УДК 632.08:531.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ НА СЕМЕНА*

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-01-00250\1**

© 2019 г. М.В. Суханова, А.А. Прохода, А.Н. Иванов

Семенной материал сельскохозяйственных культур в процессе производства перед посевом подвергается механическому воздействию со стороны рабочих органов сельскохозяйственных технических средств. Большинство рабочих органов сельскохозяйственных машин изготовляют из прочных жестких материалов. Вследствие этого между сыпучим телом, сформированным семенами в рабочем объеме машины, и поверхностью рабочих органов возникают ударные взаимодействия, травмирующие и разрушающие семена, приводя к значительному снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Использование эластомеров в качестве материалов рабочих органов сельскохозяйственных машин позволит значительно уменьшить силу ударного взаимодействия с семенным материалом, снизить травмирование и исключить разрушение семян. Цель работы заключалась в экспериментальной проверке научной гипотезы о том, что замена жестких рабочих поверхностей высокоэластичными рабочими поверхностями, обладающими способностью значительно деформироваться в пределах выполнимости закона Гука, приведет к снижению ударной силы, что позволит уменьшить или полностью исключить травмирование и разрушение семян. Уменьшение высоты отскока частицы после соударения приводит к уменьшению коэффициента восстановления, скорости и ускорения частицы и силы удара. Следовательно, чем меньше коэффициент восстановления, тем меньше сила удара на семена. Исследования проводились на авторской экспериментальной установке. Испытаниям подвергались семена гороха в качестве сыпучего тела и три пластины – металлическая пластина из стали марки 3 без покрытия, металлическая пластина из стали марки 3 с полиуретановым покрытием и высокоэластичная полимерная пластина из эластомера. Результаты экспериментальных исследований ударного воздействия поверхности различной жесткости на семена показали, что использование эластомеров в качестве рабочих органов сельскохозяйственных машин в сто раз и более снижает силу удара на семена по сравнению с использованием стальной поверхности.

Ключевые слова: семена, ударное взаимодействие, коэффициент восстановления, травмирование семян, сельскохозяйственные машины.

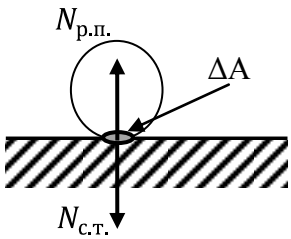
Seed material of crops in the course of production before crops is exposed to mechanical influence from working bodies of agricultural machinery. The most of equipment details of farm vehicles produce from strong, rigid materials. Thereof between the loose body created by seeds in the operating volume and a surface of working bodies there are shock interactions injuring and destroying seeds, leading to considerable decrease in productivity of crops. Use of highly elastic materials of working bodies of farm vehicles will allow reduce considerably force of shock interaction with seed material, to reduce traumatizing and to exclude destruction of seeds. Testing of a scientific hypothesis that reduction of coefficient of restoration leads to decrease in force of blow on seeds since the less height of a rebound of a particle after impact, the speed and acceleration of a particle and force of blow are less are carried out. Testing the scientific hypothesis that replacing rigid working surfaces with highly elastic working surfaces that have the ability to deform significantly within the feasibility of Guk 's law would reduce impact force, reducing or completely eliminating injury and seed destruction is the aim of this work. Reduction of the particle bounce height after impact results in reduction of the recovery coefficient, speed and acceleration of the particle and the impact force. Therefore, the smaller the recovery ratio, the smaller the impact force on the seeds. The research was carried out on the author's experimental device. Pea seeds were tested as loose body and three plates – metal plate made of steel grade 3 without coating, metal plate made of steel grade 3 with polyurethane coating and highly elastic polymer plate made of the elastomer. Results of pilot studies of shock impact of various rigidity surfaces on seeds showed that use of highly elastic material as working bodies of farm vehicles a hundred times and more reduces blow force on seeds.

Keywords: seeds, shock interaction, restoration coefficient, traumatizing seeds, farm vehicles.

Введение. Семена различных сельскохозяйственных культур в процессе производства перед посевом подвергаются механическому воздействию рабочих органов машин [1, 2, 3, 4, 5]. Большинство рабочих органов сельскохозяйственных машин изготовляют из прочных, жестких материалов, как правило, из стали. Вследствие этого между сыпучим телом, сформированным семенами в рабочем объеме машины, и поверхностью рабочих органов возникают ударные взаимодействия, травмирующие и разрушающие семена, тем самым снижая урожайность сельскохозяйственных культур.

В научных исследованиях используют различные определения удара. Наиболее содержательная формулировка дана в монографии Е.В. Александрова и В.Б. Соколинского [6]: «Механическим ударом называется явление, возникающее при столкновении тел, сопровождающееся полным или частичным переходом кинетической энергии тел в энергию их деформации». При ударе силы взаимодействия между телами настолько велики, что всеми другими постоянно действующими силами можно пренебречь.

На схеме, представленной на рисунке 1:



$N_{р.п.}$ – сила, действующая со стороны рабочей поверхности на частицу сыпучего тела;
$N_{с.т.}$ – сила, действующая со стороны частицы сыпучего тела на рабочую поверхность;
ΔA – площадь контакта между частицей и поверхностью

Рисунок 1 – Силы ударного взаимодействия, возникающие на площадке контакта частицы сыпучего тела с рабочей поверхностью

Так как эти силы одинаковы по величине, то можно записать:

$$N_{p.n.} = N_{c.m.} = N, \quad (1)$$

где N – ударная сила – сила ударного взаимодействия, направленная перпендикулярно к касательной, проведенной к контуру тел в точке контакта.

Вследствие того, что силы ударного взаимодействия гораздо больше всех остальных сил, действующих на тело, систему взаимодействующих при ударе тел можно условно считать замкнутой и применять к ней закон сохранения импульса [6, 7].

В Азово-Черноморском инженерном институте проводятся исследования травмирования семян рабочими органами сельскохозяйственных машин [8] и разрабатывается новая сельскохозяйственная техника для предпосевной обработки семян с эластичными рабочими органами, внедрение которой позволит снизить вероятность травмирования семян [9, 10, 11, 12].

Методика исследования. Цель работы заключалась в экспериментальной проверке научной гипотезы о том, что замена жестких рабочих поверхностей высокоэластичными рабочими поверхностями, обладающими способностью значительно деформироваться в пределах упругих деформаций, приведет к снижению ударной силы, что позволит уменьшить или полностью исключить травмирование и разрушение семян.

Пусть частица сыпучего тела – семя – падает с некоторой высоты на поверхность рабочего органа сельскохозяйственной машины (в дальнейшем будем называть ее «Рабочая поверхность»). Для оценки влияния жесткости рабочей поверхности на семена при соударении, используя закон сохранения количества движения применительно к частице, получим:

$$\frac{dmv}{dt} = N, \quad (2)$$

где m – масса частицы сыпучего тела (масса семени);
v – скорость частицы;
N – ударная сила.

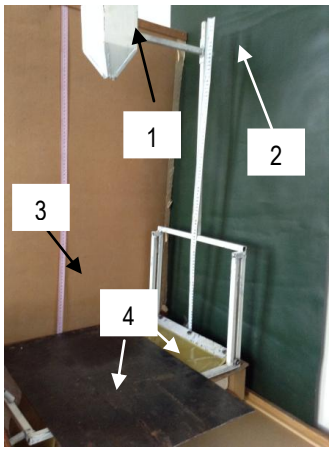
В интегральной форме получим:

$$m \cdot u - m \cdot v = N \cdot \Delta t, \quad (2')$$

где u – скорость частицы сыпучего тела после удара;
v – скорость частицы сыпучего тела до удара;
N – ударная сила;
Δt – время удара.

Сравним процесс соударения частицы сыпучего тела (семени) при взаимодействии со стальной пластиной, стальной пластиной с полимерным покрытием и гибкой пластиной, изготовленной из эластомера.

Эластомеры – это полимерные материалы, обладающие высокоэластичными свойствами, т.е. способные многократно удлиняться при растяжении. Удлинения эластомера в десятки раз превышают удлинения стали в пределах упругих деформаций, а при снятии нагрузки эластомер, как и любой другой упругий материал, возвращается к первоначальным размерам.



1 – бункер; 2 – стойка; 3 – измерительная шкала; 4 – пластины
Рисунок 2 – Экспериментальная установка для исследования воздействия поверхности различной жесткости на семена

Была выдвинута гипотеза, что уменьшение коэффициента восстановления приводит к снижению силы удара на семена. Очевидно, что чем меньше высота отскока частицы после соударения, тем меньше скорость и ускорение частицы и сила удара. Следовательно, чем меньше коэффициент восстановления, тем меньше сила удара на семена, т.к., согласно основному закону механики, ускорение, развиваемое телом, прямо пропорционально силе, действующей на тело.

Для проверки научной гипотезы нами были проведены экспериментальные исследования воздействия поверхности различной жесткости на семена.

Исследования проводились на авторской экспериментальной установке, представленной на рисунке 2.

Винтовое соединение горизонтальной опоры, на которой крепится бункер с вертикальной стойкой, позволяет изменять высоту расположения бункера. Поверхность рабочих органов имитируют пластины 4 из различных материалов, закрепляемые на раме лабораторной установки. Семена засыпались в бункер. После открытия заслонки семена высыпались на рабочую поверхность под действием силы тяжести. Масса сыпучего тела варьировалась. Использовались навески в 10, 30 и 50 граммов. Для измерения использовались весы Невские. Опыты проводились в пятикратной повторности. Для определения наблюдения и последующей обработки результатов экспериментов проводилась видеосъемка с помощью видеокамеры GoPro 4 Silver и камеры I-Pad с последующим кадрированием видеофайла. Высота падения варьировалась от 50 до 800 мм.

Испытаниям подвергались семена гороха в качестве сыпучего тела и три пластины – металлическая пластина из стали марки 3 без покрытия, металлическая пластина из стали марки 3 с полиуретановым покрытием и высокоэластичная полимерная пластина из эластомера марки Адипрен твердостью по Шору 45.

На рисунке 3 в качестве примера показано, как производилось определение коэффициента восстановления при соударении сыпучего тела с жесткой металлической поверхностью с полимерным покрытием.

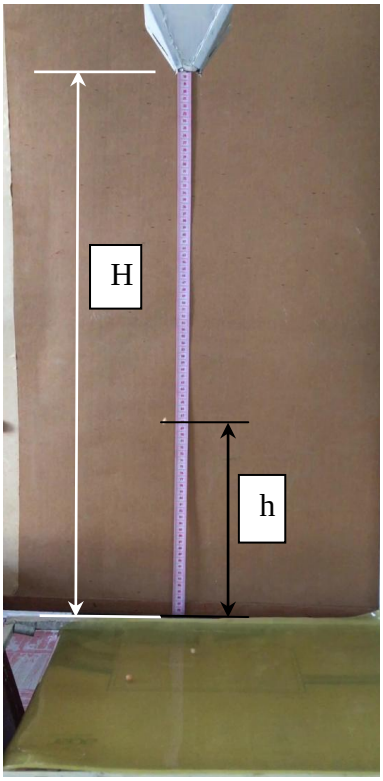


Рисунок 3 – Соударение семян со стальной поверхностью с полимерным покрытием

Опыты проводились в 15-кратной повторности с интервалом в 50 мм (от 50 до 800 мм). По 15 семян гороха сбрасывались с высоты от 50 до 800 мм на стальную, затем на стальную поверхность с полимерным покрытием, и на пластину, изготовленную из эластомера с жесткостью по Шору 45.

Известно, что коэффициент восстановления определяется по формуле [1].

$$k = \sqrt{\frac{h}{H}}. \quad (3)$$

В результате проведения опытов были определены средние значения коэффициентов восстановления при падении частицы сыпучего тела на поверхности различной жесткости.

Результаты исследований и их обсуждение. После обработки результатов опытов в программном комплексе Excel получены следующие средние значения коэффициентов восстановления:

$k_1 = 0{,}77$ – соударение с жесткой стальной поверхностью;

$k_2 = 0{,}56$ – соударение со стальной поверхностью с полиуретановым покрытием;

$k_3 = 0{,}07$ – соударение с высокоэластичной поверхностью.

Так как высота падения семян на три вида поверхностей принималась одинаковой, то и скорость падения с одинаковой высоты на три вида поверхностей была одинаковой, т.е. $m \cdot v = const$. Пользуясь формулой $m \cdot u - m \cdot v = N \cdot \Delta t$, получим $m \cdot u_1 > m \cdot u_2 > m \cdot u_3$. Следовательно, $u_1 > u_2 > u_3$.

Высота отскока – это расстояние, проходимое частицей после соударения, зависящее от скорости движения частицы после соударения. Чем быстрее и выше отскакивает частица от рабочей поверхности после соударения, тем больше ее ускорение, следовательно, больше сила удара:

$$F_1 > F_2 > F_3,$$

где F_1 – сила удара при взаимодействии частицы сыпучего тела с жесткой поверхностью без покрытия;

F_2 – сила удара при взаимодействии частицы сыпучего тела с жесткой поверхностью, покрытой полимером;

F_3 – сила удара при взаимодействии частицы сыпучего тела с высокоэластичной поверхностью.

Принимая массу семени m=0,25 г (горох), определив время отскока при каждом значении высоты падения, пользуясь программой конвертации кадров съемки экспериментов «Free Video to JPG Converter», определили среднюю скорость и среднее ускорение семени после удара о поверхность и вычислили среднее значение силы ударного взаимодействия семени гороха с рабочей поверхностью при падении с высоты 800 мм и 50 мм, соответственно.

Значения скорости отскока семян и силы удара о поверхности различной жесткости

Рабочая поверхность	Средняя скорость отскока частицы $V, \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ при падении с высоты 800 мм/50 мм	Средняя сила удара с высоты падения 800 мм/50 мм $F \cdot 10^{-5}, H$
Сталь	3,000/0,420	470,00/153,00
Сталь с покрытием	1,550/0,200	242,00/72,00
Эластомер	0,025/0,030	3,90/1,12

По результатам экспериментальных исследований установлено, что наименьшая сила ударного взаимодействия возникает при соударении частиц сыпучего тела с рабочей поверхностью из высокоэластичного материала (таблица).

Выводы. Экспериментальные исследования подтвердили научную гипотезу о том, что замена жестких рабочих поверхностей высокоэластичными рабочими поверхностями, обладающими способностью значительно деформироваться в пределах выполнимости закона Гука, приводит к уменьшению коэффициента восстановления и силы ударного взаимодействия.

Установлено, что использование высокоэластичных рабочих органов в 100 раз и более снижает силу удара, что позволит уменьшить риски травмирования и повреждения семян рабочими органами сельскохозяйственных машин.

Литература

1. Divsalar Maryam and Bita Oskouie. Study the effect of mechanical damage at processing on soybean seed germination and vigor ARPN // Journal of Agricultural and Biological Science. – 2011. – Vol. 6. – № 7, July. – P. 60–64.

2. Ульрих, Н.Н. Система машин для механизации работ в селекции и семеноводстве / Н.Н. Ульрих // Международный сельскохозяйственный журнал. – 1996. – № 5. – С. 45–49.

3. Лебедев, В.Б. Влияние различных видов механических микроповреждений зерна пшеницы на его посевные качества // Хранение и переработка зерна. – М.: ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1969. – Вып. 6. – С. 22–25.

4. Henrique, C. Diffusion as mixing mechanism in granular materials / C. Henrique, G. Batrouni, D. Bideau // Physical Rev. E. – 2000. – V. 63. – P. 1304-1–1304-9.

5. Rahman, M.M. Effect of seed moisture content following hand harvest and machine threshing on seed quality of cool tolerant soybean / M.M. Rahman, J.G. Hampton, M.J. Hill // Seed Science and Technology. – 2004. – 32(10). – P. 149–158.

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

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

8. Исследование ударного воздействия механического устройства на семена озимой пшеницы / В.П. Забродин, А.Ф. Бутенко, М.В. Суханова, С.М. Чепцов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – № 12 (32). – С. 14–19.

9. Суханова, М.В. Смеситель-инкрустатор EcoMix – устройство импульсного воздействия, исключающее травмирование семян при предпосевной обработке / М.В.

Суханова, В.П. Забродин, А.В. Суханов // Научная жизнь. – 2018. – № 6. – С. 38–42.

10. Суханова, М.В. Актуальность использования интеллектуальных систем управления динамическими процессами смешивания компонентов сыпучего тела в устройствах для предпосевной обработки семян / М.В. Суханова,
В.В. Мирошникова, А.В. Суханов // Вестник аграрной науки Дона. – 2019. – № 1 (45). – С. 45–54.

11. Experimental grounding of the efficiency of the use of elastic operating elements in the devices for pre-sowing seed treatments / M.V. Sukhanova, V.P. Zabrodin, A.V. Sukhanov, Vitězslav Stýskala, Jiři Zegzulka, Lucie Jezerska, Jiři Rozbroj // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2017. – Vol. 9. – No 7S. – P. 732–741.

12. Adaptive Approach for Anomaly Detection in Temporal Data Based on Immune Double-plasticity Principle / S. Kovalev, A. Sukhanov, M. Sukhanova, S. Sokolov. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 679. – P. 234–243.

References

1. Divsalar Maryam and Bita Oskouie. Study the effect of mechanical damage at processing on soybean seed germination and vigor ARPN, *Journal of Agricultural and Biological Science,* 2011, Vol. 6, No 7, July, pp. 60–64.

2. Ul`rix N.N. Sistema mashin dlya mekhanizatsii rabot v selektsii i semenovodstve [Machine system for the mechanization of work in breeding and seed production], *Mezhdunarodnyj sel`skokhozyajstvennyj zhurnal*, 1996, No 5, pp. 45–49. (In Russian)

3. Lebedev V.B. Vliyanie razlichnykh vidov mekhanicheskikh mikropovrezhdenij zerna pshenitsy na ego posevnye kachestva [The influence of various types of mechanical microdamages of wheat grain on its sowing qualities], *Khranenie i pererabotka zerna*, M.: CINTI Goskomzaga SSSR, 1969, Vyp. 6, pp. 22–25. (In Russian)

4. Henrique C., Batrouni G., Bideau D. Diffusion as mixing mechanism in granular materials, *Physical Rev. E.,* 2000, V. 63, pp. 1304-1–1304-9.

5. Rahman M.M., Hampton J.G., Hill M.J. Effect of seed moisture content following hand harvest and machine threshing on seed quality of cool tolerant soybean. *Seed Science and technology*, 2004, 32(10), pp. 149–158.

6. Aleksandrov E.B., Sokolinskij V.B. Prikladnaya teoriya i raschety udarnyrh system [Applied theory and shock systems calculations], M.: Nauka, 1969, 201 p. (In Russian)

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

8. Zabrodin V.P., Butenko A.F., Sukhanova M.V., Chepczov S.M. Issledovanie udarnogo vozdejstviya mekhanicheskogo ustrojstva na semena ozimoj pshenicy [The study of the impact of mechanical devices on the winter wheat seeds], *Sel`skokhozyajstvennye mashiny i tekhnologii*, 2018, No 12 (32), pp. 14–19. (In Russian)

9. Sukhanova M.V., Zabrodin V.P., Sukhanov A.V. Smesitel`-inkrustator EcoMix – ustrojstvo impul`snogo vozdejstviya, isklyuchayushhee travmirovanie semyan pri predposevnoj obrabotke [EcoMix-mixer – a device of pulse action, which excludes traumatizing seeds during presowing treatment], *Nauchnaya zhizn`*, 2018, No 6, pp. 38–42. (In Russian)

10. Sukhanova M.V., Miroshnikova V.V., Sukhanov A.V. Aktual`nost` ispol`zovaniya intellektual`nykh system upravleniya dinamicheskimi processami smeshivaniya komponentov sypuchego tela v ustrojstvakh dlya predposevnoj obrabotki semyan [The relevance of the intelligent control systems use for dynamic processes of mixing the components of a bulk body in devices for presowing treatment of seeds], *Vestnik agrarnoj nauki Dona*, 2019, No 1 (45), pp. 45–54. (In Russian)

11. Sukhanova, M.V., Zabrodin, V.P., Sukhanov, A.V., Vitězslav Stýskala, Jiři Zegzulka, Lucie Jezerska, Jiři Rozbroj. Experimental grounding of the efficiency of the use of elastic operating elements in the devices for pre-sowing seed treatments. *Journal of Fundamental and Applied Sciences,* 2017, Vol. 9, No 7S, pp. 732–741.

Сведения об авторах

Суханова Майя Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика и механика», Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде (Ростовская область, Российская Федерация). Тел.: +7-928-755-11-21. E-mail: m_suhanova@list.ru.

Прохода Алексей Алексеевич – студент 2-го курса энергетического факультета, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде (Ростовская область, Российская Федерация).

Иванов Алексей Николаевич – студент 2-го курса энергетического факультета, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде (Ростовская область, Российская Федерация).

Information about the authors

Sukhanova Mayya Victorovna – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the High mathematics and applied mechanics department, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE «Don State Agrarian University» in Zernograd (Rostov region, Russian Federation). Phone: +7-928-755-11-21. E-mail: m_suhanova@list.ru.

Prokhoda Alexey Alexeevich – student of Power faculty, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE «Don State Agrarian University» in Zernograd (Rostov region, Russian Federation).

Ivanov Alexey Nikolaevich – student of Power faculty, Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE «Don State Agrarian University» in Zernograd (Rostov region, Russian Federation).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.