



УДК 630\*232.315.4



DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68

## Анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами машин предпосевной обработки циклического действия\*

**Виктор Петрович Забродин,**  
доктор технических наук, профессор;

**Суханова Майя Викторовна,**  
доцент, кандидат технических наук,  
e-mail: [m\\_suhanova@list.ru](mailto:m_suhanova@list.ru)

Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета, Российская Федерация

**Реферат.** Повреждение и разрушение семян рабочими органами машин в результате предпосевной обработки сказывается на качестве будущего урожая. Предпосевную обработку семян обычно осуществляют машинами периодического циклического действия. (*Цель исследования*) Определить степень травмирования семян при предпосевной обработке химическими и биологическими препаратами в машинах циклического действия, провести анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами протравливателей, предложить пути снижения механических повреждений семенного материала. (*Материалы и методы*) Изучили возможные варианты последовательности взаимодействия рабочих органов машин с семенами. Определили влияние ударного механического воздействия рабочих органов машин на семена. На основании исследований ученых, опираясь на широкий спектр теоретических, экспериментальных работ и производственный опыт, сравнили существующие технологические схемы. (*Результаты и обсуждение*) Рассмотрели влияние рабочих органов на степень повреждения семян на различных этапах протравливания: во время загрузки, смешения, выгрузки. (*Выводы*) Выявили наиболее щадящий технологический процесс, включающий загрузку барабана ковшовой норией и выгрузку материала в бурты или эластичную тару. При этом повреждение семян зерновых культур составит 2,2-4,5 процента, а бобовых – не более 6 процентов. Рекомендовали при конструировании машин циклического действия не использовать шнековые погрузчики и лопастные мешалки, так как они сильно травмируют семена, особенно бобовых культур – до 20-32 процентов. С целью снижения степени повреждения семян в конструкциях протравливателей предложили применять современные материалы, обладающие высокой эластичностью, способные испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций.

**Ключевые слова:** механический удар, травмирование семян, предпосевная обработка семенного материала, протравливание семян, протравливатели, высокоэластичные материалы.

**Для цитирования:** Забродин В.П., Суханова М.В. Анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами машин предпосевной обработки циклического действия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №5. С. 63-68. DOI 10.22314.2073-7599-2019-13-5-63-68.

## Analyzing Interaction between Seeds and Pre-Seeding Treatment Machines of Cyclic Action\*

**Viktor P. Zabrodin,**  
Dr.Sc.(Eng.), professor;

**Maya V. Sukhanova,**  
Ph.D.(Eng.), associate professor,  
e-mail: [m\\_suhanova@list.ru](mailto:m_suhanova@list.ru)

Azov-Black Sea Engineering Institute – Branch of Don State Agrarian University, Russian Federation

**Abstract.** Damage and destruction of seeds by working parts of agricultural machinery affects the quality of future harvest. Pre-sowing treatment of seeds is carried out, as a rule, with machines of periodic cyclic action. (*Research purpose*) To determine the degree of damage caused to seeds during pre-sowing treatment with chemical and biological dressing agents in cyclic machines, to analyze the interaction processes between seeds and working parts of pre-sowing treatment machines of cyclic action. (*Materials and methods*) The authors examined possible options of sequencing the interaction between working parts of machines and seeds

\*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-01-00250, гранта РФФИ №17-01-00323.

\*Acknowledgments. This research was carried out with the financial support of the RFBR grant, project No. 19-01-00250 and No. 17-01-00323.

and determined the shock mechanical impact on seeds made by working parts. Basing on research results obtained by other scientists as well as a wide range of theoretical and experimental studies and the best available practices, the authors have made a comparative analysis of the existing technological solutions. (*Results and discussion*) The authors have examined the effect of working parts on the degree of damage caused to seeds at various stages of pre-sowing treatment: while loading, mixing, and unloading. (*Conclusions*) The most sparing technological process has been identified, including loading the drum with a bucket elevator and unloading the material into piles or elastic containers. In this case, damage caused to grain seeds will amount to 2.2-4.5 percent, and those of legumes – not more than 6 percent. It is recommended not to use auger loaders and paddle mixers when designing cyclic machines, since they cause severe damage to seeds, especially those of legumes, of up to 20-32 percent. The seed damage rate can be decreased due to the use of modern materials featuring high elasticity and capable of withstanding considerable stretching within the limits of elastic deformations.

**Keywords:** mechanical impact, seed damage, pre-seeding treatment of seed material, seed dressing, dressing agents, highly elastic materials.

**For citation:** Zabrodin V.P, Sukhanova M.V. Analiz protsessov vzaimodeystviya semyan s rabochimi organami mashin predposevnoy obrabotki tsiklicheskogo deystviya [Analysis of interaction between seeds and pre-seeding treatment machines of cyclic action]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N5. 63-68 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68.

**Ч**тобы сохранить всхожесть семян, перед посевом их обрабатывают химическими и биологическими препаратами против болезней и вредителей. Машины для предпосевной обработки семян бывают периодического и циклического (порционного) действия. Последние обладают следующими достоинствами:

- простота конструкции;
- минимальное число рабочих органов, взаимодействующих с семенами;
- простота обслуживания при минимальном числе персонала;
- высокая равномерность смешивания.

Однако машины циклического действия имеют недостатки:

- малую производительность;
- ограниченную область применения (чаще всего их используют для сухого смешивания);
- при сухом смешивании препарат плохо удерживается на семенах, что требует повышенных доз;
- низкий уровень экологической защиты обслуживающего персонала.

Вследствие простоты конструкции и низкой стоимости машины циклического действия применяют в основном в хозяйствах малых форм собственности.

**Цель исследования** – определить степень травмирования семян при предпосевной обработке химическими и биологическими препаратами в машинах циклического действия, провести анализ процессов взаимодействия семенного материала с рабочими органами протравливателей, предложить пути снижения механических повреждений.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Процесс предпосевной обработки семян химическими и биологическими препаратами заключается в следующем. В смесительную камеру загружается определенная порция семян и соответствующее требуемой норме количество ядохи-

миката. В зависимости от принципа действия и конструкции смесителя процесс перемешивания смеси продолжается заданное время, или продолжительность смешивания определяют визуально.

Обработка семян аналогична процессу смешения [1]. Равномерность покрытия препаратом зависит от продолжительности смешивания с протравителем (рис. 1).

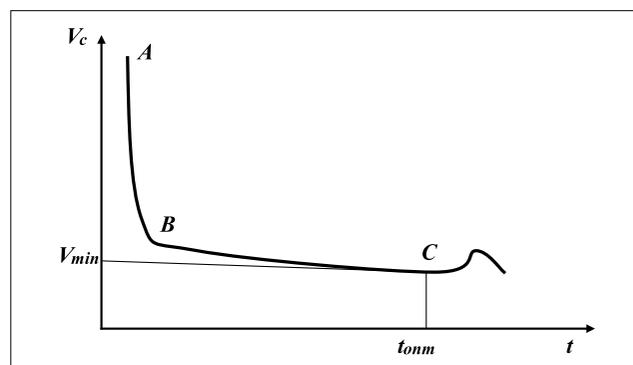


Рис. 1. Зависимость коэффициента неоднородности смеси от времени смешения в протравливателе

Fig. 1. Relationship between the coefficient of mixture heterogeneity and mixing time in a seed pre-sowing treatment machine

Процесс смешения происходит в основном на трех участках. На участке A – B при конвективном смешивании частицы перемещаются в микрообъемах. На участке B – C в ходе диффузионного смешивания частицы перераспределяются на уровне микрообъемов.

В зависимости от времени смешения неоднородность смеси быстро убывает, достигая минимального значения  $V_{min}$  при  $t = t_{opt}$ . Затем она возрастает вследствие сегрегации. Следовательно, достижение минимальной неоднородности требует от оператора повышенного внимания при выборе режима работы протравливателя.



Рассмотрим технологический процесс предпосевной обработки семян химическими и биологическими препаратами в машинах циклического (порционного) действия (рис. 2).

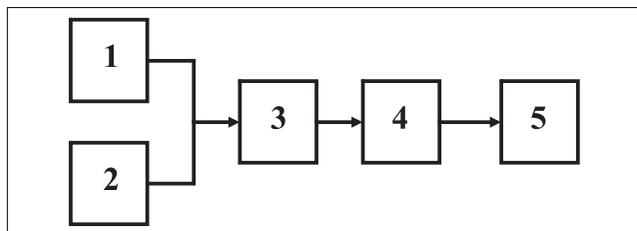


Рис. 2. Общая схема операций технологического процесса протравливания семян машинами циклического действия:

- 1–3 – загрузка семян в емкость для смешивания;
- 2–3 – загрузка препарата в емкость для смешивания;
- 3–4 – смешивание компонентов;
- 4–5 – выгрузка обработанных семян

Fig. 2. General flow chart of seed pre-sowing treatment operations with machines of cyclic action:

- 1–3 – loading seeds into a mixing tank;
- 2–3 – loading a dressing agent into a container for mixing;
- 3–4 – mixing of components;
- 4–5 – unloading of treated seeds

Каждая из операций технологического процесса может осуществляться несколькими типами рабочих органов [1]. Возможны несколько вариантов последовательности воздействия рабочих органов машин на семена, в результате чего они повреждаются (рис. 3).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** С целью выбора наиболее щадящей технологической схемы предпосевной обработки рассмотрим влияние рабочих органов на степень повреждения семян в каждом из указанных процессов (таблица).

При реализации процесса 1–6–3 загрузка семян выполняется вручную. Это самый непроизводительный процесс, он оправдан при малых объемах работ. Кроме того, он самый опасный с экологической точки зрения, так как препарат загружается в емкость вручную. В зависимости от используемых средств загрузки повреждение семян не превышает 0,5–0,8% [2].

При загрузке емкости для смешивания шнековым транспортером (процесс 1–7–3) на повреждение семян оказывает влияние технологическая схема погрузчика. При использовании погрузчиков с горизонтальным и наклонным шнеками степень повреждения семян возрастает. Кроме того, травмирование зависит от вида культуры, размеров семян, конструктивных и кинематических параметров транспортера. Повреждение семян зерновых культур составляет 2,3–7,3%, а бобовых культур (горох) – 15–25% [3, 4].

Загрузка с помощью скребкового транспортера (схема 1–8–3) приводит к повреждению семян в основном в зонах изменения направления вектора скорости поступательного движения от горизонтально-

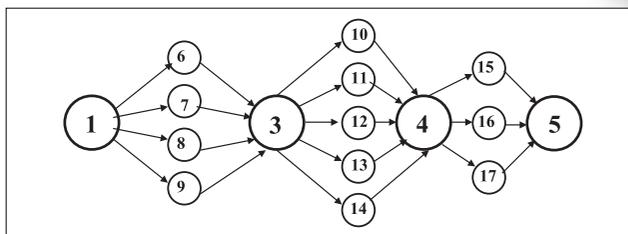


Рис. 3. Воздействие рабочих органов машин циклического действия на семена:

- 1–6–3 – ручная загрузка 6 семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания;
- 1–7–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания шнековым транспортером 7;
- 1–8–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания скребковым транспортером 8;
- 1–9–3 – загрузка семян из бурта 1 в емкость 3 для смешивания с помощью ковшовой норрии 9;
- 3–10–4 – смешение семян с протравителем в барабанном смесителе;
- 3–11–4 – смешение семян с протравителем с помощью лопастной мешалки;
- 3–12–4 – смешение семян с протравителем шнековым аппаратом;
- 3–13–4 – смешение семян с протравителем центробежным аппаратом (центробежный диск);
- 3–14–4 – смешение семян с протравителем воздушным потоком;
- 4–15–5 – выгрузка обработанных семян в эластичные контейнеры (мешки);
- 4–16–5 – выгрузка обработанных семян в бурт;
- 4–17–5 – выгрузка обработанных семян в транспортное средство

(примечание: цифра 2 отсутствует, так как обозначает операцию загрузки препарата до обработки им семян)

Fig. 3. The impact of the working parts of cyclic action machines on seeds:

- 1–6–3 – manual loading of seeds 6 from pile 1 into container 3 for mixing;
  - 1–7–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing with screw conveyor 7;
  - 1–8–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing with scraper conveyor 8;
  - 1–9–3 – loading seeds from pile 1 into container 3 for mixing using bucket elevator 9;
  - 3–10–4 – mixing of seeds with a dressing agent in a drum mixer;
  - 3–11–4 – mixing of seeds with a dressing agent using a paddle mixer;
  - 3–12–4 – mixing of seeds with a dressing agent using a screw device;
  - 3–13–4 – mixing of seeds with a using a centrifugal device (a centrifugal disk);
  - 3–14–4 – mixing of seeds with a dressing agent by air flow;
  - 4–15–5 – unloading of treated seeds into elastic containers (bags);
  - 4–16–5 – unloading of treated seeds into a storage pile;
  - 4–17–5 – unloading of treated seeds into a vehicle
- (note: position 2 is absent, as it indicates the operation of loading a dressing agent before seed treatment)

го к наклонному. Это вызвано тем, что семена защемляются между цепью и звездочками. Степень травмирования на этом этапе для зерновых культур достигает 0,1-0,6%, бобовых – 1,6-2,0% [5, 6].

При загрузке емкости с помощью ковшовой норрии (процесс 1–9–3) повреждение семян зерновых культур равно 0,7-1,5%, бобовых – 1,0-3,0% [7].

Операция 3–4 покрытия семян протравителем или биопрепаратом может быть осуществлена в барабанном смесителе (процесс 3–10–4), с помощью лопастных мешалок (3–11–4), шнеком (3–12–4), центробежным диском (3–13–4) или воздушным потоком (3–14–4).

На степень повреждения семян рабочими органами смесителей барабанного типа (процесс 3–10–4) значительное влияние оказывают конструкция барабана, наличие дополнительных рабочих поверхностей, кинематический режим и другие параметры. Из всего многообразия барабанов для предпосевной обработки семян чаще всего используют барабаны цилиндрического типа с осью вращения, совпадающей с осью симметрии цилиндра или с наклонной к оси цилиндра осью вращения – «пьяная бочка» [1].

Для интенсификации процесса смешения на внутренней поверхности барабана устанавливают лопатки прямолинейной или криволинейной формы. Лопатки, кроме того, способствуют сообщению смеси поступательного движения вдоль продольной оси барабана.

Степень повреждения семян барабанными устройствами достигает 1,3-2,5% [2, 8].

Применение лопастных мешалок (процесс 3–11–4) способствует интенсификации процесса предпосевной обработки посевного материала, но и вызывает повышенное повреждение семян из-за ударного воздействия лопаток. Травмирование в случае зерновых культур составляет 3-5%, бобовых 5-8% [7, 8].

Повреждение семян смесителями шнекового типа (процесс 3–12–4) зависит от конструкции шнека, угла наклона к горизонту, формы витков, кинематических и других параметров.

Из-за отсутствия данных по повреждению семян шнековыми смесителями при анализе технологического процесса воспользуемся данными, полученными для шнековых транспортеров. При этом будем учитывать то, что шнековый смеситель, установленный в барабане, работает аналогично шнековому транспортеру в открытом желобе, что исключает повреждение семян из-за заклинивания их между кожухом и витками шнека. Вследствие этого степень повреждения семян снижается на 40-50% [9]. Тогда для зерновых культур этот показатель равен 0,7-2,5%, бобовых – 2,0-3,5%.

Центробежные дисковые смесители (процесс 3–13–4) в практике сельхозмашиностроения не встречаются. Однако некоторые товаропроизводители используют центробежно-бегунковые смесители промышленного машиностроения. Повреждение семян в этом случае зависит от многих параметров, например, от организации места подачи компонентов в барабан, кинематических и конструктивных параметров аппарата и других. Травмирование семян зерновых культур такими смесителями достигает 1,0-2,6%, бобовых – 2,3-4,5% [2].

Применение воздушного потока (процесс 3–14–4) для предпосевной обработки семян в аппаратах циклического действия оправдано лишь при наличии источника сжатого воздуха. Конструкция смесителя несколько усложняется, а на степень повреждения семян значительное влияние оказывают скорость воздушного потока и материал барабана, так как для обеспечения процесса смешения скорость воздушного потока должна быть не ниже скорости витания семян

Причины и степень повреждения семян при протравливании		Seed damage, %	
Операции Operations	Источники травмирующего воздействия Sources of damaging effect	зерновые / cereals	бобовые / legumes
(1-3) – загрузка компонентов в смеситель (1-3) – loading components into the mixer	загрузка вручную / manual loading	0,5-0,8	0,5-0,8
	шнековый транспортер / screw conveyor	2,3-17,3	15,0-25,0
	скребковый транспортер / scraper conveyor	0,1-0,6	1,6-2,0
	ковшовой норрии / bucket elevator	0,7-1,5	1,0-3,0
(3-4) – смешивание компонентов (3-4) – mixing components	барабан / drum	1,3-2,5	1,3-2,5
	лопастная мешалка / paddle mixer	3,0-5,0	5,0-8,0
	шнек / screw auger	0,7-2,5	2,0-3,5
	центробежный диск / centrifugal disk	1,0-2,6	2,3-4,5
(4-5) – выгрузка обработанных семян (4-5) – unloading of treated seeds	воздушный поток / air flow	3,0-5,0	7,0-10,0
	эластичная тара (мешки) / elastic containers (bags)	0,2-0,5	0,2-0,5
	бурт / pile	0,2-0,5	0,2-0,5
	транспортные средства / vehicles	0,1-0,6	1,6-2,0



и протравителя [10-12]. Чтобы исключить распыливание протравителя, барабан должен быть герметизирован. Из-за многочисленных ударов семян о его стенки вероятность повреждения возрастает: для зерновых культур до 3-5%, для бобовых – до 7-10% [13].

Рассмотрим выгрузку обработанных семян (*процесс 4-5*) из протравливателя. Если для этого используют эластичные контейнеры (*процесс 4-15-5*), то причиной травмирования станет действие гравитационных сил и сил трения. Повреждение семян зерновых и бобовых культур составит 0,2-0,5% [2].

Выгрузка в бурты (*процесс 4-16-5*) применяется в тех случаях, когда обработанное зерно предназначено для хранения или при недостатке тары. Повреждение семян зависит от высоты разгрузки, поверхности на которую семена падают, и ряда других факторов. Значение показателя равно 0,2-0,5% [2].

При погрузке обработанных семян в транспортное средство (*процесс 4-17-5*) существенную роль играют тип транспортера, длина транспортирования, кинематические параметры транспортера. При применении скребковых транспортеров повреждение семян зерновых культур составляет для зерновых культур 0,1-0,6%, для бобовых – 1,6-2,0% [5, 6].

Учитывая, что данные в *таблице* получены различными авторами [13-16], принимающими разные показатели повреждения (разрушение, повреждение оболочек, микроповреждения и другие), эти показате-

тели можно использовать только при оценке рассматриваемых технологий.

Кроме того, приведенные данные получены для выпускаемых промышленностью машин, рабочие органы которых имеют стальные поверхности. Современные материалы обладают высокой эластичностью, способны испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций [17, 18].

**Выводы.** В ходе исследований выявили наиболее щадящий технологический процесс, включающий загрузку барабана ковшовой норией и выгрузку материала в бурты или эластичную тару. При этом повреждение семян зерновых культур составит 2,2-4,5%, а бобовых – не более 6%.

При конструировании машин циклического действия следует избегать использования шнековых погрузчиков и лопастных мешалок, так как они сильно травмируют семена, особенно бобовых культур – до 20-32%.

С целью снижения степени повреждения семян в конструкциях протравливателей следует использовать современные материалы, обладающие высокой эластичностью, способные испытывать значительные растяжения в пределах упругих деформаций. Это позволит значительно снизить ударные воздействия на семена, суммарные потери посевного материала и интенсифицировать процесс предпосевной обработки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение. 1973. 216 с.
- Чазов С.А. Факторы, способствующие травмированию семян зерновых культур // *Труды Свердловского СХИ*. 1972. Т. 26. С. 106-114.
- Новиков П.А. Повреждение семян транспортирующими рабочими органами // *Труды научно-исследовательского института зернового хозяйства*. 1971. С. 102-115.
- Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. М.: Колос. 1976. 319 с.
- Москаленко В.И., Виндижев Н.Л. Травмирование семян масличных культур винтовыми и скребковыми транспортерами // *Селекция и семеноводство*. 1972. №3. С. 66-67.
- Виндижев Н.Л. Травмирование семян масличных культур в транспортирующих органах уборочных машин и его устранение // *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1975. №8. С. 97-99.
- Лебедев В.Б. Влияние различных видов механических микроповреждений зерна пшеницы на его посевные качества // *Хранение и переработка зерна*. 1969. Вып. 6. С. 22-25.
- Чазов С.А., Плаксин В.Ф. Пути снижения травмирования семян // *Селекция и семеноводство*. 1969. №4. С. 48-51.
- Преображенский П.А. Спирально-винтовые транспортеры (гибкие шнеки) и смесители. КХТИ им. С.М. Кирова. 1970. 138 с.
- Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions. *International journal of multiphase flow*. 1999. Vol. 25. 1457-1489.
- Kantak A.A., Davis R.H. Collisions of spheres with wet and dry porous layers on a solid wall. *Chemical engineering science*. 2006. 61. 417-427.
- Ciampini D., Spelt T.K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. Part II. Parametric study and implications for erosion testing and blast cleaning. *Wear* 254 (2003). 250-264.
- Нуруллин Э.Г., Салахов И.М. Травмирование семян в протравливателях пневмомеханического типа // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2010. №12. С. 21-22.
- Бутенко А.Ф., Максименко В.А. Анализ травмирования семян зерновых культур. Исследование и разработка эффективности технологий и технических средств для животноводства. *Зерноград*, 2004. С. 75-83.
- Шабанов Н.И., Бутенко А.Ф. Теоретические исследования процесса взаимодействия зерновки с лопаткой ротора // *Известия вузов. Сев.-Кав. Регион. Технические науки*. 2004. №3. С. 108-111.
- Сысолин П.В., Ликкей А.В., Иваница К.Г. О причинах дробления зерна в катушечных высевальных аппаратах сеялок // *Тракторы и сельхозмашины*. 1971. №4. С. 24-25.
- Забродин В.П., Бутенко А.Ф., Суханова М.В., Чепцов С.М. Исследование ударного воздействия механическо-

го устройства на семена озимой пшеницы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №2. С. 14-19.  
18. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соу-

дарениями. М.: Международная программа образования. 2017. 336 с.

REFERENCES

1. Makarov Yu.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov [Devices for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1973. 216 (In Russian).
2. Chazov S.A. Faktory, sposobstvuyushchie travmirovaniyu semyan zernovykh kul'tur [Factors contributing to the damage of grain seeds]. *Trudy Sverdlovskogo SKHI*. 1972. Vol. 26. 106-114 (In Russian).
3. Novikov P.A. Povrezhdeniye semyan transportiruyushchimi rabochimi organami [Seed damage caused by transporting working parts]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta zernovogo khozyaystva*. 1971. 102-115 (In Russian).
4. Pugachev A.N. Povrezhdeniye zerna mashinami [Grain damage caused by machines]. Moscow: Kolos. 1976. 319 (In Russian).
5. Moskalenko V.I., Vindizhev N.L. Travmirovaniye semyan maslichnykh kul'tur vintovymi i skrebkovymi transporterami [Oilseed damage caused by screw- and scraper-type conveyors]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1972. N3. 66-67 (In Russian).
6. Vindizhev N.L. Travmirovaniye semyan maslichnykh kul'tur v transportiruyushchikh organakh uborochnykh mashin i ego ustraneniye [Oilseed damage caused by the transporting parts of harvesting machines and its avoidance]. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 1975. N8. 97-99 (In Russian).
7. Lebedev V.B. Vliyaniye razlichnykh vidov mekhanicheskikh mikropovrezhdeniy zerna pshenitsy na yego posevnyye kachestva [Influence of various types of mechanical microdamage caused to wheat grain on its sowing qualities]. *Khraneniye i pererabotka zerna*. 1969. Issue 6. 22-25 (In Russian).
8. Chazov S.A., Plaksin V.F. Puti snizheniya travmirovaniya semyan [Ways of decreasing grain damage]. *Selektsiya i semenovodstvo*. 1969. N4. 48-51 (In Russian).
9. Preobrazhenskiy P.A. Spiral'no-vintovye transportery (gibkie shneki) i smesiteli [Spiral-screw conveyors (flexible screws) and mixers]. *KKHTI im. S.M. Kirova*. 1970. 138 (In Russian).
10. Sommerfeld M., Huber N. Experimental analysis and modeling of particle-wall collisions. *International journal of multi-phase flow*. 1999. Vol. 25. 1457-1489 (In English).
11. Kantak A.A., Davis R.H. Collisions of spheres with wet and dry porous layers on a solid wall. *Chemical engineering science*. 2006. 61. 417-427 (In English).
12. Ciampini D., Spelt T.K., Papini M. Simulation of interference effects in particle streams following impact with a flat surface. Part II. Parametric study and implications for erosion testing and blast cleaning. *Wear* 254 (2003). 250-264 (In English).
13. Nurullin E.G., Salakhov I.M. Travmirovaniye semyan v protravlivatelyakh pnevmomekhanicheskogo tipa [Seed damage in a pneumo-mechanical type treatment mashing]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2010. N12. 21-22 (In Russian).
14. Butenko A.F., Maksimenko V.A. Analiz travmirovaniya semyan zernovykh kul'tur [Analyzing damage caused to grain seeds]. *Issledovanie i razrabotka effektivnosti tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv dlya zhivotnovodstva*. Zernograd, 2004. 75-83 (In Russian).
15. Shabanov N.I., Butenko A.F. Teoreticheskie issledovaniya protsessa vzaimodeystviya zernovki s lopatkoy rotora [Theoretical studies of grain interaction with a rotor blade]. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kav. Region. Tekhnicheskie nauki*. 2004. N3. 108-111 (In Russian).
16. Sysolin P.V., Likkey A.V., Ivanitsa K.G. O prichinakh drobleniye zerna v katushechnykh vysevayushchikh apparatakh seyalok [On the causes of grain crushing in reel-type seeders]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1971. N4. 24-25 (In Russian).
17. Zabrodin V.P., Butenko A.F., Sukhanova M.V., Cheptsov S.M. Issledovanie udarnogo vozdeystviya mekhanicheskogo ustroystva na semena ozimoy pshenitsy [Study of the impact of a mechanical device on winter wheat seeds]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N2. 14-19 (In Russian).
18. Ivanov A.P. Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami [Dynamics of systems with mechanical collisions]. Moscow: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya. 2017. 336 (In Russian).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 19.06.2019  
The paper was submitted  
to the Editorial Office on 19.06.2019

Статья принята к публикации 18.10.2019  
The paper was accepted  
for publication on 18.10.2019