

## ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

EDN: <https://elibrary.ru/bifsat>

УДК / UDK 631.362.3

*Оригинальная статья / Original article*

### Экспериментальное исследование процесса предварительного выделения легких компонентов очесанного вороха

**В. Ю. Савин**<sup>1</sup>✉, **В. Н. Ожерельев**<sup>2</sup>,  
**В. В. Никитин**<sup>2</sup>, **И. П. Адылин**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Брянский государственный аграрный университет,  
с. Кокино, Российская Федерация

✉ [savinvu@bmstu.ru](mailto:savinvu@bmstu.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Повышение производительности зерноуборочного комбайна при сохранении его приемлемой металло- и энергоемкости представляет собой одну из ключевых проблем в области развития зерноуборочной техники. Традиционные решения малоэффективны, поэтому одним из перспективных направлений является использование технологии очеса растений на корню.

**Цель исследования.** Определить долю выделенных легких компонентов вороха в зависимости от высоты выходного канала очесывающей жатки.

**Материалы и методы.** При исследовании очесывающей жатки с предварительным выделением мелкого вороха использован экспериментальный метод. В ходе эксперимента варьировалась высота выходного канала очесывающей жатки. Определены масса выделенного вороха и его состав. В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости, соответствующие цели исследования. Эксперимент проводился при разных условиях: с установленными сплошными щитками на задней стенке очесывающего устройства и без сплошных щитков, когда задняя стенка представляет собой сетчатую поверхность.

**Результаты исследования.** Разработана методика определения доли выделенных легких частиц. Получены зависимости доли выделенных легких компонентов и доли вынесенного зерна от высоты выходного канала. Определена зона оптимальных значений высоты выходного канала при демонтированных закрытых щитках на задней стенке очесывающего устройства. В диапазоне высоты выходного канала от 124 до 130 мм доля выделенных легких компонентов достигает 13 % при том, что потери зерна остаются на достаточно небольшом уровне.

**Обсуждение и заключения.** В рамках выделения легких компонентов вороха получен значимый результат, позволяющий не только разгрузить систему очистки зерноуборочного комбайна и повысить ее производительность, но и улучшить

© Савин В. Ю., Ожерельев В. Н., Никитин В. В., Адылин И. П., 2025



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

эффективность выделения свободного зерна на предбарабанном сепарирующем устройстве либо непосредственно на решетчатом днище наклонной камеры.

*Ключевые слова:* зерноуборочный комбайн, очесывающий адаптер, очесывающий барабан, очесанный ворох, сепарация легких примесей

*Благодарности:* авторы выражают признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Для цитирования:* Савин В.Ю., Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Адылин И.П. Экспериментальное исследование процесса предварительного выделения легких компонентов очесанного вороха. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):641–657. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

## Experimental Study of the Process of Preliminary Separation of Light Impurities from Combed Heap

V. Yu. Savin<sup>a</sup> ✉, V. N. Ozherelev<sup>b</sup>, V. V. Nikitin<sup>b</sup>, I. P. Adylin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Bauman Moscow State Technical University,*

*Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Bryansk State Agrarian University,*

*Kokino, Russian Federation*

✉ [savinvu@bmstu.ru](mailto:savinvu@bmstu.ru)

### Abstract

**Introduction.** There are specified and considered the trends determining the directions for the development of grain harvesting equipment. One of the most important issues is increasing the productivity of a grain harvester while maintaining its acceptable metal content and energy consumption. Traditional solutions have largely exhausted themselves, so a promising solution is the use of the technology for combing of standing plants.

**Aim of the Study.** The study is aimed at determining the proportion of light impurities separated from the grain heap depending on the height of the combing header outlet.

**Materials and Methods.** There was used an experimental method to examine a combing header with preliminary separation of light impurities. During the experiment, the height of the stripper header outlet was varied. The mass of the separated chaff and its composition were determined. When processing the experimental data, there were obtained relationships meeting the study objectives. The results are divided into two groups: the results with the use of solid shields installed on the combing header rear wall and those without solid shields, when the rear wall is a mesh surface.

**Results.** There has been developed a method for determining the proportion of separated light impurities. There have been found the dependences of the proportion of separated light impurities and the proportion of lost grain on the combing header outlet height. There has been identified an optimal range of the combing header outlet height if the solid shields removed from the combing header rear wall. If the range of combing header outlet height is from 124 to 130 mm, the proportion of separated light impurities reaches 13%, while grain losses remain relatively low.

**Discussion and Conclusion.** In the context of separating the heap light impurities, there has been obtained a significant result, which allows not only unloading significantly the grain harvester cleaning system and increasing its productivity, but also improving the efficiency of separating grain on the pre-drum separating device or directly on the grate bottom of the inclined chamber.

*Keywords:* combine harvester, combing header, rotary comb-dresser, combed heap, separation of light impurities

*Acknowledgements:* The authors express their gratitude to anonymous reviewers, whose objective comments contributed to improving the quality of the article.

*Conflict of interest:* The authors declare that there is no conflict of interest.

*For citation:* Savin V.Yu., Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Adylin I.P. Experimental Study of the Process of Preliminary Separation of Light Impurities from Combed Heap. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):641–657. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.641-657>

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие зерноуборочной техники связано с решением ключевых задач, среди которых повышение производительности [1; 2], сокращение потерь и повреждений зерна, а также снижение металлоемкости машин и энергоемкости технологического процесса [3–5].

Важным аспектом, определяющим направления развития зернового хозяйства, является увеличение урожайности зерновых культур [6–8]. Исследования самарских ученых показали, что использование инновационной технологии внесения карбамидно-аммиачной смеси с добавлением микроэлемента серы позволило улучшить показатели урожайности озимой пшеницы сорта Базис до 51,8 % [9].

Зарубежные исследователи в качестве значимого фактора указывают нехватку рабочей силы в сельскохозяйственной отрасли [10–12].

Работа зерноуборочного комбайна традиционной компоновки на верхней границе рабочей скорости часто приводит к перегрузке системы очистки и, следовательно, к повышению потерь зерна [13].

Указанные тенденции, а также недостаточное количество зерноуборочной техники в нашей стране [14–16] ставят на первый план проблему повышения производительности зерноуборочного комбайна при сохранении его приемлемой металло- и энергоемкости. Традиционные решения не всегда эффективны. Так, при увеличении ширины молотильного аппарата непропорционально возрастает масса комбайна. Двухбарабанные системы обмолота имеют высокую металло- и энергоемкость. Использование барабана-ускорителя сопряжено с риском повышения травмирования зерна.

Одним из перспективных решений является применение технологии очеса растений на корню, реализация которой возможна как на новых зерноуборочных машинах, так и на уже существующем парке комбайнов. Модернизация существующих комбайнов позволяет перевести их на новый уровень производительности. Кроме этого, уборка методом очеса способствует восстановлению почвенного плодородия и улучшению процессов влагозадержания в почве [17; 18].

Использование жатки очесывающего типа на зерноуборочном комбайне не в полной мере позволяет раскрыть все преимущества технологии очеса растений. Наличие значительного количества свободного зерна и мелкого вороха, полученных в процессе очеса, может приводить к некоторым негативным последствиям:

направляемое в молотильный аппарат свободное зерно подвергается избыточному механическому воздействию, вследствие чего увеличивается его травмирование и растут энергозатраты. Производительность системы очистки зерноуборочного комбайна зависит от поступающего на нее объема мелкого вороха, образующегося при работе очесывающего устройства. Таким образом, первоочередными становятся следующие задачи: предварительное выделение из очесанного вороха свободного зерна и направление его на очистку, минуя молотильное устройство, с одновременным удалением из него как можно большей части мелкой фракции.

Гипотеза исследования заключается в том, что предварительное удаление максимально возможной доли мелкой фракции вороха способствует увеличению скорости сепарации свободного зерна за счет снижения забиваемости решетчатых поверхностей и уменьшения общего объема обрабатываемого материала. Выявлена вторая причина для предварительного удаления из очесанного вороха мелких примесей, поскольку уменьшение в нем массовой доли свободного зерна снижает проход последнего сквозь отверстия решетчатой поверхности на 15 %. Следовательно, положительный эффект от уменьшения содержания в ворохе легкой фракции отчасти проявляется еще до его поступления в систему очистки комбайна.

Цель исследования – определение влияния высоты выходного канала очесывающей жатки на эффективность выделения легких компонентов (половы) из очесанного вороха и на величину потерь зерна.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) адаптировать конструктивную схему лабораторной установки к конструкции жатки «Озон»;
- 2) оценить долю выделенного мелкого вороха при различных регулировочных параметрах оборудования;
- 3) выявить долю свободного зерна, выносимого из корпуса жатки вместе с мелким ворохом.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Свободное зерно и мелкие фракции обладают разными физико-механическими свойствами, поэтому удалять их из очесанного вороха следует посредством двух различных технологических процессов. Зерно остается в технологическом потоке комбайна, а мелкие фракции вороха должны быть выведены во внешнюю среду. Проанализируем возможные варианты конструктивного исполнения предложенной технологической идеи.

Систематизация конструкций сепарирующих устройств, позволяющих произвести предварительное выделение свободного зерна до попадания очесанной массы в молотильное устройство, а также теоретическое обоснование процесса представлены учеными из Брянского государственного аграрного университета [19; 20]. Ими выделены две группы технических решений: сепарация происходит внутри наклонной камеры, сепарирующие органы расположены перед молотильным аппаратом. Наиболее предпочтительным решением является использование в качестве основного элемента сепарирующей системы решетчатого

днища наклонной камеры комбайна, что обусловлено прежде всего отсутствием необходимости перекомпоновки комбайна и возможностью унификации деталей и узлов.

Также проведен анализ влияния угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха [21]. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, проведенных на установке, созданной на основе колосового элеватора зерноуборочного комбайна, снабженного набором сменных экспериментальных решет. В связи с этим установлено, что максимальная пропускная способность устройства соответствует горизонтальному положению решетчатого днища и отверстиям шириной 12 мм. Предложены компоновочные решения по установке сепарирующего устройства на зерноуборочный комбайн.

Концепция предварительного отделения легких примесей представлена в авторском свидетельстве специалистов Мелитопольского института сельского хозяйства<sup>1</sup>. Для предварительного частичного вывода легких примесей можно использовать установленную в задней части очесывающего устройства сетчатую поверхность. При этом данная концепция не лишена недостатков: сетчатая поверхность подвержена забиванию, а увеличение крупности сетки приведет к потерям зерна.

Конструкция очесывающей жатки с предварительным отделением легких примесей предложена брянскими учеными [22]. Для этого предполагается использовать жалюзийную решетку, установленную на задней стенке очесывающего адаптера. Данная решетка образована продольными пластинами криволинейной формы, сориентированными вогнутостью в сторону задней стенки адаптера. Воздушный поток, проходя через отверстия жалюзийной решетки, должен менять направление и выносить легкие примеси наружу из корпуса адаптера.

Представлены результаты экспериментальных исследований по отделению легких примесей, произведенных с использованием модели пневмоочистительного устройства, имитирующего процесс движения воздуха и очесанного вороха внутри корпуса адаптера [23]. Установлено, что удаление из очесанного вороха большей части легких компонентов возможно без потери зерна. Выявлены оптимальные диапазоны варьирования факторов, определяющих процесс сепарации. Оптимальная скорость воздушного потока на выходе из выгрузного патрубка составила 6...6,5 м/с.

Возможны два варианта удаления мелкой фракции вороха непосредственно из корпуса очесывающего адаптера. В первом случае процесс предполагается осуществлять посредством жалюзийной решетки, во втором – за счет перепада скоростей воздушного потока вследствие резкого изменения поперечного сечения воздушных каналов [22; 23]. Второй вариант конструкции показал свою работоспособность при его испытании в виде лабораторной модели, выполненной в масштабе 1:4.

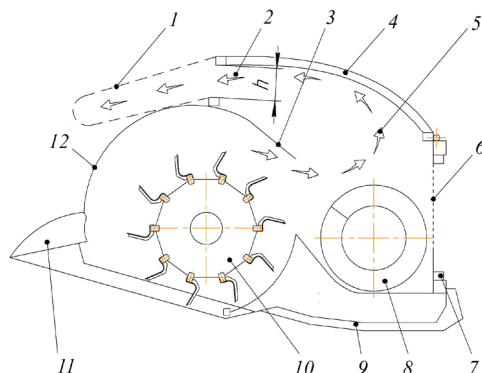
<sup>1</sup> Голубев И.К., Кончаров Б.И. Устройство для обмолота сельскохозяйственных культур на корню. Патент 1547758 СССР. 7 марта 1990. URL: <https://patents.su/2-1547758-ustrojstvo-dlya-obmolota-selskokhozyajstvennykh-kultur-na-kornyu.html> (дата обращения: 23.02.2025).

В рамках данного исследования решена задача по определению взаимосвязей ключевых параметров: высоты выходного канала очесывающей жатки с одной стороны, и долей легких компонентов вороха и вынесенного зерна — с другой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Методы, оборудование и процедура исследования

Очесывающая жатка «Озон» была соответствующим образом модернизирована для достижения цели исследования (рис. 1). У одной из трех ее секций сетчатая стенка 6 была заменена на сплошную. При этом между обтекатель 12 и крышкой 4 осталась продольная щель для выхода воздуха и захваченного им мелкого вороха, ширина которой  $h$  могла регулироваться посредством цилиндрических шарниров крепления крышек 4 к корпусу 7 и кронштейнов с отверстиями. Для улавливания мелкого вороха по контуру щели закрепляли мягкий сетчатый контейнер (мешок) 1. Генерируемый очесывающим рабочим органом 10 воздушный поток, миновав внутренний щиток 3 над шнеком 8, оказался в радикально расширившемся воздушном канале, вследствие чего потерял скорость и тяжелые компоненты, в том числе свободное зерно, которое шнек 8 подавал в наклонную камеру вместе с недомолоченными колосьями и кусками соломы. Задняя стенка корпуса жатки комбинированная. Часть ее поверхности затянута сеткой 6, которая может быть перекрыта сплошным щитком. Таким образом, параметры воздушного потока можно дополнительно регулировать.



Р и с. 1. Схема экспериментальной очесывающей жатки с предварительным выделением мелкого вороха:

- 1 – мягкий сетчатый контейнер (мешок); 2 – выходной воздушный канал;  
3 – внутренний щиток; 4 – крышка; 5 – легкие примеси; 6 – задняя сетчатая стенка;  
7 – корпус; 8 – шнек; 9 – лыжа; 10 – очесывающий рабочий орган;  
11 – отсекающий щиток; 12 – обтекатель

F i g. 1. The scheme of an experimental combing header with preliminary separation of light impurities:

- 1 – mesh bag; 2 – air outlet duct; 3 – inner shield; 4 – cover; 5 – light impurities;  
6 – rear mesh wall; 7 – frame; 8 – screw; 9 – ski; 10 – combing drum;  
11 – baffle; 12 – fairing

Примечание:  $h$  – высота выходного окна.

Note:  $h$  – height of the outlet channel.

Источник: рисунки 1, 4, 5 составлены авторами статьи.

Source: figures 1, 4, 5 are compiled by the authors of the article.



Экспериментальная очесывающая жатка агрегатировалась с комбайном СК-5МЭ-1 «НИВА-ЭФФЕКТ» (рис. 2). Испытания проводились на полях учебно-опытного хозяйства Брянского государственного аграрного университета при уборке пшеницы сорта Злата. Пшеница данного сорта относится к мягким яровым среднеранним пшеницам [24]. Условия уборки – типичные для Центрально-Нечерноземной зоны. Средняя высота стеблестоя составила 91 см. Влажность зерна была на уровне 20,5 %. Урожайность пшеницы – 32 ц/га.



Р и с. 2. Экспериментальная очесывающая жатка

F i g. 2. Experimental combing header

*Источник:* фотография сделана В. Ю. Савиным на территории Брянского государственного аграрного университета (09.08.2024 г.).

*Source:* photo are taken by V. Yu. Savin on the territory Bryansk State Agrarian University on 09 August 2024.

Площадь поперечного сечения выходного воздушного канала регулировалась. Для этого были изготовлены кронштейны (рис. 3), в которых с одинаковым шагом просверлены крепежные отверстия. Высота поперечного сечения выходного канала устанавливалась посредством фиксации держателя крышки в соответствующем отверстии кронштейна.

Для приема выделенного очесанного вороха изготовлена и смонтирована система его улавливания, состоящая из мягкого сетчатого контейнера (мешка), крепежной пластины и уголка. Сетчатый контейнер (мешок) изготовлен из прочного стекловолоконного материала. Величина отверстий в сетке порядка 1 мм, что исключало потерю как свободного зерна, так и других компонентов вороха. Боковины основного воздушного канала были закрыты плотной полипропиленовой тканью.

Программа экспериментальных исследований предусматривала установление зависимости состава и массы выделенного вороха от высоты выходного воздушного канала, а также определение потерь зерна, обусловленных возможным выбросом части зерна за пределы жатки через выходной воздушный канал.



Р и с. 3. Кронштейн для крепления и регулировки положения верхней крышки  
F i g. 3. Bracket for fixing and adjusting the position of the top cover

*Источник:* фотография сделана В. Ю. Савиным на территории Брянского государственного аграрного университета (09.08.2024 г.).

*Source:* photo are taken by V. Yu. Savin on the territory Bryansk State Agrarian University on 09 August 2024.

На этапе, предшествующем планированию эксперимента, выполнены установочные опыты, позволившие выявить влияние скорости движения зерноуборочного комбайна на состав и массу выделенного вороха.

Методика проведения эксперимента предусматривала следующую последовательность операций: предварительную общую регулировку зерноуборочного комбайна и очесывающей жатки, регулировку контролируемых параметров, контрольный проход комбайна, сбор выделенной очесанной массы и ее сортировка, взвешивание фракций, обработку полученных результатов.

В рамках предварительной настройки техники были отрегулированы положение обтекателя относительно стеблестоя и частота вращения очесывающего рабочего органа (барабана). Во всех опытах обтекатель установлен в крайнее нижнее положение. Частота вращения очесывающего барабана составляла 580 об/мин и регулировалась переключением передачи редуктора адаптера.

Перед каждым контрольным проходом высота выходного канала регулировалась поворотом крышки и фиксировалась специальными кронштейнами, расположенными по обе стороны от нее. Экспериментальные исследования проводили, устанавливая верхнюю крышку в три положения, которым соответствуют значения высоты выходного канала, равные 88, 124 и 160 мм.

Длина учетной делянки определялась рулеткой. Во время испытаний контролировалось соблюдение рабочей скорости комбайна, равной 8 км/ч.

Очесанную массу собирали после каждого прохода путем отсоединения сетчатого мешка от корпуса жатки и перемещения его содержимого в емкость, отдельную для каждого варианта опыта.



Полученную таким образом массу сортировали в лаборатории с разделением на две фракции: мелкие примеси и свободное зерно. Сортировка и разделение выполнялись вручную на специальном столе. В очесанных колосьях, попавших в сетчатый мешок, зерна не обнаружено. Для измерения массы выделенных компонентов использовались весы лабораторные с дискретностью 0,1 г.

Эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе задняя стенка адаптера была оборудована стандартными сетчатыми панелями (окнами), которые в обычном исполнении жатки являются элементами воздушного канала, необходимого для обеспечения направленности и вывода образующегося воздушного потока.

Второй этап предусматривал закрытие сетчатых окон сплошными панелями. Предполагалось, что закрытие заводской конструкцией сетчатого окна для выхода через него воздушного потока перенаправит последний в выходной канал 2 (рис. 1). Вследствие этого повысится расход воздуха и скорость воздушного потока в выходном канале, что приведет к увеличению вывода половины из корпуса очесывающего адаптера. Также необходимо учесть, что при приближении скорости воздушного потока к значениям, близким к скорости витания зерна [25; 26], существует вероятность увеличения его потерь, связанная с выбросом части зерновок вместе с мелким ворохом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены результаты эксперимента, сгруппированные по типу задней стенки: со сплошными щитками и с сетчатой поверхностью.

Т а б л и ц а 1

Table 1

**Массы выделенных легких компонентов вороха и вынесенного зерна**  
**Weight of separated light impurities and carried-out grain**

Высота выходного окна $h$ , мм / Height of the outlet channel $h$ , mm	Масса легких компонентов вороха, г / Weight of light impurities, g	Масса зерна, г / Grain weight, g
<i>Со щитками / With shields</i>		
88	136	13
124	129	18
160	251	22
<i>Без щитков / Without shields</i>		
124	182	15
160	318	27

В рамках статистической обработки результатов эксперимента была проведена проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена<sup>2</sup>. Дисперсии признаны однородными.

В первую очередь, необходимо определить доли выделенной половины и вынесенного зерна, чтобы выполнить общий анализ результатов опытов.

<sup>2</sup> Рогов В.А., Позняк Г.Г. Методика и практика технических экспериментов. М.: Издательский центр «Академия»; 2005. 288 с.

Для определения доли выделенных легких компонентов вороха  $\mu$  использовано следующее выражение:

$$\mu = \frac{W_1}{W} \cdot 100 \%,$$

где  $W$  – общая масса легких компонентов во всем объеме очесанного вороха, полученного за проход комбайна, г;  $W_1$  – масса легких компонентов, выделенных за проход комбайна в процессе предварительной сепарации очесанного вороха, г. Общую массу легких компонентов вороха  $W$  определяли следующим образом:

$$W = 1000M \cdot \frac{\delta}{100} = 10M\delta,$$

где  $M$  – общая масса зерносоломистого вороха, полученного за проход в процессе очеса, кг;  $\delta$  – среднее содержание легких компонентов в очесанном ворохе, %.

Проанализировав результаты исследований по установлению содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы [27], приняли значение содержания легких компонентов в очесанном ворохе при обработке результатов экспериментальных исследований  $\delta = 10 \%$ .

Общая масса  $M$  зерносоломистого вороха, убранный за проход, составила:

$$M = 100Y(1 + k_c)S,$$

где  $Y$  – урожайность пшеницы, ц/га;  $S$  – площадь делянки, убранной за один прогон, га;  $k_c$  – коэффициент, учитывающий соотношение массы зерна и солоmistых частиц в очесанном ворохе. При соотношении массы зерна  $M_z$  и солоmistых частиц  $M_c$  в очесанном ворохе 1:0,3 [28], коэффициент составил  $k_c = 0,3$ .

Для определения доли вынесенного зерна использовано выражение:

$$\gamma = \frac{Q_1}{Y \cdot S \cdot 10^5} \cdot 100 \%,$$

где  $Q_1$  – масса вынесенного зерна, г. Результаты обработки экспериментальных данных по определению доли выделенных легких компонентов в зависимости от высоты выходного канала представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

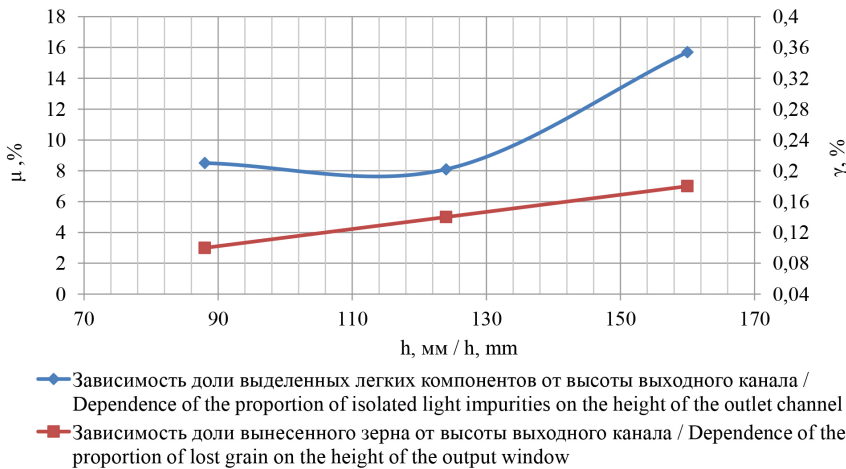
T a b l e 2

Доли выделенных легких компонентов и потери зерна  
The proportion of separated light impurities and grain losses

Высота выходного окна $h$ , мм / Height of the outlet channel $h$ , mm	Доля выделенных легких компонентов вороха, $\mu$ , % / Proportion of isolated light impurities, $\mu$ , %	Доля вынесенного зерна $\gamma$ , % / Proportion of lost grain $\gamma$ , %
<i>Со щитками / With shields</i>		
88	8,5	0,10
124	8,1	0,14
160	15,7	0,18
<i>Без щитков / Without shields</i>		
124	11,4	0,12
160	19,9	0,22

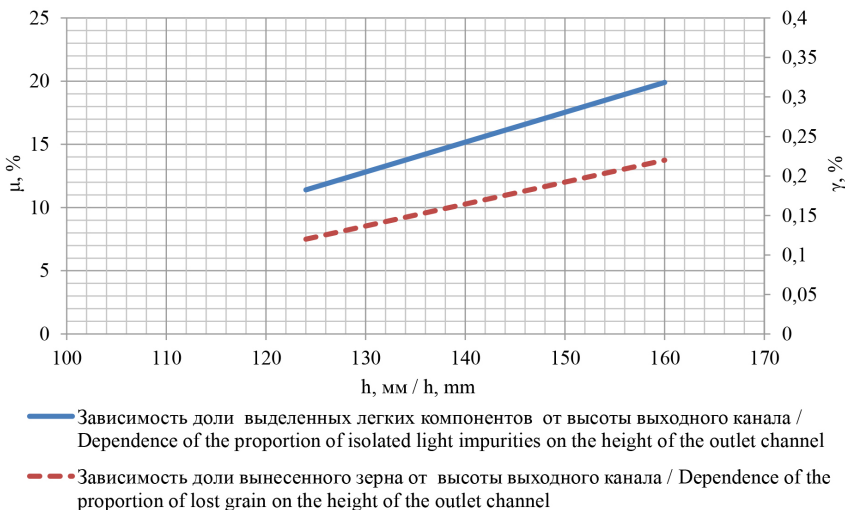
Графическая зависимость доли выделенных легких компонентов от высоты выходного канала при закрытых щитках сетчатых окнах представлена на рисунке 4. Здесь же нанесена кривая зависимости доли вынесенного зерна  $\gamma$  от высоты выходного канала  $h$ .

Аналогичные графические зависимости, но при проведении экспериментальных исследований при открытых сетчатых окнах (при демонтированных сплошных щитках), показаны на рисунке 5.



Р и с. 4. Результаты экспериментальных исследований, полученные при закрытии сетчатых окон в корпусе адаптера сплошными щитками

F i g. 4. Results of experimental studies obtained by closing the mesh windows in the adapter body with solid shields



Р и с. 5. Результаты экспериментальных исследований, полученные при демонтаже щитков, закрывающих сетчатые окна в корпусе адаптера

F i g. 5. Results of experimental studies obtained if removed the shields covering mesh windows in the adapter case

Представленные на рисунках 4, 5 совмещенные графики позволяют выделить рабочие диапазоны высоты выходного воздушного канала при открытых сетчатых окнах и в случае их закрытия сплошными щитками.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью исследований определены доли выделенных легких компонентов вороха относительно высоты выходного канала очесывающей жатки.

Анализируя результаты, полученные при закрытии сетчатых окон, целесообразно выделить значение высоты выходного канала  $h = 88$  мм. Данному размеру соответствуют минимальные потери зерна  $\gamma = 0,1$  % и доля выделенных компонентов мелкого вороха, равная  $\mu = 8,5$  %. Увеличение высоты выходного канала до 160 мм приводит к значительному повышению доли выделенных легких компонентов (до 16 %), при этом заметно растут и потери зерна.

В случае использования открытых сетчатых окон в задней стенке корпуса адаптера картина процесса существенно различается. В диапазоне высоты выходного воздушного канала от 124 до 130 мм доля выделенных легких компонентов достигает 13 % при том, что потери зерна остаются на достаточно небольшом уровне (до 0,13 %). Это объясняется уменьшением расхода и скорости воздуха в выходном воздушном канале вследствие открытия дополнительного канала выхода воздушного потока через сетчатые окна задней стенки корпуса адаптера.

Доля выделенных легких компонентов равная 13 % – это значимый результат, позволяющий повысить производительность и заметно разгрузить систему очистки зерноуборочного комбайна, что в итоге приведет к повышению производительности зерноуборочного комбайна с очесывающей жаткой. Кроме того, удаление части легких компонентов вороха позволит улучшить эффективность выделения свободного зерна на предбарабанном сепарирующем устройстве либо непосредственно на решетчатом днище наклонной камеры.

В рамках дальнейшего развития рассмотренной темы целесообразно выявить и испытать дополнительные конструктивные элементы (решения), препятствующие процессу выноса воздушным потоком части свободного зерна, доля которого не велика, и для ее дальнейшего радикального уменьшения имеются резервы. Это позволит ориентироваться на предварительное выделение в корпусе адаптера до 20 % легких примесей при исчезающе малом количестве вынесенного воздушным потоком зерна, практически не оказывающим влияние на его общие потери за комбайном.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чепик Д.А., Колесников А.В. Проблемы материально-технического обеспечения растениеводства. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2022;(4):24–31. <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-24-31>
2. Сорокина Т.И. Анализ состояния и пути совершенствования использования тракторного парка, зерноуборочной и кормоуборочной техники агропредприятия. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;(3):170–176. URL: <https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia95.pdf> (дата обращения: 22.02.2025).
3. Tomchuk V. Loss Management When Harvesting Grain, Legume and Oilseed Crops. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020;50(1):54–67. <https://elibrary.ru/vaqqxe>

4. Mladin F., Văcărescu G., Duma Copcea A., Mihutstudies C. On the Harvesting of Grassy Cereals Within the S.C. Farm. Andreas Agro Brikets S.R.L. from the Town of Bobda, Timiș County. *Research Journal of Agricultural Science*. 2023;55(4):114–120. URL: [https://www.rjas.ro/paper\\_detail/3750](https://www.rjas.ro/paper_detail/3750) (дата обращения: 21.02.2025).
5. Xu L., Li Y., Li Y., Chai X., Qiu J. Research Progress on Cleaning Technology and Device of Grain Combine Harvester. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019;50(10):1–16. URL: <http://nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/880> (дата обращения: 21.02.2025).
6. Пашканг Н.Н., Мартынушкин А.Б., Романова Л.В., Стоян М.В. Состояние зернового хозяйства в Рязанской области: основные проблемы и пути их решения. *Социально-экономический и гуманитарный журнал*. 2022;(2):35–50. <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-2-35-50>
7. Сорокин И.А., Некипелов Р.Е. Оценка возможности модернизации сельскохозяйственной техники путем отслеживания качества процесса сбора урожая зерновых культур. *Вестник НГИЭИ*. 2024;(7):41–56. URL: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2321](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2321) (дата обращения: 21.02.2025).
8. Guarin J.R., Martre P., Ewert F., Webber H., Dueri S., Calderini D., и др. Evidence for Increasing Global Wheat Yield Potential. *Environmental Research Letters* 2022;17:124045. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca77c>
9. Милоткин В.А., Овчинников В.А. Повышение урожайности и качества зерна озимой пшеницы за счет применения инновационных удобрений и сельхозмашин. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(1):52–67. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
10. Hossain M.A., Hoque M.A., Wohab M.A., Miah M.A.M., Hassan M.S. Technical and Economic Performance of Combined Harvester in Farmers Field. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*. 2015;40(2):291–304. <https://doi.org/10.3329/bjar.v40i2.24569>
11. Esgici R., Sessiz A., Bayhan Y. The Relationship between the Age of Combine Harvester and Grain Losses for Paddy. *International Scientific Journals*. 2016;62(1):18–21. URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2016/1/18> (дата обращения: 21.02.2025).
12. Zhang Z., Noguchi N., Ishii K., Yang L., Zhang C. Development of a Robot Combine Harvester for Wheat and Paddy Harvesting. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(4):45–48. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00013>
13. Tihanov G., Dalle M., Hristova G., Mitkov I. Loss of Grain at Harvesting Wheat with a Combine Harvester. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1):577–582. URL: [https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue\\_1/Art76.pdf](https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_1/Art76.pdf) (дата обращения: 22.02.2025).
14. Зюкин Д.А., Петрушина О.В., Глушков И.А., Руденко С.Р. Снижение технической оснащенности как угроза роста потерь и снижения эффективности в зерновом подкомплексе АПК. *Вестник НГИЭИ*. 2024;(8):84–95. URL: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2326](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2326) (дата обращения: 22.02.2025).
15. Хафизов Д.Ф., Валиев А.Р., Мухаметгалиев Ф.Н., Хисматуллин М.М., Мингазов А.И. Развитие материально-технической базы агропромышленного комплекса в условиях внешне-экономических санкций. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2023;18(4):170–177. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-170-177>
16. Шамин А.Е., Заикин В.П., Лисина А.Ю. Производство зерна в России: достижения, существующие и возможные проблемы. *Вестник НГИЭИ*. 2022;(3):110–121. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-3-110-121>
17. Naorem A., Jayaraman S., Dang Y.P., Dalal R.C., Rao C.S., Patra A.K. Soil Constraints in an Arid Environment – Challenges, Prospects, and Implications. *Agronomy*. 2023;13(1):220. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>
18. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalsiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. URL: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=202002246521566465](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465) (дата обращения: 22.02.2025).

19. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Сопоставление эффективности различных типов сепарирующих устройств при очесе зерна на корню. *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2024;(1):176–182. <https://elibrary.ru/uxuoxf>
20. Ожерельев В.Н., Никитин В.В., Комогорцев В.Ф., Синяя Н.В. К обоснованию способа предварительной сепарации свободного зерна при очесе растений на корню. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):77–84. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>
21. Никитин В.В., Ожерельев В.Н. Влияние угла наклона решетки на эффективность предварительной сепарации очесанного вороха. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):26–43. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>
22. Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Устройство для обмолота растений на корню. Патент 2566017 Российская Федерация. 20 октября 2015. <https://elibrary.ru/zftmnn>
23. Савин В.Ю., Ожерельев В.Н., Никитин В.В. Отделение легких примесей из очесанного вороха в корпусе адаптера. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(3):370–387. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>
24. Никифоров В.М., Никифоров М.И., Мамеев В.В. Урожайность и качество зерна сортов яровой пшеницы в условиях Брянской области. *Вестник Брянской ГСХА*. 2020;(1):7–12. URL: [https://www.bgsha.com/download/education/library/v1\\_20.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/v1_20.pdf) (дата обращения: 22.02.2025).
25. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Результаты исследований аэродинамических свойств зерновых материалов. *Наука в центральной России*. 2023;61(1):100–107. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-100-107>
26. Анисимов А.В. Результаты экспериментального определения физико-механических свойств материалов, обрабатываемых в шелушильной машине. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;(4):156–160. URL: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_84.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_84.pdf) (дата обращения: 22.02.2025).
27. Леженкин И.А. Статистическая модель содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы. *Вісник Харківського Національного Технічного Університету Сільськогосподарства Імені Петра Василенка*. 2013;132:355–360. URL: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/75d61cb3-1909-4cbc-bea0-dd6b86cfd9c2> (дата обращения: 27.02.2025).
28. Бурьянов А.И., Пасечный Н.И. Обоснование класса комбайна для уборки зерновых методом очеса. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2004;(4):21–23. <https://www.elibrary.ru/rwamif>

## REFERENCES

1. Chepik D.A., Kolesnikov A.V. Problems of Logistic and Technical Support of Plant Production. *Legumes and Groat Crops*. 2022;(4):24–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-24-31>
2. Sorokina T.I. Analysis of the State And Ways to Improve the Use of the Tractor Fleet, Grain Harvesting and Fodder Harvesting Equipment of the Agricultural Enterprise. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022;(3):170–176. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia95.pdf> (accessed 21.02.2025).
3. Tomchuk V. Loss Management When Harvesting Grain, Legume and Oilseed Crops. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2020; 50(1):54–67. <https://elibrary.ru/vaqqxe>
4. Mladin F., Văcărescu G., Duma Copcea A., Mihutstudies C. On the Harvesting of Grassy Cereals Within the S.C. Farm. Andreas Agro Brikets S.R.L. from the Town of Bobda, Timiș County. *Research Journal of Agricultural Science*. 2023;55(4):114–120. Available at: [https://www.rjas.ro/paper\\_detail/3750](https://www.rjas.ro/paper_detail/3750) (accessed 21.02.2025).
5. Xu L., Li Y., Li Y., Chai X., Qiu J. Research Progress on Cleaning Technology and Device of Grain Combine Harvester. *Nongye Jixie Xuebao Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2019;50(10):1–16. Available at: <http://nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/880> (accessed 21.02.2025).



6. Pashkang N.N., Martynushkin A.B., Romanova L.V., Stoyan M.V. Grain Farming State in the Ryazan Region: Main Problems and Ways to Solve Them. *The Social and Economic and Humanitarian Magazine*. 2022;(2):35–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/2500-1825-2022-2-35-50>
7. Sorokin I.A., Nekipelov R.E. Modernization of the Agricultural System for Monitoring the Quality of the Grain Harvesting Process. *Bulletin NGIEI*. 2024;(7):41–56. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2321](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2321) (accessed 21.02.2025).
8. Guarin J.R., Martre P., Ewert F., Webber H., Dueri S., Calderini D., et al. Evidence for Increasing Global Wheat Yield Potential. *Environmental Research Letters* 2022;(17):124045. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca77c>
9. Milyutkin V.A., Ovchinnikov V.A. Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain through the Use of Innovative Fertilizers and Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):52–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202301.052-067>
10. Hossain M.A., Hoque M.A., Wohab M.A., Miah M.A.M., Hassan M.S. Technical and Economic Performance of Combined Harvester in Farmers Field. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*. 2015;40(2):291–304. <https://doi.org/10.3329/bjar.v40i2.24569>
11. Esgici R., Sessiz A., Bayhan Y. The Relationship between the Age of Combine Harvester and Grain Losses for Paddy. *International Scientific Journals*. 2016;62(1):18–21. Available at: <https://stume-journals.com/journals/am/2016/1/18> (accessed 21.02.2025).
12. Zhang Z., Noguchi N., Ishii K., Yang L., Zhang C. Development of a Robot Combine Harvester for Wheat and Paddy Harvesting. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46(4):45–48. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00013>
13. Tihanov G., Dalle M., Hristova G., Mitkov I. Loss of Grain at Harvesting Wheat with a Combine Harvester. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1):577–582. Available at: [https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue\\_1/Art76.pdf](https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_1/Art76.pdf) (accessed 22.02.2025).
14. Zyukin D.A., Petrushina O.V., Glushkov I.A., Rudenko S.R. Reduction of Technical Equipment as a Threat of Increased Losses and Reduced Efficiency in the Grain Subcomplex of the Agro-Industrial Complex. *Bulletin NGIEI*. 2024;(8):84–95. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [http://vestnik.ngiei.ru/?page\\_id=2326](http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=2326) (accessed 22.02.2025).
15. Khafizov D.F., Valiev A.R., Mukhametgaliev F.N., Mingazov A.I. Development of the Material and Technical Base of Agro-industrial Complex in the Context of Foreign Economic Sanctions. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2023;18(4):170–177. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-170-177>
16. Shamin A.E., Zaikin W.P., Lisina A.Yu. Grain Production in Russia: Achievements, Existing and Possible Problems. *Bulletin NGIEI*. 2022;(3):110–121. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-3-110-121>
17. Naorem A., Jayaraman S., Dang Y.P., Dalal R.C., Rao C.S., Patra A.K. Soil Constraints in an Arid Environment – Challenges, Prospects, and Implications. *Agronomy*. 2023;13(1):220. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>
18. Astafyev V.L., Golikov V.A., Zhalnin E.V., Pavlov S.A., Pekhalsiy I.A. Strategy of Technical Support of Grain Harvesting Operations in Republic of Kazakhstan. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):46–51. Available at: [https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL\\_ID=202002246521566465](https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=202002246521566465) (accessed 22.02.2025).
19. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Comparison of the Efficiency of Different Types of Separating Devices when Strolling Grain on the Root. *Design, Use and Reliability of Agricultural Machinery*. 2024;(1):176–182. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/uxuoxf>
20. Ozherelev V.N., Nikitin V.V., Komogortsev V.F., Sinyaya N.V. To the Substantiation of the Method of Preliminary Separation of Free Grain in the Root of Plants. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):77–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-77-84>

21. Nikitin V.V., Ozherelev V.N. Influence of the Grid Inclination Angle on the Efficiency of Preliminary Separation of the Combed Heap. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):26–43. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.026-043>
22. Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Device for Standing Plants Threshing. Patent 2566017 Russian Federation. 2015 October 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zftmnn>
23. Savin V.Yu., Ozherelev V.N., Nikitin V.V. Separating Light Impurities from the Combed Heap in the Adapter Case. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):370–387. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.370-387>
24. Nikiforov V.M., Nikiforov M.I., Mameev V.V. Yield and Grain Quality of Spring Wheat Varieties in the Bryansk Region. *VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2020;(1):7–12. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://www.bgsha.com/download/education/library/v1\\_20.pdf](https://www.bgsha.com/download/education/library/v1_20.pdf) (accessed 22.02.2025).
25. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Results of Investigations of Aerodynamic Properties of Grain Materials. *Science in the Central Russia*. 2023;61(1):100–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-1-100-107>
26. Anisimov A.V. The Results of Experimental Determination of Physical and Mechanical Properties of Materials Processed in a Peeling Machine. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(4):156–160. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: [https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia\\_84.pdf](https://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/izvestia_84.pdf) (accessed 22.02.2025).
27. Lezhenkin I. Statistical Model of the Content of Chaff in Ochessannom Pile of Winter Wheat. *Bulletin Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*. 2013;132:355–360. Available at: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/75d61cb3-1909-4cbb-bea0-dd6b86cfd9c2> (accessed 27.02.2025).
28. Buryanov A.I., Pasechny N.I. [Justification of the Combine Harvester Class for Harvesting Grain by Combing]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyajstva*. 2004;(4):21–23. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/rwamif>

*Об авторах:*

**Савин Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тепловых двигателей и гидромашин Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, Researcher ID: D-4378-2019, [savinvu@bmstu.ru](mailto:savinvu@bmstu.ru)

**Ожерельев Виктор Николаевич**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: AAD-8298-2022, [vicoz@bk.ru](mailto:vicoz@bk.ru)

**Никитин Виктор Васильевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, Researcher ID: AAD-7368-2022, [viktor.nike@yandex.ru](mailto:viktor.nike@yandex.ru)

**Адылин Иван Петрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве Брянского государственного аграрного университета (243365, Российская Федерация, Брянская обл., с. Кокино, ул. Советская, д. 2а), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, [vanro1989@mail.ru](mailto:vanro1989@mail.ru)

*Вклад авторов:*

В. Ю. Савин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

В. Н. Ожерельев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

В. В. Никитин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи.

И. П. Адылин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 05.02.2025; поступила после рецензирования 19.06.2025;  
принята к публикации 03.07.2025*

*About the authors:*

**Vladimir Yu. Savin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of Heat Engines and Hydromachines, Bauman Moscow State Technical University (5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2476-9768>, Researcher ID: D-4378-2019, savinvu@bmstu.ru

**Viktor N. Ozherelev**, Dr.Sci. (Agric.), Professor, Professor of the Chair of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2121-3481>, Researcher ID: AAD-8298-2022, vicoz@bk.ru

**Viktor V. Nikitin**, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Technical Service Chair, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1393-2731>, Researcher ID: AAD-7368-2022, viktor.nike@yandex.ru

**Ivan P. Adylin**, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Technical Systems in Agribusiness, Environmental Management and Road Construction, Bryansk State Agrarian University (2a Sovetskaya St., Kokino 243365, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-1935>, vanro1989@mail.ru

*Authors contribution:*

V. Yu. Savin – conducting the study including performing experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

V. N. Ozherelev – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives; conducting the study including experiments and data collection; preparing the manuscript: critical analysis of the draft manuscript, comments and corrections by members of the research group, including at the stages before and after publication.

V. V. Nikitin – conducting the study, including performing experiments and collecting data; preparing the manuscript: writing a draft of the manuscript.

I. P. Adylin – conducting the study including performing experiments or collecting data.

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

*Submitted 05.02.2025; revised 19.06.2025; accepted 03.07.2025*