

Научная статья

УДК 631.354.2027

doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-98-102

Теоретический аспект комбинации решёт системы очистки зерноуборочного комбайна

Александр Петрович Ловчиков, Сергей Николаевич Кулагин

Южно-Уральский государственный аграрный университет

Аннотация. Исследование проведено с целью обоснования разработки комбинации решёт системы очистки зерноуборочного комбайна. Исследование базируется на общелогическом методе и математическом анализе. В ходе выполнения исследования установлено образование процесса сепарации зернового вороха в результате функционирования системы «зерновой ворох – воздушный поток – решето». В результате силового анализа процесса сепарации зернового вороха в системе очистки комбайна выявлена значимость действия воздушного потока. Получены аналитические зависимости, которые характеризуют изменения скорости перемещения зернового вороха в горизонтальном и вертикальном направлениях в зависимости от скорости воздушного потока. Это позволило рассмотреть изменения параметров зернового вороха от скорости воздушного потока в системе очистки зерноуборочного комбайна.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, зерновой ворох, скорость воздушного потока, парусность, решето, перемещение, зависимости.

Для цитирования: Ловчиков А.П., Кулагин С.Н. Теоретический аспект комбинации решёт системы очистки зерноуборочного комбайна // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 2 (88). С. 98–102. doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-98-102.

Original article

Theoretical aspect of the combination solution of the cleaning system of the grain combine

Aleksandr P. Lovchikov, Sergey N. Kulagin

South Ural State Agrarian University

Abstract. The research conducted in order to justify articulated a combination of sieves of the cleaning system in the grain combine. The research is based on general logical method and mathematical analysis. The research established the formation of the separation process of a grain heap as a result from the operation of system «grain heap-air flow-sieve». In consequence of the force analysis of the separation process of the grain heap in the cleaning system of the combine, the great importance of the action of the air flow was revealed. The research obtained analytical dependences which characterize changes in the speed of movement of a grain heap in the horizontal and vertical directions, depending on the speed of the air flow. This made it possible to consider the changes in the parameters of the grain heap from the air flow's speed in the cleaning system of the combine.

Keywords: grain combine, cleaning system, grain heap, air-flow speed, windage, sieve, movement, dependencies.

For citation: Lovchikov A.P., Kulagin S.N. Theoretical aspect of the combination solution of the cleaning system of the grain combine. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 88(2): 98–102. (In Russ.). doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-98-102.

Зерновой ворох, поступающий на решёта системы очистки зерноуборочного комбайна, – это смесь компонентов (рис. 1) [1–5], которые имеют разные коэффициенты парусности.



Рис. 1 – Зерновой ворох, поступающий на решёта системы очистки зерноуборочного комбайна

Для лучшего выделения из данной смеси зерновых (семян сельскохозяйственных культур) [1, 6, 7] она подвергается технологическому воздействию воздухом системы очистки комбайна. Технологический воздух обеспечивает разрыхление растительного материала зернового вороха, вследствие чего образуется пространственная решётка из растительных материалов, сквозь которую осуществляется движение зерновых как компонентов смеси к поверхности решета для последующего проникновения через его отверстия.

Наличие поверхности решета, его возвратно-поступательного движения, а также технологического воздуха приводит к образованию процессов сепарации и перемещения зернового вороха в системе очистки комбайна, которые характеризуются сложностью протекания и требуют дальнейшего своего теоретического исследования.

Исследования проводились с целью обоснования закономерностей, характеризующих процесс сепарации зерновок (далее зерна) в системе очистки зерноуборочного комбайна.

Материал и методы. При рассмотрении движения зернового вороха по решету системы очистки комбайна из-за плотного количества компонентов смеси в исследованиях применён приведённый коэффициент парусности элементарного слоя, который принят как средневзвешенное всех коэффициентов парусности компонентов, входящих в зерновой ворох (пшеница находится в интервале 0,2–0,3 [8, 9]).

Результаты исследования. Для оценки сепарации зерна в системе очистки комбайна в работах С.Ф. Сороченко [10, 11] представлена математическая модель, учитывающая распределение (процент) зернового вороха на решете (верхнем):

$$P = 100 \cdot \exp[-L_{RO} \cdot \mu_R \cdot e^{-k_1 \cdot V_h \cdot k_2}], \quad (1)$$

где L_{RO} – длина решета, м;

μ_R – коэффициент сепарации, 1/м;

k_1 и k_2 – опытные коэффициенты, характеризующие работу системы очистки комбайна;

V_h – коэффициент вариации, толщины зернового вороха на решете, %.



Рис. 2 – Поперечное сечение зернового слоя на решете (верхнее)

На решётах (верхнем и нижнем) установлено точное количество продольных гребёнок (рис. 2), препятствующих смещению зернового вороха в поперечном направлении в сторону уклона комбайна. Исходя из этого факта характер распределения зернового вороха в начале и в конце решета имеет один и тот же вид, поэтому параметр коэффициента V_h определяется как среднее значение [3, 10, 11]:

$$V_h = \frac{V_{hn} + V_{hk}}{2}, \quad (2)$$

где V_{hn} и V_{hk} – коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха в начале и в конце соответственно.

Вышеотмеченное предопределило рассмотрение сечения зернового вороха на решете как прямоугольника (рис. 2) [10, 11]. При этом элементарный слой зернового вороха перемещается в продольном направлении за одно колебание решета на расстояние:

$$\Delta X = V_{Sl} \cdot T, \quad (3)$$

где V_{Sl} – скорость перемещения слоя, м/с;

T – период колебаний.

Тогда объём определим следующим образом:

$$\Delta Q = V_{Sl} \cdot B_{RO} \cdot h_{Sl} \cdot \Delta X = B_{RO} \cdot h_{Sl} \cdot V_{Sl} \cdot T. \quad (4)$$

Поскольку колебания решёт происходят по гармоническому закону [10, 11], в поведении зернового вороха можно выделить две фазы: *первая* – неустановившееся вынужденное движение, режим – динамический нестационарный, т.е. $V_h \neq \text{const}$; *вторая* – характеризует вынужденное движение зернового вороха, режим – динамический стационарный, а это $V_h = \text{const}$.

Так как циклическая частота колебаний решета – величина const, можно принять допущение, как отмечается в ранее опубликованных работах [10, 11], что коэффициент вариации V_h изменяется по линейной зависимости, т.е. за одно колебание решета зерновой ворох пере-

местится на расстояние ΔX , а следовательно, и коэффициент вариации изменится на величину ΔV_h . Тогда при перемещении зернового вороха [10, 11] от начала до промежуточного сечения величина определится по формуле:

$$\Delta V_{hp} = \frac{(V_{hp} - V_{hx})}{z}, \quad (5)$$

где z – количество колебаний решета при перемещении зернового вороха на расстояние X :

$$z \neq \text{round}\left(\frac{x}{\Delta x}\right). \quad (6)$$

При перемещении от промежуточного к конечному [10, 11] примет вид:

$$\Delta V_{hk} = \frac{(V_{hx} - V_{hk})}{(k - z)}, \quad (7)$$

где k – количество колебаний решета, при котором зерновой ворох находится на поверхности решета, т.е.

$$k = \text{round}\left(\frac{L_{RO}}{\Delta x}\right), \quad (8)$$

где L_{RO} – длина решета.

На основе этого С.Ф. Сороченко [10, 11] предложил модель сепарации зерна в следующем виде:

$$P = 100 \prod_{i=1}^k \left(\exp\left(-\mu \cdot \Delta x \cdot e^{-\frac{(V_{hn} + \Delta V_h \cdot (-i), \text{ если } i \leq z)}{(V + \Delta V \cdot 2(z-i), \text{ если } i > z)}}\right) \right). \quad (9)$$

При этом автор отмечал [11], что зерновой ворох на решётах системы отчистки, в частности комбайна 3-го класса, при отсутствии поперечного крена имеет небольшую неравномерность распределения ($V_h = 0,091$), а потери зерна сходом с верхнего решета составляют 0,13 %.

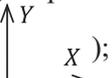
Вышеизложенный материал свидетельствует о том, что процесс сепарации зерна образуется благодаря наличию системы «зерновой ворох – воздух – решето». При этом на элементарный слой зернового вороха, находящегося на колеблющемся решете, действуют следующие силы:

1) сила тяжести:

$$G = m \cdot g, \quad (10)$$

где m – масса элементарного слоя, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

2) нормальные реакции гребёнки по осям X и Y ();

3) сила инерции элементарного слоя от колебаний решета:

$$J = m \cdot \omega^2 \cdot V \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (11)$$

Движение гребёнки решета происходит по дуге окружности с радиусом подвески l_p , поэтому на элементарный слой действует центробежная сила:

$$F_s = m \cdot \omega_z^2 \cdot l_p, \quad (12)$$

где ω_z – угловая скорость элементарного слоя, зависящая от угловой скорости подвески ω ; составляющие силы трения по осям X и Y , а именно силы F_1 и F_2 :

$$F_1 = f_1 \cdot N, \quad (13)$$

$$F_2 = f_2 \cdot N, \quad (14)$$

где f_1 – коэффициент трения слоя по гребёнке решета;

f_2 – приведённый коэффициент трения сцепления слоя с гребёнкой, $f_2 > 2$ [10].

Сила воздействия воздушного потока рассчитывается как:

$$R = m \cdot k_p \cdot \Delta U^2, \quad (15)$$

где k_p – приведённый коэффициент парусности зернового вороха как смеси;

ΔU – скорость обдува элементарного слоя воздухом в продольном направлении относительно решета (относительная скорость в продольном направлении).

В работе С.Ф. Сороченко [10] отмечается, что величину ΔU можно определить по уравнению:

$$\Delta U = U_V + \omega \cdot r \cdot \cos(V) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - x \cdot \cos(\gamma - \delta_1), \quad (16)$$

где U_V – скорость воздушного потока, м/с;

ω – циклическая частота колебаний;

r – амплитуда колебаний решета, м;

V – крен решета системы очистки колебаний, град.;

t – время, с;

γ – угол наклона воздушного потока, град.;

β – угол направления колебаний, град.;

δ_1 – угол наклона поверхности гребёнки относительно горизонта, град.

В уравнении (16) имеется параметр U_V – скорость воздушного потока, которая устанавливается в зависимости от качественных показателей зернового вороха. При этом скорость воздушного потока должна превышать критическую скорость (скорость витания, м/с) U_{KR} тех компонентов зернового вороха, которые удаляются за пределы комбайна, а зерно должно быть оставлено на поверхности решета. Принимая это во внимание, можно записать:

$$U_V = \alpha \cdot U_{KR}, \quad (17)$$

где α – коэффициент, характеризующий геометрические параметры компонентов зернового вороха ($\alpha = 1,1-1,7$ – для соломы длиной до 210 мм; $\alpha = 1,9-3,7$ – для полосты; $\alpha = 2,5-5,0$ – для сбойны; $\alpha = 2,5-3,0$ – для обмолоченных колосьев [8, 9]).

Поскольку зерновой ворох на решете очистки комбайна – это смесь, тогда выражение (17) можно записать как:

$$U_V = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i U_{KRi}}{n_i}, \quad (18)$$

где n_i – количество i -компонентов зернового вороха как смеси, шт.

Значения критических скоростей семян и других частей растений представлены в таблице 1.

По таблице 1 видно, что скорость витания U_{KR} растительных материалов зернового вороха значительно меньше скорости витания семян

(зерна) сельскохозяйственных культур. Значения скоростей витания U_{KR} характерны для полноценного зерна, а для щуплого и дроблёного данные значения будут совершенно другими. Хотя необходимо иметь в виду, что средняя скорость воздуха в зоне расположения решета составляет 60–70 % [8–10] от критической скорости витания зерна пшеницы.

1. Критические скорости семян и других частей растений [8]

Культура	Скорость витания, м/с	Частицы	Скорость витания, м/с
Пшеница	8,9–11,5	Солома	5,9–5,0
Рожь	8,4–9,9	Полова	2,7–5,3
Ячмень	8,4–10,8	Сбоина	2,0–4,0
Овёс	8,1–9,1	Мелкие примеси	4,5–5,2
Соя	17,3–20,2	Стержни колоса	2,7–4,0

Наличие технологического воздействия на зерновой ворох со стороны воздуха в системе очистки комбайна приводит к тому, что он совершает движение как в продольной, так и в поперечной плоскостях относительно решета. Так, на основе работы С.Ф. Сороченко [10] получены аналитические зависимости, характеризующие изменение скоростей движения зернового вороха в продольном (горизонтальном) и поперечном (вертикальном) направлениях от скорости воздушного потока:

$$V_{Sl}^g = 0,02 \cdot U_V^2 - 0,04 \cdot U_V + 0,219, \quad (19)$$

$$V_{Sl}^v = 0,07 \cdot U_V^2 - 0,012 \cdot U_V + 0,203, \quad (20)$$

где V_{Sl}^g и V_{Sl}^v – скорость перемещения зернового вороха в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно, м/с.

Скорость перемещения и высота слоя зернового вороха на решете очистки комбайна находятся во взаимосвязи:

$$h_{Sl} = \frac{q_z}{B_{RO} V_{Sl} j_{Sl}}, \quad (21)$$

где h_{Sl} – высота слоя зернового вороха на решете, м;

q_z – подача зернового вороха на решете системы очистки комбайна, кг/с;

V_{Sl} – скорость перемещения слоя зернового вороха по решету, м/с;

j_{Sl} – плотность зернового вороха, кг/м³.

На основе выражений (19), (20) и (21) можно записать, что $V_{Sl}^g = V_{Sl}^v$, тогда уравнение (21) примет вид:

$$h_{Sl} = \frac{q_z}{B_{RO} j_{Sl} (0,02 \cdot U_V^2 - 0,04 \cdot U_V + 0,219)}. \quad (22)$$

Графическая интерпретация выражения (22) представлена (при $q_z = 1,0$ кг/с; $B_{RO} = 1,0$ м; $j_{Sl} = 50$ кг/м³) на рисунке 3.

Графическая зависимость (рис. 3) свидетельствует, что с увеличением скорости воздушного

потока системы очистки комбайна высота слоя зернового вороха на решете уменьшается, но она может быть повышена за счёт роста параметра q_z .

Далее на основе выражения (22) установим взаимосвязь $q_z = f(U_V)$, которую запишем после преобразования в следующем виде:

$$q_z = B_{RO} \cdot h_{Sl} \cdot j_{Sl} (0,02 \cdot U_V^2 - 0,04 \cdot U_V + 0,219). \quad (23)$$

Графическая интерпретация выражения (10) приведена (при $B_{RO} = 1,0$ м; $h_{Sl} = 0,10$ м; $j_{Sl} = 50$ кг/м³) на рисунке 4.

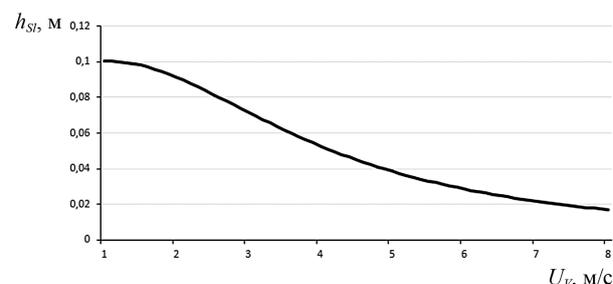


Рис. 3 – Изменение высоты слоя зернового вороха на решете системы очистки комбайна в зависимости от скорости воздушного потока

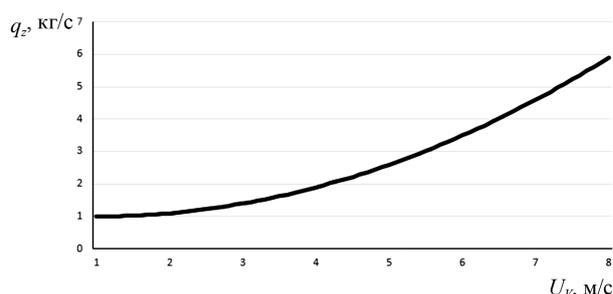


Рис. 4 – Изменение подачи зернового вороха на решете системы очистки комбайна в зависимости от скорости воздушного потока

По рисунку 4 видно, что с увеличением скорости воздушного потока системы очистки комбайна величину подачи зернового вороха на решете можно повышать.

Выводы. В результате исследования выявлено, что процесс сепарации зернового вороха на решете системы очистки комбайна характеризуется сложностью математического описания из-за комбинированного взаимодействия в системе «зерновой ворох – воздух – решето». Получены аналитические зависимости, раскрывающие связь между скоростями перемещения зернового вороха по решету и воздушного потока системы очистки комбайна. Установлена взаимосвязь между параметрами зернового вороха на решете и скоростью воздушного потока. Это позволяет глубже рассмотреть процесс сепарации зернового вороха с точки зрения математического описания, а также получить ранее неизвестные закономер-

ности, характеризующие процесс сепарации зернового вороха на решетке системы очистки зерноуборочного комбайна.

Литература

1. К разработке стационарного процесса обмолота хлебной массы комбайном с классическим молотильно-сепарирующим устройством / А.И. Ряднов, А.П. Ловчиков, В.А. Шахов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 2 (54). С. 314–322.
2. Методический подход к моделированию технологического процесса зерноуборочного комбайна / А.П. Ловчиков, Е.А. Поздеев, О.С. Шагин [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 6 (74). С. 91–93.
3. On the substantiation of the technological scheme of the combine harvester with the stationary process of threshing bread mass / A.S. Ovchinnikov, A.I. Ryadnov, O.A. Fodorova et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Russian Conference on Technological Solutions and Instrumentation for Agribusiness, TSIA 2019. 2020. С. 012057.
4. Ловчиков А.П., Ловчиков В.П., Иксанов Ш.С. Теоретический аспект технологического процесса прямого комбайнирования зерновых культур с двойным срезом стеблей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015. № 3 (53). С. 92–95.
5. Результаты производственной проверки прямого комбайнирования с высоким срезом зерновых культур / А.П. Ловчиков, В.П. Ловчиков, Ш.С. Иксанов [и др.]

// Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (63). С. 75–77.

6. Ловчиков А.П., Бжезовский А.О., Макаровская З.В. Разработка комбинированной системы очистки зернового вороха зерноуборочного комбайна // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 157–159.

7. Методический подход к исследованию эффективности технологических подпроцессов ветро-решётной очистки зерноуборочного комбайна / А.П. Ловчиков, С.А. Турчанинов, А.О. Бжезовский [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 178–184.

8. Кинематические и динамические аспекты взаимодействия ингредиентных частиц с функциональными элементами рабочей камеры измельчителя зернового материала / Ю.А. Ушаков, А.Ф. Абдюкаева, В.А. Шахов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 87–89.

9. Ловчиков А.П., Ловчиков В.П. Основы расчёта параметров зерноуборочных комбайнов. Ульяновск: Зебра. 2017. 143 с.

10. Сороченко С.Ф. Математическая модель движения зернового вороха по решетке адаптера очистки зерноуборочного комбайна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 12 (146). С. 131–137.

11. Сороченко С.Ф. Математическая модель сепарации зерна в системе очистки косоугольного зерноуборочного комбайна // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 12 (158). С. 134–140.

Александр Петрович Ловчиков, доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет». Россия, 457100, Челябинская область, г. Троицк, ул. Гагарина, 13, alovcikov@mail.ru

Сергей Николаевич Кулагин, соискатель. ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет». Россия, 457100, Челябинская область, г. Троицк, ул. Гагарина, 13, kulagin.snk@gmail.com

Aleksandr P. Lovchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor. South Ural State Agrarian University. 13, Gagarina St., Troitsk, Chelyabinsk region, 457100, Russia, alovcikov@mail.ru

Sergey N. Kulagin, research worker. South Ural State Agrarian University. 13, Gagarina St., Troitsk, Chelyabinsk region, 457100, Russia, kulagin.snk@gmail.com