

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.354.026

doi: 10.15507/2658-4123.032.202202.249-262

Научная статья



Динамика фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна

Э. В. Жалнин, М. Е. Чаплыгин ✉

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)*✉ misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов обмолота и сепарации в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна с цифровой оценкой фракционного состава обмолачиваемого зерносоломистого материала. Полученные данные позволяют выявить динамику фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном зазоре молотильного аппарата в зависимости от ее подачи.

Материалы и методы. Исследования проводили на специальном стенде в виде отдельного блока молотильного аппарата комбайна. Под каждой секцией подбарабья были установлены пробоотборники. Подачу массы меняли в пределах от 1,0 до 6,0 кг/с при коэффициенте солоmistости 1:1. Полученные данные аппроксимировали по стандартной методике.

Результаты исследования. Найдено количество зерна и соломы, прошедшее через решетку подбарабья, и остальной части, поступающей на соломосепаратор, в зависимости от начального их количества. Для каждой фракции определено отношение массы соломы к массе зерна, плотность и толщина слоя зерносоломистого вороха на стрясной доске перед решетками и в начале клавиш соломосепаратора. Получена динамика сепарации зерна и соломы по разрезке длины подбарабья с определением плотности и степени сжатия слоя зерносоломистой смеси в молотильном зазоре.

Обсуждение и заключение. Установлено, что в ворохе, прошедшем через подбарабья, отношение массы соломы к массе зерна уменьшается с 0,46 до 0,27, плотность увеличивается с 60,1 до 84,0 кг/м³. В ворохе, попавшем на соломосепаратор, отношение массы соломы к массе зерна уменьшается с 11,2 до 2,0, плотность увеличивается в небольших пределах от 21,7 до 26,4 кг/м³. Толщина слоя вороха на стрясной доске перед решетками очистки изменяется в пределах 0,25–10,2 см, а на соломотрясе – от 2,2 до 19,8 см при изменении подачи общей массы на обмолот от 1 до 6 кг/с.

Ключевые слова: зерносоломистый ворох, молотильный барабан, сепарация, плотность, толщина слоя, аппроксимация

© Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е., 2022



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

Благодарности: авторы выражают признательность анонимным рецензентам.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Динамика фракционного состава зерносоломистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 249–262. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>

Original article

Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester

E. V. Zhalnin, M. E. Chaplygin ✉

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

✉ misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article presents the results of theoretical and experimental studies of threshing and separation processes in the threshing mechanism of the combine harvester with a digital assessment of the fractional composition of the grain-and-straw material being threshed. The obtained data will allow detecting dynamics of fractional composition of grain-and-straw mass being threshed in the threshing gap of the threshing mechanism depending on its supply.

Materials and Methods. The research was carried out on a special stand in the form of a separate unit of the combine threshing mechanism. Grain-and-straw samplers were installed under each threshing section. The mass feed was changed from 1.0 to 6.0 kg/s at a straw ratio of 1:1. The obtained data were approximated using a standard procedure.

Results. There was determined the amount of grain and straw passed through the threshing section screen and the rest of grain and straw entering the straw separator depending on their initial amount. For each fraction, there were determined the ratio of straw mass to grain mass, the density and thickness of the grain-and-straw heap layer on the shaking board ahead of the grates and at the beginning of the straw separator keys. The dynamics of grain-and-straw separation was identified by scanning the length of the grains with the determination of the density and compression degree of the grain-and-straw mixture layer in the threshing gap.

Discussion and Conclusion. It was found that in the heap of grain-and-straw passed through a threshing section, the ratio of straw mass to grain mass decreases from 0.46 to 0.27 and density increases from 60.1 to 84.0 kg/m³. In the heap of grain-and-straw that fell on the straw separator, the ratio of the straw mass to the grain mass decreases from 11.2 to 2.0, the density increases within a small range from 21.7 to 26.4 kg/m³. Thickness of the heap layer on the shaking board in front of the cleaning sieves varies in the range 0.25–10.20 cm, and on the straw walker – 2.2–19.8 cm when changing the supply of the total mass for threshing from 1 to 6 kg/s.

Keywords: grain-and-straw heap, threshing drum, separation, density, layer thickness, approximation

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the anonymous reviewers.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Zhalnin E.V., Chaplygin M.E. Dynamics of Fractional Composition of Grain-and-Straw Mass Being Threshed in the Threshing Mechanism of a Combine Harvester. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):249–262. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>

Введение

Проблема увеличения производства зерна по-прежнему остается ключевой в сельскохозяйственном производстве. Решение зерновой проблемы позволит существенно ослабить или полностью снять напряженность с продовольствием, отказаться или свести к минимуму закупки зерна за рубежом, реализовать потенциальные возможности экспорта высококачественного товарного зерна. В совокупности это создает условия для продовольственной безопасности страны.

Основная доля затрат при производстве зерновых культур приходится на уборку урожая (50–55 %). Из этого следует, что для развития механизации уборочных работ необходимо обеспечить энергоемкость зерноуборочных комбайнов в пределах 20–23 кВт на единицу пропускной способности. Вместе с тем от способов и применяемых технологий уборки урожая зерновых культур во многом зависят условия закладки урожая будущего года.

Технологический процесс обмолота хлебной массы молотильным аппаратом призван обеспечить максимальный вымолот, сепарацию (выделение из основной солоmistой массы) и автономную подачу зерна на доработку [1; 2].

Процессу обмолота хлебной массы молотильным аппаратом различных конструкций посвящено достаточно много теоретических и экспериментальных исследований. Однако изучение процесса обмолота хлебной массы концентрируется на двух проблемах: обмолот и сепарация [3]. При этом основное внимание уделяется механико-технологическим процессам, которые включают динамические и технологические параметры движения растительной массы в рабочем пространстве «барабан – дека», процессам обмолота и сепарации элементов зерносолоmistого вороха, элементам динамики молотильного

барабана, оптимизации некоторых параметров молотильных устройств и общим закономерностям технологического процесса обмолота [4].

Однако не было обнаружено результатов исследования процесса сепарации зерна и соломы в широком диапазоне подач хлебной массы на обмолот и в одних условиях с определением количественного соотношения разных фракций этой массы, их плотности с аппроксимацией зависимостей параметров сепарации от исходной подачи. К тому же была слабо изучена интенсивность сепарации солоmistых частиц.

Цель исследования – выявить характер изменения параметров фракционного состава обмолочиваемого зерносолоmistого вороха, получить аппроксимирующие уравнения в зависимости от подачи массы в молотильный аппарат и рассчитать плотность вороха, прошедшего через подбарабанье на решетку очистки, вышедшего из молотильного зазора на соломотряс, а также находящегося в самом молотильном зазоре, вышедшего из него и попавшего на начало соломотряса.

Обзор литературы

Исследования технологических процессов обмолота и сепарации рабочими органами зерноуборочного комбайна, и в частности молотильного аппарата, проводятся как отечественными, так и зарубежными специалистами.

В исследованиях установлено, что главным рабочим органом зерноуборочного комбайна, определяющим его производительность и качество работы, является молотильный аппарат. Разработаны конструкции молотильных аппаратов. Несмотря на разнообразие, только три закономерности определяют уровень их технологического совершенства: количество выделяемого свободного зерна и соломы через сепарирующую решетку (деку), дробление зерна и изменение энергозатрат

в зависимости от исходной подачи массы в комбайн. Большинство публикаций посвящено именно этим трем закономерностям.

В определении В. П. Горячкина технологический процесс обмолота отражает сочетание двух стадий: свободный удар на входе и последующее перетираение в уменьшающихся зазорах между бичами барабана и планками подбарабанья¹. При этом подразумевается, что интенсивность сепарации обмолоченного зерна соответствует интенсивности его обмолота.

Первые фундаментальные теоретико-экспериментальные исследования по процессам обмолота и сепарации провел М. А. Пустыгин². Он установил, что основными показателями технологического процесса, осуществляемого в молотильном аппарате, являются полнота вымолота зерна, степень его сепарации через сепарирующую решетку деки и величина повреждения зерна [5]. Эти показатели оказывают влияние на конечную оценку работы молотилки комбайна – его пропускную способность³. Пропускная способность молотилки зерноуборочного комбайна определяется величиной потерь зерна (1,5 %), дроблением (2 %) и чистотой (95 %) бункерного зерна [6–8]. Позднее это дало возможность классифицировать все комбайны мира на классы по пропускной способности: от 1,0 до 16 кг/с, практически через каждые 1,5–2,0 кг/с. Этот разрыв вполне компенсируется шириной захвата жатки комбайна и скоростью его движения [9].

Потери зерна за молотилкой комбайна складываются из потерь свободного зерна и недомолота в соломе в сходах с клавишного соломосепаратора и соломе в сходах с очистки. Величина этих потерь при оптимальной подаче

хлебной массы в молотилку комбайна распределяется в среднем следующим образом: 50 % свободного зерна и 20 % недомолота в соломе, 20 % свободного зерна и 10 % недомолота в полове [10]. Основная доля потерь зерна приходится на потери свободного зерна в соломе, которые являются следствием достаточно низкой сепарирующей способности молотильного аппарата. Сепарация зерна в молотильном аппарате на оптимальных подачах достигает 90–95 %, в то время как обмолот при этом достигает 98–99 %. Низкая сепарирующая способность клавишного соломосепаратора (80–85 % от поступившего на него зерна) приводит к тому, что потери свободного зерна в соломе составляют 40–45 % от общих потерь за молотилкой. Устранение этого недостатка возможно путем интенсификации процесса сепарации зерна в молотильном аппарате или в клавишном соломосепараторе. Предпочтение должно отдаваться в первую очередь интенсификации процесса сепарации в молотильном аппарате, так как именно в нем находятся истоки процесса сепарации обмолоченного зерна.

Процесс сепарации зерна начинается сразу: со входом хлебной массы в молотильный аппарат, в котором содержится до 30 % зерна, обмолоченного шнеком жатки и питающим транспортером наклонной камеры. Однако процесс сепарации развивается медленнее, по сравнению с процессом обмолота зерна, вследствие того, что в зоне входа еще сравнительно велика толщина слоя потока хлебной массы и его плотность. Такое состояние массы не обеспечивает беспрепятственное прохождение свободного зерна в нижние слои потока. Поэтому наибольшую интенсивность процесс сепарации приобретает

¹ Горячкин В. П. Земледельческая механика. ПСС. М. : Сельхозгиз, 1937–1949. Т. 1–7.

² Пустыгин М. А. Теория и технологический расчет молотильных устройств. М. : Сельхозгиз, 1948.

³ Там же.

несколько позднее, чем процесс обмо­лота. Затем интенсивность сепарации зерна падает, и определяющую роль начинает играть длина сепарирующей поверхности или улучшение условий сепарации.

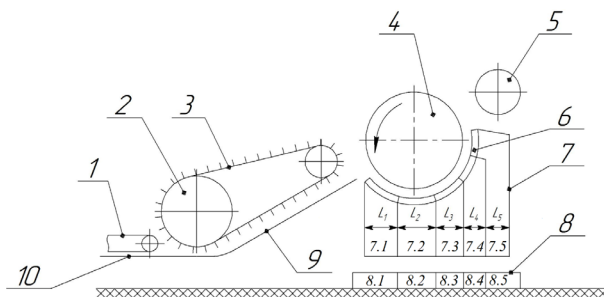
Ряд работ получил наибольшее при­знание среди ученых⁴ [11–13]. В результате исследований была уточнена терминология, предложены уравнения, проведено математическое моделиро­вание при варьировании факторов и па­раметров обмолачиваемого материала, определены методы расчета параметров молотильных аппаратов, сформули­рованы требования к ним по потерям и дроблению зерна [14–17]. Стоит вы­делить исследования Э. И. Липковича и С. А. Алферова. Первый исследовал процессы обмо­лота и сепарации в функ­ции времени движения обмолачиваемо­го материала по решетке подбарабанья, второй – по пути ее движения⁵ [18]. В предложенных ими уравнениях ин­тенсивность сепарации зерна связана

с интенсивностью вымолота зерна из колоса [19–21].

Материалы и методы

В ходе исследования был применен экспериментально-теоретический ме­тод. Эксперимент проводили на специ­альном стенде (рис. 1)

Молотильный аппарат с наклонной камерой был взят от серийного комбайна типа СК-5М «Нива», который был по­ставлен на специальные стойки. Перед наклонной камерой был установлен по­лотенно-планчатый транспортер, подаю­щий хлебную массу в наклонную камеру. Хлебная масса представляла собой есте­ственные стебли с колосом, скошенные на высоте среза 15–20 см. Стебли равно­мерным слоем укладывали на транспор­тер колосом вперед. Подбарабанье было выполнено из пяти секций. Секции друг от друга в нижней своей части раздели­ли эластичными шторами. Под каждой секцией устанавливали пробоотбор­ник, что позволило изучить зональную сепарацию по длине подбарабанья.



Р и с. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда для исследования процессов обмо­лота и сепарации в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна: 1 – подающий транспортер; 2 – наклонная камера; 3 – планчатый транспортер; 4 – молотильный барабан; 5 – отбойный битер; 6 – секции подбарабанья; 7 – секционные шторы; 8 – лотки пробоотборников; 9 – поддон наклонной камеры; 10 – направляющий щиток

F i g. 1. Schematic diagram of the laboratory stand for the investigation of threshing and separation processes in the threshing mechanism of the combine harvester: 1 – feeder conveyor; 2 – inclined chamber; 3 – slat conveyor; 4 – threshing drum; 5 – beater; 6 – threshing sections; 7 – sectional curtains; 8 – sample trays; 9 – inclined chamber tray; 10 – guiding board

⁴ Кленин Н. И., Сакун В. А. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. Элементы тео­рии рабочих процессов, расчет регулировочных параметров и режимов работы. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Колос, 1980. 671 с.

⁵ Липкович Э. И. Аналитические основы системы машины. Ростов-на-Дону : Ростовское книж­ное издательство, 1983. 112 с.

Технологическая схема распределения разных фракций обмолачиваемой массы представлена на рисунке 2.

Подачу зерносомолистой массы в молотильный барабан изменяли от 1,0 до 6,0 кг/с через каждые 1,0 кг/с при исходном соотношении массы соломы к массе зерна $\alpha_0 = \frac{M_3}{M_c} = 1 : 1$. Диапазон подач 1–3 кг/с очень важен для оценки работы селекционно-семеноводческих комбайнов.

Соответственно, для фракций, прошедших через подбарабанье, $\alpha_n = \frac{Y_3}{Y_c}$, попавших на соломотряс, $\alpha_c = \frac{Y'_3}{Y'_c}$, находящихся в молотильном зазоре, $\alpha_m = \frac{M_{пс}}{M_{мз}}$.

Следовательно, $M_3 = Y_3 + Y'_3$, а $M_c = Y_c + Y'_c$. Опыты проводили в 3 повторностях. Аппроксимацию опытных данных проводили по компьютерной программе.

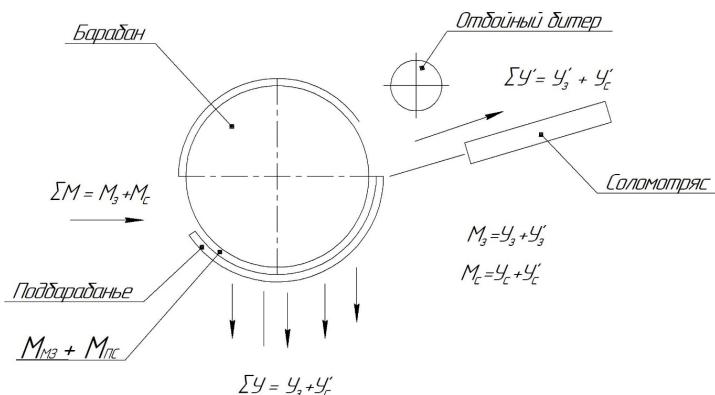
Плотность фракций определили по уравнению (1), полученному в работе Э. В. Жалнина и А. Н. Савченко:

$$\gamma_m = \frac{(1 + \alpha)\gamma_3\gamma_c}{\alpha\gamma_3 + \gamma_c}, \quad (1)$$

где α соответственно α_n , α_m или α_c , а γ_3 и γ_c – плотность зерна и соломы в свободном состоянии⁶.

Результаты исследования

В таблице 1 представлена количественная оценка процесса сепарации зерна и соломы через подбарабанье молотильного аппарата и остальной части, поступающей на соломотряс, согласно рисунку 2, в зависимости от подачи массы q .



Р и с. 2. Технологическая схема распределения зерновой и соломистой фракции:
 ΣM – Общая подача зерна и соломы, кг/с; M_3 и M_c – соответственно масса зерна и соломы;
 Y_3 и Y_c – количество зерна и соломы, прошедших через подбарабанье;
 Y'_3 и Y'_c – количество зерна и соломы, попавших на соломотряс;
 $M_{мз}$ и $M_{пс}$ – количество зерна и соломы, находящихся в молотильном зазоре

F i g. 2. Technological scheme of distribution of grain and straw fraction:
 ΣM – total feed of grain and straw, kg/s; M_3 and M_c – mass of grain and straw respectively;
 Y_3 and Y_c – number of grain and straw that passed through the drum;
 Y'_3 and Y'_c – number of grain and straw that reached the straw walker;
 $M_{мз}$ and $M_{пс}$ – number of grain and straw in the threshing gap

⁶ Жалнин Э. В., Савченко А. Н. Технологии уборки зерновых комбайновыми агрегатами. М. : Россельхозиздат, 1985. 207 с.

Таблица 1
Table 1

Количественная оценка процесса сепарации зернооломистой массы в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна типа СК-5МЭ «Нива-Эффект» при исходном отношении массы соломы к массе зерна $\alpha_0 = 1:1$ на обмолоте озимой пшеницы
Quantitative evaluation of the separation process of grain-and-straw mass in the threshing mechanism of the SK-5ME Niva-Effect combine harvester at the initial ratio of straw mass to grain mass $\alpha_0 = 1:1$ in threshing of winter wheat

Всего $\sum M /$ Total $\sum M$	Количество обмолачиваемой массы (на входе в барабан), кг/с / Quantity of being threshed mass (at the inlet to the drum), kg/s		Количество материала, прошедшего через подбарабанье, кг/с / Amount of material passed through the threshing section, kg/s				Количество массы, вышедшей из молотильного зазора и попавшей на соломосепаратор, кг/с / The amount of mass coming out of the threshing gap and falling on the straw separator, kg/s						
	В том числе / Including	зерно $M_3 /$ grain M_3	солома $M_c /$ straw M_c	зерно $Y_3 /$ grain Y_3	солома $Y_c /$ straw Y_c	Плотность смеси $\gamma_{\text{см}} /$ кг/м ³ / Mixture density $\gamma_{\text{см}}$ kg/m ³	Отношение массы соломы к массе зерна $\alpha_{\text{н}} /$ Straw to grain weight ratio $\alpha_{\text{н}}$	зерно $Y_3 /$ grain Y_3	солома $Y_c /$ straw Y_c	Отношение массы соломы к массе зерна $\alpha_c /$ Straw to grain weight ratio α_c	Плотность смеси $\gamma_{\text{см}} /$ кг/м ³ / Mixture density $\gamma_{\text{см}}$ kg/m ³		
1,0	0,5	0,5	0,47	95,0	0,22	44,0	0,46	0,025	5,0	0,28	56,0	11,2	21,7
2,0	1,0	1,0	0,82	82,0	0,27	27,0	0,33	0,180	18,0	0,73	73,0	4,1	24,7
3,0	1,5	1,5	1,17	78,0	0,33	22,0	0,28	0,330	22,0	1,17	78,0	3,5	25,5
4,0	2,0	2,0	1,52	76,0	0,41	20,5	0,27	0,480	24,0	1,60	79,6	3,3	25,9
5,0	2,5	2,5	1,86	74,4	0,50	20,0	0,27	0,640	26,0	2,00	80,0	3,7	26,3
6,0	3,0	3,0	2,21	73,6	0,60	20,0	0,28	0,700	26,0	2,40	80,0	3,0	26,3

Статистическая обработка опытных данных выявила следующие уравнения (2), (3) при максимальном уровне доверительной вероятности 0,90–0,95:

для зерна

$$Y_3 = 0,12 + 0,7q, \text{ кг/с}, \quad (2)$$

для соломы

$$Y_c = 0,18 \cdot e^{0,41q}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

где Y_3 и Y_c – соответственно зерно и солома, прошедшие через решетку подбарабья.

При исходной подаче 0,5 кг/с каждой фракции от исходного их количества через подбарабья проходит 95 % зерна и 44 % соломы. При общей подаче 6,0 кг/с и каждой фракции 3 кг/с через подбарабья проходит 73,6 % зерна и 20 % соломы. Полученное линейное уравнение (2) для аппроксимации процесса сепарации зерна через решетку подбарабья отличается от часто применяемого экспоненциального уравнения М. Н. Летошнева, И. Ф. Василенко, Э. И. Липковича и других⁷. Это, по-видимому, объясняется тем, что в наших экспериментах было учтено все зерно, то есть свободное и невымоленное вместе.

Отношение массы соломы к массе зерна уменьшается от 0,46 до 0,28, а плотность увеличивается от 60,15 до 86 кг/м³ при изменении подачи массы от 1,0 до 6,0 кг/с.

Плотность зерносомистого вороха на начальной части соломотряса увеличивается с 20,7 до 26,3 кг/м³ при уменьшении отношения α с 11,2 до 2,0 при изменении исходной подачи от 1 до 6 кг/с.

Таким образом, плотность вороха, прошедшего через подбарабья, больше плотности вороха, поступающего

на соломотряс, в 2,8–3,2 раза. Эти данные получены впервые.

Полученные значения плотности каждой фракции обмолачиваемого вороха позволили рассчитать толщину (высоту) слоя зерносомистой смеси, находящейся на стрясной доске перед решетками на очистке примерно на первой ее трети и в начале соломотряса. Расчеты проведены по формуле (4):

$$h_3 = \frac{Y_3 + Y_c}{V_d \cdot B_d \cdot \gamma_n}, \quad (4)$$

где V_d – скорость движения вороха по стрясной доске (0,3 м/с); B_d – ширина стрясной доски.

Соответственно, для вороха, попавшего на начало соломотряса,

$$h_c = \frac{Y'_3 + Y'_c}{V'_c \cdot B'_c \cdot \gamma'_c}, \quad (5)$$

где V'_c – скорость движения вороха по клавишам соломотряса (0,5 м/с).

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таким образом, толщина слоя зерносомистого вороха на стрясной доске под подбарабьем с увеличением подачи с 1,0 до 6,0 кг/с увеличивается с 2,5 до 10,1 см, а на начале соломотряса – с 2,2 до 19,3 см.

Полученные данные по сепарации зерна и соломы и их плотности дают общее представление о распределении зерновой и соломистых фракций в молотилке зерноуборочного комбайна и могут быть использованы в различных технологических расчетах с уточнением конструктивных параметров рабочих органов, задействованных в процессе обмолота зерносомистой массы.

⁷ Липкович Э. И. Аналитические основы системы машины ; Василенко И. Ф. Теория соломотряса : Сборник трудов по земледельческой механике. Л.–М. : Сельхозиздат, 1961. т. VI ; Летошнев М. Н. Сельскохозяйственные машины : Теория, расчет, проектирование и испытание. 3-е изд., перераб. и доп. М.–Л. : Сельхозгиз, 1955. 764 с.

Расчетная толщина слоя вороха на стрясной доске и в начале соломотряса
Estimated thickness of the layer on the shaking board and at the beginning of the straw walker

Начальная подача при $\alpha = 1:1$, кг/с / Initial feed at $\alpha = 1:1$, kg/s	Толщина слоя вороха, мм / Heap layer thickness, mm	
	на стрясной доске перед решетками очистки / on the shaking board in front of the cleaning grids	на начале соломотряса / at the beginning of the straw walker
1,0	25	22
2,0	36	58
3,0	44	94
4,0	515	126
5,0	68	16
6,0	101	193

Большой интерес представляет динамика параметров зерносоломистой смеси, находящейся непосредственно в молотильном зазоре, то есть в пространстве между планками подбарабана и бичами молотильного барабана. Объем этого пространства V_{Δ} рассчитан по классическому уравнению расчёта объемов объекта исследования:

$$V_{\Delta} = B_{\text{п}} \cdot l_{\text{с}} \cdot h, \text{ м}^3, \quad (6)$$

где $B_{\text{п}}$ – ширина подбарабана, м; $l_{\text{с}}$ – длина секции подбарабана после развертки ($l_{\text{с}} = 0,17$ м); h – величина молотильного зазора под секцией подбарабана (I – 20 мм; II – 16 мм; III – 12 мм; IV – 8 мм; V – 5 мм).

Обобщенные данные представлены в таблице 3, из которой следует, что плотность смеси, находящейся в молотильном зазоре в сжатом состоянии значительно отличается от плотности фракций, прошедших через подбарабанье, и тех, которые попали на начало соломотряса. Плотность зерносоломистого вороха в свободном состоянии, прошедшего через подбарабанье, при изменении подачи в 6 раз от 1,0 до 6,0 кг/с изменилась в 1,42 раза

(с 60,15 до 86 кг·с⁻¹/м³), а попашвего на соломотряс – в 1,2 раза (с 21,7 до 26,3 кг·с⁻¹/м³). В то же время плотность смеси, находящейся в молотильном зазоре, увеличивается в 10,4 и 1,34 раза соответственно, достигая на подаче 6 кг/с 236,7–318,0 кг·с⁻¹/м³ над первой секцией подбарабана до последней.

Такие высокие значения плотности смеси в молотильном зазоре объясняют большие нагрузки на молотильный аппарат, повышенный износ бичей барабана и планок подбарабана на подачах массы от 3 кг/с и выше, что оправдывает идею переменного зазора пропорционально задаче [22].

Обсуждение и заключение

Проведенные исследования показали, что процесс сепарации зерна через решетку подбарабана в зависимости от подачи обмолачиваемой хлебной массы соломы к массе зерна аппроксимируется линейным уравнением, а сепарация соломистых частиц – по экспоненциальной в зависимости от исходной их подачи при доверительной вероятности 0,90–0,95.

В цифровом выражении количество зерна, прошедшего через подбарабанье, уменьшается с 95,0 до 73,6 %,

Расчетная секундная плотность зерносоломистой смеси, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, в молотильном зазоре по секциям подбарабанья в зависимости от исходной подачи

Calculated second density of grain-and-straw mixture, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}/\text{m}^3$, in threshing gap by threshing sections of the concave, depending on the initial feeding

Показатели / Indicators	Секции подбарабанья / Concave sections				
	I	II	III	IV	V
Величина молотильного зазора, мм / Threshing clearance, mm	20	16	12	8	5
Объем пространства между бичами барабана и планками подбарабанья, м^3 / The volume of the space between the drum beats and the threshing section slats, m^3	0,00403	0,00321	0,0024	0,0016	0,001
Количество зерносоломистой смеси в молотильном зазоре, $\text{кг}/\text{с}$ / Quantity of grain-and-straw mixture in the threshing gap, kg/s	0,0915	0,0762	0,061	0,0458	0,03
Исходная подача, $\text{кг}/\text{с}$ / Initial feeding rate, kg/s	Плотность зерносоломистой смеси в молотильном зазоре / Grain-and-straw mixture density in the threshing gap				
1,0	22,7	23,8	25,4	28,6	30,5
2,0	65,3	71,3	75,8	85,0	91,0
3,0	148,9	156,0	166,6	188,1	200,0
4,0	154,0	161,3	172,5	194,3	207,0
5,0	196,5	205,6	220,0	247,5	269,0
6,0	236,7	248,3	263,0	300,0	318,0

а солоmistых частиц – с 44 до 20 % от их исходного количества в обмолачиваемом материале при изменении подачи с 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$.

С увеличением подачи обмолачиваемой хлебной массы в шесть раз от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ секундная плотность вороха, прошедшего через решетку подбарабанья, увеличивается в 1,43 раза от 60,15 до 86,00 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, плотность вороха, попавшего на начало соломотряса, – в 1,21 раза от 21,7 до 26,3 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, а плотность зерносоломистого вороха, находящегося в молотильном зазоре h на последней секции подбарабанья, увеличивается в 10,43 раза от 30,5 до 318,0 $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}/\text{м}^3$, что объясняет повышенные нагрузки на детали молотильного аппарата и повышенный износ бичей барабана и планок подбарабанья.

С увеличением подачи обмолачиваемой хлебной массы от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ толщина слоя вороха, попавшего на стрясную доску, перед решетками очистки увеличивается от 25 до 101 мм, а толщина слоя вороха, попавшего на начало соломотряса, – от 22 до 193 мм, что следует учитывать при обосновании компоновочных параметров молотильно-соломотрясной группы рабочих органов.

Научная новизна проведенного исследования состоит в том, что впервые получены аналитические выражения для изменения параметров, которые раньше не изучались: количество прошедшей зерновой и незерновой части обмолачиваемого материала в широком диапазоне подачи от 1,0 до 6,0 $\text{кг}/\text{с}$ в реальных эксплуатационных

условиях; плотность материала по длине подбарабанья толщины вороха на стрясной доске и соломотряса в начальной стадии.

Теоретическое значение результатов исследования состоит в том, что доказан разный характер выделения зерна и незерновой части урожая через подбарабанье. Этот процесс аппроксимируется линейным уравнением (2), а для соломы – экспоненциальным уравнением (3). Ранее не проводились исследования по изменению плотности и толщины слоя зерносоломистой смеси, поступающей на очистку и отдельно на соломотряс. Нами установлено, что в диапазоне подачи от 1,0 до 6,0 кг/с (табл. 1, 2) плотность вороха смеси в молотильном зазоре по длине подбарабанья изменяется от начального зазора до конечного.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Получено более комплексное представление о процессе обмолота и сепарации зерна и незерновой части урожая. Исследования по изменению сепарации соломы ранее не проводились в таком диапазоне подачи.

2. Выявлены критические точки изменения плотности обмолачиваемого материала в молотильном аппарате, что при отсутствии средств автоматизации требует от комбайнера не перегружать молотилку комбайна, потому что плотность материала доходит до 300 кг/м³. Это приводит к большому травмированию зерна и оправдывает идею изменения молотильного зазора по всей длине подбарабанья.

3. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых конструкций молотильных устройств комбайнов с учетом рекомендуемых параметров толщины слоя зерносоломистого вороха и автоматического регулирования молотильного зазора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Review of Grain Threshing Theory and Technology / J. Fu [et al.] // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11, Issue 3. P. 12–20. doi: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181103.3432>
2. Results of Experimental Studies of Pneumatic Threshing of Ears with Subsequent Separation of Fractions / V. Pakhomov [et al.] // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Lecture Notes in Networks and Systems ; A. Beskopylny, M. Shamtsyan (eds.). Vol. 246. Cham : Springer, 2022. P. 147–153. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_16
3. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop / A. Kumar [et al.] // International Journal of Pure & Applied Bioscience. 2017. Vol. 5, Issue 2. P. 604–611. doi: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>
4. Cujbescu D., Gageanu I., Iosif A. Mathematical Modeling of Ear Grain Separation Process Depending on the Length of the Axial Flow Threshing Apparatus // INMATEH Agricultural Engineering. 2021. Vol. 65, Issue 3. P. 101–110. URL: <https://clck.ru/hUuoM> (дата обращения: 01.02.2022).
5. Fisunova E., Groshev L., Baryshnikova O. Analysis of the Threshing Process in the Interriffle Space of the Threshing Device [Электронный ресурс] // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Vol. 224. 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405017>
6. Дослідження впливу пропускної здатності комбайна на якість зерна, відокремленого пристроєм попереднього обмолоту / В. Шейченко [и др.] // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2019. Вип. 9. С. 72–80. doi: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-8>
7. Гусаров В. В., Клочков А. В., Курзенков С. В. Параметры зон воздействия молотильно-сепарирующего устройства на обмолачиваемую массу // Вестник Белорусской государственной *Agricultural engineering*

сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 175–181. URL: <https://clck.ru/hUvgy> (дата обращения: 01.02.2022).

8. Threshing and Grain Separating Mechanism with Differentiate Concave for Intensification of Threshing and Grain Separation / A. Klochkov [et al.] // Agricultural Engineering. 2017. Vol. 21, Issue 3. P. 29–45.

9. Жалнин Э. В. Типаж комбайнов: какой есть и какой нужен [Электронный ресурс] // Сельский механизатор. 2012. № 8. URL: <http://selmech.msk.ru/812.htm> (дата обращения: 01.02.2022).

10. Пустыгин М. А. Закономерности сепарации зерна в молотильно-сепарирующих устройствах // Труды ВИСХОМ. 1977. Вып. 88.

11. Orobinsky V. I., Gulevsky V. A., Gievsky A. M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

12. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties / M. Govindaraj [et al.] // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. Vol. 6, Issue 8. P. 2375–2383. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>

13. Франциско О. Ю. Моделирование структуры управления региональным АПК приемами регрессионного анализа // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 83. С. 49–53. doi: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-83-49-53>

14. Matuchchenko A. E., Klasner G. G., Sarksyian L. D. Analysis and Estimation of Energy Costs during Operation of a Combine with a Differential Type Threshing Machine [Электронный ресурс] // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2402, Issue 1. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0071892>

15. Effects of Impurity on the Efficiency of a Legume Threshing Machine / O. B. Aluko [et al.] // African Journal of Agricultural Research. 2020. Vol. 16, Issue 12. P. 1700–1709. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14895>

16. Modeling the Throughput Capacity of Threshing-Separating Apparatus of Grain Harvester's Combines / I. Rogovskii [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042098>

17. Yu Ya., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process // Advanced Powder Technology. 2015. Vol. 26, Issue 5. P. 1400–1409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.07.015>

18. Алферов С. А., Брагинцев В. С. Обмолот и сепарация зерна в молотильных устройствах как единый вероятностный процесс // Тракторы и сельхозмашины. 1972. № 4. С. 23–26.

19. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses / M. Sotnar [et al.] // Acta Technologica Agriculturae. 2018. Vol. 21, Issue 3. P. 105–108. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183378801> (дата обращения: 01.02.2022).

20. Семенов В. А., Семенова Е. И. Способ обмолота колосьев и сепарации зерна в молотильно-сепарирующем устройстве // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14. С. 123–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21604314> (дата обращения: 01.02.2022).

21. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2012. Vol. 14, Issue 4. P. 150–155. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2169> (дата обращения: 01.02.2022).

22. Способ регулирования молотильно-сепарирующего устройства : патент 1144651 СССР / Цвик Б. Д. [и др.]. № 3562521/30-15 ; заявл. 02.03.83 ; опубл. 15.03.1985. 2 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/45/b3/9d/0e1e7057985efa/SU1144651A1.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).

Поступила 07.02.2022; одобрена после рецензирования 01.03.2022; принята к публикации 15.03.2022

Об авторах:

Жалнин Эдуард Викторович, заведующий отделом технологий и оборудования для зерновых, зернобобовых и масличных культур Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), доктор технических

наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, заведующий лабораторией технологий и машин для посева и уборки зерна и семян Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Э. В. Жалнин – научное руководство, формулирование основной концепции, цели и задач исследования, разработка методов испытаний, доработка текста, формирование выводов.

М. Е. Чаплыгин – подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация, доработка текста, формирование частных и общих выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Fu J., Chen Z., Han L., Ren L. Review of Grain Threshing Theory and Technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(3):12–20. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3432>

2. Pakhomov V., Braginets S., Bakhchevnikov O., Rudoy D. Results of Experimental Studies of Pneumatic Threshing of Ears with Subsequent Separation of Fractions. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (Eds.). XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 246. Cham: Springer; 2022. p. 147–153. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_16

3. Kumar A., Kumar A., Khan K., Kumar D. Performance Evaluation of Harvesting and Threshing Methods for Wheat Crop. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*. 2017;5(2):604–611. doi: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2497>

4. Cujbescu D., Gageanu I., Iosif A. Mathematical Modeling of Ear Grain Separation Process Depending on the Length of the Axial Flow Threshing Apparatus. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2021;65(3):101–110. Available at: <https://clck.ru/hUuoM> (accessed 01.02.2022).

5. Fisunova E., Groshev L., Baryshnikova O. Analysis of the Threshing Process in the Interriffle Space of the Threshing Device. In: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Vol. 224. 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405017>

6. Sheychenko V., Kuzmich A., Dudnikov I., Shevchuk M., et al. Investigation Effect of the Throughput Combine on the Quality of Grain Separated by a Preliminary Threshing Device. *Mechanization and Electrification of Agricultural*. 2019;9:72–80. (In Ukr., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-9-8>

7. Gusarov V.V., Klochkov A.V., Kurzenkov S.V. Parameters of Zones of Influence of Threshing-Separating Device on Threshed Mass. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2015;(3):175–181. Available at: <https://clck.ru/hUvgy> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

8. Klochkov A., Gusarov V., Kubon M., Kamiński Ja. Threshing and Grain Separating Mechanism with Differentiate Concave for Intensification of Threshing and Grain Separation. *Agricultural Engineering*. 2017;21(3):29–45.

9. Zhalnin E.V. Harvester Type: What Is and What Is Needed. *Rural Mechanic*. 2012;(8). Available at: <http://selmech.msk.ru/812.htm> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

10. Pustygin M.A. [Laws of Grain Separation in Threshing and Separating Devices]. *Trudy VISKhOM*. 1977;88. (In Russ.)

11. Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.M. The Technological Process of the Grain Harvester as a Complex Functional System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032005>

12. Govindaraj M., Masilamani P., Asokan D., et al. Effect of Different Harvesting and Threshing Methods on Seed Quality of Rice Varieties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017;6(8):2375–2383. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.281>
13. Frantsisko O.Yu. Modeling of the Regional Agriculture Management Structure by Regression Analysis Methods. *Works of the Kuban State Agrarian University*. 2020;(83):49–53. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-83-49-53>
14. Matuchchenko A.E., Klasner G.G., Sarksyian L.D. Analysis and Estimation of Energy Costs during Operation of a Combine with a Differential Type Threshing Machine. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2402(1). doi: <https://doi.org/10.1063/5.0071892>
15. Aluko O.B., Sanni L.A., Akingbade T.O., Ogundahunsi O. Effects of Impurity on the Efficiency of a Legume Threshing Machine. *African Journal of Agricultural Research*. 2020;16(12):1700–1709. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14895>
16. Rogovskii I., Martiniuk D.I., Voinash S.A., Luchinovich A.A. Modeling the Throughput Capacity of Threshing-Separating Apparatus of Grain Harvester's Combines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/4/042098>
17. Yu Ya., Fu H., Yu J. DEM-Based Simulation of the Corn Threshing Process. *Advanced Powder Technology*. 2015;26(5):1400–1409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.07.015>
18. Alferov S.A., Braginets V.S. [Grain Threshing and Separation in Threshing Devices as a Single Probabilistic Process]. *Tractors and Agricultural Machinery*. 1972;(4):23–26. (In Russ.)
19. Sotnar M., Pospisil J., Marecek J., et al. Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018;21(3):105–108. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20183378801> (accessed 01.02.2022).
20. Semenov V.A., Semenova Ye.I. The Method of Thrashing of Ears and Grain Separation in a Threshing and Separating Drum. *Russian State Agrarian Correspondence University Bulletin*. 2013;(14):123–129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21604314> (accessed 01.02.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
21. Shahbazi F., Valizadeh S., Dolwlatshah A. Mechanical Damage to Wheat and Triticale Seeds Related to Moisture Content and Impact Energy. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2012;14(4):150–155. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2169> (accessed 01.02.2022).
22. Tsvik B.D., Zhalnin E.V., Rogachkov I.G., Sevastyanov A.O. [Method for Adjusting the Threshing and Separating Device]. Patent 1,144,651 USSR. 1985 March 15. 2 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/45/b3/9d/0e1e7057985efa/SU1144651A1.pdf> (accessed 01.02.2022). (In Russ.)

Submitted 07.02.2022; approved after reviewing 01.03.2022; accepted for publication 15.03.2022

About the authors:

Eduard V. Zhalnin, Head of the Technology and Equipment Department for Grain, Grain Legumes and Oilseeds, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Mikhail E. Chaplygin, Head of the Laboratory of Technology and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seed, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Contribution of the authors:

E. V. Zhalnin – scientific guidance, formulation of the main concept, goal and objectives of the study, development of test methods, finalization of the text, formation of conclusions.

M. E. Chaplygin – preparation of the initial version of the text, analysis of literary sources, visualization, finalization of the text, formation of private and general conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.