

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.19>

ТРАВМИРОВАНИЕ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ ОБМОЛОТЕ И ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ДОРАБОТКЕ

Научная статья

Ступин А.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-0548-6313;

¹ Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (stupin32[at]yandex.ru)

Аннотация

Послеуборочные потери семян зерновых культур включают в себя прямые физические потери и потери качества, которые снижают экономическую ценность урожая или делают его непригодным для использования на посевные цели. В отдельных случаях эти потери могут составлять до 80% от общего объема производства. Обмолот семян – самая ответственная, трудная и сложная процедура при механической уборке зерновых. Сложный процесс обмолота состоит из взаимодействия между механическими частями оборудования и колосьями зерновых культур, и включает в себя выдавливание, столкновение и трение. Поэтому качество молотильного аппарата оказывает значительное влияние на степень повреждения, потери и другие параметры урожая. С учетом отмеченного в статье рассматриваются вопросы, связанные с травмированием семян зерновых культур при обмолоте и послеуборочной доработке. Отдельное внимание в процессе исследования уделено описанию основных подходов к обмолоту зерна, включая ударное обмолачивание и молотью с протираем. Также отмечены перспективные технологии снижения повреждения зерен в процессе послеуборочной доработки.

Ключевые слова: зерно, обработка, молотья, зубья, скорость, удар.

GRAIN SEED INJURY DURING THRESHING AND POST-HARVEST TREATMENT

Research article

Stupin A.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-0548-6313;

¹ Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russian Federation

* Corresponding author (stupin32[at]yandex.ru)

Abstract

Post-harvest losses of grain seed include direct physical and quality losses that reduce the economic value of the crop or make it unsuitable for use for sowing purposes. In some cases, these losses can account for up to 80% of total production. Seed threshing is the most responsible, difficult and complex procedure in mechanical harvesting of cereals. The complex threshing process consists of the interaction between the mechanical parts of the equipment and the ears of grain crops, and includes squeezing, collision and friction. Therefore, the quality of threshing equipment has a significant impact on the degree of damage, losses and other parameters of the crop. In view of the noted, the article discusses the issues related to the injury of grain crop seeds during threshing and post-harvest handling. Special attention in the process of research is paid to the description of the main approaches to threshing of grain, including impact threshing and threshing with rubbing. Promising technologies to reduce grain damage during post-harvest handling are also highlighted.

Keywords: grain, processing, threshing, tines, speed, impact.

Введение

Семена представляют собой основу производственной деятельности сельскохозяйственных предприятий, поэтому их качество должно быть гарантировано в любое время. Около 90% всех продовольственных культур, выращиваемых в мире, размножаются семенами. В любой системе растениеводства качественный семенной материал внушает доверие сельскохозяйственным производителям, поскольку все остальные факторы производства будут лишь способствовать получению оптимального урожая [1]. Актуальность данной тематики несоизмеримо возрастает в контексте увеличения спроса на продовольствие в связи с растущей урбанизацией, изменением климата и использованием земель для выращивания непродовольственных культур.

В последние несколько десятилетий большинство стран сосредоточились на улучшении своего сельскохозяйственного производства и землепользования. Механизация сельского хозяйства привела к своевременному выполнению операций, повышению продуктивности земли, а также к устранению изнурительного труда и увеличению экономической отдачи для фермера. Основными компонентами механизации сельского хозяйства, помимо подъемных ирригаторов, являются тракторы и сопутствующее сельскохозяйственное оборудование, такое как культиваторы, дисковые бороны, сеялки, молотилки, а также разнообразные модификации зерноуборочных комбайнов.

Особого внимания в данном контексте заслуживает система послеуборочной обработки семян, включающая в себя последовательность действий и операций, которые можно разделить на две группы: технические (уборка урожая: обмолот, очистка, дополнительная сушка; хранение, переработка и контроль качества) и экономические (транспортировка, маркетинг, информационная политика, административные и управленческие процедуры). Урожай невозможно улучшить после сбора, но правильная практика может повысить стабильность и уменьшить негативные изменения, которые приводят к порче семенного материала. Данные вопросы критически важны, поскольку, например,

в развивающихся странах более 40% потерь приходится на операции после уборки и переработки урожая. По калорийности потери в зерновых культурах составляют наибольшую долю (53%) [2]. Зерновые культуры, такие как пшеница, рис и кукуруза, являются самым популярным продовольственным сырьем в мире и составляют основу базовых продуктов питания в большинстве стран мира.

В то же время следует отметить, что послеуборочные потери (ПУП), являющиеся критически важной проблемой, не получают должного внимания в научно-экспертном сообществе. Так, например, в предыдущие годы на ее решение выделялось менее 5% средств, направляемых на сельскохозяйственные исследования. Примерно треть производимого продовольствия (около 1,3 млрд. т.) стоимостью около 1 трлн. дол. ежегодно теряется во всем мире во время послеуборочных операций [3]. Под «продовольственными потерями» понимаются продукты питания, которые могут быть использованы человеком, но остаются неиспользованными. Согласно экспертным оценкам, решения по сокращению послеуборочных потерь требуют относительно скромных инвестиций и могут принести высокую прибыль по сравнению с увеличением производства сельскохозяйственных культур для удовлетворения растущего спроса на продовольствие.

Таким образом, вопросы, связанные с минимизацией потерь зерновых в ходе послеуборочных работ и обмолота, являются теоретически и практически значимыми, что и обусловило выбор темы данной статьи.

Методы и принципы исследования

Над разработкой теорий и моделей, направленных на понимание сложных факторов, способствующих повреждению зерна во время обмолота, и определение эффективных стратегий минимизации такого повреждения, трудятся Файзуллин Р.А., Нуруллин Э.Г., Залялов А.А., Леканов С.В., Стрикунов Н.И., Лугачев В.Е., D. W. Lambert, W. W. Worzella, R. C. Kinch, J. N. Cheadle.

Специфика повреждения зерен в результате физического давления в процессе обмолота нашла свое отражение в публикациях Суркова И.А., Ларюшина Н.П., Шукова А.В., Кирюхиной Т.А., Isabel Valenzuela, Ary A Hoffmann, Loren V. Goodrich, Carrie J. Butts-Wilmsmeyer, Germán A. Bollero.

Исследования с целью определить влияние переменных параметров сельскохозяйственной техники и условий окружающей среды на потери зерна на разных этапах переработки продукта, от уборки урожая до посева проводят Филенко Г.А., Фирсова Т.И., Скворцова Ю.Г., Ряднов А.И., Арылов Ю.Н., D. P. Livingston, T. D. Tuong, C. H. Haigler, U. Avci, S. P. Tallury.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и публикации, следует отметить, что ряд проблемных вопросов требует отдельного внимания. Так, в более детальной проработке нуждаются задачи улучшения конструктивных особенностей рабочих органов машин, эксплуатируемых как отдельно, так и в составе поточных линий по переработке семенного материала. Дальнейшего развития и усовершенствования требуют методы, позволяющие определить степень повреждения зерна во время обмолота. Кроме того, в условиях цифровизации и развития Четвертой промышленной революции перспективным направлением будущих исследований являются технологические вмешательства в процесс послеуборочной доработки, особенно касательно повышения эффективности герметичного хранения для снижения потерь зернового материала.

Таким образом, цель статьи заключается в изучении ключевых аспектов травмирования семян зерновых культур при обмолоте и послеуборочной доработке, а также перспективных способов решения данной проблемы.

Методы исследования включают в себя: системный и междисциплинарный подходы, а также ряд общенаучных и специальных методов исследования, в частности, анализ и синтез, обобщение и группировка, сравнение, систематизация, прогнозирование, декомпозиция.

Основные результаты

Термин ПУП относится к измеряемым количественным и качественным потерям пищевых продуктов в послеуборочной системе. ПУП можно определить как ухудшение количественных и качественных характеристик продовольственной продукции на протяжении всего периода от уборки урожая до потребления. Потери можно в целом классифицировать как потери веса из-за порчи, потери качества, потери питательных веществ, потерю жизнеспособности семян и коммерческие потери. Масштабы потерь после уборки урожая в цепочке поставок продовольствия сильно различаются в зависимости от культур, регионов и экономик [4].

Обмолот зерна – процесс отделения съедобной части зерновых культур от несъедобной мякины. Этот процесс является важнейшим этапом послеуборочных работ, который может существенно повлиять на общее качество и урожайность убранных зерен. Чрезмерное механическое повреждение зерна в процессе обмолота может привести к значительным потерям в виде снижения его качества, ухудшения всхожести и уменьшения рыночной стоимости. Помимо прямого экономического воздействия, повреждение зерна может иметь далеко идущие последствия для продовольственной безопасности и устойчивости, влияя на доступность, питательность и сохранность убранных зерен.

Механизмы и оборудование сельскохозяйственного назначения в зависимости от степени влияния на травмирование семян зерновых культур могут быть классифицированы следующим образом: зерноуборочный комбайн – 30...36%; сушильные агрегаты – 6,3...11,4%; воздухо-решетчатые машины – 2,71...5,4%; транспортирующие механизмы – 2,5...4%; триерные блоки – 0,32...2,33%; пневмосортировочные машины – 0,17% [5].

Таким образом, очевидно, что потери количества (веса или объема) и качества (изменение физического состояния или характеристик) зерна могут произойти на любом этапе послеуборочного процесса (рис. 1).



Рисунок 1 - Расчетные потери (вес и качество) в цепочке послеуборочной обработки семян зерновых культур
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.19.1>

Повреждение семян зерновых культур может произойти из-за различных факторов, включая характеристики зерен, аспекты, связанные с оборудованием, и механические факторы, такие как скорость вращения барабана, скорость подачи материала, угол наклона захвата и уровень влажности.

Не подлежит сомнению тот факт, что конструкция и технологические параметры молотильного аппарата существенным образом влияют на повреждение зерна. Традиционно урожай зерновых культур убирают комбайнами с одним или двумя молотильными аппаратами. Роторный сепаратор также повреждает зерно при отделении его от соломы. Наибольшее повреждение обмолоченного зерна приходится на барабанные рашпили. Испытания показали, что при увеличении скорости барабанных рашпелей с $27,5 \text{ м с}^{-1}$ до $34,8 \text{ м с}^{-1}$ травмирование зерна возрастает на 2,6%. Скорость рашпиля связана с деформацией зерна и потоком массы через вогнутую поверхность. Поток массы в начале подбарабана на $1,1 \text{ м с}^{-1}$ медленнее, чем в его конце, поэтому при обмолоте большего количества зерен из колосьев они быстрее проходят через подбарабанье и меньше повреждаются [6].

Также ученые обнаружили, что молотильный механизм с ротором и осевым потоком приводит к меньшему повреждению зерна, чем молотильный механизм с ротором и тангенциальным потоком. Помимо этого, на повреждение зерна оказывает влияние тип молотильного аппарата в зерноуборочном комбайне. По сравнению с обычными комбайнами, скорость вращения барабана ниже, а расстояние между вогнутостями больше в роторных комбайнах, что приводит к меньшему проценту поврежденного зерна.

Таким образом, оценка влияния конструкции комбайна на качественные характеристики обмолачиваемого зерна позволяет заключить, что наибольшее влияние на повреждение семян оказывают технологические параметры молотильного аппарата. Их необходимо ежедневно пересматривать и корректировать после оценки уборочной ситуации, биометрических показателей урожая и видовых характеристик.

Данная проблематика, по мнению автора, заслуживает отдельного внимания.

На сегодняшний день используются разные подходы к обмолоту зерна, включая удар, растирание, предварительное прочесывание и измельчение. Соответственно, возникают разные типы моделей контакта между зерновыми культурами и молотильными компонентами. На такие показатели обмолота зерна, как потери и повреждения, существенно влияет характер контакта между зерновыми культурами и компонентами молотилки. Модели контакта строятся на основе геометрических структур и механических движений молотильных устройств. Сила и движение — это не только два важных параметра контактных моделей, но и ключевые факторы влияния на производительность обмолота зерна, такие как потери и повреждения [7].

3.1. Ударное обмолачивание

Контактная модель ударного молотильного устройства продемонстрирована на рисунке 2. Зубья, такие как зубья-шпы и зубья-бабочки, прикрепленные к барабану, являются ключевыми молотильными компонентами ударного молотильного устройства. Молотильный зазор распространяется от корня молотильного зуба до вершины вогнутой решетки (рис. 2а). Основная энергия, используемая для обмолота, поступает от ударного контакта между молотильными зубьями и зерновыми колосьями (рис 2б).

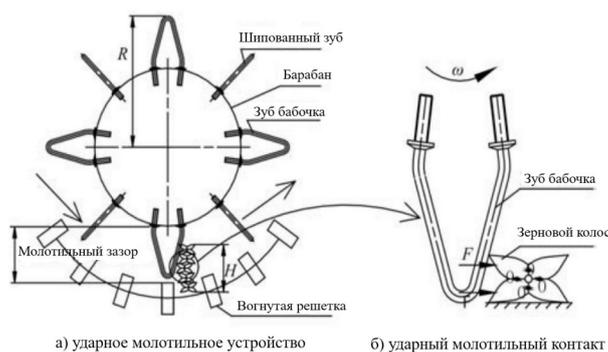


Рисунок 2 - Контактная модель ударного обмолота
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.19.2>

При вращении барабана молотильные зубья проникают в зерновую массу в молотильном зазоре. Зерновые колосья подвергаются воздействию высокоскоростных молотильных зубьев с дополнительными действиями сжатия, трения и расчесывания. Зерновки отделяются от стеблей с ускорением, возникающим в результате удара. В то же время, подстилка зерновых культур разрыхляется под действием проникающих молотильных зубьев. В результате зерно попадает в отверстие между соседними вогнутыми решетками.

В ходе экспериментов было установлено, что типы зубьев и барабанов, периферийная скорость зубьев оказывают существенное воздействие на эффективность обмолота и качество поверхности зерен. Масса зерновых культур получает силу удара и испытывает внутреннее сопротивление всего потока, а также сопротивление трения на подбарабанье. В момент, когда периферийная скорость зубьев становится выше критической скорости повреждения, сила удара играет важную роль в травмировании зерна. В данном случае считаем, что модификация поверхности молотильных зубьев может быть эффективным решением, которое позволит изменить характер контакта при ударе. Таким образом, повреждение зерна можно рассматривать как функцию периферийной скорости и формы контакта.

3.2. Молотьба с протираем

Контактная модель трущегося молотильного аппарата показана на рисунке 3. Обычно шесть или восемь рашпелей устанавливаются на барабан, образуя молотильный цилиндр, а под цилиндром находится вогнутость с углом обхвата 110° .

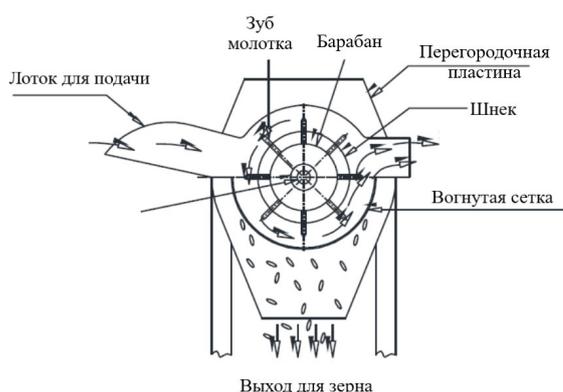


Рисунок 3 - Контактная модель обмолота
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.19.3>

Барaban закрыт верхней крышкой и нижней вогнутой проволочной сеткой и, наконец, подвешен на двух закрытых шарикоподшипниках, прикрученных к жесткой раме молотилки. Верхняя крышка с отбойными пластинами,

загрузочным лотком и выпускным отверстием для соломы прикреплена к жесткой раме молотилки с помощью болтов и гаек.

На контактной поверхности каждого рашпиля распределено множество ребер (рис. 4), которые увеличивают коэффициент трения между ними и зерновыми колосьями. Это позволяет прийти к заключению, что рашпили являются основными компонентами трущихся молотилок. Чаще всего они применяются для формирования молотильного просвета, который распространяется от вершины рашпиля до вершины вогнутого решета, где зерновые колосья обмолачиваются под воздействием трения.

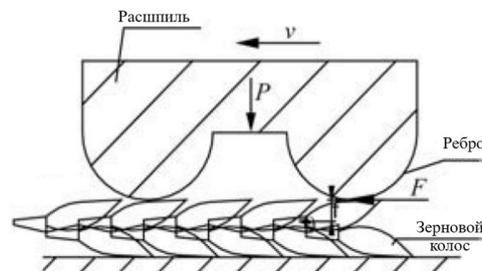


Рисунок 4 - Трущийся молотильный контакт
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.56.19.4>

Под действием силы тяжести и центробежной силы зерна проходят через соломенную подстилку и вылетают через вогнутое отверстие. Однако при соприкосновении зерен с вогнутым решетом происходит отскок, и зерна снова вылетают или выбрасываются вместе с соломой. Следовательно, возникают потери зерна при обмолоте. Таким образом, потери зерна можно рассматривать как функцию формы контакта прутьев рашпиля.

По мнению автора, уменьшить степень травмирования семян зерновых культур при обмолоте и послеуборочной доработке, а также снизить потери позволяют на сегодняшний день технологии искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, которые совмещаются с цифровыми инновациями.

Например, интеллектуальное определение условий обмолота имеет большое значение для повышения качества работы молотильного устройства. В современных исследованиях особое внимание уделяется мониторингу и управлению молотильным цилиндром комбайна, а также регулировке зазора вогнутого сита. Так, ученые из Шанхайского технологического университета на базе алгоритмов машинного обучения создали информационную систему, позволяющую мгновенно собирать данные о норме подачи, влажности зерна и скорости вращения молотильного цилиндра, обрабатывать их и автоматически регулировать скорость вращения молотильного цилиндра. Это, в свою очередь, повышает эффективность и надежность работы комбайна [8].

Коллектив авторов из Индии разработали устройство для регулировки зазора подбарабья и контроля нагрузки на молотильный цилиндр. Устройство может осуществлять автоматическую регулировку цилиндра посредством сбора, обработки и анализа давления. Что касается самой конструкции, то позиционирование контролируется с помощью датчика перемещения и датчика натяжения, движение гидроцилиндра осуществляется путем управления электромагнитным реверсивным клапаном, а встроенный вогнутый экран предназначен для автоматической регулировки зазора вогнутости [2].

Заключение

Потери после уборки урожая являются сложной и актуальной проблемой, а ее масштабы различаются в зависимости от различных культур, методов, климатических условий и стран. Полученные результаты позволяют подчеркнуть, что такие параметры машины, как скорость обмолота, конструкция барабана и настройки подбарабья, напрямую влияют на интенсивность и тип наносимых повреждений. Перспективным методом решения данных проблем является использование интеллектуальных технологий, позволяющих более точно настраивать параметры молотильного оборудования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Файзуллин Р.А. Экспериментальное исследование травмирования семян зерновых культур в протравочной машине / Р.А. Файзуллин, Э.Г. Нуруллин, А.А. Залялов // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. — 2023. — № 2(18). — С. 4–19.
2. Shahbazi R. Effects of cushion box and closed let-down ladder usage on impact damage to corn kernel during handling / R. Shahbazi, F. Shahbazi // Food Science & Nutrition. — 2022. — Vol. 11, № 5. — P. 13–19.
3. Ряднов А.И. Повышение урожайности яровой пшеницы за счет использования семян с низким уровнем травмирования / А.И. Ряднов, Ю.Н. Арылов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2022. — № 4(68). — С. 45–52.
4. Ma B. Understanding the regulation of cereal grain filling: The way forward / B. Ma, L. Zhang // Journal of Integrative Plant Biology. — 2023. — Vol. 65, № 2. — P. 120–124.
5. Li Y. Decreasing grain processing breakage with a novel flexible threshing system: Multivariate optimization and wear investigation / Y. Li // Journal of Food Processing and Preservation. — 2022. — Vol. 46, № 8. — P. 23–29.
6. Нуруллин Э.Г. Экспериментальное исследование травмирования семян в сельскохозяйственных машинах / Э.Г. Нуруллин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. — 2022. — Т. 17, № 2(66). — С. 99–105.
7. Su Z. Design and performance test of variable diameter threshing drum of combine harvester / Z. Su, Z. Ding // Food Science & Nutrition. — 2021. — Vol. 9, № 8. — P. 87–92.
8. Zhang H. Lightweight Threshing Rack under Multisource Excitation Based on Modal Optimization Method / H. Zhang, Z. Tang // Advances in Materials Science and Engineering. — 2020. — № 1. — P. 20–27.
9. Коростелев Д.Н. Пневматический сепаратор для фракционного разделения и очистки зерна / Д.Н. Коростелев, А.В. Черняков, В.С. Коваль // Вестник Омского государственного аграрного университета. — 2024. — № 3(55). — С. 118–122.
10. Asemu A.M. Effects of grain drying methods on postharvest insect infestation and physicochemical characteristics of maize grain / A.M. Asemu // Journal of Food Process Engineering. — 2020. — Vol. 43. — P. 66–71.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Fajzullin R.A. Jeksperimental'noe issledovanie travmirovaniya semjan zernovyh kul'tur v protravochnoj mashine [Experimental study of injury to grain crop seeds in a seed treatment machine] / R.A. Fajzullin, Je.G. Nurullin, A.A. Zaljalov // Nauchno-tehnicheskij vestnik: Tehnicheskie sistemy v APK [Scientific and Technical Bulletin: Technical systems in the agro-industrial complex]. — 2023. — № 2(18). — P. 4–19. [in Russian]
2. Shahbazi R. Effects of cushion box and closed let-down ladder usage on impact damage to corn kernel during handling / R. Shahbazi, F. Shahbazi // Food Science & Nutrition. — 2022. — Vol. 11, № 5. — P. 13–19.
3. Rjadnov A.I. Povyschenie urozhajnosti jarovoj pshenicy za schet ispol'zovaniya semjan s nizkim urovnem travmirovaniya [Increasing the yield of spring wheat through the use of seeds with a low level of injury] / A.I. Rjadnov, Ju.N. Arylov // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2022. — № 4(68). — P. 45–52. [in Russian]
4. Ma B. Understanding the regulation of cereal grain filling: The way forward / B. Ma, L. Zhang // Journal of Integrative Plant Biology. — 2023. — Vol. 65, № 2. — P. 120–124.
5. Li Y. Decreasing grain processing breakage with a novel flexible threshing system: Multivariate optimization and wear investigation / Y. Li // Journal of Food Processing and Preservation. — 2022. — Vol. 46, № 8. — P. 23–29.
6. Nurullin Je.G. Jeksperimental'noe issledovanie travmirovaniya semjan v sel'skohozjajstvennyh mashinah [Experimental study of seed injury in agricultural machinery] / Je.G. Nurullin // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Kazan State Agrarian University]. — 2022. — Vol. 17, № 2(66). — P. 99–105. [in Russian]
7. Su Z. Design and performance test of variable diameter threshing drum of combine harvester / Z. Su, Z. Ding // Food Science & Nutrition. — 2021. — Vol. 9, № 8. — P. 87–92.
8. Zhang H. Lightweight Threshing Rack under Multisource Excitation Based on Modal Optimization Method / H. Zhang, Z. Tang // Advances in Materials Science and Engineering. — 2020. — № 1. — P. 20–27.
9. Korostelev D.N. Pnevmaticheskij separator dlja frakcionnogo razdeleniya i ochistki zerna [Pneumatic separator for fractional separation and cleaning of grain] / D.N. Korostelev, A.V. Chernjakov, V.S. Koval' // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Omsk State Agrarian University]. — 2024. — № 3(55). — P. 118–122. [in Russian]
10. Asemu A.M. Effects of grain drying methods on postharvest insect infestation and physicochemical characteristics of maize grain / A.M. Asemu // Journal of Food Process Engineering. — 2020. — Vol. 43. — P. 66–71.