

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634384>

Оригинальное исследование



Влияние режимных параметров воздушно-решётной очистки зерноуборочного комбайна

А.А. Кувшинов, В.С. Усанов, В.А. Сахаров, А.В. Липкань

Всероссийский научно-исследовательский институт сои, Благовещенск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Повышение количества и качества посевного материала сельскохозяйственной культуры сои можно обеспечить с помощью использования комбайна с двухфазным обмолом, так как при классической послеуборочной обработке выход семенного материала уменьшается за счёт травмирующего воздействия рабочих органов очистительных машин. Одним из важнейших процессов получения семенной фракции сои является процесс очистки. В этой связи совершенствование систем воздушно-решётной очистки зерноуборочных комбайнов является важнейшей задачей комбайностроения.

Цель работы — выявить закономерности изменения скорости воздушного потока в зависимости от режимных параметров системы воздушно-решётной очистки комбайна.

Методы. Для изучения параметров воздушного потока экспериментальная часть исследований была проведена на лабораторном стенде, имитирующем работу системы очистки зерноуборочного комбайна. Всего проведено 43 опыта в трёх повторностях согласно матрице многофакторного эксперимента и получены 4 уравнения регрессии.

Результаты. Представлены эмпирические зависимости, которые характеризуют изменение скорости воздушного потока за решетом в зависимости от различных параметров системы зерноочистки. Исследовано влияние режимных параметров системы воздушно-решётной очистки зерноуборочного комбайна на характер распределения воздушного потока. Рассмотрено изменение скорости воздушного потока на выходе из диффузора вентилятора и распределение скорости на всей поверхности верхнего решета.

Заключение. Полученные закономерности позволяют оптимизировать распределение воздушного потока по всей длине решета системы воздушно-решётной очистки и создают предпосылки для автоматизации уборочного процесса. Раскодированные уравнения регрессии будут являться основой при разработке алгоритма автоматического управления параметрами воздушно-решётной очистки комбайна.

Ключевые слова: уборка сои; зерноуборочный комбайн; воздушно-решётная очистка.

Как цитировать:

Кувшинов А.А., Усанов В.С., Сахаров В.А., Липкань А.В. Влияние режимных параметров воздушно-решётной очистки зерноуборочного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 695–704. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634384>

Рукопись получена: 17.07.2024

Рукопись одобрена: 31.12.2024

Опубликована online: 31.12.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634384>

Original Study Article

Influence of the operating parameters of air-sieve cleaning of a combine harvester

Alexey A. Kuvshinov, Vyacheslav S. Usanov, Vladimir A. Sakharov, Alexander V. Lipkan

All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, Blagoveshchensk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: An increase in the quantity and quality of soybean crop seed can be achieved by using a combine harvester with two-phase threshing, since during conventional post-harvest processing, the yield of seed material is reduced due to the traumatic effects of the working organs of cleaning machines. One of the most important processes for obtaining soybean seed fraction is the purification process. In this regard, the improvement of air-sieve cleaning systems of combine harvesters is the most important task of combine engineering.

OBJECTIVE: Identification of the patterns of changes in the airflow rate depending on the operating parameters of the air-sieve cleaning system of a combine harvester.

MATERIALS AND METHODS: To study the parameters of the airflow, the experimental part of the research was carried out using a laboratory bench simulating the operation of a combine harvester cleaning system. A total of 43 experiments were conducted in three repetitions according to the matrix of the multifactorial experiment and 4 regression equations were obtained.

RESULTS: Empirical dependences that describe the change in the airflow rate behind the sieve depending on various parameters of the grain cleaning system are presented. The influence of the operating parameters of the air-sieve cleaning system of a combine harvester on the nature of the airflow distribution is studied. The change in the airflow rate at the outlet of the fan diffuser and the flow rate distribution over the entire surface of the upper sieve are considered.

CONCLUSIONS: The obtained patterns will be helpful to optimize the airflow distribution along the entire length of the sieve of the air-sieve cleaning system and to create prerequisites for automating the harvesting process. The decoded regression equations will be the basis for the development of an algorithm for automatic control of the parameters of the air-sieve cleaning of the combine harvester.

Keywords: soybean harvesting; combine harvester; air-sieve cleaning.

To cite this article:

Kuvshinov AA, Usanov VS, Sakharov VA, Lipkan AV. Influence of the operating parameters of air-sieve cleaning of a combine harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):695–704. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634384>

Received: 17.07.2024

Accepted: 31.12.2024

Published online: 31.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей сельского хозяйства является увеличение производства зерновых и бобовых сельскохозяйственных культур, в частности сои. Соя, с высоким содержанием белка и жира, является важнейшей стратегической культурой растениеводства Дальнего Востока. Площади её посевов в Российской Федерации ежегодно увеличиваются, что обусловлено постоянно растущим спросом на соевые продукты со стороны пищевой и комбикормовой промышленности.

В настоящее время посевные качества семян сои, регламентируемые ГОСТ Р 52325–2005, можно получить с помощью послеуборочной обработки, однако при этом снижается выход конечного материала за счёт механического воздействия на зерно сои в процессе подработки семенного материала рабочими органами машин и транспортирующими узлами линии обработки.

Снизить потери от дробления и микроповреждений семян возделываемых сортов сои при уборке и подработке, подготовленных к посеву, возможно за счёт их выделения в модернизированном комбайне двухфазного обмолота с двухпоточной очисткой первой фракции (обмолоченных и очищенных семян после первого молотильного барабана), непосредственно в ходе уборки, без послеуборочной обработки, и использовать их в дальнейшем на посеве.

Совершенствованием технологических процессов в системах сепарации и очистки зерноуборочных комбайнов занимаются учёные России, Белоруссии, Китая и других стран.

В современных зерноуборочных комбайнах потери зерна в процессе очистки, наряду с потерями за молотильным устройством, играют существенную роль и с повышением урожайности и соломистости культур закономерно увеличиваются. В этой связи совершенствование систем воздушно-решетной очистки зерноуборочных комбайнов с обоснованием её режимных параметров является важнейшей задачей комбайностроения [1].

Авторами исследования [2] с помощью общего логического метода и математического анализа рассмотрен процесс сепарирования зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна как функционирование комплекса «зерновой ворох — поток воздуха — решето». Представлены аналитические зависимости, которые характеризуют изменение потерь зерна за решетом очистки. Разработаны системы уравнений, позволяющие получить данные о характере потерь зерна за верхним решетом очистки комбайна в зависимости от типа конструкции решета.

Результаты исследования учёных [3] демонстрируют взаимодействие разнородных сил в ходе течения процесса разделения зернового вороха на решетках системы очистки комбайна, которая состоит из двух подсистем в виде верхнего и нижнего решёт, на которых ворох с разным фракционным составом подвергается воздействию воздушного потока. Это нужно учитывать при проработке

математической модели комбинации решет в системе очистки зерноуборочного комбайна.

По мнению исследователей [4] интенсификация процесса сепарации зерна возможна за счёт новых технических решений, обеспечивающих оптимальные кинематические и динамические параметры движения транспортной доски, верхнего и нижнего решет, способствующих быстрому перераспределению частиц зернового вороха для улучшения сепарации с помощью воздушного потока. Рассмотрена проблема использования накопителей потенциальной энергии (упругих элементов, пружин) для снижения динамических нагрузок, возникающих при работе системы очистки, и улучшения качества сепарации при повышенной подаче вороха. Обозначены внешние факторы, способствующие созданию оптимальных условий работы соломотряса, представлены варианты конструктивных решений, обеспечивающих снижение динамических нагрузок при одновременном повышении качественных показателей работы системы очистки.

В работе [5] представлены результаты исследования распределения воздушных потоков в системе очистки в зависимости от геометрических параметров проточных областей системы очистки зерноуборочного комбайна КЗС-1319 производства ОАО Гомсельмаш. Для различных вариантов геометрии проточных частей введение дополнительных элементов, регулирующих поток в зоне выхода воздуха из вентилятора, позволяет эффективно управлять как скоростью, так и её распределением по объёму системы очистки.

На сегодняшний день большое значение предаётся внедрению в конструкцию зерноуборочных комбайнов электронных датчиков контроля поступающей массы, автоматизации открытия рабочих органов воздушно-решетной очистки.

На основе результатов лабораторных экспериментов, полученных авторами [6] с помощью испытательного стенда для осевого обмолота с тангенциальной подачей, были построены функции движения отделённого зерна в осевом и радиальном направлениях молотильного ротора. Для метода косвенного контроля потерь зерна при сепарации была использована пьезоэлектрическая плёнка из поливинилиденфторида в качестве чувствительного материала для создания датчика потока зерна. Зерно и материалы, отличные от зерна, отделённые в зоне мониторинга, воздействуют на пьезоэлектрические плёнки, при этом генерируются различные электрические заряды. После прохождения сигнала с помощью усилителя заряда, частотного распознавания и формирования волны количество зерен может быть подсчитано микроконтроллером, и потери при сепарации зерна в зерноуборочном комбайне могут быть измерены в режиме реального времени. Результаты полевых испытаний показали, что погрешности измерения потерь при сепарации зерна, зарегистрированные системой мониторинга, по сравнению с потерями, проверенными вручную, составили менее 12%.

В исследовании авторов [7] зерноуборочный комбайн был оснащён дополнительными датчиками для снятия информации, необходимой для прогнозирования производительности уборки. Для ранжирования пула потенциометрических датчиков для модели прогнозирования содержания примесей в зерновом бункере использовался метод регрессии. Полученная модель важна для разработки автоматизации системы очистки. Результаты показали, что на содержание примесей в зерновом бункере нелинейно влияют различия в количестве растительной массы на решете и частоты вращения вентилятора, которые также коррелируют друг с другом.

В обзоре авторов [8] рассматривается влияние геометрии вентилятора на распределение скорости воздушного потока; численное моделирование и экспериментальные методы измерения скорости воздушного потока; анализ движения материала и определение перепада давления из-за слоя материала и решета; датчики для определения рабочего состояния и методы контроля для настройки параметров. При разработке датчиков и контроллеров для уборочных агрегатов следует уделять особое внимание их адаптации к различным культурам и полевым условиям. Необходимы дальнейшие исследования для определения пороговых значений этих показателей, внедрение алгоритмов искусственного интеллекта, что могло бы преодолеть неопределённость и нелинейность и улучшить производительность уборки.

Несмотря на разработку новых устройств для выделения зерна из вороха, традиционные системы очистки по-прежнему широко используются в зерноуборочных комбайнах. Чтобы обеспечить более высокую производительность в условиях риска засорения передней части решета, традиционное решето с возвратно-поступательным движением следует усовершенствовать. Для решения данной проблемы ранее авторами был разработан новый тип метода просеивания с переменной амплитудой, основанный на работе Адамса, с использованием технологии моделирования EDEM. Было проведено соответствующее стендовое испытание для изучения влияния угла поворота передней поворотной планки и проверки предыдущих результатов моделирования на основе высокоскоростного анализа изображений [9].

В своём исследовании учёными [10] были получены следующие результаты: частота вращения вентилятора оказывает значительное влияние на эффективность очистки, влияя на общую скорость воздушного потока в системе очистки; скорость воздушного потока над вибрационным грохотом увеличивается от $0,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $0,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на каждые $150 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$; увеличение скорости потока под вибрационным грохотом увеличивается от $0,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Область наибольших скоростей воздушного потока над вибрационным грохотом перемещается вперёд к центру в продольном направлении по мере увеличения угла отклонения воздушного потока. При уменьшении отверстия решета на каждые 4 мм скорость воздушного потока над вибрационным грохотом увеличивается на $0,2\text{--}0,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Были установлены

математические зависимости между рабочими параметрами и производительностью системы очистки и предложен метод регулировки каждого рабочего параметра в номинальных условиях в соответствии с производительностью, что обеспечивает основу для автоматической регулировки рабочих параметров в установке для воздушно-решетной очистки в режиме реального времени.

С развитием механизации сельского хозяйства и совершенствованием зерноуборочных комбайнов, системы очистки значительно влияют на процесс уборки зерна. В работе [11] для определения скорости витания каждого компонента зернового материала использовался измеритель скорости витания типа DFPF-25. Устройство воздушной очистки DFQX-3 использовалось для проведения полевых исследований воздушного потока. Впоследствии было проведено моделирование потока в сепарирующем устройстве. Результаты показали, что данные по моделированию и экспериментальные результаты хорошо согласуются при условиях работы сепарирующего устройства с одним и двумя вентиляторами. Скорость высокоскоростного потока, создаваемого системой двойных вентиляторов, в задней части сепарирующего устройства составила $4,76 \text{ м}\cdot\text{с}$ (моделирование) и $4,03 \text{ м}\cdot\text{с}$ (эксперимент), что показало значительное очищающее действие на не рассыпавшиеся зерна, длинные и короткие части стеблей. Конструкция очистки с двумя вентиляторами, состоящая из поперечного вентилятора и центробежного вентилятора, может значительно улучшить эффект очистки.

Несмотря на проведённые ранее другими учёными исследования по изменению конструктивных элементов воздушно-решетной очистки, наличие реализованных комбайновыми заводами новых технических решений в зерноуборочных комбайнах, значительной совокупности запатентованных решений в изобретениях и в полезных моделях, исследований по совершенствованию процесса воздушно-решетной очистки комбайнов по автоматической регулировке частоты вращения вентилятора, механизму раскрытия лепестков жалюзи для модернизации комбайнов с целью непосредственного получения в процессе уборки посевных семян сои ещё недостаточно.

Конструкция макетного образца соеуборочного комбайна с выделением мелкого соевого вороха из-под второго молотильного барабана и подачей его на вторую половину решётного стана посредством дополнительной стрясной доски длиной 1000 мм обеспечивает разделение семян сои на первую (из-под I-го молотильного барабана) и вторую (из-под II-го молотильного барабана) фракции в отношении $55:45\%$. Использование верхнего решета с удлинёнными (70 мм вместо 22 мм) лепестками жалюзи, величиной перекрытия верхнего решета надставкой дополнительной стрясной доски 300 мм и длиной скатной доски для первой фракции зерна сои 670 мм , при установленных параметрах воздушно-решетной очистки, обеспечивает получение 55% семян первой фракции с чистотой $99,8\text{--}99,9\%$, дроблением $3,3\text{--}4,6\%$, и микроповреждениями $1\text{--}2\%$ [12, 13].

При разработке технологии получения семенного материала непосредственно при уборке сои важным аспектом является существенная модернизация систем транспортирования и сепарации зерна, которая в значительной степени определяется технологическими регулировками воздушно-решетной очистки.

Воздушно-решётная очистка комбайна работает следующим образом: соевый зерновой ворох, представляющий неоднородную смесь компонентов (целое, дроблёное, невызревшее зерно, частицы полосты, стеблей, мёртвый сор), имеющих различные критические скорости (скорости витания), сдвигается за счёт колебательных движений стрясной доски и подвергается процессу сегрегации. Далее ворох, сходя с пальцевой решётки и, падая с некоторой высоты на верхнее решето, которое вместе с основной и дополнительной стрясными досками движется во встречном направлении относительно нижнего решета, разделяется — более тяжёлые компоненты соевого зернового вороха (целое и дроблёное зерно) оседают вниз и просыпаются на начальном участке, а с дополнительной стрясной доски ворох попадает на вторую половину верхнего решета, просыпаясь на нижнее решето. При этом вспушенный слой вороха продувается воздушным потоком сквозь просветы планок жалюзийного решета, поступающим от вентилятора. Ценная фракция зерна, проходя сквозь нижнее решето и преодолевая сопротивление воздуха, дополнительно очищается и попадает в зерновой шнек, а компоненты соевого зернового вороха, обладающие малой массой и большой парусностью, например полосты, соломистая примесь и т.п. не могут преодолеть сопротивление скоростного воздушно-го потока и выносятся за пределы решётного стана.

Не всегда регулировка раствора планок серийных жалюзийных решет позволяет качественно разделять соевый зерновой ворох, нижний слой которого обогащён зерном после процесса сегрегации на стрясной доске и пневматической сепарации в процессе падения со стрясной доски на верхнее решето. Для выделения различных компонентов соевого зернового вороха средняя скорость воздушного потока, подаваемого из диффузора вентилятора и проходящая через просветы планок жалюзийных решет, не должна превышать скоростей витания семян сои.

При большом угле открытия лепестков жалюзи и малой скорости воздушного потока повышается вероятность прохода через большие щели мелкой соломистой примеси, засоряющей зерно, и частичного забивания решет. Подача к жалюзийному решету воздуха, обеспечивающего создание псевдооживленного слоя вороха с увеличенными просветами между его компонентами, и тем самым, интенсифицирующего прохождение зерна через решето, должна обеспечивать скорость воздушного потока меньшую, чем скорость витания (скорость, при которой частицы зерна находятся в вертикальном пневмоканале в относительном равновесии) основного очищаемого компонента.

В настоящее время регулировка режимов системы воздушно-решетной очистки осуществляется

непосредственно комбайнёром в процессе уборки, что является недостаточно эффективным методом, поскольку такая регулировка режимами системы воздушно-решетной очистки комбайна не будет оптимальной. Внедрение автоматизированной системы контроля и управления регулировками системы воздушно-решетной очистки комбайна позволит качественно производить очистку с учетом сортовых и физико-механических свойств убираемой культуры, повысит качество процесса комбайнирования.

Полученные математические модели в дальнейшем позволят разработать алгоритм управления параметрами воздушно-решетной очистки комбайна и комплексное программное обеспечение с использованием прогнозных моделей с использованием искусственного интеллекта [14].

Таким образом, дальнейшие исследования по разработке автоматизированной системы контроля и управления регулировками системы воздушно-решетной очистки в процессе уборки сои с получением качественных семян без последующей подработки являются актуальными.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выявить закономерности изменения скорости воздушного потока в зависимости от режимных параметров системы воздушно-решетной очистки комбайна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования величин скорости воздушного потока проведены в лабораторных условиях на экспериментальном стенде (рис. 1).

Изучаемые режимные параметры системы воздушно-решетной очистки и уровни их варьирования представлены в табл. 1.

Постоянным фактором являлось положение удлинителя верхнего решета 15°, раствор лепестков жалюзи 16–18 мм.

На рис. 2 представлена схема расположения точек замера скоростей воздушного потока (вид сверху).

Всего проведено 43 опыта в трёх повторностях согласно матрице многофакторного эксперимента.

Исследования были проведены на территории ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои, на базе лаборатории механизации и автоматизации растениеводства (Амурская область, г. Благовещенск). Исследования были проведены в 2023 году, в течение первой половины ноября. При проведении исследований получали данные по скоростям воздушного потока. Полученные данные заносили в лабораторный журнал.

Замеры проводили в плоскости просвета рядов планок верхнего решета у вершины лепестка с помощью термоанемометра DT-8880.

Математическая обработка полученных данных и проверка на адекватность полученных уравнений регрессии произведена согласно методическим указаниям Ю.П. Адлера [15].

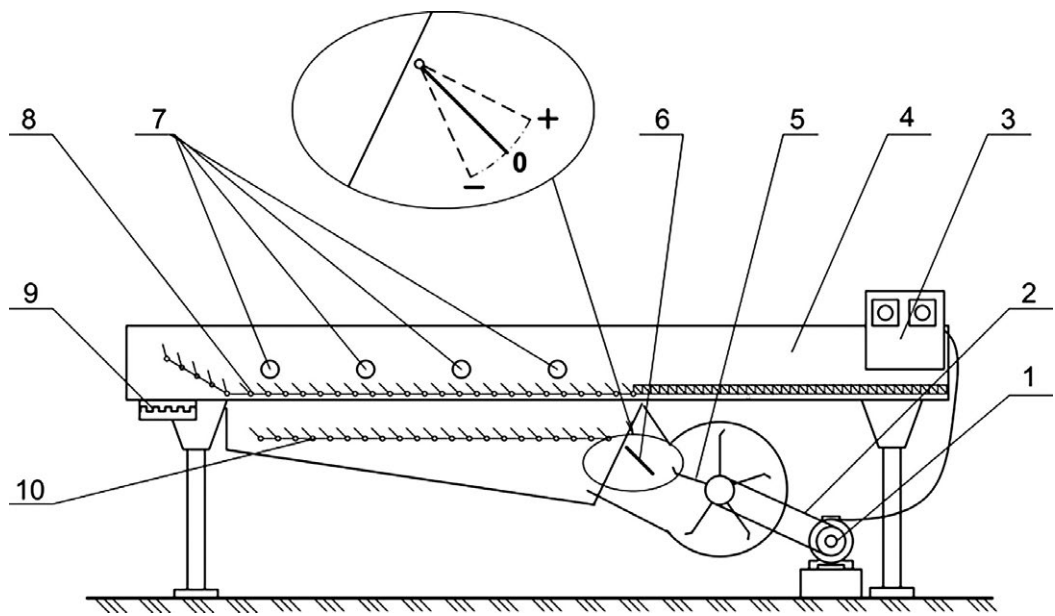


Рис. 1. Лабораторный стенд для исследования параметров воздушного потока очистки комбайна: 1 — электродвигатель с ведущим шкивом; 2 — клиноременная передача; 3 — электрощит управления; 4 — рама установки; 5 — вентилятор; 6 — направлятель воздушного потока; 7 — отверстия для замера скорости воздушного потока на верхнем решете; 8 — верхнее жалюзийное решето; 9 — регулятор наклона лепестков жалюзийных решет; 10 — нижнее жалюзийное решето.

Fig. 1. The laboratory bench for studying the parameters of the airflow of the cleaning of a combine harvester: 1 — an electric motor with a drive pulley; 2 — a V-belt transmission; 3 — an electrical control panel; 4 — an installation frame; 5 — a fan; 6 — an airflow guide; 7 — holes for measuring the airflow rate on the upper sieve; 8 — an upper louver sieve; 9 — a tilt control of louver sieves vanes; 10 — a lower louver sieve.

Таблица 1. Факторы и уровни их варьирования

Table 1. Factors and levels of their variation

Уровень варьирования	Факторы				
	Раствор планок жалюзи I половины верхнего решета, x_1 мм (b)	Раствор планок жалюзи II половины верхнего решета, x_2 мм (c)	Раствор планок жалюзи нижнего решета, x_3 мм (d)	Угол наклона направлятеля воздушного потока, x_4 град. (a)	Средняя скорость воздуха в диффузоре вентилятора, x_5 м/с (v)
- 1	6	6	6	-15	8
0	12	12	10	0	10,25
+1	18	18	14	15	12,5
Интервал варьирования	6	6	4	15	2,25
-1,5%	2	2	4	-24	6,66
+1,5%	23	23	16	24	13,84

В результате получены 4 уравнения регрессии следующего вида:

$$y_i = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где y_1 — средняя скорость воздушного потока на 1 части решета; y_2 — средняя скорость воздушного потока на 2 части решета; y_3 — средняя скорость воздушного потока на 3 части решета; y_4 — средняя скорость воздушного потока на 4 части решета.

Для построения графиков зависимостей изменения скорости воздушного потока, была использована программа для анализа и визуализации научных и статистических данных SigmaPlot (v. 12.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разделение верхнего решета на 2 части с автономными регулировками угла раствора лепестков жалюзи и их автоматическая регулировка от уровня урожайности

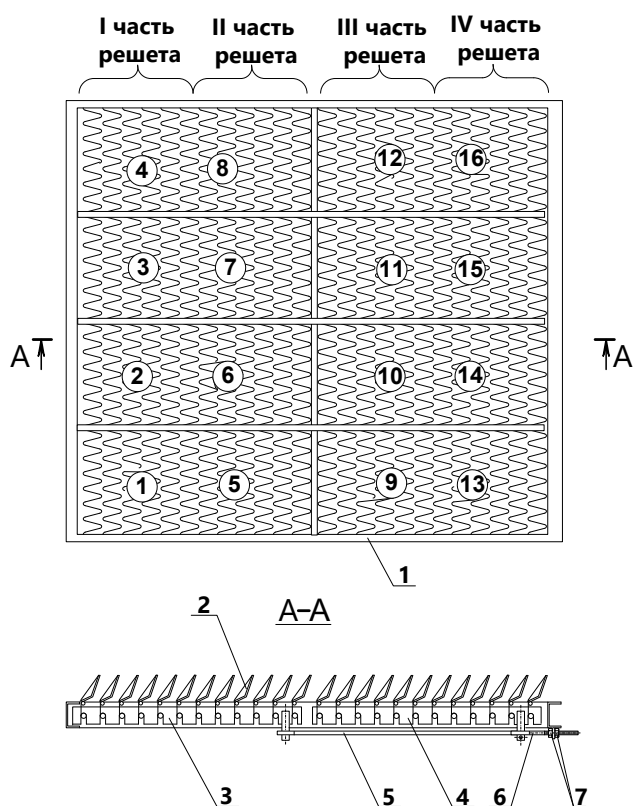


Рис. 2. Расположение точек для замера скоростей воздушного потока на верхнем решете и узлы регулировки I и II половин верхнего решета лабораторного стенда: 1 — рама верхнего решета; 2 — лепестки; 3 — регулировочная планка I половины решета; 4 — регулировочная планка II половины решета; 5, 6 — тяги планок; 7 — регулировочные гайки угла раствора лепестков.

Fig. 2. The location of the points for measuring the airflow rates on the upper sieve and the adjustment nodes of the I and II halves of the upper sieve of the laboratory bench: 1 — the frame of the upper sieve; 2 — the petals; 3 — the adjusting bar of the I half of the sieve; 4 — the adjusting bar of the II half of the sieve; 5, 6 — the rods of the slats; 7 — adjusting nuts for the solution angle of the vanes.

и состояния посевов сои позволит более качественно производить очистку зерна сои. Установка направлятеля воздушного потока позволит направить увеличенный поток воздуха снизу к соответствующим участкам жалюзи верхнего решета для лучшего продува слоя мелкого соевого вороха.

После статистической обработки полученных результатов были рассчитаны адекватные уравнения регрессии для каждого из четырёх участков верхнего решета решётного стана, которые описывают зависимость изменения скорости воздушного потока на данных участках от изучаемых факторов.

Уравнение регрессии для первого участка решета (при $F_p = 0,4$):

$$y_1 = 6,1 - 0,65x_1 + 0,92x_3 - 2,02x_4 + 1,28x_5 + 0,34x_3x_2. \quad (2)$$

Уравнение регрессии показывает, что зависимость изучаемых факторов на скорость воздушного потока на 1 участке верхнего решета имеет нелинейный характер. Отсутствие квадратичных членов уравнения регрессии указывают на то, что для изучаемых диапазонов факторов нет точек экстремума по скорости воздушного потока. Наибольший обратный эффект оказывает угол направлятеля воздушного потока, наглядно это можно увидеть, построив поверхность отклика при зафиксированных значениях на нулевом уровне факторов x_1 и x_5 (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что с уменьшением угла направлятеля и увеличением раскрытия лепестков нижнего решета происходит увеличение скорости воздушного потока на 1-м участке верхнего решета.

В раскодированном виде уравнение (2) имеет следующий вид:

$$v_1 = -0,724 - 0,10855b + 0,23d - 0,7019\alpha + 0,56832v + 0,05669d\alpha' \quad (3)$$

Уравнение регрессии, описывающее зависимость средней скорости воздушного потока на втором участке решета представлено ниже (при $F_p = 1,39$):

$$y_2 = 7,45 + 1,85x_3 + 1,56x_5 + 0,33x_1x_3 + 1,14x_3x_4 + 0,36x_3x_5 - 0,49x_4^2, \quad (4)$$

Присутствие квадратичного члена (x_4) со знаком «-» в уравнении (4) указывает на наличии точки экстремума

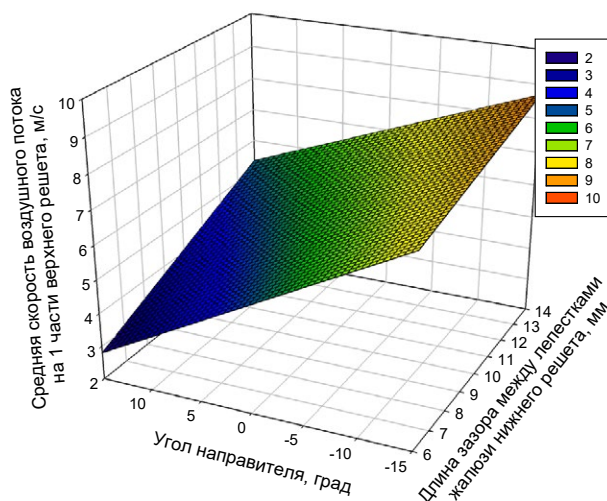


Рис. 3. Зависимость изменения скорости воздушного потока на 1-м участке верхнего решета от угла направлятеля и раскрытия лепестков жалюзи нижнего решета при средней скорости на выходе из вентилятора в 10,25 м/с и раствора планок жалюзи 1-й половины верхнего решета в 12 мм.

Fig. 3. The dependence of the change of the airflow rate in the 1st section of the upper sieve on the angle of the guide and the opening of the louver vanes of the lower sieve at an average flow rate at the outlet of the fan of 10.25 m/s and a solution of the louver vanes of the 1st half of the upper sieve of 12 mm.

и то, что функция имеет знакопеременный характер, т.е. с увеличением угла наклона направлятеля при нижних значениях диапазона изменения зазора между лепестками жалюзи нижнего решета средняя скорость воздушного потока на второй части решета будет снижаться, а по мере роста величины зазора на нижнем решете — увеличиваться, проходя точку экстремума (рис. 4).

Уравнение регрессии (4) в раскодированном виде имеет следующий вид:

$$V_2 = 1,472 - 0,138b - 0,112d - 0,191\alpha + 0,293v + 0,019d\alpha + 0,0138bd + 0,03996dv - 0,0022\alpha^2 \quad (5)$$

Уравнение регрессии, описывающее зависимость средней скорости воздушного потока на третьем участке решета представлено ниже (при $F_p = 1,3$).

$$y_3 = 7,47 - 0,3x_1 - 0,8x_2 - 1,85x_3 + 0,48x_4 + 1,32x_5 - 0,21x_1x_3 - 0,37x_2x_3 - 0,58x_3x_4 - 0,35x_3x_5 - 0,5x_2^2 - 1,2x_3^2 \quad (6)$$

Значения коэффициентов при всех линейных членах уравнении регрессии (6) говорит о значимости факторов на изменение средней скорости на третьем участке верхнего решета. Причём линейные коэффициенты регрессии факторов x_1 , x_2 и x_3 имеют отрицательный знак, т.е. с увеличением раствора лепестков на верхнем и нижнем решетах средняя скорость для этой части верхнего решета будет снижаться. Наибольший обратный эффект из них оказывает раствор лепестков нижнего решета (x_3). Наличие квадратичных членов указывает, что функция отклика по данным факторам x_2 и x_3 имеет точки экстремума. Наглядно это можно увидеть, построив поверхность отклика, зафиксировав при этом факторы x_1 , x_4 и x_5 на нулевом уровне (рис. 5).

В раскодированном виде уравнение (6) имеет следующий вид:

$$V_3 = -1,296 + 0,037575b + 0,459874c + 1,620625d + 0,12931a + 0,89688v - 0,0087675bc - 0,0154475cd - 0,03885dv - 0,009715\alpha c - 0,0139445c^2 - 0,075d^2 \quad (7)$$

В следующем уравнении регрессии (при $F_p = 1,46$) для четвёртого участка верхнего решета влияние факторов имеют тот же характер, что и для третьего:

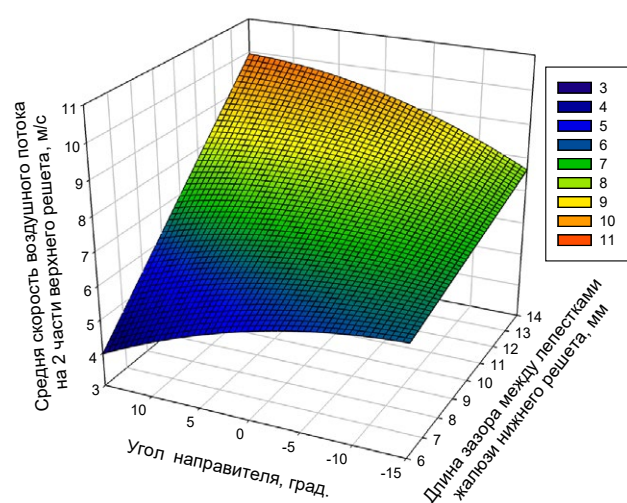


Рис. 4. Зависимость изменения скорости воздушного потока на 2-м участке верхнего решета от угла направлятеля и раскрытия лепестков жалюзи нижнего решета при средней скорости на выходе из вентилятора в 10,25 м/с и растворе лепестков жалюзи I половины верхнего решета в 12 мм.

Fig. 4. The dependence of the change of the airflow rate in the 2nd section of the upper sieve on the angle of the guide and the opening of the louver vanes of the lower sieve at an average flow rate at the outlet of the fan of 10.25 m/s and the solution of the louver vanes of the I half of the upper sieve of 12 mm.

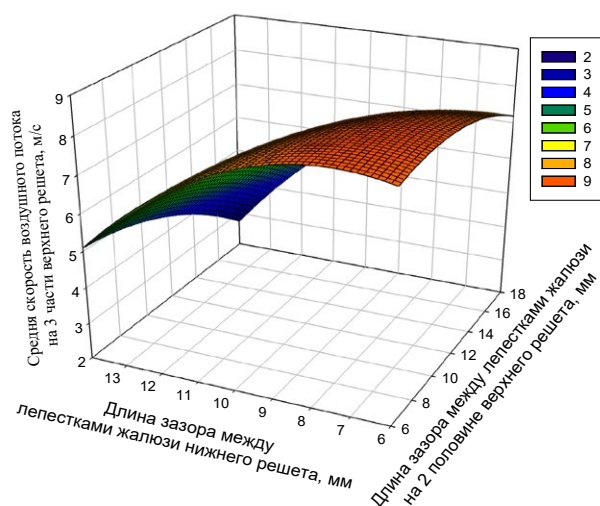


Рис. 5. Зависимость изменения скорости воздушного потока на 3-м участке верхнего решета от раствора лепестков жалюзи нижнего решета и второй половины верхнего решета при средней скорости на выходе из вентилятора в 10,25 м/с, раствора между жалюзи 1-ой половины верхнего решета в 12 мм и угла положения направлятеля 0 град.

Fig. 5. The dependence of the change of the airflow rate in the 3rd section of the upper sieve on the solution of the louver vanes of the lower sieve and the second half of the upper sieve at an average flow rate at the outlet of the fan of 10.25 m/s, the solution between the blinds of the 1st half of the upper sieve of 12 mm and the angle of the guide of 0 degrees.

$$y_4 = 5,72 - 0,29x_1 - 0,36x_2 - 2,02x_3 + 0,41x_4 + 1,06x_5 - 0,33x_1x_3 - 0,19x_1x_4 - 0,68x_3x_4 - 0,68x_3x_5 - 0,37x_3x_5 - 0,29x_2^2 - 0,73x_3^2 \quad (8)$$

Уравнение регрессии (8) в раскодированном можно представить в виде:

$$V_4 = -4,33425 + 0,089345b + 0,1336c + 0,993375d + 0,16683\alpha + 0,88134c - 0,013778bd - 0,04107dv - 0,00212591ab - 0,01139\alpha d - 0,00808781c^2 - 0,045625d^2 \quad (9)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения скорости воздушного потока на выходе из диффузора вентилятора (x_5) и распределение скорости на всей поверхности верхнего решета имеет прямую зависимость. Установка направителя воздушного потока в диффузоре вентилятора имеет значительное влияние на величину скорости воздушного потока по всей длине верхнего решета, причём зависимость расположения направителя для первой и второй половины верхнего решета обратная. С уменьшением угла направителя увеличивается скорость воздушного потока на 1-й половине решета, в то время как на второй половине решета происходит её падение и наоборот. Тот же эффект наблюдается и при изменении раствора лепестков жалюзи нижнего решета, причём на 2–4 участке верхнего решета он имеет наибольшее значение.

Полученные закономерности позволяют оптимизировать распределение воздушного потока по всей длине решета системы воздушно-решётной очистки и создают предпосылки для автоматизации уборочного процесса. Раскодированные уравнения регрессии будут являться основой при разработке алгоритма автоматического управления параметрами воздушно-решетной очистки комбайна.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Кувшинов — проведение замеров величины воздушного потока, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; В.С. Усанов — математическая обработка полученных результатов, подготовка и написание текста статьи; В.А. Сахаров — проведение замеров величины воздушного потока, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; А.В. Липкань — проведение замеров величины воздушного потока, обзор литературы, сбор и анализ

литературных источников, написание текста и редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. A.A. Kuvshinov — carrying out measurements of the air flow, literature review, collection and analysis of literary sources, writing and editing the manuscript; V.S. Usanov — mathematical processing of the results obtained, preparation and writing of the text of the manuscript; V.A. Sakharov — carrying out measurements of the air flow, literature review, collection and analysis of literary sources, writing and editing of the text of the manuscript; A.V. Lipkan — carrying out measurements of the air flow, literature review, collection and analysis of literary sources, writing and editing the text and editing the manuscript. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The authors state that there is no external funding for the research and preparation of the publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Rudoy DV, Aleksakov YuF, Golev BYu, et al. Prerequisites and ways to improve the wind-sieve cleaning system of combine harvesters. *Polythematic network electronic scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2023;194:192–202. (In Russ.) doi: 10.21515/1990-4665-194-017
2. Lovchikov AP, Kulagin SN. The relationship between the air flow velocity and grain losses due to wind-sieve cleaning of a combine harvester.

Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. 2023;3(101):106–109. (In Russ.) doi: 10.37670/2073-0853-2023-101-3-106-109

3. Lovchikov AP, Kulagin SN. Methodological provisions for the development of a mathematical model of a combination of sieves in the cleaning system of a combine harvester. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2023;2(100):80–83. (In Russ.) doi: 10.37670/2073-0853-2023-100-2-80-83

4. Vikhlyantsev AA. Determination of the main parameters of the cleaning mechanism of a combine harvester. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2020;5(85):114–116. (In Russ.)
5. Baran IA, Trukhanovich SV, Ivanov DN. Investigation of changes in the distribution of air flows in the cleaning system of the KZS-1319 combine harvester depending on the geometric parameters of the flow areas. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2019;1(45):29–38. (In Russ.)
6. Zhan Zhao, Yaoming Li, Jin Chen, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011. Vol. 76, No. 2. P. 183–188. doi: 10.1016/j.compag.2011.01.016
7. Geert Craessaerts, Wouter Saeys, Bart Missotten, et al. A genetic input selection methodology for identification of the cleaning process on a combine harvester, Part II: Selection of relevant input variables for identification of material other than grain (MOG) content in the grain bin. *Biosystems Engineering*. 2007;98(3):297–303. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.07.002
8. Zhenwei Liang, Million Eyasu Wada, Development of cleaning systems for combine harvesters: A review. *Biosystems Engineering*. 2023;236:79–102. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2023.10.018
9. Zheng Ma, Min Han, Yaoming Li, et al. Motion of cereal particles on variable-amplitude sieve as determined by high-speed image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;174. doi: 10.1016/j.compag.2020.105465
10. Yang Li, Lizhang Xu, Ying Zhou, et al. Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: A computational and experimental study. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;152:141–148. doi: 10.1016/j.compag.2018.07.019
11. Liang Yaquan, Tang Zhong, Zhang Hao, et al. Cross-flow fan on multi-dimensional airflow field of air screen cleaning system for rice grain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2022;15:223–235. doi: 10.25165/j.ijabe.20221504.6949
12. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP, Sakharov VA, et al. Obtaining high-quality soybean seeds based on the modernization of a combine harvester with a two-phase threshing scheme. *Machinery and equipment for the village*. 2023;4(310):17–21. (In Russ.) doi: 10.33267/2072-9642-2023-4-17-21
13. Prisyazhnaya IM, Prisyazhnaya SP. Improving the cleaning of the combine of two-fase reference to soya seeds. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024;6(46). doi: 10.60797/JAE.2024.46.7
14. Pustovaya OA, Pustovoy EA, Usanov VS, et al. Evaluation of the operation of the fan of the combine harvester air-and-screen cleaning system when using an asynchronous electric motor as a drive. *BIO Web of Conferences*. 2024;108. (In Russ.) doi: 10.1051/bioconf/202410822004
15. Adler YuP, Markova EV, Granovsky YuV. *Experiment planning in the search for optimal conditions*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* Кувшинов Алексей Алексеевич,

канд. техн. наук,
старший научный сотрудник лаборатории «Механизации
и автоматизации растениеводства»;
адрес: Россия, 675027, Благовещенск, Игнатьевское ш., д. 19;
ORCID: 0000-0002-6332-5406;
eLibrary SPIN: 5643-1885;
e-mail: kyaa@vniisoi.ru

Усанов Вячеслав Сергеевич,

канд. с.-х. наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории «Механизации
и автоматизации растениеводства»;
ORCID: 0000-0002-4288-9835;
eLibrary SPIN: 8078-1707;
e-mail: uvs@vniisoi.ru

Сахаров Владимир Александрович,

старший научный сотрудник лаборатории «Механизации
и автоматизации растениеводства»;
ORCID: 0000-0003-3471-301X;
eLibrary SPIN: 8193-7685;
e-mail: sva@vniisoi.ru

Липкань Александр Васильевич,

старший научный сотрудник лаборатории «Механизации
и автоматизации растениеводства»;
ORCID: 0000-0002-2769-6672;
eLibrary SPIN: 5598-3932;
e-mail: lav-blg@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Alexey A. Kuvshinov,

Cand. Sci. (Engineering),
Senior Researcher at the Laboratory of Mechanization
and Automation of Crop Production;
address: 19 Ignatievskoe hgy, Blagoveshchensk, Russia, 675027;
ORCID: 0000-0002-6332-5406;
eLibrary SPIN: 5643-1885;
e-mail: kyaa@vniisoi.ru

Vyacheslav S. Usanov,

Cand. Sci. (Agriculture),
Leading Researcher at the Laboratory of Mechanization
and Automation of Crop Production;
ORCID: 0000-0002-4288-9835;
eLibrary SPIN: 8078-1707;
e-mail: uvs@vniisoi.ru

Vladimir A. Sakharov,

Senior Researcher at the Laboratory of Mechanization
and Automation of Crop Production;
ORCID: 0000-0003-3471-301X;
eLibrary SPIN: 8193-7685;
e-mail: sva@vniisoi.ru

Alexander V. Lipkan,

Senior Researcher at the Laboratory of Mechanization
and Automation of Crop Production;
ORCID: 0000-0002-2769-6672;
eLibrary SPIN: 5598-3932;
e-mail: lav-blg@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author