

Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы

Александр Геннадиевич Пастухов,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: pastukhov_ag@mail.ru;
Дмитрий Николаевич Бахарев,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: baharevdn_82@mail.ru;

Сергей Федорович Вольвак,
кандидат технических наук, профессор кафедры,
e-mail: volvak.s@yandex.ru;
Александр Александрович Добрицкий,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: dobrickiy_aa@bsaa.edu.ru

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, п. Майский, Белгородская обл., Российская Федерация

Реферат. Отметили необходимость снижения травмирования зерна кукурузы при обмолоте початков. Показали, что можно ввести ограничивающие условия и обеспечить рациональные параметры при работе молотильно-сепарирующих устройств, исключающие повреждение внешней плодовой оболочки зерна. Подтвердили, что закономерности обмолота початков кукурузы адекватно описываются посредством применения контактной задачи теории упругости Г. Герца. (*Цель исследования*) Определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы, поверхность которой непосредственно контактирует с рабочими органами молотильного устройства. (*Материалы и методы*) Использовали методы однофакторного экспериментального исследования с последующей статистической обработкой массива данных. Экспериментально изучили коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зубовидной кукурузы и модуль Юнга применительно к зерну кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы. (*Результаты и обсуждение*) Разработали методики исследования и экспериментальные установки для определения коэффициента Пуассона и модуля Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы. Установили, что с доверительной вероятностью 0,95 среднее значение коэффициента Пуассона плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы составляет 0,356. Определили модуль Юнга применительно к нескольким разновидностям кукурузы: кремнистой – 98-125 мегапаскалей, зубовидной кукурузы – 78-127, сахарной – 97-124, лопающейся – 127-169 мегапаскалей. Выявили, что максимально допустимый скоростной режим обмолота обеспечивается при скорости контактного взаимодействия зерна и шипа молотильного устройства не более 1,6 метра в секунду. (*Выводы*) Доказали, что для более полного прикладного применения контактной задачи теории упругости Г. Герца при моделировании процессов обмолота початков кукурузы необходимо знать коэффициент Пуассона и модуль Юнга внешней плодовой оболочки зерна. Рекомендовали использовать полученные численные значения данных механико-технологических характеристик при моделировании деформационных процессов, регламентирующих скоростные режимы обмолота.

Ключевые слова: обмолот, зерно кукурузы, травмирование зерна, молотильно-сепарирующее устройство, плодовая оболочка, коэффициент Пуассона, модуль Юнга.

■ **Для цитирования:** Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Добрицкий А.А. Определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №3. С. 20-26. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN BNZXOM.

Estimating Poisson's Ratio and Young's Modulus of the Outer Fruit Shell of Corn Grain

Aleksandr G. Pastukhov,
Dr.Sc.(Eng.), professor, head of department,
e-mail: pastukhov_ag@mail.ru;
Dmitriy N. Bakharev,
Ph.D.(Eng.), e-mail: baharevdn_82@mail.ru;

Sergey F. Vol'vak,
Ph.D.(Eng.), professor, e-mail: volvak.s@yandex.ru;
Aleksandr A. Dobritskiy,
Ph.D.(Eng.), e-mail: dobrickiy_aa@bsaa.edu.ru

Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin, Maysky, Belgorod region, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the need of reducing damage caused to corn grain during cobs threshing. The damage to the grain fruit shell can be eliminated by introducing limiting conditions and ensuring optimal parameters for the threshing and separating device operation. It has been confirmed that the patterns of corn cobs threshing can be adequately described by applying the Hertzian elastic contact theory. (*Research purpose*) To obtain the Poisson's ratio and Young's modulus of the fruit shell of corn grain, whose surface is in direct contact with the working bodies of the threshing device. (*Materials and methods*) One-factor-at-a-time experiments were conducted with the subsequent statistical processing of the data array. Poisson's ratio was experimentally studied for the fruit shell of dent corn and so was Young's modulus for the grain of flint corn, dent corn, sugar corn and popcorn. (*Results and discussion*) Research methods and experimental equipment have been developed to determine the Poisson's ratio and Young's modulus of the fruit shell of corn grain. It was established that with a confidence probability of 0.95, the average Poisson's ratio value of the fruit shell of the dent corn grain equals 0.356. Young's modulus was obtained by the following corn varieties: flint corn – 98-125 megapascals, dent corn – 78-127 megapascals, sugar corn – 97-124 megapascals, popcorn – 127-169 megapascals. It was found out that the maximum permissible speed mode of threshing can be provided if the speed of contact interaction between the grain and the threshing device pin does not exceed 1.6 meters per second. (*Conclusion*). It was proved that for a more comprehensive application of the Hertzian elastic contact theory when modeling the processes of threshing corn cobs, it is necessary to know the Poisson's ratio and Young's modulus for the outer fruit shell of grain. The obtained numerical values of these mechanical and technological characteristics are recommended to be used in modeling the deformation processes that regulate the threshing speed regimes.

Keywords: threshing, corn grain, grain damage, threshing and separating device, fruit shell, Poisson's ratio, Young's modulus.

■ **For citation:** Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Dobritskiy A.A. Opredelenie koeffitsienta Puassona i modulya Yunga vneshney plodovoy obolochki zerna kukuruzy [Estimating Poisson's ratio and Young's modulus of the outer fruit shell of corn grain]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N3. 20-26 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-3-20-26. EDN BNZXOM.

Из зерна и обмолоченных стержней початков кукурузы производят пищевые продукты, корма для сельскохозяйственных животных и более 500 разновидностей непищевых продуктов (спирт, биоэтанол, пластик для 3D-принтеров, гранулы для твердотопливных котлов и т.д.) [1, 2]. Полная реализация генетического потенциала урожайности семенного зерна возможна только при отсутствии механических повреждений. В процессе комбайновой уборки початков и их послеуборочной переработки зерно подвергается многократному силовому воздействию рабочими органами машин, конструкция и режимы работы которых в большинстве случаев не рациональны [3, 4].

Совершенствование рабочих органов машин для комбайновой уборки початков и их послеуборочной переработки на семена целесообразно проводить посредством моделирования и всестороннего изучения динамического контактного взаимодействия внешней плодовой оболочки зерна кукурузы и рабочих органов машин. Больше всего зерно повреждается во время обмолота в аксиально-роторном молотильно-сепарирующем устройстве (МСУ). Здесь осуществляется контакт зерна со стальными шипами деки МСУ (рис. 1) [5, 6].

Расчет и прогнозирование величины равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия позволяют ввести ограничивающие условия и обеспечить рациональную скорость взаимодействия, исключая повреждение внешней плодовой оболочки зерна. Максимально допустимая сила

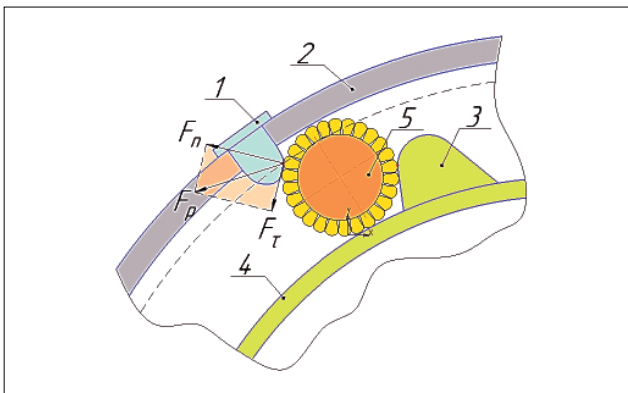


Рис. 1. Графическая интерпретация динамического контактного взаимодействия зерна кукурузы с шипом деки МСУ: 1 – шип деки; 2 – дека; 3 – лопасть ротора; 4 – цилиндр-ротор; 5 – початок кукурузы; F_n , F_t – нормальная и тангенциальная составляющие равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия F_p

Fig. 1. Graphical interpretation of the dynamic contact interaction of corn grain with the pin of the TSD deck: 1 – a pin of the deck; 2 – deck; 3 – rotor blade; 4 – cylinder rotor; 5 – corn cob; F_n , F_t – normal and tangent components of the resultant forces of dynamic contact interaction F_p

удара по зерну кукурузы составляет 680 Н [7-9]. Тогда научная задача минимизации повреждений сводится к определению зависимости равнодействующей сил динамического контактного взаимодействия и скорости движения рабочего органа. Для этих целей применима теория Г. Герца, выраженная в виде прикладной модели [10, 11]:

$$F_p = \left(\frac{4 \cdot \sqrt{R_1}}{3 \cdot \pi \cdot (k_1 + k_2)} \right)^{2/5} \cdot \left(\frac{5 \cdot V^2}{4 \cdot \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \right)} \right)^{3/5}, \quad (1)$$

где F_p – равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия, Н;

R_1 – радиус кривизны ударника (шила), м;

V – скорость удара, м/с;

m_1, m_2 – массы соударяющихся тел, кг;

k_1 и k_2 – коэффициенты, зависящие от модуля Юнга и коэффициента Пуассона соударяющихся тел [11]:

$$k_1 = (1 - \nu_1^2) / \pi \cdot E_1 \text{ и } k_2 = (1 - \nu_2^2) / \pi \cdot E_2, \quad (2)$$

где E_1 и E_2 – модули Юнга материалов соударяющихся тел, Па;

ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона материалов соударяющихся тел.

Изучение контактного взаимодействия целесообразно начинать с исследования механических характеристик контактирующих поверхностей. В частности, необходимо определить модуль Юнга и коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна кукурузы.

Цель исследования – определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга плодовой оболочки зерна кукурузы, поверхность которой непосредственно контактирует с рабочими органами молотильного устройства.

Материалы и методы. Использованы методы однократного экспериментального исследования с последующей статистической обработкой массива данных.

Экспериментально изучали коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зубовидной кукурузы. Модуль Юнга определяли для внешней плодовой оболочки зерна кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы.

Результаты и обсуждение. Методика определения коэффициента Пуассона внешней плодовой оболочки зерна кукурузы предусматривает три этапа.

1. Выбрана опорная математическая модель [12, 13]:

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона;

ε – относительное удлинение;

ε' – относительное сужение.

Относительное сужение ε' определяется выражением [12, 13]:

$$\varepsilon' = \frac{\Delta a}{a_0}, \quad (4)$$

где Δa – абсолютное сужение, мм;

a_0 – начальная толщина, мм.

Относительное удлинение ε определяется выражением [12, 13]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5)$$

где Δl – абсолютное удлинение, мм;

l_0 – начальная длина, мм.

2. Изготовлена экспериментальная установка (рис. 2).

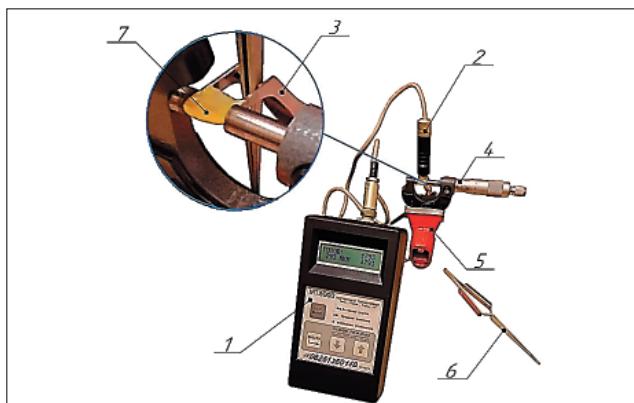


Рис. 2. Оборудование для определения коэффициента Пуассона плодовой оболочки зерна кукурузы: 1 – магнитный толщиномер; 2 – датчик толщиномера; 3 – захват-расширитель; 4 – микрометр; 5 – мини-тиски; 6 – обратный пинцет; 7 – внешняя плодовая оболочка зерна кукурузы

Fig. 2. Equipment for determining the Poisson's ratio of the fruit shell of corn grain: 1 – magnetic thickness gauge; 2 – thickness gauge sensor; 3 – gripper expander; 4 – micrometer; 5 – mini vise; 6 – reverse tweezers; 7 – outer fruit shell of corn grain

3. Разработана методика экспериментального исследования и проведены эксперименты. С зерна зубовидной кукурузы, созревшей до восковой спелости, посредством пинцета удалили зародыш и эндосперм так, чтобы внешняя плодовая и семенная оболочки сохранили свою целостность. Затем освобожденную от внутренних тканей плодовую оболочку надели на стальной захват-расширитель. Замерили начальную длину l_0 оболочки микрометром марки МК25-1 и начальную толщину a_0 магнитным толщиномером марки МТ2003. Шток микрометра переместили на 2,25 мм в сторону увеличения. Данная величина растяжения оболочки установлена в результате поискового опыта, чтобы исключить ее полный или частичный разрыв. По результатам экспериментов при 20-кратной повторности на основании выражения (3) рассчитали коэффициент Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна кукурузы.

В среднем значение коэффициента Пуассона для внешней плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы составило 0,356, а диапазон значений может колебаться от 0,341 до 0,382. Среднее квадратичное отклонение – 0,014, абсолютная ошибка – 0,020 мм, относительная ошибка – 5,6%.

Методика определения модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы различных ботанических подвидов также проводится в три этапа.

1. Выбрана опорная математическая модель [14-16]:

$$E = \frac{0,886 \cdot P_{\text{ви}} \cdot \psi \cdot (1 - \nu^2)}{H_{\text{ви}}^{\frac{3}{2}} \cdot d^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга, МПа;

$P_{\text{ви}}$ – сопротивление внедрению индентора в оболочку зерна, Н;

ψ – приведенная константа упругости;

ν – коэффициент Пуассона;

d – диаметр цилиндрического индентора, $d = 1,13$ мм;

$H_{\text{ви}}$ – глубина внедрения индентора в оболочку зерна, мм.

2. Изготовлена экспериментальная установка (рис. 3).

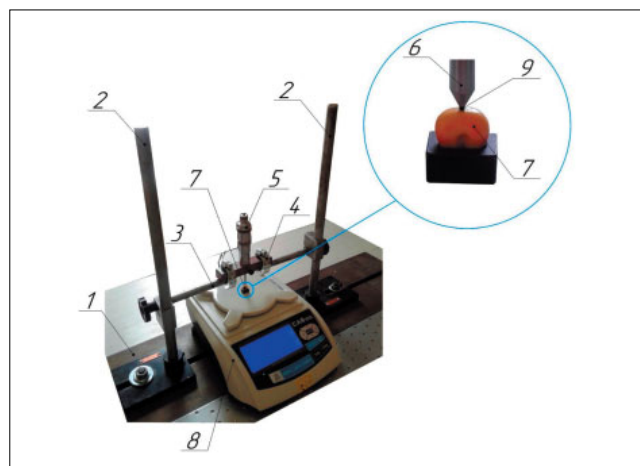


Рис. 3. Оборудование для определения модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы: 1 – лабораторный стенд СМУ 000.000; 2 – стойка-штатив; 3 – опора; 4 – фиксатор; 5 – микрометрический глубиномер; 6 – шток глубиномера; 7 – зерно; 8 – весы; 9 – цилиндрический индентор

Fig. 3. – Equipment for determining the Young's module of the outer fruit shell of corn grain: 1 – SMU 000.000 laboratory stand; 2 – stand-tripod; 3 – support; 4 – retainer; 5 – micrometer depth gauge; 6 – depth gauge rod; 7 – grain; 8 – scales; 9 – cylindrical indenter

3. Разработана методика экспериментального исследования и проведены эксперименты. Выявлена зависимость сопротивления внедрению цилиндрического индентора $P_{\text{ви}}$ от глубины внедрения индентора в оболочку зерна кремнистой, зубовидной, сахарной и лопающейся кукурузы $H_{\text{ви}}$ до достижения границы ее упругих свойств. Сопротивление измеряли посредством весового оборудования II высокого класса точности, глубину внедрения – микрометрическим глубиномером ГМ50 первого класса точности.

Зерно кукурузы – это живой организм, развивающийся по законам биологии и биосимметрии. Исходя из этого, на основе методики теории подобия предложено приведенную константу упругости принять сопоставимой с величиной двойного отношения линейных размеров, для зерна кукурузы $\psi = 1,29$ [17, 18].

Влажность испытуемых образцов зерна составляла 12,8-13,4% и контролировалась по общеизвестной методике в лабораторных условиях.

Для каждого из четырех исследуемых подвидов кукурузы отобрали группу зерен с равной толщиной и шириной верхней части. В защитную плодную оболочку отобранных зерен посредством перемещения штока глубиномера внедряли цилиндрический индентор на глубину до 1600 мкм. Сопротивление внедрению фиксировалось дискретно при ступенчатом изменении положения индентора с шагом 100 мкм. В каждом положении индентора эксперимент повторяли до появления статистически достоверного результата.

Применяемое измерительное оборудование и кратность повторения опытов позволили получить результаты экспериментов, достоверная вероятность которых превышает $p = 0,95$. По результатам исследований построили соответствующие графические зависимости (рис. 4).

После полного разрыва всех тканей оболочки начинается деформация эндосперма, это характеризуется стабильностью сопротивления и графически выражается участком плавной кривой. Для определения модуля Юнга наибольший научный интерес представляет последний изгиб кривой перед началом деформации эндосперма, поскольку здесь достигается предел упругости материала защитной плодовой оболочки зерна [19]. Числовые значения сопротивления в данном участке целесообразно использовать для расчета модуля Юнга. В результате установлено усилие, при котором преодолевается предел прочности внешней плодовой оболочки зерна кукурузы и при этом зафиксирована глубина внедрения индентора в оболочку зерна. В итоге на основании (6) рассчитан модуль Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы, МПа:

- кремнистой – 98-125;
- зубовидной – 78-127;
- сахарной – 97-124;
- лопающейся – 127-169.

Полнота знаний о коэффициенте Пуассона и модуле Юнга внешней плодовой оболочки зерна кукурузы позволяет реализовать модель (1), в результате чего для анализируемых ботанических подвидов кукурузы установлен максимально допустимый скоростной режим обмолота, обеспечивающий скорость контактного взаимодействия зерна и шипов МСУ, – не более 1,6 м/с. При этом равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия не превышает максимально допустимого значения $F_p = 680$ Н.

В перспективе предстоит уточнить механико-технологические характеристики плодовых оболочек большинства зерновых культур, что позволит не только оптимизировать режимы их обмолота, но и корректировать эффективные конструктивные параме-

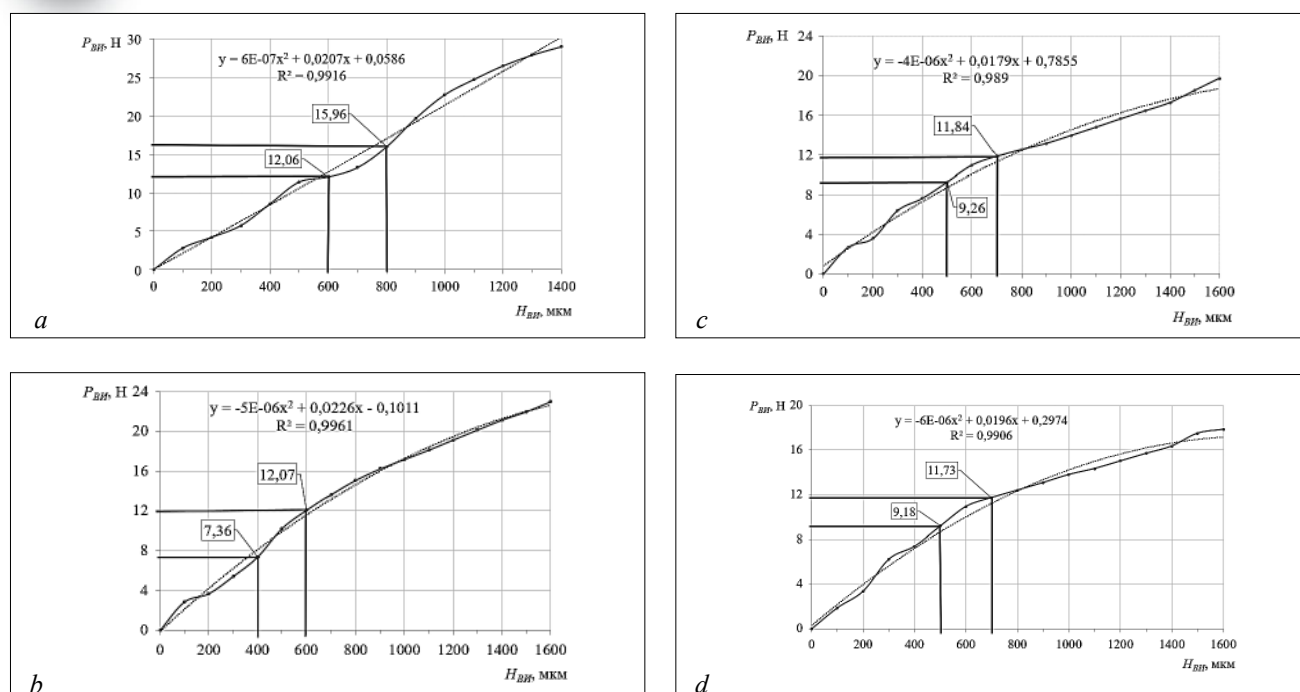


Рис. 4. Графическая зависимость сопротивления внедрению индентора в оболочку зерна от глубины его внедрения: а – кремнистая кукуруза; б – зубовидная; с – лопающаяся; д – сахарная

Fig. 4. – Graphical dependence between the indenter resistance to the insertion into the grain shell and its penetration depth: а – flint corn; б – dent corn; с – popcorn; d – sugar corn

тры рабочих органов молотильных устройств.

Выводы

1. Для более полного прикладного применения контактной задачи теории упругости Г. Герца при моделировании процессов обмолота початков кукурузы необходимо знание коэффициента Пуассона и модуля Юнга внешней плодовой оболочки зерна.
2. Коэффициент Пуассона защитной плодовой оболочки зерна зубовидной кукурузы в среднем составляет 0,356.
3. Модуль Юнга внешней плодовой оболочки кремнистой кукурузы равен 98-125 МПа, зубовидной –

78-127, сахарной – 97-124, лопающейся – 127-169 МПа.

4. Полученные численные значения данных механико-технологических характеристик использованы при моделировании деформационных процессов, регламентирующих скоростные режимы обмолота. В результате установлено, что максимально допустимый скоростной режим обмолота обеспечивается скоростью контактного взаимодействия зерна и шипов МСУ не более 1,6 м/с. При этом равнодействующая сил динамического контактного взаимодействия не превысит максимально допустимого значения $F_p = 680$ Н.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Santolini E., Bovo M., Barbaresi A., Torreggiani D., Tassinari P. Turning Agricultural Wastes into Biomaterials: Assessing the Sustainability of Scenarios of Circular Valorization of Corn Cob in a Life-Cycle Perspective. MDPI. *Applied Sciences*. 2021 Vol. 11. 6281.
2. Voća N., Krička T., Janušić V., Matin A. Bioethanol production from corn kernel grown with different cropping intensities. *Proceedings of the VI. Alps-Adria Scientific Workshop*. 2007. Vol. 35(2). 1309-1312.
3. Шекихачев Ю.А Технические средства для обмолота початков кукурузы // *NovalInfo*. 2016. N45. С. 28-35.
4. Тронеv С.В., Ряднов А.И., Федорова О.А. Повышение производительности зерноуборочного комбайна // *Научное обозрение*. 2017. N21. С. 37-43.
5. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Черников Р.В. Пневматическая система дифференцированного обмолота кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N4. С. 42-47.
6. Пастухов, А.Г., Бахарев Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для первичного семеноводства кукурузы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1. С. 34-39.
7. Курасов В.С., Куцеев В.В., Самурганов Е.Е. Механизация работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ. 2013. 151 с.
8. Труфляк Е.В., Кравченко В.С., Гончарова И.А. Изучение механического повреждения початка кукурузы при его отрыве в кукурузоуборочной жатке // *Научный журнал КубГАУ*. 2008. N38(4). С. 1-11.

9. Петунина И.А. Обмолот початков кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ. 2006. 200 с.
10. Zukas J. A., Nicholas T., Hallock F. Swift H.F. Impact dynamics: Monograph. New York: John Wiley and sons. 1982. 296.
11. Лейбович М.В. Теория удара в задачах и примерах. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. 2016. 236 с.
12. Burubail W., Amulal E., Davies R.M., Etekpe G.W.W., Davoriye S.P. Determination of Poisson's ratio and elastic modulus of African nutmeg (*Monodora myristica*). *International Agrophysics*. 2008. Vol. 22(2). 99-102.
13. Dai F., Zhao W., Han Z., Zhang F. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel. *Proceedings of 3rd International Conference on Chemical Engineering and Advanced*. 2013. Vol. 781-784. 799-802.
14. Shelef L., Mohsenin N.N. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*. 1967. Vol. 44(4). 392-402.
15. Калашникова Н.В. Модуль упругости семян зерновых и зернобобовых культур // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, Вып. 12, 1975. С. 51-52.
16. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Dobrickiy A. Methodology and results of experimental determination of corn grain elasticity modulus. *Proceedings of 20th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»*. 2021. Vol. 20. 92-97.
17. Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Пастухов А.Г. Бионические основы конструирования молотильно-сепарирующих систем для початков кукурузы: Монография. п. Майский: Белгородский ГАУ. 2018. 168 с.
18. Бахарев Д.Н., Пастухов А.Г., Вольвак С.Ф., Бурнукин А.Е. Научные основы совершенствования технологии поточной обработки кукурузы в початках: Монография. п. Майский: Белгородский ГАУ. 2021. 188 с.
19. Рожковский М.Ф. До визначення механізму деформації і руйнування зернових матеріалів. *Вісник аграрної науки*. 2000. Вип. 7. С. 50-53.

REFERENCES

1. Santolini E., Bovo M., Barbaresi A., Torreggiani D., Tassinari P. Turning Agricultural Wastes into Biomaterials: Assessing the Sustainability of Scenarios of Circular Valorization of Corn Cob in a Life-Cycle Perspective. MDPI. *Applied Sciences*. 2021 Vol. 11. 6281 (In English).
2. Voća N., Krička T., Janušić V., Matin A. Bioethanol production from corn kernel grown with different cropping intensities. *Proceedings of the VI. Alps-Adria Scientific Workshop*. 2007. Vol. 35(2). 1309-1312 (In English).
3. Shekikhachev Yu. A. Tekhnicheskie sredstva dlya obmola pochatkov kukuruzy [Technical means for threshing corn cobs]. *NovaInfo*. 2016. N45. 28-35 (In Russian).
4. Tronev S.V., Ryadnov A.I., Fedorova O.A. Povyshenie proizvoditel'nosti zernouborochnogo kombayna [Increasing the performance of a combine harvester]. *Nauchnoe obozrenie*. 2017. N21. 37-43 (In Russian).
5. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Chernikov R.V. Pnevmaticheskaya sistema differentsirovannogo obmolota kukuruzy [Pneumatic system of variable-force corn threshing]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N4. 42-47 (In Russian).
6. Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Molotil'no-separiruyushchee ustroystvo dlya pervichnogo semenovodstva kukuruzy [Maize threshing and separating device for primary seed production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N1. 34-39 (In Russian).
7. Kurasov V.S., Kutseev V.V., Samurganov E.E. Mekhanizatsiya rabot v selektsii, sortoispytanii i pervichnom semenovodstve kukuruzy: Monografiya [Mechanization of work in breeding, variety testing and primary corn seed production: Monograph]. Krasnodar: KubGAU. 2013. 151 (In Russian).
8. Truflyak E.V., Kravchenko V.S., Goncharova I.A. Izucheniye mekhanicheskogo povrezhdeniya pochatka kukuruzy pri ego otryve v kukuruzouborochnoy zhatke [Study of mechanical damage of a corn-cob under its brake-off in a corn-harvester]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2008. N38(4). 1-11 (In Russian).
9. Petunina I.A. Obmolot pochatkov kukuruzy: Monografiya [Corn cobs threshing: Monograph]. Krasnodar: KubGAU. 2006. 200 (In Russian).
10. Zukas J.A., Nicholas T., Hallock F. Swift H.F. Impact dynamics: Monograph. New York: John Wiley and sons. 1982. 296 (In English).
11. Leybovich M.V. Teoriya udara v zadachakh i primerakh [Impact theory in problems and examples]. Khabarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet. 2016. 236 (In Russian).
12. Burubail W., Amulal E., Davies R.M., Etekpe G.W.W., Davoriye S.P. Determination of Poisson's ratio and elastic modulus of African nutmeg (*Monodora myristica*). *International Agrophysics*. 2008. Vol. 22(2). 99-102 (In English).
13. Dai F., Zhao W., Han Z., Zhang F. Experiment on Poisson's ratio determination about corn kernel. *Proceedings of 3rd International Conference on Chemical Engineering and Advanced*. 2013. Vol. 781-784. 799-802 (In English).
14. Shelef L., Mohsenin N.N. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*. 1967. Vol 44(4). 392-402 (In English).
15. Kalashnikova N.V. Modul' uprugosti semyan zernovykh i zernobobovykh kul'tur [Elasticity modulus of grain and leguminous crops seeds]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 1975. N12. 51-52 (In Russian).
16. Bakharev D., Pastukhov A., Volvak S., Dobrickiy A. Methodology and results of experimental determination of corn grain elasticity modulus. *Proceedings of 20th International Scientific Conference «Engineering for Rural Development»*. 2021. Vol. 20. 92-97 (In English).
17. Bakharev D.N., Vol'vak S.F., Pastukhov A.G. Bioniches-

kie osnovy konstruirovaniya molotil'no-separiruyushchikh sistem dlya pochatkov kukuruzy: Monografiya [Bionic basis for the design of threshing and separating systems for corn cobs: Monograph]. Mayskiy: Belgorodskiy GAU. 2018. 168 (In Russian).

18. Bahharev D.N., Pastuhov A.G., Vol'vak S.F., Burnukin A.E. Nauchnye osnovy sovershenstvovaniya tekhnologii potochnoy obrabotki kukuruzy v pochatkakh: Monografiya [Sci-

entific foundations of improving the flow processing technology of corn cobs: Monograph]. Mayskiy: Belgorodskiy GAU. 2021. 188 (In Russian).

19. Rozhkovskiy M.F. Do viznachennya mekhanizmu deformatsii i rujnuvannya zernovih materialiv [To determine the mechanism of deformation and destruction of grain materials]. *Visnik agrarnoi nauki*. 2000. N7. 50-53 (In Ukrainian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Пастухов А.Г. – научное руководство и формулирование основных направлений исследования, общая корректировка текста;
Бахареv Д.Н. – проведение экспериментов и обработка результатов исследования, формирование общих выводов;
Вольвак С.Ф. – литературный анализ и выбор опорных тематических моделей;
Добрицкий А.А. – изготовление экспериментальных установок, визуализация.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Pastukhov A.G. – scientific supervision and formulation of the research main directions, manuscript proofreading;
Bakharev D.N. – conducting experiments and processing research results, developing general conclusions;
Volvak S.F. – literature review and selection of the reference mathematical models;
Dobritsky A.A. – creating experimental installations, visualization.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

07.04.2022
03.06.2022