

# **ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION**

УДК 631.354.2

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.111-132



## **Результаты экспериментальных исследований обмолота колосьев в пневматическом молотильном устройстве**

**В. И. Пахомов, С. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников\*,  
Е. В. Бенова, А. И. Рухляда**  
*ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»  
(г. Зерноград, Россия)*  
*\*oleg-b@list.ru*

*Введение.* В настоящее время актуальной проблемой является высокий уровень травмирования зерна в процессе обмолота. Поэтому необходимо разработать щадящие способы выделения зерна из колоса, исключая непосредственное ударное воздействие рабочих органов молотильных устройств на зерновки. Цель исследования – изучить процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве и оценить влияние режимных характеристик устройства на выделение и травмирование зерна.

*Материалы и методы.* Экспериментальная установка представляет собой пневматическое молотильное устройство, в котором обмолот производится при взаимодействии колоса и деки, осуществляемом под чередующимся действием высокого и низкого давления воздуха, создаваемого лопастями ротора, а сепарация – посредством отвода легкой незерновой фракции в камеру пониженного давления.

*Результаты исследования.* Установлено, что травмирование зерна уменьшается при снижении скорости движения лопастей ротора и соответственно скорости движения колоса в молотильной камере. При минимальной скорости движения лопасти 13,5 м/с уровень травмирования зародыша и дробления зерна снижается практически до нуля. Диапазон скорости лопасти 13,5...20 м/с является наиболее благоприятным для пневматического обмолота зерна по показателю травмирования его зародыша. В результате пневматического обмолота на экспериментальной установке происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев.

*Обсуждение и заключение.* Процесс пневматического обмолота колосьев пшеницы дает удовлетворительные результаты, обеспечивая снижение травмирования эндосперма зерна на 10...12 %. Травмирование зародыша зерна снижается на 5 %, практически исключая его. Дробление зерна при минимальной скорости лопастей ротора составило не более 0,5 %. Сопоставление доли травмированного и дробленного зерна при пневматическом обмолоте с долей поврежденного зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что предлагаемый способ обеспечивает снижение травмирования.

© Пахомов В. И., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Бенова Е. В., Рухляда А. И., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Ключевые слова:** зерно, колос, обмолот, травмирование зерна, выделение зерна из колоса, молотильное устройство

**Для цитирования:** Пахомов, В. И. Результаты экспериментальных исследований обмолота колосьев в пневматическом молотильном устройстве / В. И. Пахомов, С. В. Брагинетц, О. Н. Бахчевников [и др.]. – DOI: 10.15507/2658-4123.030.202001.111-132 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 111–132.

## Experimental Data of the Ear Threshing Process in a Pneumatic Device

**V. I. Pakhomov, S. V. Braginets, O. N. Bakhchevnikov\*,  
E. V. Benova, A. I. Rukhlyada**  
*Agricultural Research Center “Donskoy” (Zernograd, Russia)*  
*\*oleg-b@list.ru*

**Introduction.** The current problem is the high level of grain injuries during the threshing process. Therefore it is necessary to develop the gentle methods for separating grains from ears. These methods shall exclude direct shock influence of operative parts of the threshing devices on cereal grains. The objective of research is to study the process of the wheatear threshing in the pneumatic device and to estimate the influence of device settings on cereal grain separation and damage.

**Materials and Methods.** The experimental apparatus is a pneumatic threshing device. The threshing is carried out in case of the interaction of an ear and concave under the influence of the alternating high and low pressure of the airflow generating by the rotor’s blades. Separation is carried out by means of deriving light-load tailings into the reduced pressure chamber.

**Results.** The grain damage decreases in reducing the speed of rotor blades motion and consequently the speed of ears motion in the threshing unit. Germ damage and grain breakage decrease almost to zero at a minimum blade motion speed of 13.5 mps. The range of blade speed between 13.5 and 20 mps is the most favorable for the pneumatic grain threshing in terms of the germ damage. The pneumatic threshing on the experimental device results in effective assorting of grains and light-load tailings of ears.

**Discussion and Conclusion.** Process of the wheat ears pneumatic threshing has satisfactory results. The pneumatic threshing reduces grain endosperm damage by 10...12%. Grain germ damage decreases by 5%, practically to zero. Crushing of grain at rotor blades minimum speed is no more than 0.5%. Comparison of shares of the damaged and crushed grains when using the pneumatic threshing with shares of the damaged grains when using the traditional combine threshing has showed that the offered method of the threshing provides a reduction in grain damage.

**Keywords:** grain, ear, threshing, grain damage, ear separation, threshing device

**For citation:** Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., et al. Experimental Data of the Ear Threshing Process in a Pneumatic Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):111-132. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.111-132>

### Введение

В настоящее время насущной проблемой является высокий уровень травмирования семян зерновых культур, в том числе озимой пшеницы, в процессе обмолота [1], что в дальнейшем отрицательно влияет на качество по-

лучаемого семенного материала [2; 3]. Значительные механические повреждения зерна получают при взаимодействии с рабочими органами молотильных устройств ударного действия [4; 5]. Это имеет особенно большое значение в ходе селекционных работ по созда-

нию новых сортов зерновых культур, так как при небольшом количестве зерен в каждом исследуемом образце их травмирование отрицательно влияет на результаты и продолжительность таких работ [6].

Результаты исследований [3; 4; 7] доказывают, что совершенствование рабочих органов молотильных устройств, осуществляющих непосредственное ударное воздействие на колос и содержащиеся в нем зерна, не позволяет добиться значительного снижения травмирования зерна и полностью исключить его [8; 9]. Поэтому появилась необходимость разработать новые щадящие способы выделения зерна из колоса, сводящие к минимуму или исключают непосредственное ударное воздействие подвижных рабочих органов молотильных устройств на зерновки [9–11].

В настоящее время широкое распространение получают зерноуборочные комбайны с аксиально-роторными молотильно-сепарирующими устройствами, в которых зерна практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию рабочих органов, а выделяются в результате вытирания колосьев при их перемещении между рабочими поверхностями, образующими молотильный зазор [9; 12; 13]. При этом вследствие интенсивного контакта с рабочими поверхностями зерна подвергаются травмированию, хотя и в меньшей степени, чем в традиционном молотильном аппарате [4; 9].

В последнее время широкое распространение получила комбайновая уборка зерновых методом очеса, при котором в молотильное устройство комбайна поступают лишь колосья без стеблей [4; 9; 14]. В результате молотильный аппарат комбайна оказывается недостаточно загружен, что приводит к повышению травмирования зерна [4; 15]. Это также требует разработки нового способа малотравматичного обмолота колосьев зерновых культур.

Предпосылкой для разработки нового способа обмолота является свойство колосьев растений зерновых культур, заключающееся в том, что чешуи, охватывающие каждое зерно, препятствуют эффективному ударному воздействию на него в процессе обмолота [16; 17]. Поэтому следует разработать способ обмолота, заключающийся в разрушении чешуй колоса или ослаблении их связи с зерновкой. Чтобы при этом снизить травмирование зерна, в ходе его реализации рационально применять не ударное, а контактное воздействие, заключающееся в перекалывании колоса по поверхности деки молотильного устройства, приводящего к частичному истиранию колоса, в результате чего и происходит выделение зерен. Для того чтобы обеспечить движение колоса в нужном направлении и контактное воздействие на него деки, авторами предложено использовать поток воздуха, создаваемый лопастями ротора в молотильной камере. При этом контактное воздействие ротора на колосья заменяется малотравматичным действием воздушной струи.

В данном исследовании эффективность способов обмолота и молотильных устройств оценивалась с точки зрения снижения травмирования зерна, вопросы производительности не рассматривались. Цель исследования – изучить процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве и оценить влияние режимных характеристик устройства на выделение и травмирование зерна.

### **Обзор литературы**

Опыт эксплуатации зерноуборочных комбайнов с традиционным молотильным аппаратом барабанного типа с ударным действием показал, что обмолот зерна в них сопровождается значительным его травмированием [4; 8]. В рамках этого традиционного способа обмолота предлагались различные технические решения для снижения травмирования зерна [9; 11], которые

дали лишь небольшой положительный эффект [4; 7; 8]. В результате изучения процесса ударного обмолота исследователи, в частности Ф. Шахбази [7; 18; 19] и М. Лашгари [20], пришли к выводу, что этот метод обмолота исчерпал возможности к совершенствованию, так как при его применении невозможно избежать травмирующего ударного воздействия на зерно [1; 3; 7; 21]. Поэтому стала очевидной необходимость разработки нового малотравматичного способа обмолота колосьев зерновых культур [9; 10; 22].

Такой способ обмолота осуществляют посредством роторных молотильно-сепарирующих устройств с аксиальным и тангенциальным расположением ротора, которые находят все более широкое применение в конструкции зерноуборочных комбайнов [9; 23–26]. В основу этого способа обмолота положено использование эффекта истирания колосьев при перемещении между образующими молотильный зазор рабочими поверхностями и ударами выступающих элементов ротора по колосьям [4; 9; 13; 27]. Теоретические и экспериментальные исследования обмолота зерна в роторных молотильно-сепарирующих устройствах проводили П. И. Миу [27], К. О. Осуэке [28], Л. Сюй и И. Ли, [29; 30], С. Хуань-Удом. В частности, П. И. Миу была разработана математическая модель движения зерна в аксиальном роторном молотильном устройстве [28]. К. О. Осуэке приведена модель воздействия трения и ударов на зерно в роторном молотильном устройстве [27]. С. Хуань-Удом исследовал влияние параметров аксиального роторного молотильного устройства на дробление зерна [31]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что роторные молотильные устройства обеспечивают снижение травмирования зерна [4; 8; 9; 31]. Однако такое снижение является недостаточным, в част-

ности, оно не обеспечивает получение качественного семенного материала при создании новых сортов зерновых культур [32; 33]. Многочисленные технические решения по усовершенствованию роторных молотильных устройств не привели к значительному уменьшению травмирования зерна [13; 34–36].

Таким образом, анализ литературных источников подтвердил необходимость разработки нового малотравматичного способа выделения зерна из колоса и устройства для его осуществления.

### Материалы и методы

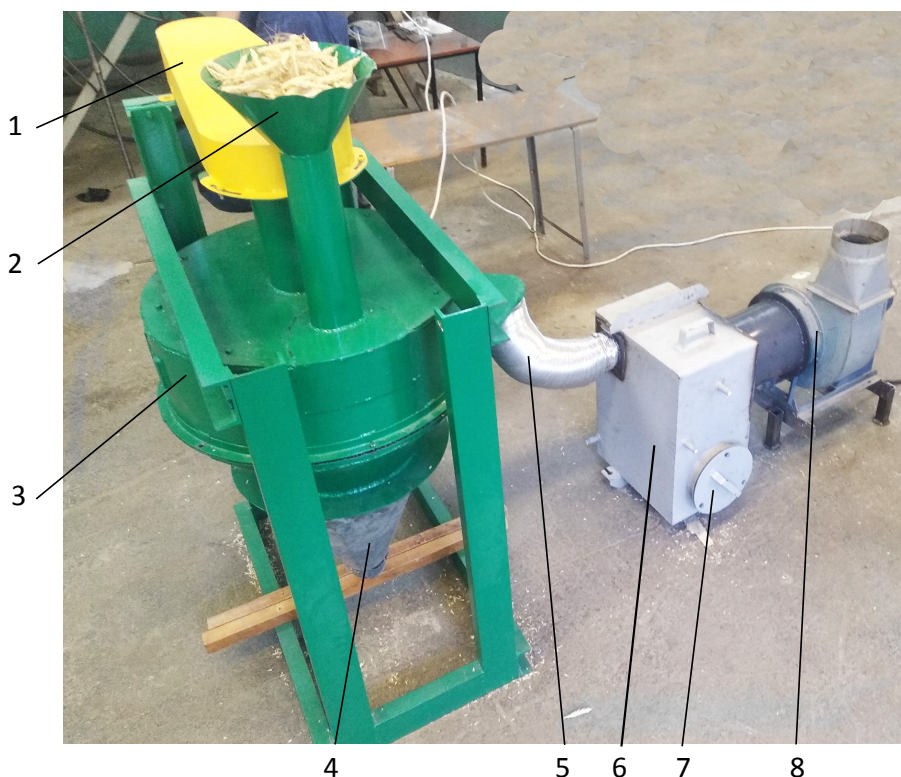
Оригинальная экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой пневматическое молотильное устройство [37].

Молотильное устройство включает цилиндрический корпус, содержащий молотильную камеру и ротор с четырьмя лопастями. В верхней части корпуса размещен загрузочный бункер. В нижней части цилиндрического корпуса под молотильной камерой и ротором установлено решето, под которым находится разгрузочная камера, соединенная с емкостью для сбора обмолоченного зерна. Зазор между краем деки и решетом составляет 25 мм.

Ротор состоит из вертикального вала, на котором перпендикулярно его оси неподвижно закреплены верхний и нижний диски (рис. 2). Диски соединены стойками, к которым прикреплены держатели, на концах которых на равном расстоянии друг от друга установлены четыре лопасти. Лопасти установлены таким образом, что они не закрыты дисками ротора. Лопасти представляют собой изогнутые в направлении вращения ротора гладкие пластины с покрытием из полимерного материала.

Внутри цилиндрического корпуса молотильного устройства размещена дека, профиль поверхности которой представляет собой периодиче-





Р и с. 1. Экспериментальное пневматическое молотильное устройство (общий вид):  
 1 – привод ротора; 2 – загрузочный бункер; 3 – цилиндрический корпус;  
 4 – емкость для сбора зерна; 5 – отвод камеры пониженного давления; 6 – осадительная камера;  
 7 – емкость для сбора легкой фракции; 8 – центробежный вентилятор

Fig. 1. Experimental pneumatic threshing device (general view): 1 – rotor drive; 2 – load bunker;  
 3 – cylindrical case; 4 – capacity for grain collection; 5 – branch of the reduced pressure chamber;  
 6 – settling chamber; 7 – capacity for light-load fraction collection; 8 – centrifugal fan

ское чередование выступов и впадин (рис. 2; 3). Дека выполнена из полимерного материала. Зазор между декой и внутренней поверхностью корпуса составляет 45 мм. Между внутренней поверхностью корпуса и декой размещена камера пониженного давления (вакуумная рубашка).

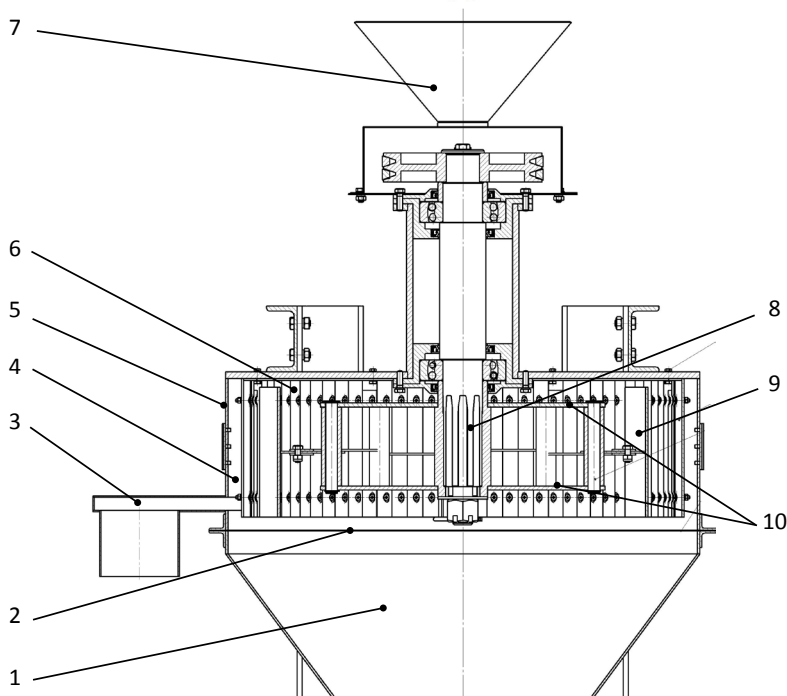
В ходе экспериментов зазор между краем лопасти и выступами деки составлял 16 мм.

Камера пониженного давления (вакуумная рубашка) соединена отводом с осадительной камерой, которая в свою очередь соединена с центробеж-

ным вентилятором. В осадительной камере размещена емкость для сбора легкой незерновой фракции. Пониженное давление воздуха в вакуумной рубашке и отводе создается центробежным вентилятором.

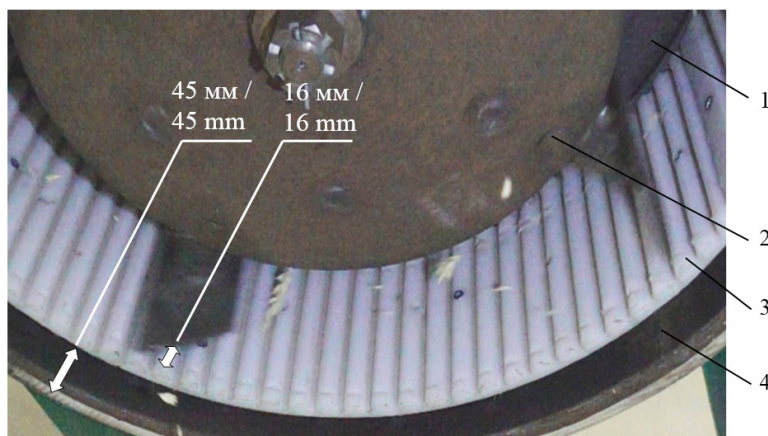
В ходе экспериментальных исследований срезанные вручную колосья безостой озимой пшеницы сорта «Лучезар» помещали в загрузочный бункер молотильного устройства. Суммарная масса колосьев в каждом опыте составляла 1000 г [38; 39].

Регулировка частоты вращения ротора молотильного устройства осу-



Р и с. 2. Продольный разрез экспериментального пневматического молотильного устройства:  
1 – камера для сбора зерна; 2 – решето; 3 – отвод камеры пониженного давления;  
4 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка); 5 – цилиндрический корпус; 6 – дека;  
7 – загрузочный бункер; 8 – ротор; 9 – лопасть; 10 – диск ротора

F i g. 2. Longitudinal section of experimental pneumatic threshing device: 1 – chamber for grain collection;  
2 – sieve; 3 – branch of the reduced pressure chamber; 4 – reduced pressure chamber (vacuum jacket);  
5 – cylindrical case; 6 – concave; 7 – load bunker; 8 – rotor; 9 – blade; 10 – rotor's disc



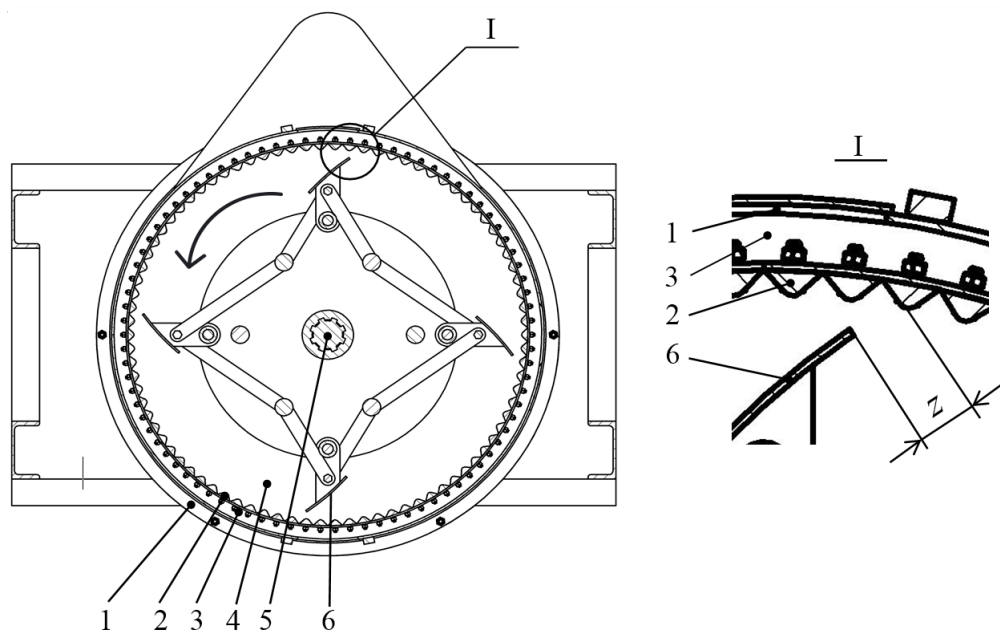
Р и с. 3. Экспериментальное пневматическое молотильное устройство (вид изнутри):  
1 – лопасть; 2 – ротор; 3 – дека из пластика; 4 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка)  
F i g. 3. Experimental pneumatic threshing device (inside view): 1 – blade; 2 – rotor; 3 – plastic concave;  
4 – reduced pressure chamber (vacuum jacket)

щественная частотным преобразователем.

В процессе работы экспериментального молотильного устройства колосья из загрузочного бункера по патрубку поступают в молотильную камеру. Выходное отверстие патрубка размещено таким образом, что зерна поступают в зону между декой и поверхностью верхнего диска ротора. В молотильной камере колосья увлекаются вихревым потоком воздуха, создаваемым лопастями ротора, во вращательное движение вдоль поверхности деки (рис. 4).

Обмолот колосьев в молотильном устройстве производится при взаимодействии колоса и деки, осуществляемом под чередующимся действием высокого и низкого давления воздуха, создаваемого лопастями. При враще-

нии ротора перед лопастями создается повышенное давление воздуха, под действием которого колосья прижимаются к деке, одновременно передвигаясь вдоль нее. При этом происходит взаимодействие колоса с ее выступами и впадинами, заключающееся в его истирании, в результате которого происходит разрушение связей зерен с колосом и выделение их из него. При прохождении лопасти мимо прижатого к деке колоса он находится в зоне между ними и не подвергается ударному воздействию. Позади лопастей создается пониженное давление воздуха, под действием которого колосья отдаляются от деки. Чередование действия повышенного и пониженного давления воздуха на колосья происходит непрерывно вплоть до разрушения колоса



Р и с. 4. Схема молотильной камеры экспериментальной установки: 1 – корпус; 2 – дека; 3 – камера пониженного давления (вакуумная рубашка); 4 – молотильная камера; 5 – ротор; 6 – лопасть;  $z$  – зазор между лопастью и декой

F i g. 4. Scheme of the threshing camera of the experimental device: 1 – case; 2 – concave; 3 – reduced pressure chamber (vacuum jacket); 4 – threshing chamber; 5 – rotor; 6 – blade;  $z$  – clearance between the blade and a concave

и выделения из него всех зерен. Таким образом, непосредственно в процессе обмолота зерна почти не подвергаются прямому ударному воздействию подвижного рабочего органа (лопасти).

Выделенное из колосьев зерно под действием силы тяжести через решето поступает в разгрузочную камеру и далее в емкость для сбора зерна. Частицы легкой незерновой части колосьев под действием создаваемого центробежным вентилятором пониженного давления воздуха перемещаются в вакуумную рубашку, откуда всасываются в отвод и поступают по нему в осадительную камеру, где осаждаются в емкости для сбора легкой фракции. Интенсивность воздушного потока, создаваемого центробежным вентилятором, значительно превышает интенсивность воздушного потока, создаваемого лопастями ротора, благодаря чему обеспечивается устойчивое перемещение легкой незерновой части колосьев в вакуумную рубашку и далее в отвод и осадительную камеру.

Величина зазора  $z = 16$  мм между краем лопасти и вершиной выступа деки в данном исследовании обоснована тем, что она больше, чем толщина колосьев безостой озимой пшеницы (не более 15 мм), благодаря чему колосья не защемляются в зазоре и практически не подвергаются ударам лопастей в процессе обмолота, что снижает травмирование зерна. Для остистой озимой пшеницы и других зерновых культур может быть установлена иная величина зазора.

Следует отметить, что на начальном этапе обмолота при попадании в молотильную камеру до начала установившегося движения вдоль деки под действием воздушного потока колосья могут подвергаться единичным ударам лопастей ротора. Также нельзя полностью исключить возможность случайных единичных ударных воздействий лопасти на колос в процессе обмолота. Имеющимися в распоряжении авторов техническими средствами невозможно

было точно оценить вклад в травмирование зерна именно ударных воздействий лопастей. Поэтому оценивалось травмирование зерен в целом в результате применения пневматического метода обмолота. Для уменьшения травмирования зерна при возможных ударах лопастей последние имели покрытие из полимерного материала.

Процесс разрушения колосьев в молотильной камере при пневматическом обмолоте фиксировали для последующего изучения с помощью скоростной видеосъемки. Видеосъемку производили высокоскоростной камерой Evercam 1000-4-C с цветным сенсором. Режим видеосъемки: разрешение  $1280 \times 800$  пикселей, частота кадров 1000 к/с. Видеокамеру и источник света для нее (светодиодная лампа в ударопрочной колбе) размещали в наклонной камере для сбора зерна (рис. 2) таким образом, чтобы видеокамера снизу фиксировала процессы, происходящие в молотильной камере. При этом для удобства видеосъемки временно удаляли решето. Данные с видеокамеры по кабелю передавали на компьютер и записывали на его жесткий диск.

Целью проведения высокоскоростной видеосъемки было последующее визуальное изучение сохраненных видеозаписей фактического процесса пневматического обмолота колосьев и сравнение его с теоретически предсказанным без численного определения параметров. При проведении же опытов по установлению точных значений травмирования зерна при пневматическом обмолоте видеосъемка не производилась.

Было проведено 5 серий опытов, в каждом из которых при помощи частотного преобразователя устанавливали определенное значение частоты вращения ротора и, соответственно, линейной скорости движения лопастей. Частоту вращения ротора варьировали в диапазоне 402...732 об/мин (6,7...12,2 Гц), линейную скорость



движения его лопасти соответственно изменяли в диапазоне 13,5...24,6 м/с. Каждый опыт осуществлялся в трех повторностях.

После завершения каждого опыта выделенные зерна подвергали визуальному осмотру при помощи стереомикроскопа Soptop SZX12 для определения наличия травмирования [40], то есть дробления зерна, повреждения его зародыша, а также повреждения эндосперма [41; 42]. Показатели травмирования и дробления зерна определялись по общепринятой в семеноводстве методике В. В. Гриценко и З. М. Калошиной<sup>1</sup>.

Основной целью экспериментальных исследований было определение показателей травмирования и дробления зерна при применении разработанного способа пневматического обмолота и молотильного устройства для его осуществления в сравнении с традиционными способами обмолота. Поэтому изучалось лишь выделенное в процессе обмолота и собранное в емкости для его сбора зерно на наличие травмирования и дробления, а также на наличие примеси легкой незерновой части колосьев в выделенном зерне. Определялся сам факт наличия эффективного разделения зерновой и легкой незерновой частей колосьев в экспериментальном молотильном устройстве без численной оценки потерь зерна, выводимого в циклон вместе с легкими частицами.

### Результаты исследования

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что процесс пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы протекает успешно и дает удовлетворительные результаты.

Визуальное изучение видеозаписей скоростной видеосъемки процесса работы экспериментального пневматического молотильного устройства (рис. 5) показало, что происходящий в моло-

тильной камере фактический процесс обмолота колоса пшеницы совпадает с теоретически предсказанным и протекает в соответствии с положениями, принятыми при конструировании данного молотильного устройства.

На рисунке 5а показано действие на колос пшеницы области высокого давления воздуха перед движущейся лопастью ротора, заключающееся в том, что колос под его действием перемещается к деке и прижимается к ней.

На рисунке 5б показано разрушение колоса, наступающее при его перемещении вдоль деки под действием высокого давления и взаимодействия с ее выступами и впадинами, в результате которого происходит выделение из него зерен и разделение его на части.

На рисунке 5с показано действие на колос области низкого давления воздуха позади движущейся лопасти, заключающееся в том, что части колоса отдаляются от деки.

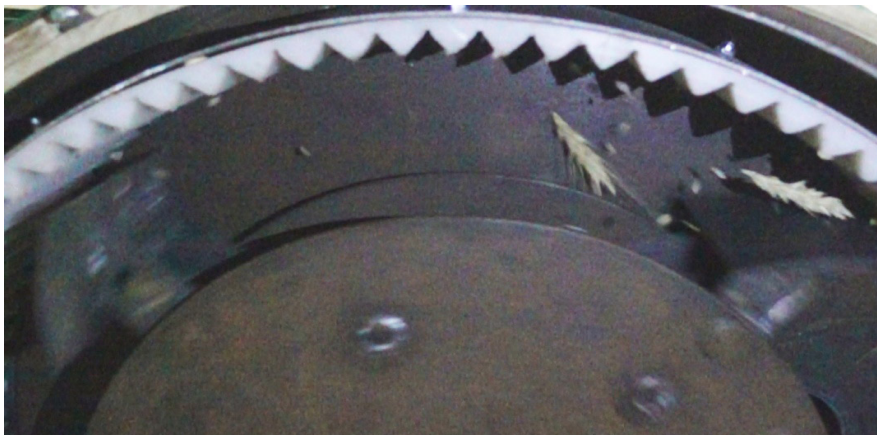
Затем цикл воздействия на колос, показанный на рисунке 5, повторяется и продолжается до полного его разрушения и выведения выделенных зерен и незерновой части колосьев из молотильной камеры в соответствующую емкость молотильного устройства.

При изучении видеозаписей установлено, что зерна в процессе пневматического обмолота практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию со стороны лопастей ротора. Единичные ударные воздействия лопастей на колос и содержащиеся в нем зерна происходят в основном на начальном этапе обмолота в момент поступления колосьев в молотильную камеру.

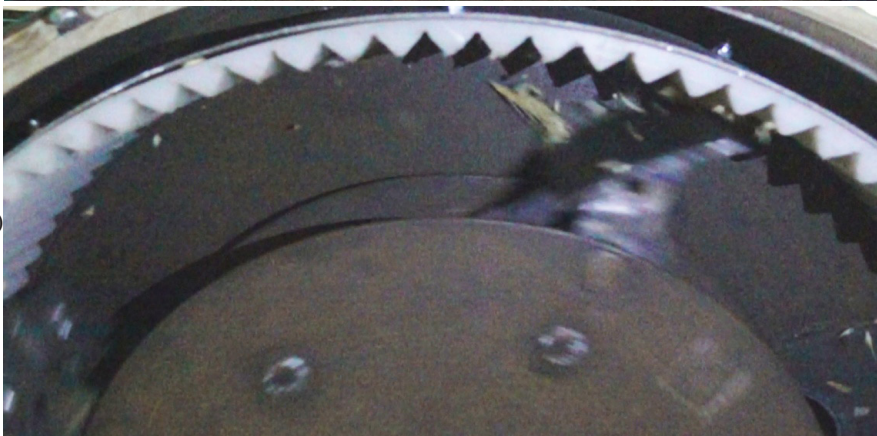
Изучение видеозаписей также показало, что в процессе обмолота не исключена возможность ударного воздействия лопастей на колосья, причем ее вероятность повышается при увеличении скорости движения лопастей.

<sup>1</sup> Гриценко В. В., Калошина З. М. Семеноведение полевых культур. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1984. 272 с.

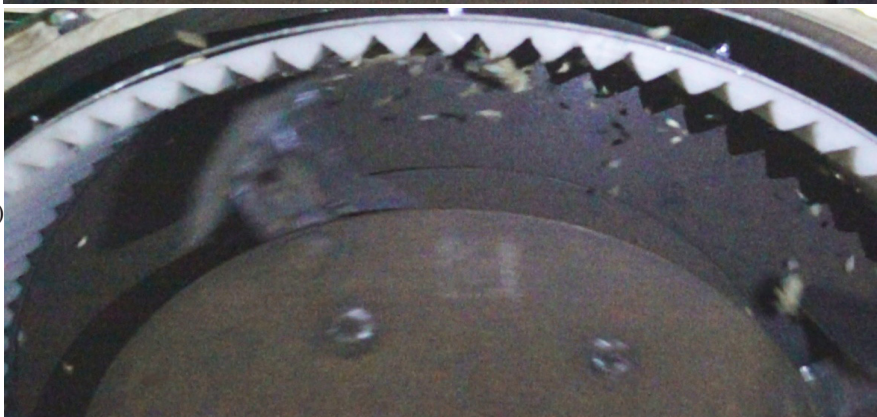
a)



b)



c)



Р и с. 5. Процесс обмолота колоса пшеницы в пневматическом молотильном устройстве:

а) действие на колос области высокого давления воздуха; б) разрушение колоса при взаимодействии с декой; в) действие на колос области низкого давления воздуха

F i g. 5. Threshing process of wheat ears in the pneumatic threshing device: a) action on an ear of area the air high pressure; b) ear destruction in case of interaction with a concave; c) action on an ear of area the air low pressure

Установлено, что выделение зерен из колоса в процессе пневматического обмолота в основном происходит при контактном взаимодействии колосьев с негладкой поверхностью деки, а не в результате ударов по ним лопастей.

Результаты экспериментальных исследований процесса пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы представлены в таблице 1.

Анализ результатов экспериментов показывает, что травмирование и разрушение зерна максимальны при наибольшей скорости движения лопастей ротора и, соответственно, скорости движения колосьев в молотильной камере и снижаются при ее уменьшении. Особенно значительно доля травмированного зерна и доля дробленого зерна снижаются при линейной скорости лопасти менее 20 м/с.

На рисунке 6 представлен график зависимости доли зерна с повреждением зародыша и доли дробленого зерна от линейной скорости лопасти при пнев-

матическом обмолоте колосьев озимой пшеницы. Данный график показывает, что максимальные значения показателей повреждения зерна наблюдаются при максимальной линейной скорости движения лопастей ротора 24,6 м/с. При снижении скорости движения лопастей снижается и травмирование зерна. При минимальной скорости движения лопасти 13,5 м/с доля зерна с повреждением зародыша и доля дробленого зерна снижаются практически до нуля.

Анализируя представленные на графике (рис. 6) результаты экспериментов, можно сделать вывод, что диапазон линейной скорости движения лопасти 13,5...20 м/с является наиболее благоприятным для пневматического обмолота зерна с точки зрения снижения травмирования его зародыша и уменьшения дробления зерна. Меньшие значения скорости движения лопасти принимать нерационально, так как в таком случае не обеспечивается эффективное взаимодействие колоса и деки вследст-

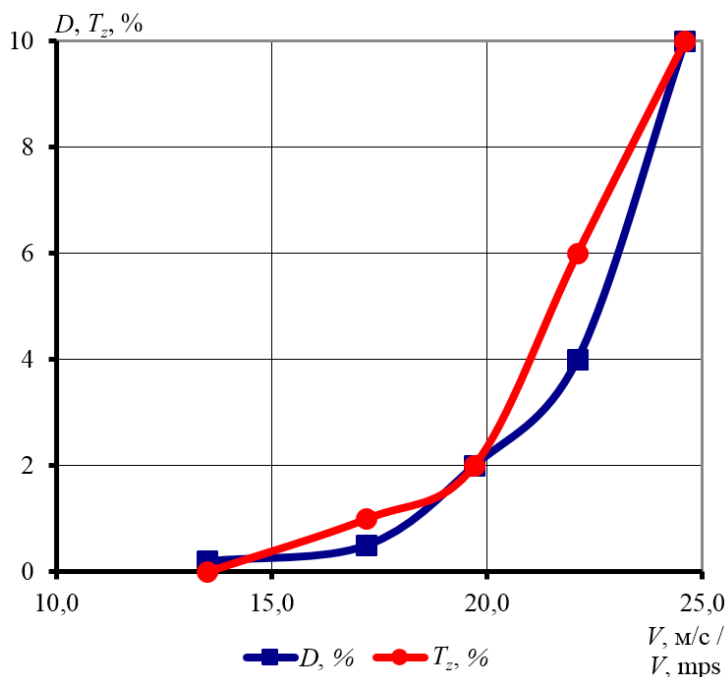
Таблица 1

Table 1

**Результаты экспериментальных исследований процесса пневматического обмолота колосьев озимой пшеницы**

**Experimental data of the pneumatic threshing process of winter wheat ears**

Частота электрической сети, Гц / Electrical network frequency, Hz	Частота вращения ротора, об/мин / Rotor speed, rpm	Линейная скорость лопасти ротора, м/с / Linear rotor blade speed, mps	Доля дробленого зерна, % (по массе) / Fraction of breakage grain, % (on weight)	Доля травмированного зерна, % (количество зерен) / Fraction of damaged grain, % (grains quantity)	
				Поврежден зародыш / Germ damage	Поврежден эндосперм / Endosperm damage
40	732	24,6	10	10	63
36	660	22,1	4	6	59
32	588	19,7	2	2	44
28	510	17,2	0,5	1	37
22	402	13,5	0,2	0	23



Р и с. 6. Зависимость доли зерна с повреждением зародыша и доли дробленого зерна от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы:

$V$  – линейная скорость лопасти ротора;  $D$  – доля дробленого зерна;

$T_z$  – доля зерна с повреждением зародыша

Fig. 6. Relationship of fraction of grain with germ damage and fraction of breakage grain in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears:  $V$  – linear rotor blade speed;

$D$  – fraction of breakage grain;  $T_z$  – fraction of grain with germ damage

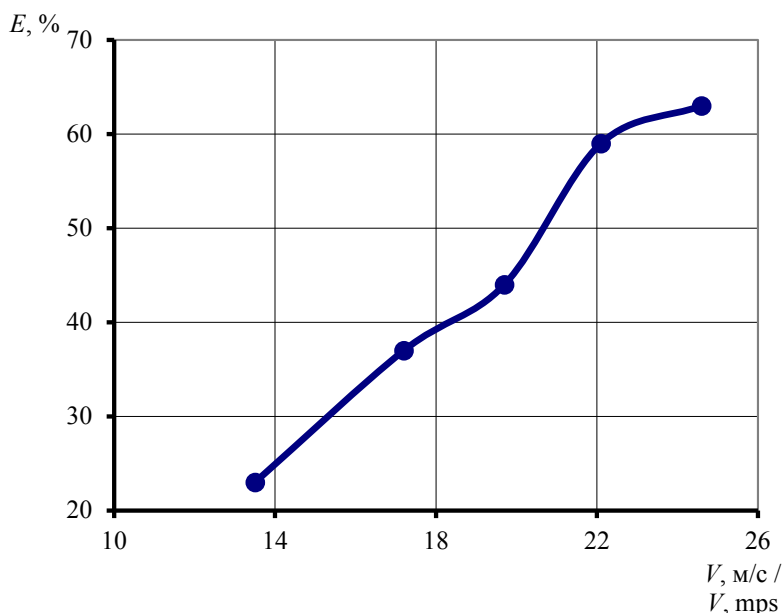
вие недостаточной величины повышенного давления воздуха, создаваемого лопастями ротора.

При пневматическом обмолоте колосьев пшеницы доля зерна с повреждением эндосперма также снижалась при уменьшении линейной скорости лопасти (рис. 7).

Минимальное значение доли зерна с повреждением эндосперма при минимальной скорости лопасти 13,5 м/с составило 23 %. В диапазоне скоростей движения лопасти 13,5...20 м/с значения доли зерна с повреждением эндосперма составили 23...45 %. Значения доли зерен с повреждением эндосперма более 30 % являются достаточно высо-

кими, поэтому рациональный диапазон линейной скорости движения лопасти следует сузить до 13,5...15 м/с.

Сравнение доли травмированного и дробленного зерна при пневматическом обмолоте с долей такого зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что исследуемый способ обмолота обеспечивает снижение травмирования зерна. В частности, доля зерна с повреждением эндосперма при исследуемом способе обмолота в среднем на 10...12 % меньше, чем при обмолоте современным зерноуборочным комбайном. Доля дробленого зерна при пневматическом обмолоте соответствует его доле после обмолота



Р и с. 7. Зависимость доли зерна с повреждением эндосперма от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы:  $E$  – доля зерна с повреждением эндосперма;  $V$  – линейная скорость лопасти ротора

F i g. 7. Relationship of a fraction of grain with endosperm damage from the line speed of the blade in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears:  $E$  – fraction of grain with endosperm damage;  $V$  – linear rotor blade speed

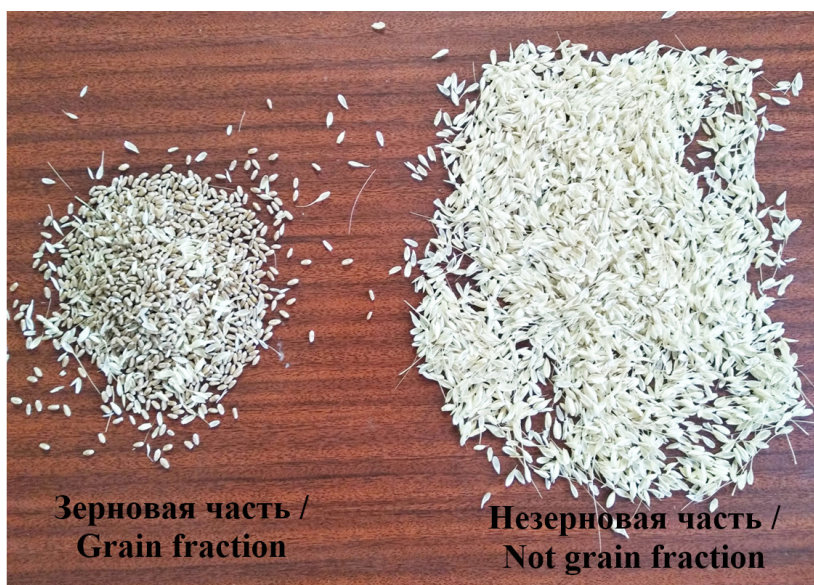
современными комбайнами. Доля зерна с повреждением зародыша в среднем на 5 % меньше, чем при обмолоте существующими молотильными устройствами комбайнов. Особенно важно то, что при минимальной скорости движения лопастей 13,5 м/с травмирования зародыша и дробления зерна практически не наблюдается. Это позволяет значительно повысить эффективность селекционного процесса за счет увеличения сохранности и всхожести ценного семенного материала.

Также установлено, что в результате пневматического обмолота на экспериментальной установке происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев, которые накапливаются в соответствующих емкостях экспериментальной молотильной установки (рис. 8).

Исследование зерна, выделенного из колосьев и собранного в соответствующую емкость экспериментальной молотильной установки, показало, что способ пневматического обмолота обеспечивает эффективное отделение легкой незерновой фракции от зерен (рис. 9).

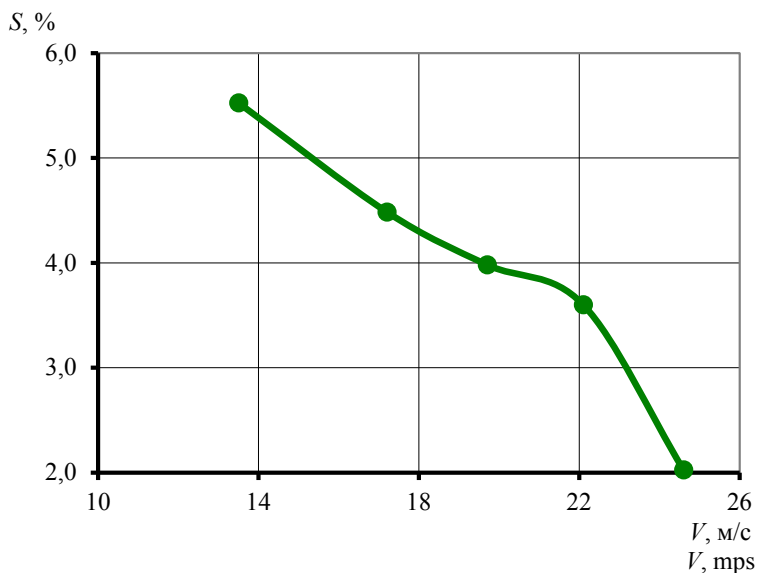
Установлено, что при уменьшении линейной скорости лопасти ротора доля неотделенных легких незерновых частиц в общей массе выделенного зерна увеличивается, достигая максимума при минимальном значении скорости 13,5 м/с. Однако достигнутые значения этого показателя в пределах 2...5,5 % являются приемлемыми для селекционных работ. Увеличение этого показателя до 5,5 % при снижении скорости лопастей компенсируется происходящим при этом значительным снижением травмирования и дробления зерна.





Р и с. 8. Разделение зерновой и незерновой частей колосьев в результате пневматического обмолота

F i g. 8. Partition of a grain and not grain fraction of ears as a result of the pneumatic threshing



Р и с. 9. Зависимость доли легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна от линейной скорости лопасти при пневматическом обмолоте колосьев озимой пшеницы:  $S$  – доля легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна;  $V$  – линейная скорость лопасти ротора

F i g. 9. Relationship of a light-load not grain fraction in lump of the selected grain on the line speed of the blade in case of the pneumatic threshing of winter wheat ears:  $S$  – light-load not grain fraction in lump of the selected grain;  $V$  – linear rotor blade speed

### Обсуждение и заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что процесс пневматического обмолота колосьев пшеницы протекает успешно и дает удовлетворительные результаты, обеспечивая снижение травмирования эндосперма зерна на 10...12 %. Травмирование же зародыша зерна снижается на 5 %, практически исключая его. Дробление зерна при минимальной скорости лопастей ротора составило не более 0,5 %.

Сопоставление доли травмированного и дробленного зерна в общем его количестве при пневматическом обмолоте с долей поврежденного зерна при традиционном комбайновом обмолоте показало, что предлагаемый способ обмолота обеспечивает снижение травмирования.

Минимальное травмирование и дробление зерна при пневматическом обмолоте наблюдалось при минимальной линейной скорости движения лопастей ротора 13,5 м/с. Рациональный диапазон линейной скорости движения лопастей ротора составляет 13,5...20 м/с. Меньшие значения скорости движения лопасти принимать нерационально, так как при этом не обеспечивается эффективное взаимодействие колоса и деки по причине недостаточной величины повышенного давления воздуха, создаваемого лопастями ротора.

Снижение травмирования достигается тем, что зерна в процессе обмолота практически не подвергаются непосредственному ударному воздействию со стороны рабочих органов молотильного устройства, в данном случае – лопастей ротора. Единичные ударные воздействия лопастей на колос и содержащиеся в нем зерна происходят в основном при поступлении колосьев в молотильную камеру до начала их установившегося движения в процессе обмолота.

Установлено, что выделение зерен из колоса в основном происходит при

контактном взаимодействии колосьев с поверхностью деки, а не в результате ударов лопастей.

Выделение зерен из колоса происходит при контактном взаимодействии колосьев с негладкой поверхностью деки под действием потока воздуха, при этом зерна подвергаются меньшему механическому воздействию, чем в традиционных молотильных устройствах с ударными рабочими органами.

Уменьшение травмирования зерна достигается также тем, что поверхности лопастей и деки изготовлены из полимерного материала, что обеспечивает снижение контактных воздействий на зерно по сравнению со стальными рабочими органами.

Однако доля зерна с повреждением эндосперма, выделенного в результате пневматического обмолота, хотя и ниже, чем при традиционном обмолоте, но все еще достаточно высока – 23 % при минимальной скорости лопасти 13,5 м/с, что требует дальнейшего совершенствования молотильного устройства для осуществления предлагаемого способа обмолота.

Установлено, что в результате пневматического обмолота на экспериментальном молотильном устройстве происходит эффективное разделение зерновой и легкой незерновой частей колосьев. Но при этом уменьшение линейной скорости лопасти, эффективное с точки зрения снижения травмирования зерна, приводит к небольшому увеличению содержания легкой незерновой фракции в общей массе выделенного зерна. В ходе дальнейшего исследования доля легкой незерновой фракции в выделенном зерне может быть минимизирована включением в состав пневматического молотильного устройства узла для дополнительного провеивания выделенного в молотильной камере зерна.

Применение разработанного способа пневматического обмолота и соответствующего молотильного устройства позволит снизить травмирование

зерна колосовых культур при обмолоте, что особенно важно при селекционных работах, так как позволит увеличить выход ценного селекционного материала. Принцип пневматического об-

молота может быть положен в основу разработки нового малотравматичного молотильного аппарата для комбайнов, убирающих зерновые только методом очеса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Shahbazi, F.** Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy / F. Shahbazi, S. Valizadeh, A. Dolwlatshah // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. – 2012. – Vol. 14, issue 4. – Pp. 150–155. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0087/755cec528440e60c45e7d4bb2d19b771fbcd.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).

2. **Пехальский, И. А.** Травмирование внутренних структур зерновок как фактор снижения продуктивности семян зерновых культур / И. А. Пехальский, В. М. Кряжков, А. А. Артюшин [и др.] // *Научный журнал КубГАУ*. – 2016. – Т. 117, № 3. – С. 783–792. URL: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/51.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

3. **Shahbazi, F.** Mechanical Damage to Corn Seeds / F. Shahbazi, R. Shahbazi. – DOI 10.2478/cerce-2018-0021 // *Cercetari Agronomice in Moldova*. – 2018. – Vol. 51, issue 3. – Pp. 1–12. URL: [https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals\\$002fcerce\\$002f51\\$002f3\\$002farticle-p1.xml](https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002fcerce$002f51$002f3$002farticle-p1.xml) (дата обращения: 14.02.2020).

4. **Benaseer, S.** Impact of Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality – a Review // S. Benaseer, P. Masilamani, A. Albert [et al.] // *Agricultural Reviews*. – 2018. – Vol. 39, issue 3. – Pp. 183–192. URL: [https://www.researchgate.net/publication/334050911\\_Impact\\_of\\_harvesting\\_and\\_threshing\\_methods\\_on\\_seed\\_quality-A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/334050911_Impact_of_harvesting_and_threshing_methods_on_seed_quality-A_review) (дата обращения: 14.02.2020).

5. **Orobinsky, V. I.** Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production / V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko, A. M. Gievsky [et al.]. – DOI 10.2991/agrosmart-18.2018.159 // *International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018)*. Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 151. – Pp. 849–852. URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/agrosmart-18/55908804> (дата обращения: 14.02.2020).

6. **Погосян, В. М.** Обмолот початков кукурузы трехвалковой молотилкой на этапе селекции / В. М. Погосян, В. С. Курасов // *World Science : материалы научно-практической конференции*. – 2016. – № 1 (5). – С. 11–13. URL: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/1321.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).

7. **Shahbazi, F.** A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage // *Journal of Agricultural Science and Technology*. – 2012. – Vol. 14. – Pp. 505–512. URL: <http://jfst.modares.ac.ir/article-23-749-en.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).

8. **Govindaraj, M.** Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties / M. Govindaraj, P. Masilamani, D. Asokan [et al.]. – DOI 10.20546/ijcmas.2017.608.281 // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 6, issue 8. – Pp. 2375–2383. URL: <https://www.ijcmas.com/abstractview.php?ID=3832&vol=6-8-2017&SNo=281> (дата обращения: 14.02.2020).

9. **Fu, J.** Review of Grain Threshing Theory and Technology / J. Fu, Z. Chen, L. Han [et al.]. – DOI 10.25165/ij.jabe.20181103.3432 // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2018. – Vol. 11, issue 3. – Pp. 12–20. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3432> (дата обращения: 14.02.2020).

10. **Ожерельев, В. Н.** Инновации процесса выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. Б. Попов // *Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого*. – 2017. – № 4. – С. 26–35. URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/18219> (дата обращения: 14.02.2020).

11. **Бахтерев, А. А.** Совершенствование процесса обмолота зерновых культур / А. А. Бахтерев, Г. А. Иовлев, А. Г. Несговоров // *Теория и практика мировой науки*. – 2017. – № 10. – С. 51–60.

12. **Sotnar, M.** Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses / M. Sotnar, J. Pospisil, J. Marecek [et al.]. – DOI 10.2478/ata-2018-0019 // *Acta Technologica Agriculturae*. – 2018. – Vol. 21, issue 3. – Pp. 105–108. URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/ata/21/3/article-p105.xml> (дата обращения: 14.02.2020).

13. Семёнов, В. А. Способ обмолота колосьев и сепарации зерна в молотильно-сепарирующем устройстве / В. А. Семёнов, Е. И. Семёнова // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2013. – № 14. – С. 123–129. URL: [http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik\\_14.pdf](http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik_14.pdf) (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
14. Бурьянов, М. А. Разработка и совершенствование методов обоснования технологии комбайновой уборки зерновых колосовых культур очесом / М. А. Бурьянов, А. И. Бурьянов, И. В. Червяков [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – Т. 2, № 38. – С. 59–72. URL: [http://achga.ru/files/vestnik/VD2\\_2017.pdf](http://achga.ru/files/vestnik/VD2_2017.pdf) (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
15. Бурьянов, А. И. Комбайновая технология уборки зерновых культур: достоинства и недостатки / А. И. Бурьянов, М. А. Бурьянов // Актуальные агросистемы. – 2017. – № 5. – С. 22–25.
16. Ожерельев, В. Н. Перспективные направления снижения энергоёмкости процесса выделения зерна из колоса / В. Н. Ожерельев, В. В. Никитин // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 8. – С. 30–31. URL: [http://www.cnsb.ru/jour/j\\_as.asp?id=113070](http://www.cnsb.ru/jour/j_as.asp?id=113070) (дата обращения: 14.02.2020).
17. Бурьянов, А. И. Методы и результаты определения естественной силы связи зерна с колосом в период созревания и полной спелости / А. И. Бурьянов, И. В. Червяков, А. А. Коляничко [и др.]. – DOI 10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25 // Зерновое хозяйство России. – 2018. – № 6. – С. 21–25. URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/551> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
18. Shahbazi, F. Simulation and Modeling the Mechanical Damage to Cowpea Seeds under Impact / F. Shahbazi, A. Dolatshah, S. Valizadeh // Post Harvest, Food and Process Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life. – Valencia : CIGR-EurAgEng, 2012. URL: [https://www.researchgate.net/publication/266167974\\_Simulation\\_and\\_Modeling\\_the\\_Mechanical\\_Damage\\_to\\_Cowpea\\_Seeds\\_Under\\_Impact](https://www.researchgate.net/publication/266167974_Simulation_and_Modeling_the_Mechanical_Damage_to_Cowpea_Seeds_Under_Impact) (дата обращения: 14.02.2020).
19. Khazaei, J. Evaluation and Modeling of Physical and Physiological Damage to Wheat Seeds under Successive Impact Loadings: Mathematical and Neural Networks Modeling / J. Khazaei, F. Shahbazi, J. Massah [et al.]. – DOI 10.2135/cropsci2007.04.0187 // Crop Science. – 2008. – Vol. 48, issue 4. – Pp. 1532–1544. URL: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2135/cropsci2007.04.0187> (дата обращения: 14.02.2020).
20. Lashgari, M. Qualitative Analysis of Wheat Grain Damage during Harvesting with John Deere Combine Harvester / M. Lashgari, M. Hossein, M. Omid [et al.] // International Journal of Agriculture and Biology. – 2008. – Vol. 10, issue 2. – Pp. 201–204. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236484261\\_Qualitative\\_Analysis\\_of\\_Wheat\\_Grain\\_Damage\\_during\\_Harvesting\\_with\\_John\\_Deere\\_Combine\\_Harvester](https://www.researchgate.net/publication/236484261_Qualitative_Analysis_of_Wheat_Grain_Damage_during_Harvesting_with_John_Deere_Combine_Harvester) (дата обращения: 14.02.2020).
21. Shahbazi, F. Breakage Susceptibility of Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy / F. Shahbazi, A. Dowlathshah, S. Valizadeh. – DOI 10.2478/v10298-012-0051-4 // Cercetari Agronomice in Moldova. – 2012. – Vol. 45, issue 3. – Pp. 5–13. URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/cerce/45/3/article-p5.xml> (дата обращения: 14.02.2020).
22. Yu, Y. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process / Y. Yu, H. Fu, J. Yu. – DOI 10.1016/j.apr.2015.07.015 // Advanced Powder Technology. – 2015. – Vol. 26, issue 5. – Pp. 1400–1409. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883115001582?via%3Dihub> (дата обращения: 14.02.2020).
23. Maertens, K. Flow Rate Based Prediction of Threshing Process in Combine Harvesters / K. Maertens, J. De Baerdemaeker // Applied Engineering in Agriculture. – 2003. – Vol. 19, issue 4. – Pp. 383–388. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=14915> (дата обращения: 14.02.2020).
24. Ma, J. An Innovative Vertical Axial-Flow Threshing Machine Developed in China / J. Ma // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2007. – Vol. 38, № 2. – Pp. 18–22.
25. Radwan, G. G. Development and Test Attachments to the Tangential Flow Thresher to Suit Caraway Crop Threshing / G. G. Radwan, R. G. Salim, A. S. Al-Ashry // Misr Journal of Agricultural Engineering. – 2009. – Vol. 26, issue 3. – Pp. 1068–1080. URL: <http://www.mjae.eg.net/pdf/2009/july/2.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
26. Semenova, E. I. Technical Modernization of Harvesting Machinery / E. I. Semenova, A. V. Bogoviz, V. A. Semenov. – DOI 10.1007/978-3-319-90835-9\_22 // Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 726. – Pp. 189–196. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90835-9\\_22](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90835-9_22) (дата обращения: 14.02.2020).



27. **Osueke, C. O.** Frictional Impact Modeling of a Cereal Thresher / C. O. Osueke // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2011. – Vol. 4, issue 3. – Pp. 405–412. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/15dc/d92eb32a41f4a16715630e212b1e6410973f.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
28. **Miu, P. I.** Mathematical Model of Material Kinematics in an Axial Threshing Unit / P. I. Miu, H.-D. Kutzbach. – DOI 10.1016/j.compag.2007.04.002 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2007. – Vol. 58, issue 2. – Pp. 93–99. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907001056> (дата обращения: 14.02.2020).
29. **Lizhang, X.** Modeling and Experiment to Threshing Unit of Stripper Combine / X. Lizhang, L. Yaoming // African Journal of Biotechnology. – 2011. – Vol. 10, issue 20. – Pp. 4106–4113. URL: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/6163E2B29675>
30. **Tang, Z.** Modeling and Design of a Combined Transverse and Axial Flow Threshing Unit for Rice Harvesters / Z. Tang, Y. Li, L. Xu [et al.]. – DOI 10.5424/sjar/2014124-6077 // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2014. – Vol. 12, issue 4. – Pp. 973–983. URL: <http://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/6077> (дата обращения: 14.02.2020).
31. **Chuan-Udom, S.** Effects of Operating Factors of an Axial Flow Rice Combine Harvester on Grain Breakage / S. Chuan-Udom, W. Chinsuwan // Songklanakarin Journal of Science and Technology. – 2011. – Vol. 33, issue 2. – Pp. 221–225. URL: <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/33-2/0125-3395-33-2-221-225.pdf> (дата обращения: 14.02.2020).
32. **Дорохов, А. С.** Теоретическое обоснование процесса получения семенного материала при его репродуктировании в хозяйствах / А. С. Дорохов, М. Н. Московский, В. Г. Хамуев // Вестник ВИАЭСХ. – 2018. – № 3. – С. 127–132. URL: [http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВИАЭСХ\\_3\\_2018\\_БЛОК\\_1-156.pdf](http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВИАЭСХ_3_2018_БЛОК_1-156.pdf) (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
33. **Kumar, A.** Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop / A. Kumar, A. Kumar, K. Khan [et al.]. – DOI 10.18782/2320-7051.2497 // International Journal of Pure & Applied Bioscience. – 2017. – Vol. 5, issue 2. – Pp. 604–611. URL: <http://www.ijpab.com/vol5-iss2a77.php> (дата обращения: 14.02.2020).
34. **Dhananchezhian, P.** Development and Comparative Study of Cast Iron Rasp Bar and Nylon Rasp Bar Threshing Cylinders for Paddy Threshing / P. Dhananchezhian, S. Parveen, N. K. S. Pandian [et al.] // Agricultural Engineering. – 2013. – № 4. – Pp. 45–54. URL: [http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT\\_04-2013.pdf](http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT_04-2013.pdf) (дата обращения: 14.02.2020).
35. **Puzauskas, E.** Substantiation of Concave Crossbar Shape for Corn Ear Threshing / E. Puzauskas, D. Steponavicius, E. Jotautiene [et al.]. – DOI 10.5755/j01.mech.22.6.16370 // Mechanics. – 2016. – Vol. 22, issue 6. – Pp. 553–561. URL: <http://mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/16370> (дата обращения: 14.02.2020).
36. **Zhao, Z.** Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester / Z. Zhao, Y. Li, J. Chen [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2011.01.016 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, issue 2. – Pp. 183–188. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169911000354?via%3Dihub#!> (дата обращения: 14.02.2020).
37. **Патент № 195355 Российская Федерация, МПК A01F 7/00(2006.01).** Молотильное устройство для селекционных работ : № 2019125549 : заявл. 12.08.2019 : опубл. 23.01.2020 / Лачуга Ю. Ф., Алабушев А. В., Пахомов В. И. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «АНЦ «Донской». – 9 с. : ил. . URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1\\_20200123.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1_20200123.pdf) (дата обращения: 14.02.2020).
38. **Патент на селекционное достижение № 9602 Российская Федерация.** Пшеница мягкая озимая Лучезар : № 66568 : заявл. 24.12.2014 ; опубл. 08.07.2018 / Скрипка О. В., Гричаникова Т. А., Самофалова Н. Е. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «АНЦ «Донской».
39. **Ионова, Е. В.** Технологическая оценка зерна сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» / Е. В. Ионова, Н. С. Кравченко, Н. Г. Игнатьева [и др.] // Зерновое хозяйство России. – 2017. – № 6. – С. 16–21. URL: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/111> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.
40. **Пехальский, И. А.** Методика определения комплексного травмирования зерна и семян машинами / И. А. Пехальский, А. А. Артюшин, В. П. Елизаров [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 120. – С. 399–411. URL: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/26.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.



41. **Пехальский, И. А.** Универсальная классификация травматических повреждений внутренних структур семян сельскохозяйственных культур / И. А. Пехальский // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – № 6. – С. 9–13. URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/download/102/58> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

42. **Пехальский, И. А.** О количественной и качественной оценке травмирования семян машинами / И. А. Пехальский, В. М. Кряжков, А. А. Артюшин [и др.] // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 119. – С. 503–512. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/36.pdf> (дата обращения: 14.02.2020). – Рез. англ.

*Поступила 06.09.2019; принята к публикации 11.11.2019; опубликована онлайн 31.03.2020*

*Об авторах:*

**Пахомов Виктор Иванович**, заместитель директора по науке по механизации и электрификации ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), доктор технических наук, Researcher ID: Y-7085-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, [vnptim@gmail.com](mailto:vnptim@gmail.com)

**Брагинцев Сергей Валерьевич**, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-6307-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, [sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru)

**Бахчевников Олег Николаевич**, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: S-3312-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

**Бенова Елена Викторовна**, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), кандидат технических наук, Researcher ID: Y-6314-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7456-3514>, [benova@km.ru](mailto:benova@km.ru)

**Рухляда Артем Игоревич**, младший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (347740, Россия, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), Researcher ID: Y-6315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, [ruhlada1990@yandex.ru](mailto:ruhlada1990@yandex.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. И. Пахомов – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; С. В. Брагинцев – общее руководство экспериментальными исследованиями, проведение критического анализа результатов и формулирование выводов; О. Н. Бахчевников – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста; Е. В. Бенова – написание введения, проведение экспериментов и обработка их результатов; А. И. Рухляда – проведение экспериментов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2012; 14(4):150-155. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/0087/755cec528440e60c45e7d4bb2d19b771fbcd.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
2. Pekhalskiy I.A., Kryazhkov V.M., Artushin A.A., et al. Traumatizing of Inside Structures of Weevils as a Factor of Reduction in Seeds' Productivity of Cereal Crops. *Nauchnyy zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*. 2016; 117(3):783-792. Available at: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/03/pdf/51.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)

3. Shahbazi F., Shahbazi R. Mechanical Damage to Corn Seeds. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2018; 51(3):1-12. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/cerce-2018-0021>
4. Benaseer S., Masilamani P., Albert A., et al. Impact of Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality – a Review. *Agricultural Reviews*. 2018; 39(3):183-192. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/334050911\\_Impact\\_of\\_harvesting\\_and\\_threshing\\_methods\\_on\\_seed\\_quality-A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/334050911_Impact_of_harvesting_and_threshing_methods_on_seed_quality-A_review) (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
5. Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Gievsky A. M., et al. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production. In: International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018). *Advances in Engineering Research*. 2018; 151:849-852. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>
6. Pogosyan V.M., Kurasov V.S. Corn Cobs Threshing With a Triple Roller Thresher at the Selection Stage. In: International Scientific and Practical Conference “World Science”. 2016; (1):11-13. Available at: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/1321.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
7. Shahbazi F. A Study on the Seed Susceptibility of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Cultivars to Impact Damage. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012; 14:505-512. Available at: <http://jfst.modares.ac.ir/article-23-749-en.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
8. Govindaraj M., Masilamani P., Asokan D., et al. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017; 6(8):2375-2383. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>
9. Fu J., Chen Z., Han L., et al. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018; 11(3):12-20. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>
10. Ozherelev V.N., Popov V.B. Innovations in the Process of Grain Separation from the Spike. *Vestnik GGTU imeni P.O. Sukhogo* = Sukhoi Gomel State Technical University Bulletin. 2017; (4):26-35. Available at: <https://elib.gstu.by/handle/220612/18219> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
11. Bakhterev A.A., Iovlev G.A., Nesgovorov A.G. Improvement of Grain Crop Threshing Process. *Teoriya i praktika mirovoy nauki* = World Science Theory and Practice. 2017; (10):51-60. (In Russ.)
12. Sotnar M., Pospisil J., Marecek J., et al. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018; 21(3):105-108. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019>
13. Semenov V.A., Semenova E.I. The Method of Thrashing of Ears and Grain Separation in a Threshing and Separating Drum. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = Russian State Agrarian Correspondence University Bulletin. 2013; (14):123-129. Available at: [http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik\\_14.pdf](http://www.rgazu.ru/upload/iblock/b65/vestnik_14.pdf) (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
14. Burianov M.A., Buryanov A.I., Chervyakov I.V., et al. Design and Improvement of Methods for Substantiating the Technology of Combine Harvesting of Grain Crops by Tow. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2017; 2(38):59-72. Available at: [http://a4raa.pf/files/vestnik/VD2\\_2017.pdf](http://a4raa.pf/files/vestnik/VD2_2017.pdf) (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
15. Buryanov A.I., Buryanov M.A. Cereal Harvesting Technology: Advantages and Disadvantages. *Aktualnye agrosistemy* = Actual Agricultural Systems. 2017; (5):22-25. (In Russ.)
16. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Prospective Directions for Reducing the Energy Intensity of Grain Separation From the Ears. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2012; (8):30-31. Available at: [http://www.cnsb.ru/jour/j\\_as.asp?id=113070](http://www.cnsb.ru/jour/j_as.asp?id=113070) (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
17. Buriyanov A.I., Chervyakov I.V., Kolinko A.A., et al. Methods and Results of Identification of Natural Interconnection of Grain and an Ear during Ripening and Complete Ripeness. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2018; (6):21-25. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-60-6-21-25>
18. Shahbazi F., Dolatshah A., Valizadeh S. Simulation and Modeling the Mechanical Damage to Cowpea Seeds under Impact. In: Post Harvest, Food and Process Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life. Valencia: CIGR-EurAgEng; 2012. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/266167974\\_Simulation\\_and\\_Modeling\\_the\\_Mechanical\\_Damage\\_to\\_Cowpea\\_Seeds\\_Under\\_Impact](https://www.researchgate.net/publication/266167974_Simulation_and_Modeling_the_Mechanical_Damage_to_Cowpea_Seeds_Under_Impact) (accessed 14.02.2020). (In Eng.)

19. Khazaei J., Shahbazi F., Massah J., et al. Evaluation and Modeling of Physical and Physiological Damage to Wheat Seeds under Successive Impact Loadings: Mathematical and Neural Networks Modeling. *Crop Science*. 2008; 48(4):1532-1544. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0187>
20. Lashgari M., Hossein M., Omid M., et al. Qualitative Analysis of Wheat Grain Damage during Harvesting with John Deere Combine Harvester. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2008; 10(2):201-204. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/236484261\\_Qualitative\\_Analysis\\_of\\_Wheat\\_Grain\\_Damage\\_during\\_Harvesting\\_with\\_John\\_Deere\\_Combine\\_Harvester](https://www.researchgate.net/publication/236484261_Qualitative_Analysis_of_Wheat_Grain_Damage_during_Harvesting_with_John_Deere_Combine_Harvester) (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
21. Shahbazi F., Dowlatshah A., Valizadeh S. Breakage Susceptibility of Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Cercetari Agronomice in Moldova*. 2012; 45(3):5-13. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2478/v10298-012-0051-4>
22. Yu Y., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process. *Advanced Powder Technology*. 2015; 26(5):1400-1409. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.07.015>
23. Maertens K., De Baerdemaeker J. Flow Rate Based Prediction of Threshing Process in Combine Harvesters. *Applied Engineering in Agriculture*. 2003; 19(4):383-388. Available at: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=14915> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
24. Ma J. An Innovative Vertical Axial-Flow Threshing Machine Developed in China. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2007; 38(2):18-22. (In Eng.)
25. Radwan G.G., Salim R.G., Al-Ashry A.S. Development and Test Attachments to the Tangential Flow Thresher to Suit Caraway Crop Threshing. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2009; 26(3):1068-1080. Available at: <http://www.mjae.eg.net/pdf/2009/july/2.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
26. Semenova E.I., Bogoviz A.V., Semenov V.A. Technical Modernization of Harvesting Machinery. In: Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017; 726:189-196. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90835-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90835-9_22)
27. Osueke C.O. Frictional Impact Modeling of a Cereal Thresher. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2011; 4(3):405-412. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/15dc/d92e-b32a41f4a16715630e212b1e6410973f.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
28. Miu P.I., Kutzbach H.-D. Mathematical Model of Material Kinematics in an Axial Threshing Unit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2007; 58(2):93-99. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.04.002>
29. Lizhang X., Yaoming L. Modeling and Experiment to Threshing Unit of Stripper Combine. *African Journal of Biotechnology*. 2011; 10(20):4106-4113. Available at: <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/6163E2B29675> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
30. Tang Z., Li Y., Xu L., et al. Modeling and Design of a Combined Transverse and Axial Flow Threshing Unit for Rice Harvesters. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2014; 12(4):973-983. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2014124-6077>
31. Chuan-Udom S., Chinsuwan W. Effects of Operating Factors of an Axial Flow Rice Combine Harvester on Grain Breakage. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2011; 33(2):221-225. Available at: <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/33-2/0125-3395-33-2-221-225.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
32. Dorokhov A.S., Moskovskiy M.N., Khamuyev V.G. Theoretical Justification of the Process of Producing Seed Material at Its Reproduction in Farms. *Vestnik VIESKh* = Bulletin of VIESKh; 2018; (3):127-132. Available at: [http://vestnik.vieskh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВНЭСХ\\_3\\_2018\\_БЛОК\\_1-156.pdf](http://vestnik.vieskh.ru/wp-content/uploads/2018/11/ВНЭСХ_3_2018_БЛОК_1-156.pdf) (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
33. Kumar A., Kumar A., Khan K., et al. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*. 2017; 5(2):604-611. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>
34. Dhananchezhian P., Parveen S., Pandian N.K.S., et al. Development and Comparative Study of Cast Iron Rasp Bar and Nylon Rasp Bar Threshing Cylinders for Paddy Threshing. *Agricultural Engineering*. 2013; (4):45-54. Available at: [http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT\\_04-2013.pdf](http://jageng.agrif.bg.ac.rs/files/casopis/PT_04-2013.pdf) (accessed 14.02.2020). (In Eng.)
35. Puzauskas E., Steponavicius D., Jotautiene E., et al. Substantiation of Concave Crossbar Shape for Corn Ear Threshing. *Mechanics*. 2016; 22(6):553-561. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5755/jol.mech.22.6.16370>

36. Zhao Z., Li Y., Chen J., et al. Grain Separation Loss Monitoring System in Combine Harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011; 76(2):183-188. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.016>
37. Threshing Device for Breeding Work: Patent 195355 Russian Federation. No. 2019125549; appl.12.08.2019; publ. 23.01.2020. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1\\_20200123.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU195355U1_20200123.pdf) (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
38. Soft Winter Wheat Luchesar: Patent 9602 Russian Federation. No. 66568; appl. 24.12.2014; publ. 08.07.2018. (In Russ.)
39. Ionova E.V., Kravchenko N.S., Ignatieva N.G., et al. Technological Assessment of Varieties and Lines of Winter Soft Wheat Developed by the FSBSI ARC "Donskoy". *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Farming of Russia. 2017; (6):16-21. Available at: <https://www.zhros.ru/jour/article/view/111> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
40. Pekhalskiy I.A., Artushin A.A., Elizarov V.P., et al. Methods of Definition of Complex Machine Grains' and Seeds' Traumatizing. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2016; 120:399-411. Available at: <http://www.ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/26.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
41. Pekhalskiy I.A. Universal Classification of Traumatic Damages of Internal Structures of Crops Seeds. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tehnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2015; (6):9-13. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/download/102/58> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)
42. Pekhalskiy I.A., Kryazhkov V.M., Artushin A.A., et al. Quantitative and Qualitive Assessment of Seeds Traumatizing While Using Machines. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2016; 119:503-512. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/05/pdf/36.pdf> (accessed 14.02.2020). (In Russ.)

*Received 06.09.2019; revised 11.11.2019; published online 31.03.2020*

#### *About the authors:*

**Viktor I. Pakhomov**, Vice Director for Science for Mechanization and Electrification, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: Y-7085-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, [vnptim@gmail.com](mailto:vnptim@gmail.com)

**Sergey V. Braginets**, Leading Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-6307-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, [sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru)

**Oleg N. Bakhchevnikov**, Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: S-3312-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)

**Elena V. Benova**, Senior Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: Y-6314-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7456-3514>, [benova@km.ru](mailto:benova@km.ru)

**Artem I. Rukhlyada**, Junior Researcher of Plant Production Processing Department, Agricultural Research Center "Donskoy" (3 Nauchnyy Gorodok St., Zernograd 347740, Russia), Researcher ID: Y-6315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2597-0818>, [ruhlada1990@yandex.ru](mailto:ruhlada1990@yandex.ru)

#### *Contribution of the authors:*

V. I. Pakhomov – scientific leadership, formulation of the study basic concept; S. V. Braginets – general management of the experimental studies, critical analysis of results and formulation of conclusions; O. N. Bakhchevnikov – analysis of literary data, writing the draft and finishing the article; E. V. Benova – writing introduction, experimental research and processing their results; A. I. Rukhlyada – experimental research.

*All authors have read and approved the final manuscript.*