УДК 631.171

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДАРОПОГЛОЩАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТРАВМИРОВАНИЯ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН*

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00250**

© 2020 г. М.В. Суханова

При проектировании техники для производства сельскохозяйственных культур и получения высокого урожая необходимо свести к минимуму потери семян на всех этапах производства. Одним из способов сокращения потерь является снижение травмирования семян рабочими органами сельскохозяйственных машин. Предпосевная обработка семян – это неотъемлемый и важный процесс агротехнолологии подготовки семян к посеву. Исключение разрушения легко травмируемых семян зерновых, зернобобовых и других сельскохозяйственных культур при предпосевной обработке позволит сократить потери урожая, ускорить введение системы органического земледелия в Ростовской области и других регионах России, повысить качество посевного материала, уменьшить расход семян и препаратов-протравителей, полноценно и без потерь использовать биопрепараты при обработке семян. Исследование посвящено теоретическому обоснованию условий «ударопоглощения» – явления, исключающего разрушение семян и снижающего риск их травмирования при соударении с поверхностями рабочих органов сельскохозяйственных машин, в частности машин для предпосевной обработки семян. Анализ зависимости для определения потенциальной энергии деформации рабочей поверхности, полученной при теоретическом исследовании ударного взаимодействия семян и рабочей поверхности, показывает, что снижение коэффициента восстановления при ударе позволит увеличить потенциальную энергию деформации, что приведет к снижению риска повреждения семян. Экспериментальные исследования показали, что количество потенциальной энергии при падении на высокоэластичную поверхность увеличится в 2,5 раза по сравнению с ударом семян о стальную поверхность и позволит интенсифицировать процесс покрытия семян препаратом-протравителем. Результаты выполненного исследования позволят интенсифицировать процесс обработки семенного материала перед посевом и разрабатывать машины, исключающие дробление семян рабочими органами.

Ключевые слова: предпосевная обработка, сельскохозяйственные машины, механизация сельского хозяйства, протравливание, протравливатель, инокуляция, ударное воздействие, напряженно-деформированное состояние, травмирование и разрушение семян, всхожесть, потенциальная энергия деформации, биологизация, однородная смесь.

JUSTIFICATION OF APPLICATION OF SHOCK-ABSORBING WORKING ELEMENTS FOR REDUCTION OF INJURY AND INTENSIFICATION OF PRE-SEEDING TREATMENT OF SEEDS*

***This research was conducted with the financial support of the RFBR grant, Project No 19-01-00250**

© 2020 M.V. Sukhanova

When designing machinery for the production of agricultural crops and the production of high yields, it is necessary to minimize the loss of seeds at all stages of production. One of the ways to reduce losses is to reduce injury to seeds by working elements of agricultural machines. Pre-sowing seed treatment is an integral and important process of agrotechnological preparation of seeds for sowing. The elimination of the destruction for easily injured seeds of cereals, legumes and other agricultural crops during pre-sowing treatment will allow to reduce crop losses, accelerate the introduction of an organic farming system in the Rostov region and other regions of Russia, improve the quality of seed, reduce the consumption of seeds and dressing pre-parations, fully and without losses use biological products when processing seeds. The study is devoted to the theoretical substantiation of the conditions of «shock absorption» – a phenomenon that excludes the destruction of seeds and reduces the risk of injury when they collide with the surfaces of the working bodies of agricultural machines, in particular machines for pre-sowing seed treatment. The analysis of the dependence to determine the potential energy for deformation of the working surface, obtained in the theoretical study of the impact interaction of seeds and the working surface, shows that a decrease in the recovery coefficient upon impact will increase the potential energy of deformation, which will lead to a decrease in the risk of damage to seeds. Experimental studies have shown that the amount of potential energy when falling on a highly elastic surface will increase by 2,5 times compared to the impact of seeds on the steel surface and will intensify the process of coating seeds with a dressing preparation. The results of the performed study will allow intensifying the process of processing seed material before sowing and developing machines that prevent crushing of seeds by working bodies.

Keywords: pre-sowing treatment, agricultural machinery, agricultural mechanization, dressing, dressing agent, inoculation, shock impact, stress-strain state, injury and destruction of seeds, germination, potential energy of deformation, biologization, homogeneous mixture.

Введение. Многолетние исследования совершенствования сельскохозяйственной техники по производству семян, показывают, ученых, занимающихся вопросами

что повреждение семян рабочими органами машин значительно снижает качество семенного материала, что приводит, в конечном итоге, к большим потерям урожая [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В процессе работы по определению степени повреждения семенного материала рабочими органами машин для обработки семян перед посевом было установлено, что с целью снижения травмирования семян необходимо использовать материалы с высокоэластичными свойствами [7, 8]. К таким материалам относят полиуретановые эластомеры [8, 9, 10, 11]. Рассмотрим условия, исключающие разрушение и уменьшающие повреждение семян рабочими органами сельскохозяйственных машин при ударном взаимодействии и позволяющие интенсифицировать процесс предпосевной обработки препаратами-протравителями.

В научной литературе существует много определений механического удара. Наиболее точно ударное взаимодействие между семенами и рабочими органами сельскохозяйственной техники можно описать, используя определение, предложенное Е.В. Александровым и В.Б. Соколинским в монографии «Прикладная теория и расчеты ударных систем» [12]: «Механическим ударом называют явление, возникающее при столкновении тел, сопровождающееся полным или частичным переходом кинетической энергии тел в энергию их деформации».

Методика исследования. Если при ударном взаимодействии деформация рабочей поверхности будет незначительна, то кинетическая энергия падающих семян, достигнув максимального значения при столкновении с поверхностью, практически полностью перейдет в энергию деформации семян, являясь причиной их травмирования и разрушения. Чем больше скорость и высота падения – тем значительнее разрушающие последствия для семян при ударе о жесткую рабочую поверхность [7]. Следовательно, для того чтобы минимизировать травмирование семян и исключить их разрушение, рабочая поверхность должна обладать эластичными свойствами. Эластичность – это способность материала растягиваться под действием внешней нагрузки на значительную величину в пределах упругих деформаций [13]. Растяжение рабочей поверхности приведет к поглощению кинетической энергии удара, предотвращая тем самым повреждение и разрушение семян. Поглощенным ударом будем называть такое явление после соударения семян с рабочей поверхностью, при котором происходит переход кинетической энергии движущегося семенного материала в потенциальную энергию деформации рабочей поверхности. При поглощенном ударе исключается полное разрушение и минимизируется травмирование семян.

На рисунке 1 приведена схема состояния рабочей поверхности из различных материалов при ударном взаимодействии с семенами.

При ударе семян о жесткую стальную поверхность происходит резкий скачок ударной силы за очень короткое время ударного взаимодействия (кривая 1 на рисунке 1).

При ударе о стальную поверхность, покрытую полимером, несмотря на то, что ударная сила уменьшается за счет некоторого увеличения длительности ударного взаимодействия (рисунок 1, кривая 2), но вследствие того, что рабочая поверхность остается малодеформируемой, сила удара все еще достаточно велика [8].

При ударе о полиуретановую поверхность происходит растяжение волокон эластомера и опускание поверхности под гравитационной силой веса семян (кривая 3 на рисунке 1). Достигнув определенного значения, зависящего от веса семян и упругих свойств эластомера, растяжение волокон прекратится, и поверхность начнет сокращаться и отталкивать частицы.

Состояние «поглощенного удара» отличается от первого состояния взаимодействия семян с жесткой поверхностью тем, что длительность взаимодействия семян и поверхности намного превышает длительность контакта при ударе о жесткую поверхность. Отличие второго состояния от «поглощенного удара» в том, что при ударе о жесткую стальную поверхность с полимерным покрытием происходит сжатие покрытия, смягчающее, демпфирующее удар. Но величина этого сжатия не превышает толщины слоя полимерного покрытия и поэтому накопления потенциальной энергии деформации рабочей поверхности недостаточно для того, чтобы переданной энергии хватило для интенсификации процесса

смешивания семян с препаратами-протравителями.

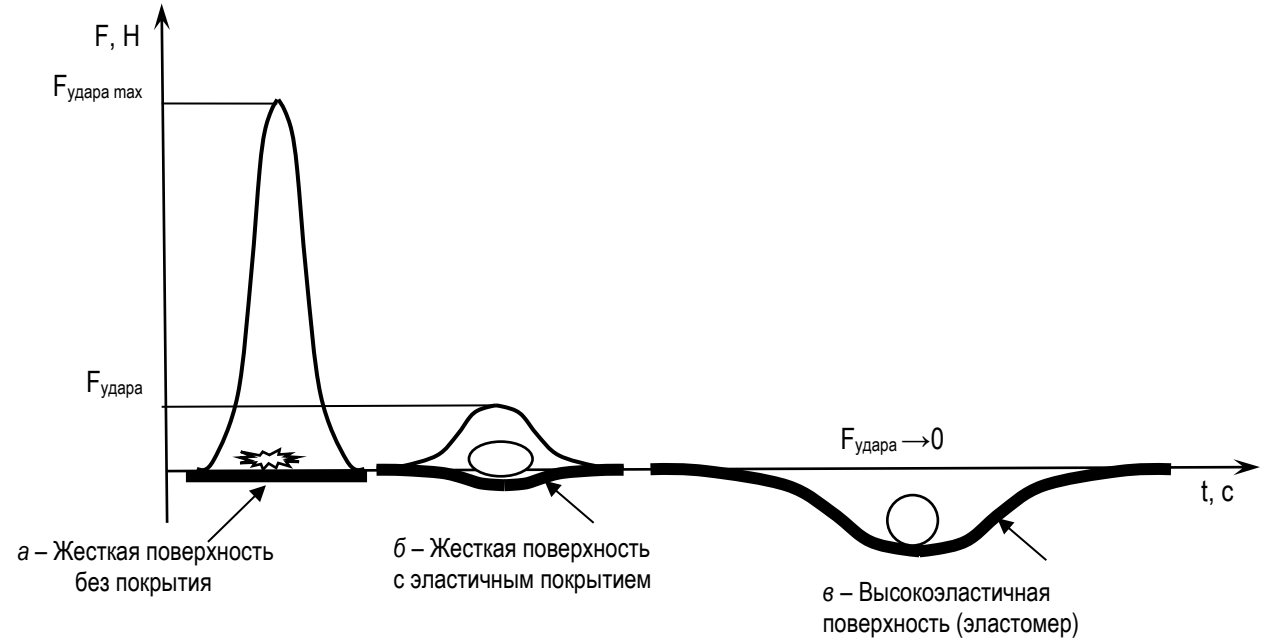


Рисунок 1 – Графическое представление напряженного состояния частицы сыпучего тела и деформированного состояния поверхности различной жесткости при ударном взаимодействии

Если полиуретановую рабочую поверхность привести в колебательное движение внешним воздействием различных колебательных механизмов (кулачковых, гидравлических, кривошипно-шатунных и т.д.), то семена, падая и отскакивая от поверхности, будут находиться во взвешенном свободном псевдоожиженном состоянии, что позволит каплям или частицам препарата-протравителя быстрее перемешаться и покрыть семена. Таким образом, использование ударопоглощающих рабочих органов позволит не только снизить травмирование и исключить разрушение семян, но и интенсифицировать процесс предпосевной обработки.

Определим потенциальную энергию деформации, накапливаемой рабочей поверхностью при ударе семенного материала.

Кинетическая энергия семени, падающего на рабочую поверхность с некоторой скоростью v_c, преобразуется при ударе в потенциальную энергию деформации семени и рабочей поверхности и кинетическую энергию семени после удара:

$$U = T_n - T_{уд}, \quad (1)$$

где U – потенциальная энергия деформации, Дж;

T_n – кинетическая энергия семени до удара, Дж;

$T_{уд}$ – кинетическая энергия семени после удара, Дж.

Потенциальная энергия деформации семени будет равна:

$$U_c = \frac{P_{уд}\Delta l_c}{2} \cdot \quad (2)$$

Потенциальная энергия деформации рабочей поверхности

$$U_{р.п.} = \frac{P_{уд}\Delta l_{р.п.}}{2}, \quad (3)$$

где U_c, $U_{р.п.}$ – потенциальная энергия деформации семени и рабочей поверхности, соответственно, Дж;

$P_{уд}$ – сила удара при столкновении семени и поверхности, Н;

ΔL_c, $\Delta L_{р.п.}$ – абсолютная деформация семени и рабочей поверхности, соответственно, мм.

Согласно положениям механики деформируемого тела абсолютные значения деформации семени ΔL_c и деформации рабочей поверхности $\Delta L_{р.п.}$ зависят от своих размеров и коэффициентов жесткости:

$$\Delta l_{с} = \frac{P_{уд}\cdot с}{E_c \cdot F_c}, \qquad \Delta l_{р.п.} = \frac{P_{уд}\cdot \Delta l_{р.п.}}{E_{р.п.}\cdot F_{р.п.}}, \quad (4)$$

где $с$ – толщина семени, мм;

E_c, – модуль упругости семян, МПа;

$E_{р.п.}$ – модуль упругости, МПа;

$F_ч$ – площадь поверхности семени, мм^2;

F_c – площадь рабочей поверхности, мм^2;

$Δ_{р.п.}$ – толщина рабочей поверхности, мм.

Подставив уравнения (4) в формулы (2) и (3), получим:

$$U_c = \frac{P_{уд}^2 \cdot с}{2E_c \cdot F_c}, \qquad U_{р.п.} = \frac{P_{уд}^2 \cdot \Delta l_{р.п.}}{2E_{р.п.} \cdot F_{р.п.}}. \quad (5)$$

Кинетическая энергия семени в момент удара

$$T_c = \frac{m_c \cdot v_{уд}^2}{2}, \qquad (6)$$

где m_c – масса семени, г;

v_y – скорость семени в момент столкновения с поверхностью, м/с.

Исследования ученых [11, 14] показывают, что часть кинетической энергии при ударе тратится на деформацию семян и рабочей поверхности.

Учитывая, что скорость после соударения (отскока) связана со скоростью удара v_y соотношением

$$v_{от} = v_y k_в, \qquad (7)$$

где $k_в$ – коэффициент восстановления,

оставшаяся часть кинетической энергии семени после отскока от рабочей поверхности определится по формуле

$$T_{от} = \frac{m_с \cdot V_у^2 \cdot k_в^2}{2}. \qquad (8)$$

Результаты исследований и их обсуждение. После подстановки выражения (8) в уравнение энергетического баланса (1) и соответствующих преобразований, получим зависимость для потенциальной энергии деформации семени и рабочей поверхности при их ударном взаимодействии:

$$U = \frac{m \cdot V_у^2}{2}(1 - k_в^2). \qquad (9)$$

Учитывая, что $U_{р.п.} = U - U_ч$, объединяя формулы (5) и (9), приравняем их правые части и получим зависимость для потенциальной энергии, накопленной рабочей поверхностью при ударе:

$$U_{р.п.} = m_с \cdot V_у^2(1 - k_в^2) - \frac{P_{уд}^2 \cdot \Delta_ч}{E_c \cdot F_c}. \qquad (10)$$

Пользуясь теоремой об изменении количества движения, имеем:

$$m_c \cdot V_у = P_{уд} \cdot \Delta t, \qquad (11)$$

где Δt – время ударного взаимодействия семени и рабочей поверхности.

В этом случае сила удара

$$P_{уд} = \frac{m_c \cdot V_у}{\Delta t}. \qquad (12)$$

Подставив формулу (12) в формулу (10), получим выражение, определяющее потенциальную энергию деформации, накопленную рабочей поверхностью при ударном взаимодействии:

$$U_{р.п.} = m_c \cdot V_у^2 \left((1 - k_в^2) - \frac{m_c \cdot \Delta_с}{(\Delta t)^2 \cdot E_с \cdot F_с} \right). \quad (13)$$

Анализируя полученную формулу, можно отметить, что потенциальная энергия, накопленная рабочей поверхностью при падении на нее семян одного и того же сорта с одинаковыми физико-механическими свойствами, увеличивается при уменьшении коэффициента восстановления. Коэффициент восстановления зависит от эластичности поверхности. Чем большей эластичностью будет обладать материал рабочей поверхности, тем меньше будет высота отскакивания семян после соударения, тем меньше коэффициент восстановления.

Гипотеза «поглощенного удара» нашла подтверждение при проведении экспериментальных исследований. На рисунке 2 приведены экспериментальные зависимости, показывающие, как изменяется высота отражения семян гороха от высоты падения на поверхности различной жесткости.

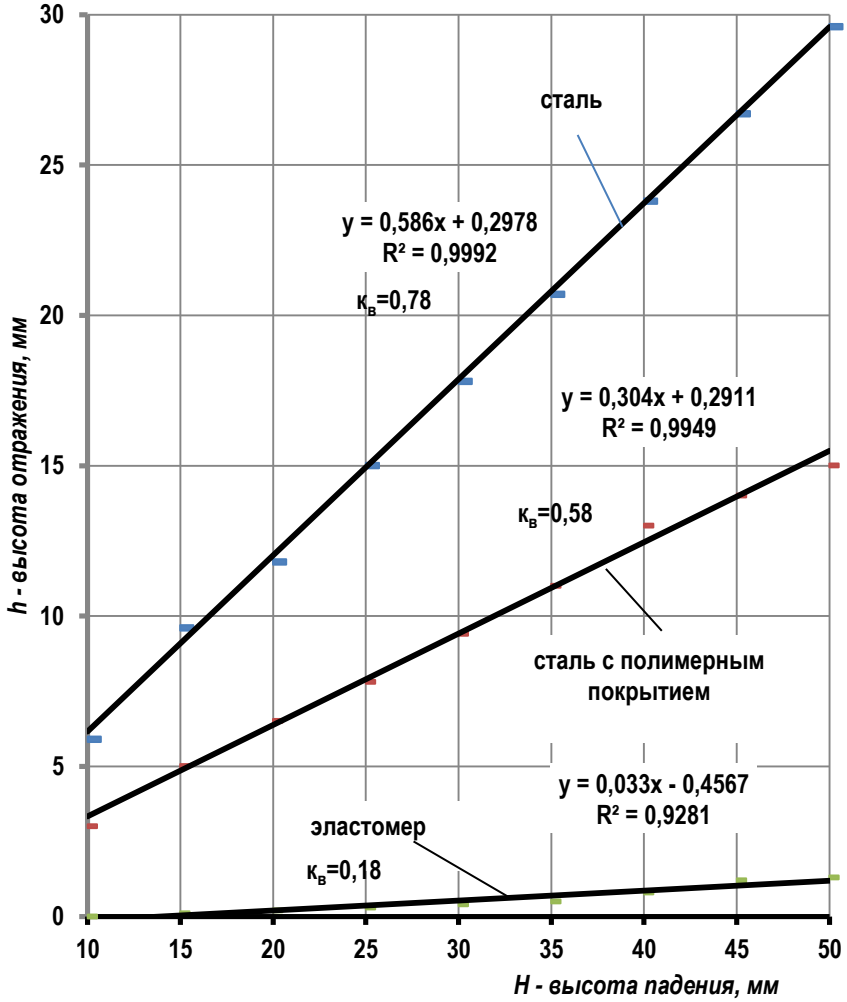


Рисунок 2 – Взаимодействие семян гороха с рабочими поверхностями машин

По результатам экспериментов были определены коэффициенты восстановления. Несложные вычисления по формуле 13 показывают, что количество потенциальной энергии при падении на высокоэластичную поверхность увеличится в 2,5 раза по сравнению с ударом семян о стальную поверхность. Экспериментально подтверждается гипотеза о том, что при падении семян на высокоэластичную поверхность происходит «поглощение удара» и накопление потенциальной энергии деформации этой поверхности. Замена стальных элементов, взаимодействующих с семенами, высокоэластиными элементами позволит более чем в 4,3 раза снизить коэффициент восстановления, что не только уменьшит вероятность повреждения семян, но и увеличит количество энергии, переданной семенам при сокращении волокон эластомера для интенсификации процесса обработки защитно-стимулирующими препаратами без разрушения семян.

Выводы. Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В целях снижения степени повреждения семян при соударении с поверхностью рабочих органов машин для предпосевной обработки и другой сельскохозяйственной техники необходимо создать условие «ударопоглощения», при котором большая часть кинетической энергии удара переходит в потенциальную энергию деформации рабочей поверхности.

2. Основным фактором, определяющим величину потенциальной энергии деформации, является коэффициент восстановления, зависящий от скорости и высоты падения семян, а также от физико-механических свойств поверхности. Потенциальная энергия деформации поверхности возрастает при уменьшении коэффициента восстановления.

3. Использование полиуретановых эластомеров в качестве материалов для изготовления рабочих органов машин для предпосевной обработки семян позволит

«поглотить» ударное воздействие рабочих органов на семена и значительно снизить их повреждения. При падении на высокоэластичную поверхность количество потенциальной энергии увеличится в 2,5 раза по сравнению с ударом семян о стальную поверхность, что позволит не только снизить ударное воздействие, но и интенсифицировать процесс обработки семян препаратами-протравителями.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта РФФИ № 19-01-00250.

Acknowledgements: This study was conducted with the financial support of the RFBR grant, projects No 19-01-00250.

Литература

1. Фейденгольд, В.Б. Причины травмирования зерна и меры по их устранению / В.Б. Фейденгольд, С.Л. Белецкий // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. – 2016. – № 6. – С. 204–217.

2. Тарасенко, А.П. Совершенствование средств механизации для получения качественного зерна / А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, М.Э. Мерчалова // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2012. – № 3 (34). – С. 109–115.

3. Шатохин, И.В. Оценка дробления зерна различных культур нориями / И.В. Шатохин, А.Г. Парфенов // Лесотехнический журнал. – 2015. – № 1 (17). – С. 244–249.

4. Несмиян, А.Ю. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур / А.Ю. Несмиян, Ю.С. Ценч // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 3. – С. 45–52.

5. Бедыч, Т.В. Возникновение напряжений в зерновке при её взаимодействии с рабочими органами машин / Т.В. Бедыч // Международный сельскохозяйственный журнал. – М., 2008. – № 2. – С. 61.

6. Курманов, А.К. Определение параметров процесса разрушения зерна / А.К. Курманов, А.А. Камышева // Вестник ВНИИМЖ. – 2017. – № 3 (27). – С. 185–188.

7. Суханова, М.В. Экспериментальное определение силы ударного воздействия поверхности различной жесткости на семена / М.В. Суханова, А.А. Прохода,
А.Н. Иванов // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 3 (47). – С. 17–21.

8. Суханова, М.В. Преимущества использования устройств с высокоэластичными рабочими органами в сельскохозяйственных машинах и механизмах / М.В. Суханова, А.В. Бондарев, С.А. Войнаш // Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК: сборник статей II Российской (Национальной) научно-практической конференции. – Барнаул, 2019. – С. 102–104.

9. Мазурин, В.Л. Полиуретан как конструкционный материал XXI века // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2 (171). – С. 165–170.

10. Zhang, H. Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers / H. Zhang // Journal of Elastomers and Plastics. – 2008. – Vol. 40. – P. 161–177.

11. Rek, V. Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers / V. Rek // Journal of Elastomers and Plastics. – 2006. – Vol. 38. – P. 105–118.

12. Александров, Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.Б. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969. – 201 с.

13. Бартенев, Г.М. Релаксационные свойства эластомеров / Г.М. Бартенев, А.Г. Бартенева. – М.: Химия, 1992. – 384 с.

14. Иванов, А.П. Динамика систем с механическими соударениями / А.П. Иванов. – М.: Международная программа образования, 2017. – 336 с.

References

1. Feydengol'd V.B., Beletskiy S.L. Prichiny travmirovaniya zerna i mery po ih ustraneniyu [Causes of grain injury and measures to eliminate it], *Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya material'nykh tscennostey dlya gosudarstvennykh nuzhd*, 2016, No 6, pp. 204–217. (In Russian)

2. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Merchalova M.E. Sovershenstvovanie sredstv mekhanizatsii dlya polucheniya kachestvennogo zerna [Improvement of mechanization means for obtaining high-quality grain], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta,* 2012, No 3 (34), pp. 109–115. (In Russian)

3. Shatohin I.V., Parfenov A.G. Otsenka drobleniya zerna razlichnykh kul'tur noriyami [Evaluation of grain crushing of various crops by noria], *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2015, No 1 (17), pp. 244–249. (In Russian)

4. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendentsii i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhniki dlya poseva zernovykh kul'tur [Trends and prospects for the development of domestic equipment for sowing grain crops], *Sel'skohozyaystvennye mashiny i tekhnologii*, 2018, No 3, pp. 45–52. (In Russian)

5. Bedych T.V. Vozniknovenie napryazheniy v zernovke pri ee vzaimodeystvii s rabochimi organami mashin [The emergence of intension in the grain when it interacts with the working bodies of the machines], *Mezhdunarodnyy sel'skohozyaystvennyy zhurnal*, M., 2008, No 2, p. 61.
(In Russian)

6. Kurmanov A.K., Kamysheva A.A. Opredelenie parametrov protsessa razrusheniya zerna [Determination of the parameters of the grain destruction process], *Vestnik VNIIMZH*, 2017, No 3 (27), pp. 185–188. (In Russian)

7. Sukhanova M.V., Prokhoda A.A., Ivanov A.N. Eksperimental'noe opredelenie sily udarnogo vozdejstviya poverhnosti razlichnoj zhestkosti na semena [Experimental determination of the impact force of a surface of different hardness on seeds], *Vestnik agrarnoj nauki Dona*, 2019, No 3 (47), pp. 17–21.
(In Russian)

8. Sukhanova M.V., Bondarev A.V., Voynash S.A. Preimushchestva ispol'zovaniya ustroystv s vysokoelastichnymi rabochimi organami v sel'skohozyaystvennyh mashinah i mekhanizmah [Advantages of using devices with highly

elastic working bodies in agricultural machines and mechanisms], Perspektivy vnedreniya innovacionnyh tekhnologiy v APK: sbornik statey II Rossiyskoy (Nacional'noy) nauchno-prakti-cheskoy konferentsii, Barnaul, 2019, pp. 102–104. (In Russian)

9. Mazurin V.L. Poliuretan kak konstrukcionnyy material XXI veka [Polyurethane as a structural material of the XXI century], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, No 2 (171), pp. 165–170. (In Russian)

10. Zhang H. Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2008, Vol. 40, pp. 161–177.

11. Rek V. Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*, 2006, Vol. 38, p. 105–118.

12. Aleksandrov E.B., Sokolinskiy V.B. Prikladnaya teoriya i raschety udarnyh system [Applied theory and calculations of impact systems], M.: Nauka, 1969, 201 p. (In Russian)

13. Bartenev G.M. Barteneva A.G. Relaksatsionnye svoystva elastomerov [Relaxation properties of elastomers], M.: Khimiya, 1992, 384 p. (In Russian)

14. Ivanov A.P. Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami [Dynamics of systems with mechanical collisions], M., Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya, 2017, 336 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Суханова Майя Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и физика», Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зерограде (Ростовская область, Российская Федерация).

Information about the author

Sukhanova Maya Victorovna – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Technical mechanics and physics, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE «Don State Agrarian University» in Zernograd (Rostov region, Russian Federation).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.