^2\sin\theta d\theta = \frac{ABC\pi}{3}. \end{aligned}$$

Применение фасонного шипа новой конструкции вторую часть половины эллипсоида изменяет до более растянутой формы эллиптического параболоида. Причем экстремального проникновения шипа в тело зерна на этом участке нет. Объем данного эллиптического параболоида V_{II-III} определяется уравнением [10]:

$$V_{II-III} = \frac{1}{2} \iiint_V dV = \frac{1}{2} \iiint_V dx dy dz. \quad (5)$$

Каноническое уравнение эллиптического параболоида [10, 11]:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = H.$$

Из канонического уравнения получим:

$$y = \sqrt{B^2 \left(H - \frac{x^2}{A^2} \right)}; \quad 0 \leq x \leq A;$$

$$0 \leq y \leq \sqrt{B^2 \left(H - \frac{x^2}{A^2} \right)}; \quad 0 \leq z \leq H.$$

Сделаем замену для облегчения вычислений:

$$\begin{aligned} -\sqrt{2pH} \leq x \leq \sqrt{2pH}; \\ -\sqrt{2q \left(H - \frac{x^2}{2p} \right)} \leq y \leq \sqrt{2q \left(H - \frac{x^2}{2p} \right)}; \\ \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} \leq z \leq H. \end{aligned}$$

Иначе говоря, $V_{II-III} = \frac{1}{2} V_{\text{эллипт. параб.}}$ [10, 11]:

$$\begin{aligned} V_{\text{эллипт. параб.}} &= \iiint_{\frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} \leq z \leq H} dx dy dz = \\ &= \int_{-\sqrt{2pH}}^{\sqrt{2pH}} dx \int_{-\sqrt{2q \left(H - \frac{x^2}{2p} \right)}}^{\sqrt{2q \left(H - \frac{x^2}{2p} \right)}} dy \int_{\frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q}}^H dz = \pi \sqrt{pq} H^2. \end{aligned}$$

Окончательно уравнение примет вид

$$V_{II-III} = \frac{1}{2} \pi \sqrt{pq} H^2 = \frac{\pi \sqrt{\frac{A^2}{2H} \cdot \frac{B^2}{2H}}}{2} H^2 = \frac{\pi ABH}{4}.$$

Искомый объем тела

$$\begin{aligned} V &= V_I + V_{II-III} = \frac{\pi ABC}{3} + \frac{\pi ABH}{4} = \\ &= \frac{\pi AB(3H + 2C)}{12}. \end{aligned} \quad (6)$$

Расчет объемов вдавленных внутрь зерна фигур показывает их относительное равенство. Объем фигуры эллиптической формы V_K , полученной при вдавлении в зерно круглого шипа, равен 0,942 мм³. Объем фигуры описанной выше формы V_ϕ , полученной при вдавлении в зерно нового фасонного шипа, равен 0,936 мм³. Расчет площадей, ограниченных контуром внедренного в зерно шипа, показал: для круглого шипа $S_K = 3,12$ мм², а для фасонного шипа $S_\phi = 5,17$ мм². Разница в площадях составляет 1,6 раза. Таким образом, при заданной равной глубине вдавления 0,45 мм фасонный шип контактирует с зерном по площади в 1,6 раза больше, чем круглый, а следовательно, обмолачивающее усилие распределяется по большей площади и вероятность образования макро- и микроповреждений зерна пропорционально снижается.

Выводы

Повысить эффективность молотильных устройств для кукурузы можно путем применения шипов молотильной камеры фасонной формы. Шипы фасонной и круглой формы, проникая в тело зерна, вдавливают внутрь равные объемы материала оболочки, однако фасонный шип осуществляет вдавление на большей площади. Фигура, вдавленная фасонным шипом, математически выражается как сложное тело, состоящее из эллипсоида и эллиптического параболоида. Причем прирост поверхности контакта осуществляется за счет увеличения длины эллиптического параболоида. При заданной равной глубине вдавления 0,45 мм фасонный шип контактирует с зерном по площади в 1,6 раза больше, чем круглый. Следовательно, обмолачивающая сила распределяется по большей области и снижается вероятность нанесения зерну макро- и микроповреждений.

Библиографический список

1. Петунина И.А. Обмолот початков кукурузы. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2006. 206 с.
2. Голик С.М. Механизация уборки, обработки и хранения кукурузы. М.: Колос, 1973. 335 с.
3. Алдошин Н.В., Золотов А.А., Цыгуткин А.С. и др. Уборка бинарных посевов зерновых культур // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 3 (73). С. 11-17.
4. Алдошин Н.В., Золотов А.А. Анализ повреждения зерна на уборке белого люпина // Глобализация и развитие агропромышленного комплекса России: Сб. науч. трудов по материалам Межд. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию ФГБОУ ВПО СПбГАУ. 2014. С. 132-136.
5. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. К.: Наукова думка, 1976. 357 с.
6. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия. М.: Наука, 1981. 240 с.
7. Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф. Бионические основы разработки и конструирования эффективных

шипов молотильно-сепарирующих устройств для кукурузы // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2017. № 3 (15). С. 3-13.

8. Рожківський М.Ф. До визначення механізму деформації і руйнування зернових матеріалів // *Вісник аграрної науки*. 2000. № 7. С. 50-53.

9. Берд Дж. *Инженерная математика*. М.: Додэка-XXI, 2008. 544 с.

10. Гусак А.А. *Справочник по высшей математике*. Мн.: ТетраСистема, 1999. 640 с.

Статья поступила 02.05.2018

THEORETICAL STUDY OF THE CONTACT BETWEEN SHAPED PEGS AND CORN GRAIN IN A THRESHING CHAMBER

ALEKSANDR G. PASTUKHOV, DSc (Eng), Professor

E-mail: pastukhov_ag@mail.ru

DMITRY N. BAKHAREV, Phd (Eng), Associate Professor

E-mail: baharevdn_82@mail.ru

Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 308503, Vavilov Str., 1, Maisky village, Belgorod region, Russian Federation

For effective threshing of cobs, the working elements of modern threshing devices are equipped with steel pegs of various shapes. The design parameters of these studs are determined experimentally, without previous theoretical studies. In this paper, the authors propose the design of a new shaped peg for a corn cob threshing device. The design of the new-shaped stud has been obtained on the basis of the analysis of design features of biological prototypes of the studs. It differs from the widely spread round stud by the curvature of its working surface. Mandibles of granary pests (elements of the mouthpiece of insects eating corn kernels) were taken as a biological prototype. The study involved 3D modeling of the contact of a corn grain shell with steel pegs of a widespread round shape and new shaped studs. It has been established that the contact area of the round stud and the corn grain shell is an ellipsoid, and the contact area of the new shaped peg and the corn grain shell is a complex figure consisting of an ellipsoid and an elliptical paraboloid. Theoretical studies have been carried out, as a result of which expressions have been obtained for determining the volumes of a grain shell pressed into the inside by a round and a new shaped peg. The contact areas of grains and round and shaped studs have been analyzed in terms of the contact area size and the penetration depth of the peg into the grain. As a result, relative equality of the pressed volumes of a grain shell with both a round and a new shaped peg has been determined and a significant difference in the contact area size has been revealed: for the round peg, the contact area with the corn shell is 3,12 mm², and the new shaped peg, it amounts to 5,17 mm². Therefore, when using pegs of a new design, threshing force is spread over a larger area, which reduces the probability of small and large deformations of grain.

Key words: corn grain, threshing, shaped peg, biological prototype, grain deformation.

References

1. Petunina I.A. *Obmolot pochatkov kukuruzy* [Cob threshing]. Krasnodar, Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2006: 206. (in Rus.).

2. Golik S.M. *Mekhanizatsiya uborki, obrabotki i khraneniya kukuruzy* [Mechanization of corn harvesting, processing and storage]. Moscow, Kolos, 1973: 335. (in Rus.).

3. Aldoshin N.V., Zolotov A.A., Tsygutkin A.S. et. al. *Uborka binarnykh posevov zernovykh kul'tur* [Harvesting binary grain crops]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2016; 3(73): 11-17. (in Rus.).

4. Aldoshin N.V., Zolotov A.A. *Analiz povrezhdeniya zerna na uborke belogo lyupina* [Analysis of grain damage in white lupine harvesting]. *Globalizatsiya i razvitiye agropromyshlennogo kompleksa Rossii: Sb. nauch. trudov po mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 110-letiyu FGBOU VPO SPbGAU*, 2014: 132-136. (in Rus.).

5. Kil'chevskiy N.A. *Dinamicheskoye kontaktnoye szhatiye tverdykh tel* [Dynamic contact compression of solids]. *Udar. K., Naukova dumka*, 1976: 357. (in Rus.).

6. Petukhov S.V. *Biomekhanika, bionika i simmetriya* [Biomechanics, bionics and symmetry]. Moscow, Nauka, 1981: 240. (in Rus.).

7. Bakharev D.N., Vol'vak S.F. *Bionicheskiye osnovy razrabotki i konstruirovaniya effektivnykh shipov molotil'no-separiruyushchikh ustroystv dlya kukuruzy* [Bionic bases for the development and design of effective pegs of threshing-and-separating units for maize]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2017; 3(15): 3-13. (in Rus.).

8. Rozhkiv'skiy M.F. *Do viznachennya mekhanizmu deformatsii i ruynuvannya zernovykh materialiv* [Determination of a deformation and destruction mechanism of grain materials]. *Visnik agrarnoi nauki*, 2000; 7: 50-53. (In Ukr.).

9. Berd J. *Inzhenernaya matematika* [Engineering mathematics]. Moscow, Dodeka-XXI, 2008: 544. (in Rus.).

10. Gusak A.A. *Spravochnik po vyshey matematike* [Reference book on higher mathematics]. Mn., Tetra-Sistema, 1999: 640. (in Rus.).

The paper was received on May 2, 2018