

Научная статья

УДК 631.354.026:633.34

EDN KHQZDV

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-3-103-117>

**Обоснование параметров дополнительной транспортной доски
в комбайне с двухфазным обмолотом и двухпоточной очисткой зерна сои**

**Александр Васильевич Липкань¹, Владимир Александрович Сахаров²,
Вячеслав Сергеевич Усанов³, Алексей Алексеевич Кувшинов⁴**

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт сои

Амурская область, Благовещенск, Россия

¹ lav-blg@mail.ru, ² sva@vniisoi.ru, ³ uvs@vniisoi.ru, ⁴ kyaa@vniisoi.ru

Аннотация. В статье представлено расчетно-аналитическое обоснование вариантов конструктивно-кинематических параметров дополнительной транспортной доски, обеспечивающих качество зерна первой фракции за счет падения зерна из-под второго молотильного барабана, соломотряса и домолачивающего устройства на вторую половину верхнего решета решетного стана модернизированного комбайна с двухфазной схемой обмолота и двухпоточной очисткой зерна без учета и с учетом воздействия наклонного воздушного потока от штатного вентилятора, направление и величина скорости которого определяются положением планок жалюзи верхнего решета и вылетом дополнительной транспортной доски над ним.

Ключевые слова: модернизация комбайна, двухфазная схема обмолота, двухпоточная очистка, вылет дополнительной транспортной доски, семенное и товарное зерно, дробление и чистота зерна

Для цитирования: Липкань А. В., Сахаров В. А., Усанов В. С., Кувшинов А. А. Обоснование параметров дополнительной транспортной доски в комбайне с двухфазным обмолотом и двухпоточной очисткой зерна сои // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 3. С. 103–117. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-3-103-117>.

Original article

**Substantiation of the parameters of an additional transport board
in a combine with two-phase threshing and two-stream grain cleaning**

**Alexander V. Lipkan¹, Vladimir A. Sakharov²,
Vyacheslav S. Usanov³, Alexey A. Kuvshinov⁴**

^{1, 2, 3, 4} All-Russian Scientific Research Institute of Soybean

Amur region, Blagoveshchensk, Russia

¹ lav-blg@mail.ru, ² sva@vniisoi.ru, ³ uvs@vniisoi.ru, ⁴ kyaa@vniisoi.ru

Abstract. The article provides a computational and analytical justification for the design and kinematic parameters of an additional transport board that ensure the quality of grain of the first fraction due to the fall of grain from under the second threshing drum, a straw cutter and a threshing device on the second half of the upper sieve of the sieve mill of an upgraded combine with a two-phase threshing scheme and two-stream grain cleaning without taking into account and taking into account the impact of an inclined air flow from a standard fan, the direction and magnitude of the speed of which is determined by the position of the louver slats of the upper sieve and the departure of an additional transport board above it.

Keywords: modernization of the combine, two-phase threshing scheme, two-flow cleaning, departure of an additional transport board, seed and commercial grain, crushing and grain purity

For citation: Lipkan A. V., Sakharov V. A., Usanov V. S., Kuvshinov A. A. Substantiation of the parameters of an additional transport board in a combine with two-phase threshing and two-stream grain cleaning. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. 2024;18;3:103–117. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-3-103-117>.

Введение. В рамках совершенствования рабочих органов макетного образца модернизируемого комбайна с двухфазной схемой обмолота с целью минимизации травмирующего воздействия на зерно сои необходимо рассмотреть меры оптимизации конструктивно-кинематических параметров системы очистки.

В работе [1] представлена методология моделирования потоков воздуха в проточной части системы очистки воздушного экрана зерноуборочной машины в двумерной постановке. Приведен пример расчета аэродинамических показателей двумерной модели системы очистки. Сформулированы рекомендации по конструктивным особенностям системы очистки для получения равномерного потока воздуха по ее ширине. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях системы очистки зерноуборочных машин.

Исследование, представленное в работах [2, 3], проводилось учеными с целью обоснования разработки комбинации решет для устройства очистки зерноуборочной машины. В методическом плане оно основано на общем логическом методе и математическом анализе. Выявлена закономерность между подачей зернового вороха в систему очистки уборочной машины и технологическими свойствами зернового вороха, а также технико-эксплуатационными параметрами уборочной машины. Графическая интерпретация полученных закономерностей характеризует изменение высоты слоя вороха на решетке в системе очистки уборочной машины от технологических свойств сельскохозяйственных культур и других параметров комбайна.

Авторы работы [4] утверждают, что из-за нелинейного характера уборочного процесса не существует точной матема-

тической модели для описания поведения системы очистки зерноуборочного комбайна. Для решения данной проблемы разработан алгоритм нечеткого логического управления системы очистки зерноуборочной машины. При проведении экспериментов по оценке эффективности очистки зерноуборочной машины, средние значения количества примесей и потерь на разных эксплуатационных режимах, основанные на представленном методе нечеткого управления, составляют 1,66 и 1,69 %, что лучше соответствующих значений (2,13 и 2,11 %) при классическом методе управления. Результаты показывают, что установленная система управления надежна и эффективна для повышения эффективности уборки урожая.

В статье [5] представлена методика изучения реального рабочего процесса с использованием цифрового двойника, выявлены проблемные зоны и исследовано равномерное распределение воздушного потока на выходе из выпускного канала вентилятора системы очистки зерноуборочного комбайна. На основе разработки и исследования была определена скорость потока воздуха на выходе из выпускного канала радиального вентилятора системы очистки зерноуборочного комбайна при различных скоростях вращения вентилятора (от 450 до 1 050 мин⁻¹). Экспериментальные измерения распределения скорости воздушного потока по рабочей части решетчатого стана для системы очистки в современных зерноуборочных комбайнов составили 3,75–10,2 м/с.

Процесс очистки зерна в комбайне представляется в большей мере сложным и менее изученным из-за его многофункциональности, которая заключается в транспортировании вороха по разным элементам системы при одновременном воздействии потоком воздуха в местах перепадов решет и лепестков жалюзи.

Рассматриваемый авторами работы [6] процесс движения растительной массы подвергает изменению структуру воздушного потока при различной подаче, что приводит к сложности согласования параметров очистки в зависимости от особенностей убираемой сельскохозяйственной культуры и загрузки уборочной машины. В исследовании представлены основополагающие критерии, которые необходимо учитывать при совершенствовании уборочных машин. Предложена новая универсальная производительная система очистки для зерноуборочных комбайнов.

В работе [7] предлагается перспективный путь повышения продуктивности сои, который заключается в разработке технологии получения качественных кондиционных семян сои, непосредственно в комбайне двухфазного обмолота в процессе уборки. Разработанные технологические и конструкторские разработки позволяют разделять зерно после обмолота на семенную и товарную фракцию. Семенная фракция с большой массой 1 000 семян отличается чистотой на уровне требований посевных качеств, репродукционных для семенных целей, с пониженным уровнем дробления и микроповреждений и увели-

ченной продуктивностью. Товарная фракция зерна сои, получаемая после домолота вторым молотильным барабаном, проходит систему очистки, предотвращает потери зерна.

На рисунке 1 представлена конструктивно-технологическая схема макетного образца модернизируемого комбайна с двухфазной схемой обмолота (патенты Российской Федерации № 2765580 от 01.02.2022; № 216094 от 17.01.2023; № 220380 от 11.09.2023), создаваемого для получения наиболее биологически ценного семенного зерна сои непосредственно в процессе уборки за счет выделения, очистки и сбора фракции, обмолоченной первым молотильным барабаном с наиболее мягким режимом обмолота – с минимальным уровнем травмирования.

Данная разработка, направленная на снижение себестоимости получения семенного зерна сои непосредственно на этапе уборки за счет исключения этапов предварительной и первичной очисток при послеуборочной обработке для комбайнов с двухбарабанной схемой обмолота, несомненно, является актуальной [8].

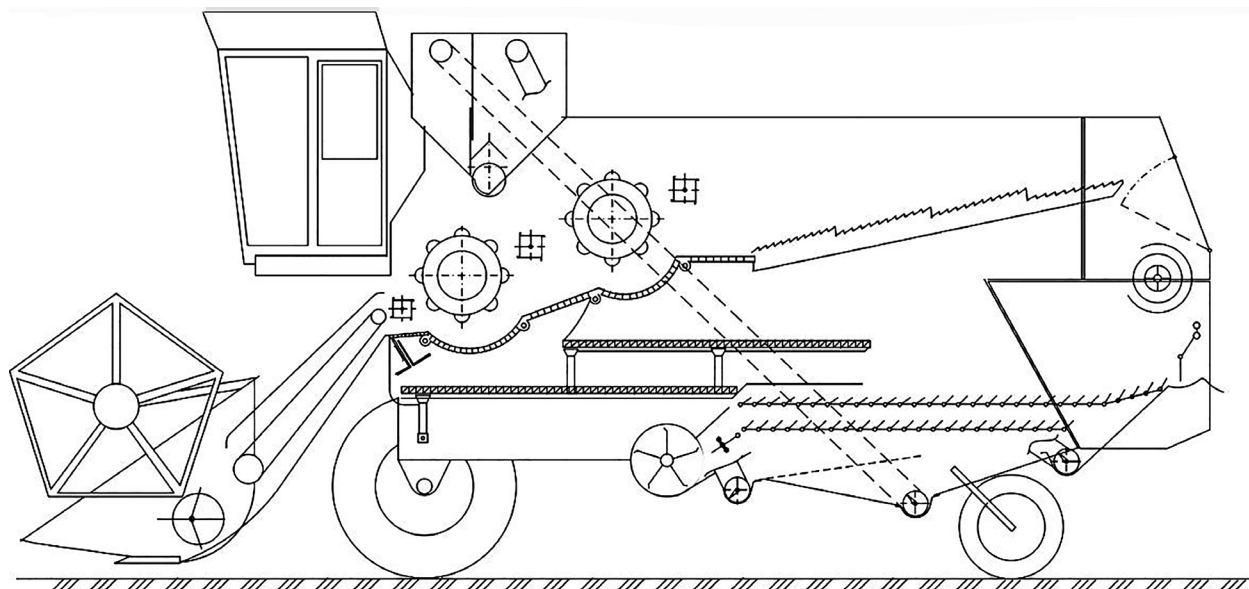


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема макетного образца модернизируемого комбайна с двухфазной схемой обмолота

Figure 1 – Design and technological diagram of a mock-up sample of an upgraded combine harvester with a two-phase threshing circuit

Полевые испытания разрабатываемого макетного образца в 2022 г. при низкой влажности зерна (8,2 %) выявили повышенный к нормативу процент дробления зерна сои в первой семенной фракции и недостаточную чистоту зерна во второй товарной фракции [9].

Одной из причин снижения качества семян сои первой фракции является недостаточный вылет дополнительной транспортной доски (ДТД) над первой половиной верхнего решета. В этом случае падение целого и дробленого зерна из мелкого соевого вороха из-под второго молотильного барабана, соломотряса и домолачивающего устройства приходится на первую половину верхнего решета – на участке 320–500 мм, что приводит к его скатыванию по первой скатной доске или пробивному решету под нижним решетом и попаданию в первую (семенную) фракцию. Скорость свободного полета частиц мелкого соевого вороха с дополнительной транспортной доски и величина их горизонтального перемещения (относа) при падении на верхнее решето очистки зависят от частоты колебаний грохота и от величины воздушного потока, определяемых соответственно передаточным отношением цепной передачи с вала вентилятора на привод грохота и оборотами вентилятора.

Для решения задачи автоматизации управлением работой системы очистки в зависимости от урожайности убираемой культуры и рабочей скорости комбайна необходимо иметь возможность изменения частоты колебаний грохота и автономного управления оборотами вентилятора очистки в процессе комбайнирования.

Цель исследования – обеспечение нормативных показателей качества семенной (травмирование) и товарной (чистота) фракций согласно техническому заданию.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленной цели необходимо аналитически-расчетным путем определить возможные сочетания конструктивно-кинематических параметров привода грохота и воздушно-решетной очистки:

1) при режимных параметрах воздушно-решетной очистки, соответствующих номинальному режиму двигателя комбайна, величину вылета ДТД, обеспе-

чивающей относ зерно сои и легких компонентов (дробленое зерно, бобы, полова) на вторую половину верхнего решета;

2) минимальную скорость отрыва целого и дробленого зерна сои от края ДТД и соответствующие конструктивно-кинематические параметры ее привода, обеспечивающие относ зерно с высоты 140 мм на верхнее решето на дальность не менее 180 мм;

3) дополнительное влияние наклонного воздушного потока, создаваемого у обреза ДТД над верхним решетом и углом наклона планок его жалюзи, на относ частиц мелкого соевого вороха.

Для выявления взаимосвязи кинематических параметров механизма привода очистки соезерноуборочного комбайна с его конструктивными (размерными) параметрами необходимо получить соответствующие аналитические выражения, позволяющие ответить на поставленные вопросы.

Результаты исследований и их обсуждение. Расчетная схема привода системы двухпоточной очистки макетного образца модернизируемого соезерноуборочного комбайна дана на рисунке 2.

В приводе транспортной доски комбайна применяется шарнирный четырехзвенник. Выражения для перемещений, скоростей и ускорений его точек этим механизмом довольно сложны. Поэтому для дальнейшего анализа с достаточной для практики точностью можно рассматривать кинематику транспортной доски, приводимой кривошипно-ползунным механизмом (КПМ).

Поскольку у КПМ для обеспечения колебаний транспортной доски и связанного с ней верхнего решета, длина шатуна (l) во много раз превышает величину радиуса кривошипа (r), то есть $l \gg r$, то с достаточной степенью точности можно на основании схемы, представленной на рисунке 2, записать следующие уравнения для перемещения, скорости и ускорения точек транспортной доски (1):

$$\begin{aligned} x &= r(1 - \cos \omega t), \\ V &= \frac{dx}{dt} = r \cdot \omega \cdot \sin \omega t; \\ a &= \frac{d^2x}{dt^2} = r \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

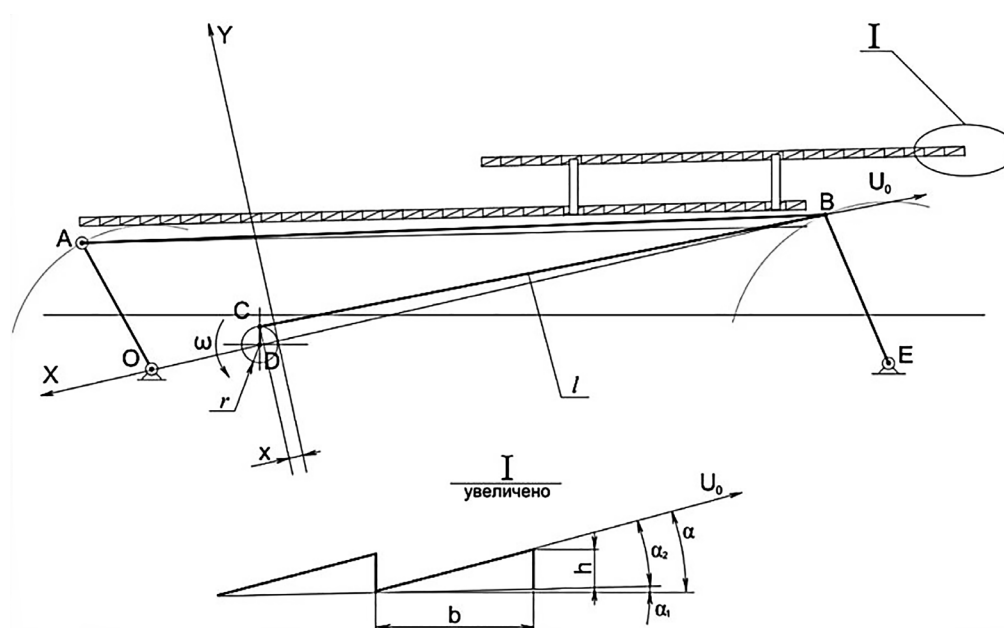


Рисунок 2 – Схема привода транспортной доски системы двухпоточной очистки
Figure 2 – Drive diagram of the transport board of the two-stream cleaning system

где r – радиус кривошипа;
 ω – угловая скорость кривошипа;
 t – время.

Выразим скорость и ускорение точки транспортной доски в функции перемещения; для этого из первого уравнения системы (1) выразим:

$$\begin{aligned}\cos\omega t &= 1 - \frac{x}{r} \text{ или} \\ \sin\omega t &= \sqrt{1 - \cos^2\omega t} = \\ &= \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x}{r}\right)^2} = \sqrt{\frac{x}{r} \left(2 - \frac{x}{r}\right)}\end{aligned}$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned}V &= r \cdot \omega \sqrt{\frac{x}{r} \left(2 - \frac{x}{r}\right)} \\ \text{где } \omega &= \frac{\pi \cdot n_{\text{кр}}}{30}, n_{\text{кр}} = \frac{n_{\text{в}} \cdot Z_1}{Z_2},\end{aligned} \quad (2)$$

$$a = r \cdot \omega^2 \cdot \left(1 - \frac{x}{r}\right) = \omega^2 (r - x) \quad (3)$$

где $n_{\text{в}}$ и $n_{\text{кр}}$ – номинальное число оборотов вентилятора очистки и кривошипа толкателя ($n_{\text{в}} = 754 \text{ мин}^{-1}$);

ω – угловая скорость вала кривошипа;

$Z_1 = 13$ и $Z_2 = 36$ – число зубьев звездочек на валах вентилятора и кривошипного вала толкателя грохота.

Проанализируем полученные выражения (2) и (3). Максимальное значение скорости транспортной доски $V_{\text{max}} = r \cdot \omega$ будет при $x = r$; минимальное $V_{\text{min}} = 0$ составит при $x = 0$ и $x = 2r$. Максимальное значение ускорения транспортной доски $a_{\text{max}} = r \cdot \omega^2$ будет при $x = 0$ и при $x = 2r$; минимальное ускорение $a_{\text{min}} = 0$ составит при $x = r$.

Максимальная скорость транспортной доски определяется максимальной скоростью точки В шатуна СВ, которая, в свою очередь, зависит от угла поворота колебательного вала и радиуса его кривошипа r :

$$V = 28,5 \times 0,03 = 0,855 \text{ м/с};$$

$$\text{при этом } \omega = 3,14 \times 272,28 / 30 = 28,5 \text{ с}^{-1};$$

$$n_{\text{кр}} = 754 \times 13 / 36 = 272,28 \text{ мин}^{-1}$$

Время одного колебания транспортной доски (T_r) должно быть больше времени свободного полета частицы с консоли ДТД (t_n), тем самым должно соблюдаться условие (4):

$$T_r \geq t_n \quad (4)$$

Время одного оборота вала кривошипа определяется зависимостью (5):

$$T_r = \frac{60}{n_{\text{кр}}} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5)$$

В нашем случае:

$$T_r = 2 \times 3,14 / 28,5 = 0,22 \text{ с}$$

Исходя из анализа конструктивно-кинематической схемы привода грохота макетного образца, все точки ДТД будут иметь ту же скорость $U_0 = V$, направленную под углом $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ к горизонтали, где α_1 – угол наклона к горизонтали плоскости основания транспортной доски в момент ее максимальной скорости в сторону очистки; α_2 – угол наклона ступени транспортной доски к плоскости ее основания (гипотенуза транспортирующего гребня).

Для определения величины α_2 используем зависимость (6):

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{h_r}{b_r}\right) \quad (6)$$

где h_r и b_r – высота и основание гребня по фактическим замерам (составляют соответственно 15 и 50 мм).

Тогда получим:

$$\alpha_2 = \arctg(15/50) = 0,2915 \text{ рад.} = 16,7^\circ$$

По фактическим данным графического построения в масштабе схемы привода транспортной доски, представленной на рисунке 2, $\alpha_1 \approx 3^\circ$.

Таким образом:

$$\alpha = 3 + 16,7 = 19,7^\circ$$

После достижения максимальной скорости при движении транспортной доски назад, транспортная доска начинает уменьшать скорость движения V_x до нуля, а зерно сои или иной компонент мелкого соевого вороха по инерции продолжает двигаться в заданном направлении, преодолевая силу трения на поверхности гребня и сопротивление воздуха. В момент отрыва частица мелкого вороха рассматривается как материальная точка, обладающая массой m .

Падение частицы происходит в двух возможных направлениях:

1) вертикально вниз (свободное падение) от точки отрыва;

2) по касательной к траектории движения точки В рычага ВЕ.

Рассмотрим первый случай, как наиболее неблагоприятный. Примем зерно сои или другую частицу мелкого

соевого вороха за материальную точку массой m , падающую от точки отрыва с ДТД без начальной скорости свободно и вертикально вниз. На все тела, падающие в пустоте (без учета сопротивления воздуха), действует только сила тяжести, поэтому они падают равноускоренно. Ускорение свободного падения (силы тяжести) для средних широт (g) равно $9,81 \text{ м/с}^2$. Частица, сброшенная из неподвижной точки через t секунд свободного падения будет иметь вертикальную скорость (7):

$$V_{\text{верт}} = g \cdot t \quad (7)$$

Конечная скорость частицы будет определяться выражением (8), а средняя скорость падения частицы в пустоте в данном случае находится из выражения (9):

$$V_{\text{кон}}^B = g \cdot t_{\text{п}} \quad (8)$$

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_{\text{кон}}}{2} \quad (9)$$

Путь по вертикали (Y), который частица пройдет за время ($t_{\text{п}}$), составит:

$$Y = V_{\text{ср}} \cdot t_{\text{п}} \quad (10)$$

Принимая $Y = H$, а $t_{\text{п}} = T$, получим:

$$H = V_{\text{ср}} \cdot T = \frac{g \cdot T^2}{2} \quad (11)$$

Откуда время падения частицы в пустоте равно:

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (12)$$

С учетом формулы (12), время падения частицы в пустоте, сброшенной с высоты $H = 0,14 \text{ м}$, при продольном колебании дополнительной и основной транспортной доски, составит $0,169$ секунд.

Если частица сброшена под углом α к горизонтальному решету, продолжаясь двигаться в том же направлении на 30 мм , а затем на 60 мм в обратном, со средней скоростью, составляющей $U/2 = 0,855/2 = 0,427 \text{ м/с}$. За

время полета частицы решето переместится на расстояние $0,427 \times 0,169 = 0,072$ м, то есть сдвинется вперед на 1,2 см.

Если начальная скорость частицы в новой системе координат в момент отрыва от транспортной доски равна максимальной скорости последней (U_0) и направлена назад под углом $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, то горизонтальная составляющая скорости ее полета будет определяться выражением (13):

$$U_r = U_0 \cdot \cos \alpha = U_0 \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (13)$$

Опускаясь под влиянием силы тяжести, частица одновременно будет смещаться по горизонтали с постоянной скоростью, равной U_r , и за время падения T пройдет определенный путь. Этот путь можно определить, как относ частицы по верхнему решету (14):

$$S = U_r \cdot T \quad (14)$$

В нашем случае значение величины пути (S) составит 0,136 м.

Конечная скорость частицы, сброшенной с ДТД, будет равна геометрической сумме вертикальной и горизонтальной скоростей частицы (15):

$$U_{\text{кон}} = \sqrt{(U_r)^2 + (V_{\text{кон}}^B)^2} = \sqrt{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \cos^2(\alpha_1 + \alpha_2) + 2 \cdot g \cdot H} \quad (15)$$

Подставляя значения параметров в формулу (15), получим значение конечной скорости частицы, равное 1,84 м/с.

Угол падения частицы (θ) (угол, составленный вектором скорости частицы и горизонтом верхнего решета) определяется по формуле (16):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sqrt{2gH}}{U_r} \quad (16)$$

Произведя необходимые расчеты, получим угол падения частицы, равный 1,118651 рад. или 64,09°.

Таким образом, можно заключить, что: 1) при падении в пустоте относ и

время падения частицы не зависят от веса или формы частицы;

2) в пустоте все частицы мелкого соевого вороха независимо от их формы и веса падают одинаково;

3) время одного колебания грохота больше времени свободного полета частицы с конца дополнительной транспортной доски, то есть:

$$T_r = 0,22 \text{ с} > t_n = 0,169 \text{ с}$$

Для исключения попадания частиц мелкого соевого вороха из-под второго молотильного барабана, соломотряса и домолачивающего устройства на первую половину верхнего решета при номинальных режимах очистки комбайна вылет ДТД (l_b) должен составлять не менее:

$$l_b = \frac{L_p}{2} - S \quad (17)$$

где L_p – длина верхнего решета решетного стана, м.

Таким образом, получим:

$$l_b = 1,0/2 - 0,136 = 0,364 \text{ м.}$$

При стендовых исследованиях скорости воздушного потока, создаваемого вентилятором очистки с автономным частотно регулируемым электроприводом, число оборотов вентилятора достигало 1 015 мин⁻¹. Для проверки эффективной работы штатного привода грохота при таких режимах по условию выражения (4) и согласно зависимостей (2):

$$\omega_l = 2 \times 3,14 / 0,169 = 37,18 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{r1} = 2 \times 3,14 / 37,18 = 0,169 \text{ с};$$

$$n_{\text{кр}} = 30 \times 37,18 / 3,14 = 355,04 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_b = 355,04 \times 36 / 13 = 983 \text{ мин}^{-1}.$$

При этом максимально возможная скорость ДТД составит:

$$U_0 = V \leq \omega_l \times r$$

$$37,18 \times 0,03 = 1,115 \text{ м/с}$$

Частицы (зерно) отделяются от края ДТД с начальной скоростью U_0 под минимальным углом $\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$, тогда горизонтальная составляющая определяется согласно выражению (13). Так как высота падения частицы небольшая, можно не учитывать сопротивление воздуха и считать, что частицы движутся по параболам, уравнения которых и дальность относ

частиц (зерна) определяются с использованием выражений (18) и (19):

$$x = U_r \cdot \sqrt{\frac{2y}{g}}, \quad (18)$$

$$S = U_r \cdot \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (19)$$

где H – высота сбрасывания с ДТД.

Если частицы лежат на слое мелко-го вороха, то высота (H) верхних слоев и дальность отброса (S) больше, чем в нижних слоях.

Поскольку вал толкателя транспортной доски кинематически зависит от вала вентилятора очистки, то горизонтальная составляющая начальной скорости частиц при номинальном режиме и максимально возможном значении числа оборотов вентилятора ($n_{\text{вн}} = 754 \text{ мин}^{-1}$, $n_{\text{вм}} = 983 \text{ мин}^{-1}$), согласно формуле (13), составит:

$$0,855 \times 0,9415 = 0,805 \text{ м/с};$$

$$1,115 \times 0,9415 = 1,05 \text{ м/с}$$

В этих случаях относ частицы (зерна), с учетом выражения (19) и при высоте сбрасывания с ДТД, равной 0,14 м, составит 0,136 и 0,177 м.

Это означает, что без изменения конструкции привода вала толкателя, связанного с валом вентилятора, и номинальном числе оборотов последнего, следует удлинить вылет ДТД до 364 мм или при существующем вылете в 320 мм увеличить число оборотов вентилятора до 983 мин^{-1} .

Для вылета дополнительной транспортной доски в 320 мм, принимая, что $S = 0,18 \text{ м}$, определим по формулам (13), (19) и (20) необходимую скорость отрыва от транспортной доски U_0 и соответствующую частоту вращения кривошипного вала толкателя транспортной доски:

$$U_0 = \frac{S}{\sqrt{\frac{2H}{g} \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}}, \quad (20)$$

$$\omega = \frac{U_0}{r} = \frac{\pi \cdot n_{\text{кр}}}{30}; \quad n_{\text{кр}} = \frac{30 \cdot U_0}{\pi \cdot r}$$

$$\text{или } n_{\text{кр}} = \frac{30 \cdot S}{\pi \cdot r \sqrt{\frac{2H}{g} \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}} \quad (21)$$

Подставляя данные, получим:

$$U_0 = 1,13 \text{ м/с}; \quad n_{\text{кр}} = 360,1 \text{ мин}^{-1}$$

При частоте вращения вентилятора ($n_{\text{в}} = 754 \text{ мин}^{-1}$, частота толкателя ($n_{\text{кр}} = 360,1 \text{ мин}^{-1}$) составляет $272,28 < 360 \text{ мин}^{-1}$.

Для обеспечения необходимой частоты колебаний грохота при прежней частоте вращения вентилятора (754 мин^{-1}), нужно вал кривошипа толкателя грохота оснастить звездочкой с числом зубьев не более: $754 \times 13 / 360,1 = 27,22$.

Другой вариант предполагает, не изменяя конструкции привода толкателя, сделать его независимым от оборотов вентилятора. Тогда при вылете дополнительной транспортной доски в 320 мм и обеспечении штатной частоты вала кривошипа толкателя $272,28 \text{ мин}^{-1}$, необходимо сохранить нужную скорость отрыва от дополнительной транспортной доски за счет увеличения радиуса кривошипа на 10 мм.

Данные возможные варианты расчета сочетаний конструктивно-кинематических параметров ДТД модернизируемого образца комбайна, теоретически обеспечивающие с учетом принятых допущений попадание зерна сои на вторую половину верхнего решета, приведены в таблице 1.

Руководствуясь практическими соображениями, предпочтительнее первый, либо четвертый варианты сочетаний конструктивно-кинематических параметров привода грохота комбайна. При этом оба варианта перспективны в плане дальнейшей автоматизации управления работой воздушно-решетной очистки с приводом, кинематически независимым от работы вентилятора.

Рассмотрев свободный полет частицы мелкого соевого вороха с ДТД, определим величину ее отброса в случае воздействия на нее наклонного воздушно-го потока.

На рисунке 3 приведена схема наклонного воздушного потока от штатного вентилятора для ДТД. При рассмотрении процесса разделения мелкого вороха на фракции (зерно целое, дробленое, солома и солома) принимаем следующие допущения. Считаем, что:

1) воздушный канал от вентилятора плоский, его скорость по величине и направлению постоянна в любой точке;

Таблица 1 – Варианты сочетаний конструктивно-кинематических параметров привода ДТД макетного образца модернизируемого комбайна с двухфазной схемой обмолота и двухпоточной системой воздушно-решетной очистки для уборки сои на семенные цели

Table 1 – Variants of combinations of design and kinematic parameters of the DTD drive of a mock-up sample of an upgraded combine with a two-phase threshing circuit and a two-stream air-sieve cleaning system for harvesting soybeans for seed purposes

Параметры	Варианты расчета			
	1	2	3	4
Уклон транспортной доски α_1 , град.	3	3	3	3
Уклон гребня транспортной доски α_2 , град.	16,7	16,7	16,7	16,7
Основание гребня b_1 , мм	50	50	50	50
Высота гребня h_1 , мм	15	15	15	15
Радиус кривошипа привода r , м	0,03	0,03	0,03	0,0396
Обороты вентилятора n_b , мин ⁻¹	754	983	754 (737)	754 (1 015)
Звездочка Z_1	13	13	13	13
Звездочка Z_2	36	36	27	36
Передаточное отношение i	2,77	2,77	2,077	2,77
Обороты кривошипа $n_{кр}$, мин ⁻¹	272,28	355	363 (355)	272,28
Угловая скорость кривошипа ω , с ⁻¹	28,56	37,18	38,01 (37,18)	28,56
Период колебаний грохота T_r , с	0,22	0,169	0,167 (0,169)	0,22
Высота падения частиц H , м	0,14	0,14	0,14	0,14
Время свободного падения частиц $t_{п} = T$, с	0,169	0,169	0,169	0,169
Скорость отрыва частиц мелкого вороха U_o , м/с	0,855	1,115	1,13 (1,115)	1,13
Горизонтальная составляющая скорости отрыва частиц U_r , м/с	0,805	1,05	1,064 (1,05)	1,064
Относ. частиц вороха S , м	0,136	0,177	0,180	0,180
Конечная скорость $V_{кон}$, м/с	1,84	1,962	1,975	1,97
Угол падения на решето Q , град.	64,09	57,64	57,28 (57,64)	57,28
Вылет дополнительной транспортной доски l_b , мм	364	320	320	320

2) частицы зерновой смеси перемещаются в потоке свободно, как материальные тела, без столкновения между собой.

Рассмотрим случай, когда начальная скорость зерна равна нулю. На зерно в этом случае действуют следующие силы:

$m \times g$ – вес зерна;

$R = m \times k_n \times C^2$ – сила действия наклонного воздушного потока

Сила R имеет такое же направление, как и скорость потока C . Здесь k_n – коэффициент парусности, который определяется как $g/(V_{кр}^2)$, где $V_{кр}$ – критическая скорость (скорость витания).

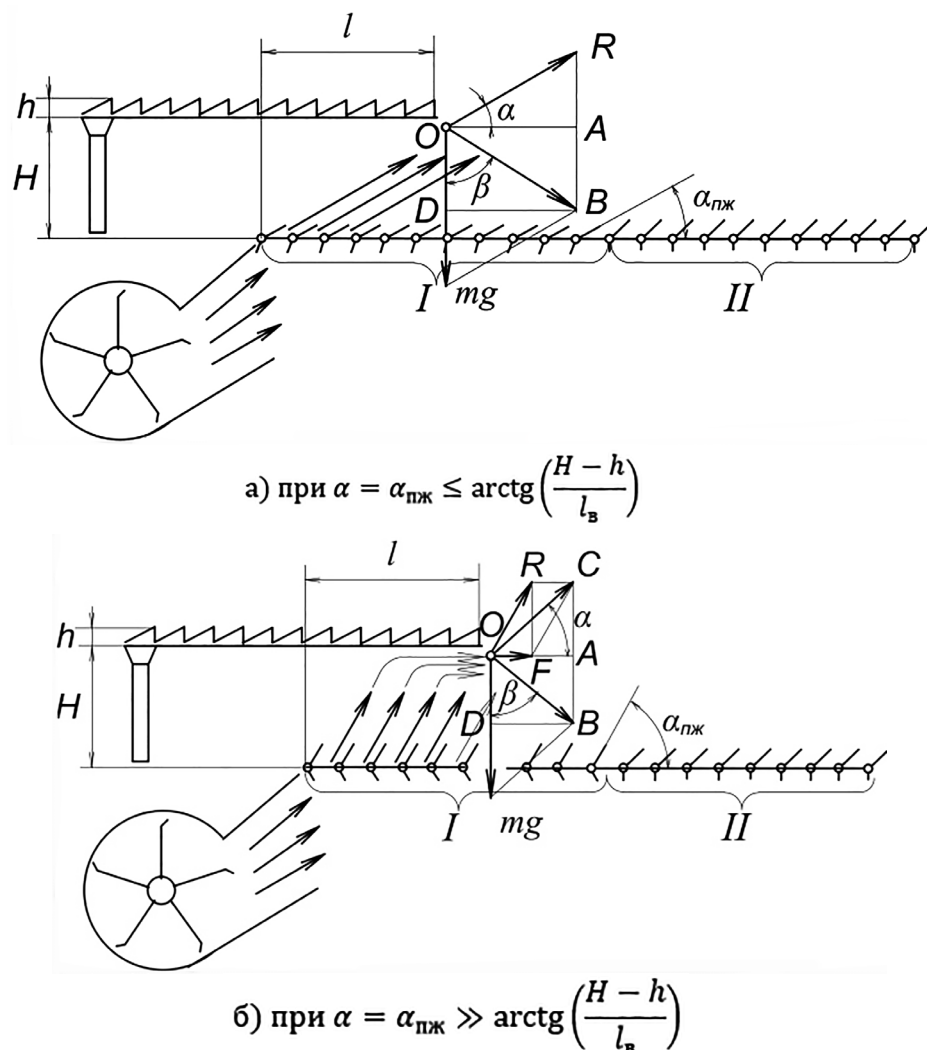


Рисунок 3 – Схема наклонного воздушного потока для частиц мелкого соевого вороха, падающего с ДТД модернизируемого комбайна

Figure 3 – Diagram of an inclined air flow for particles of small soybean heaps falling from the DTD of an upgraded combine

При этом направление абсолютной скорости зерна совпадает с направлением равнодействующей векторов веса зерна и силы действия наклонного воздушного потока (рис. 3, а).

Из $\angle OBD$ (рис. 3, а) угол β отклонения вектора абсолютной скорости частиц мелкого соевого вороха в начале движения от вертикали определяется согласно формуле (22):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{C^2 \cdot \cos \alpha}{V_{кр}^2 - C^2 \cdot \sin \alpha} \quad (22)$$

На рисунке 4 представлены зависимости отклонения вектора абсолютной

скорости частиц вороха, иллюстрирующие расчеты по формуле (22).

При этом скорости витания для целого, дробленого зерна сои и соевой половы при расчетах принимались по данным таблицы 2 и определялись как средние значения данных, полученных авторами экспериментально на парусном классификаторе для сои трех сортов.

Из анализа рисунка 4 можно заключить, что равномерный по всей высоте падения частиц с ДТД наклонный воздушный поток оказывает наибольшее отклоняющее влияние для предкритических скоростей: целого зерна сои при скорости потока 8 м/с; дробленого зерна при скорости потока 5 м/с; а для половы с соломой

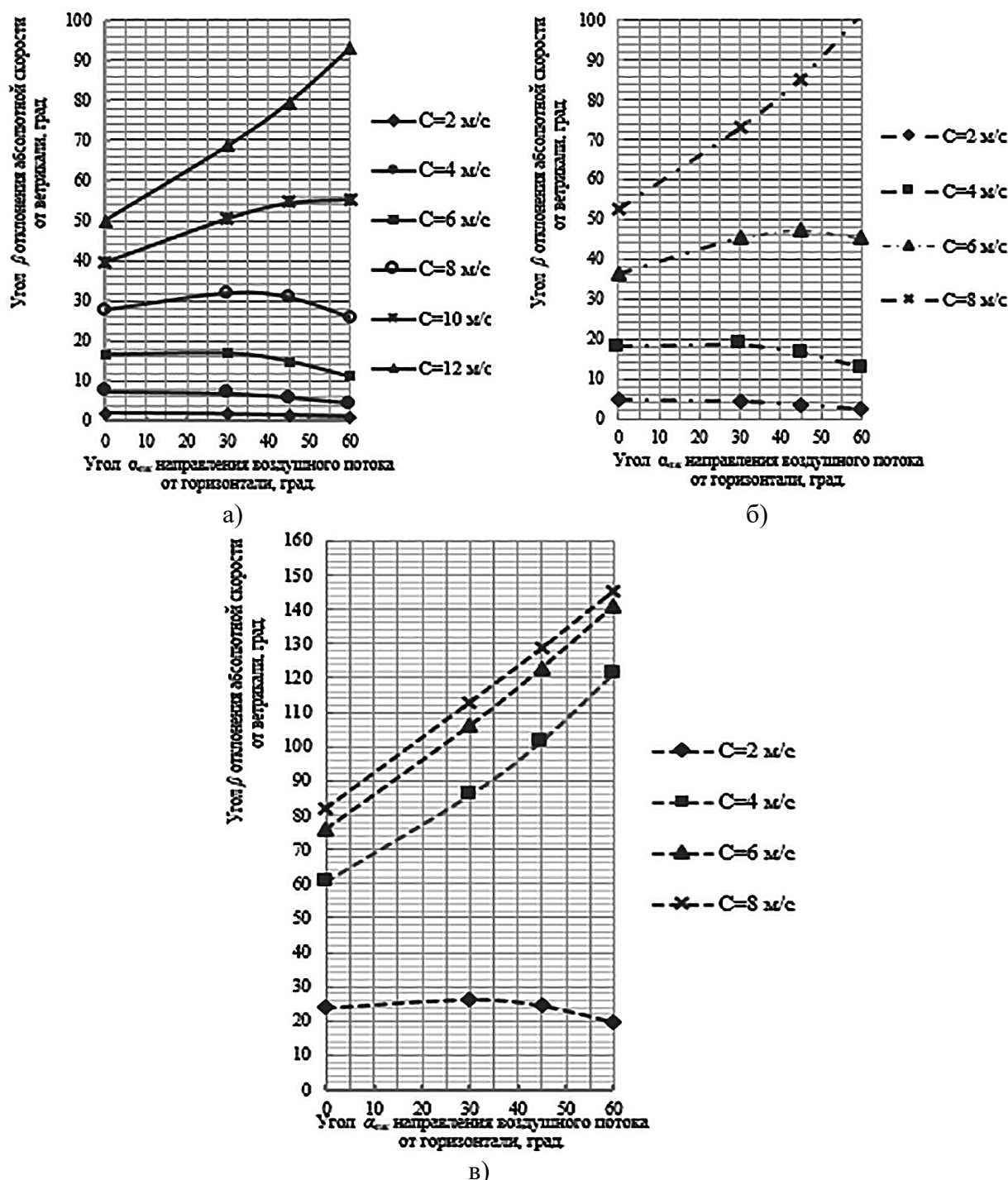


Рисунок 4 – Зависимости угла β отклонения вектора абсолютной скорости частиц мелкого соевого вороха от вертикали для различных значений реальной скорости воздушного потока и его направления, определяемого углом $\alpha_{пж}$ направления воздушного потока от горизонтали, задаваемого положением планок жалюзи верхнего решета

Figure 4 – Dependences of the angle β of the deviation of the vector of the absolute velocity of the particles of small soybean heap from the vertical for different values of the real velocity of the air flow and its direction, determined by the angle $\alpha_{пж}$ of the direction of the air flow from the horizontal set by the position of the slats of the blinds of the upper sieve

Таблица 2 – Аэродинамические характеристики некоторых сортов сои

Table 2 – Aerodynamic characteristics of some soybean varieties

Показатели	Фракции мелкого соевого вороха		
	полова, стебли	дробленое зерно	целое зерно
<i>Сентябринка</i>			
Масса 1 000 зерен, г	–	–	156,1
Скорость витания, м/с	3	7	12,0
Коэффициент парусности	1,08	0,20	0,068
<i>ВНИИС 18</i>			
Масса 1 000 зерен, г	–	–	181,8
Скорость витания, м/с	3	8	14,5
Коэффициент парусности	1,08	0,15	0,046
<i>Лидия</i>			
Масса 1 000 зерен, г	–	–	144,9
Скорость витания, м/с	3	7	11,0
Коэффициент парусности	1,08	0,20	0,080

при скорости потока 2 м/с, соответствующих углу $\alpha_{пж}$ в пределах 10–30°.

Предварительно (без установки ДТД) экспериментальная оценка цифровым анемометром модели СЕМ DT-8880 распределения горизонтальной составляющей реальной скорости воздушного потока по высоте 140 мм падения частиц вороха на длине вылета 320 мм с уровня верхней поверхности ДТД на верхнее решето при открытии планок жалюзи, определяющих угол $\alpha_{пж} = 30^\circ$, показана в виде графика на рисунке 5.

Из представленного рисунка 5 видно, что горизонтальная составляющая скорости наклонного воздушного потока при падении частиц не является однородной по величине, по абсолютной величине не достигает критической скорости, как для целого, так и для дробленого зерна при номинальном числе оборотов вентилятора, составляющем 754 мин⁻¹, но превышает критическую скорость для половы, соломы. Это явно должно способствовать попаданию целого и дробленого зерна на вторую половину верхнего решета и созданию на ней псевдосжиженного слоя мелкого соевого вороха, а также хорошей сепарации обмолоченного зерна сои и удалению половы и соломы за пределы очистки при условии, что и на второй половине верхнего решета распределение скорости воздушного потока будет соответствующим.

При ранее рассмотренных вариантах вылета 320 и 360 мм высотой 20 мм и при условии наклона воздушного потока от первой половины верхнего решета, задаваемого положением планок его жалюзи при угле их наклона, большим или равным 30°, часть воздушного потока из-под жалюзи верхнего решета, встречаясь с консолью ДТД, формирует горизонтальный слой воздушного потока, уменьшающий угол направления вектора суммарной скорости воздушного потока у обреза ДТД до 16,1° и увеличивающий величину суммарной скорости потока в 1,34 раза.

Как следует из рисунка 5, при величине скорости воздушного потока, равной 3 м/с, ее значение составит 4,02 м/с.

Подставляя расчетное значение суммарной скорости воздушного потока под обрезом ДТД (рис. 3, б) в формулу (22), получим, что отклонение вектора абсолютной скорости полета частицы мелкого соевого вороха от вертикали в начале движения, даже при ее начальной скорости, равной нулю, составит:

1) для целого зерна сои:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{4,02^2 \cdot \cos(16,1 \cdot \pi/180)}{11^2 - 4,02^2 \cdot \sin(16,1 \cdot \pi/180)} = 0,1333$$

тогда $\beta = 0,1325$ рад (7,59°)

2) для дробленого зерна сои:

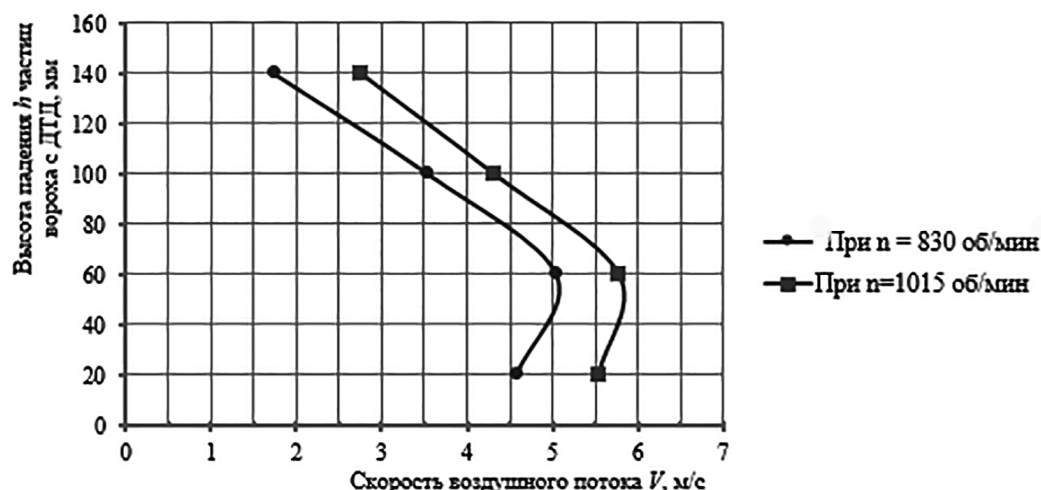


Рисунок 5 – Распределение горизонтальной составляющей реальной скорости воздушного потока по высоте на длине вылета $l_v = 320$ мм над верхним штатным решетом при открытии планок жалюзи $\alpha_{пж} = 30^\circ$ на первой его половине
Figure 5 – Distribution of the horizontal component of the real air flow velocity in height at the length of departure $l_v = 320$ mm above the upper standard sieve when opening the slats of the blinds $\alpha_{пж} = 30^\circ$ in its first half

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{4,02^2 \cdot \cos(16,1 \cdot \pi / 180)}{7^2 - 4,02^2 \cdot \sin(16,1 \cdot \pi / 180)} = 0,3488$$

тогда $\beta = 0,3356$ рад. ($19,23^\circ$)

3) для половы с соломой:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{4,02^2 \cdot \cos(16,1 \cdot \pi / 180)}{3^2 - 4,02^2 \cdot \sin(16,1 \cdot \pi / 180)} = 3,4362$$

тогда $\beta = 1,2876$ рад. ($73,77^\circ$)

Используя зависимость $S = 120 \operatorname{tg} \beta$, расчетное значение минимального отбоя с ДТД за счет отклонения наклонным воздушным потоком при $\alpha_{пж} = 30^\circ$ составит для целого зерна сои – 16 мм, для дробленого зерна – 42 мм, а для половы с соломой – 412 мм. Тем самым под совместным действием инерционных сил при отрыве от ДТД и воздействия наклонного воздушного потока у ее обреза полова с соломой, попадая на последнюю четверть верхнего решета, должны гарантированно улететь за пределы молотилки при условии, что и скорость наклонного воздушного потока над второй половиной верхнего решета будет не менее 4 м/с, что подтверждается графиком на рисунке 4, в.

Заключение. Для попадания частиц мелкого соевого вороха из-под второго молотильного барабана, соломотряса и домолачивающего устройства на вторую

половину верхнего решета при номинальных режимах очистки комбайна вылет ДТД должен быть не менее 364 мм, либо необходимо увеличить число оборотов вентилятора до 983 мин⁻¹.

Теоретически обоснованы четыре варианта сочетаний конструктивно-режимных параметров ДТД модернизируемого комбайна, обеспечивающих попадание зерна сои из-под второго молотильного барабана на вторую половину верхнего решета с автономной регулировкой положения планок жалюзи. Предпочтительнее варианты с удлинением вылета ДТД до 364 мм и без удлинения ДТД с увеличением радиуса кривошипа привода грохота комбайна до 40 мм.

Данные варианты перспективны в связи с необходимостью дальнейшей автоматизации управления работой воздушно-решетной очистки с приводом грохота, кинематически независимым от режима работы вентилятора.

Таким образом, целое и дробленое зерно сои с учетом совместного действия инерционных сил при отрыве от ДТД и воздействия наклонного воздушного потока должны гарантированно попадать на вторую половину верхнего решета, что позволит обеспечить качество первой (семенной) фракции сои.

Список источников

1. Kalinouski A. Aerodynamic calculation of the combine harvester cleaning system in second formulation // *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2024. No. 2. P. 53–60. doi: 10.46864/1995-0470-2024-2-67-53-60.
2. Lovchikov A. P., Ognev I. I. To the development of sieve combination of the combine harvester cleaning system // *AIP Conference Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021*. Sevastopol : American Institute of Physics Inc., 2022. P. 030005. doi: 10.1063/5.0099725.
3. Lovchikov A. P., Ognev I. I. Theoretical background for combination of sieves of combine harvester cleaning system // *AIP Conference Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021*. Sevastopol : American Institute of Physics Inc., 2022. P. 030006. doi: 10.1063/5.0099726.
4. Wei L., Kai Zh., Gang L., Huaichu D., Chunpeng Zh. An improved fuzzy logic control method for combine harvester's cleaning system // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022. Vol. 56. P. 337–346. doi: 10.3103/S0146411622040058.
5. Badretdinov I. D., Mudarisov S. G., Khaliullin D. T. Examination of the airflow uneven distribution over the combine harvester cleaning system // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. Vol. 9. No. 2. P. 371–378. doi: 10.18280/mmep.090210.
6. Рудой Д. В., Алексаков Ю. Ф., Голев Б. Ю., Мальцева Т. А. Предпосылки и пути совершенствования ветро-решетной системы очистки зерноуборочных комбайнов // *Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2023. № 194. С. 192–202. doi: 10.21515/1990-4665-194-017.
7. Присяжная И. М., Присяжная С. П. Определение конструктивных параметров дополнительной транспортной и скатной досок в комбайне двухфазного обмолота для сепарации семян сои // *Агронаука*. 2024. Т. 2. № 1. С. 78–89. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-1-78-89.
8. Присяжная И. М., Присяжная С. П., Синеговская В. Т., Бумбар И. В., Перепелкина Л. И., Кузин В. Ф. [и др.]. Совершенствование комбайна двухфазного обмолота для получения качественных семян сои // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2018. № 4 (48). С. 277–283. doi: 10.24411/1999-6837-2018-14116.
9. Присяжная И. М., Присяжная С. П., Липкань А. В. Разработка адаптирующих устройств комбайна для получения качественных семян при уборке сои // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. № 2. С. 84–88. doi: 10.31857/2500-2082/2023/2/84-88.

References

1. Kalinouski A. Aerodynamic calculation of the combine harvester cleaning system in second formulation. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2024;2:53–60. doi: 10.46864/1995-0470-2024-2-67-53-60.
2. Lovchikov A. P., Ognev I. I. To the development of sieve combination of the combine harvester cleaning system. *Proceedings from AIP Conference Proceedings: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021*. (PP. 03005), Sevastopol, American Institute of Physics Inc., 2022. doi: 10.1063/5.0099725.
3. Lovchikov A. P., Ognev I. I. Theoretical background for combination of sieves of combine harvester cleaning system. *Proceedings from AIP Conference Proceedings: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2021*. (PP. 030006), Sevastopol, American Institute of Physics Inc., 2022. doi: 10.1063/5.0099726.
4. Wei L., Kai Zh., Gang L., Huaichu D., Chunpeng Zh. An improved fuzzy logic control method for combine harvester's cleaning system. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022;56:337–346. doi: 10.3103/S0146411622040058.
5. Badretdinov I. D., Mudarisov S. G., Khaliullin D. T. Examination of the airflow uneven distribution over the combine harvester cleaning system. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2022;9;2:371–378. doi: 10.18280/mmep.090210.

6. Rudoy D. V., Aleksakov Yu. F., Golev B. Yu., Maltseva T. A. Prerequisites and ways to improve the wind-sieve cleaning system of combine harvesters. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2023;194:192–202. doi: 10.21515/1990-4665-194-017 (in Russ.).

7. Prisyazhnaya I. M., Prisyazhnaya S. P. Determination of the design parameters of additional transport and pitched boards in a two-phase threshing combine for the separation of soybean seeds. *Agronauka*, 2024;2;1:78–89. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-1-78-89 (in Russ.).

8. Prisyazhnaya I. M., Prisyazhnaya S. P., Sinegovskaya V. T., Bumber I. V., Perepelkina L. I., Kuzin V. F. [et al.]. Improvement of the two-phase threshing combine for obtaining high-quality soybean seeds. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*, 2018;4(48):277–283. doi: 10.24411/1999-6837-2018-14116 (in Russ.).

9. Prisyazhnaya I. M., Prisyazhnaya S. P., Lipkan A. V. Development of adaptive combine harvester devices for obtaining high-quality seeds during soybean harvesting. *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2023;2:84–88. doi: 10.31857/2500-2082/2023/2/84-88 (in Russ.).

© Липкань А. В., Сахаров В. А., Усанов В. С., Кувшинов А. А., 2024

Статья поступила в редакцию 22.07.2024; одобрена после рецензирования 17.08.2024; принята к публикации 19.08.2024.

The article was submitted 22.07.2024; approved after reviewing 17.08.2024; accepted for publication 19.08.2024.

Информация об авторах

Липкань Александр Васильевич, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сои, ORCID: 0000-0002-2769-6672, Author ID: 610444, lav-blg@mail.ru;

Сахаров Владимир Александрович, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сои, ORCID: 0000-0003-3471-301X, Author ID: 959033, sva@vniisoi.ru;

Усанов Вячеслав Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сои, ORCID: 0000-0002-4288-9835, Author ID: 876149, uvs@vniisoi.ru;

Кувшинов Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт сои, ORCID: 0000-0002-6332-5406, Author ID: 898389, kyaa@vniisoi.ru

Information about the authors

Alexander V. Lipkan, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, ORCID: 0000-0002-2769-6672, Author ID: 610444, lav-blg@mail.ru;

Vladimir A. Sakharov, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, ORCID: 0000-0003-3471-301X, Author ID: 959033, sva@vniisoi.ru;

Vyacheslav S. Usanov, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, ORCID: 0000-0002-4288-9835, Author ID: 876149, uvs@vniisoi.ru;

Alexey A. Kuvshinov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Soybean, ORCID: 0000-0002-6332-5406, Author ID: 898389, kyaa@vniisoi.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.