

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.361.022

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>



Концепция обмолота кукурузы роторным молотильно-сепарирующим устройством с воздушной завесой выгрузного окна

А.Г. Пастухов^{1✉}, Д.Н. Бахарев², С.Ф. Вольвак³, А.Е. Бурнукин⁴, С.А. Швыдченко⁵

^{1,2,3} Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; Белгородская область, Россия

⁴ Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова; г. Луганск, Россия

⁵ Колледж метрополитена и железнодорожного транспорта; г. Санкт-Петербург, Россия

¹ pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

² baharevdn_82@mail.ru

³ volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

⁴ andrey_243@mail.ru

⁵ schvidtschenko@mail.ru

Аннотация. Для повышения эффективности уборки кукурузы на зерно роторное молотильно-сепарирующее устройство, имеющее массивный ротор и увеличенную длину пути активной сепарации зерновой массы при обмолоте, требует совершенствования. Уменьшение размеров роторных молотильных устройств возможно путём обеспечения останавливающего воздействия на свободное зерно, летящее в выгрузное окно в конце камеры обмолота, что достигается посредством применения воздушной завесы выгрузного окна. При этом сход свободным зерном будет находиться на регламентированном уровне при уменьшенной длине ротора и, соответственно, укороченной длине пути активной сепарации зерновой массы. Останавливающее воздействие на свободно летящее в выгрузное окно зерно должно обеспечивать его перемещение в нижнюю часть зоны домолота, где целесообразно установить вибрационный участок деки, интенсифицирующий сепарацию. Управление действием воздушной завесы требует определения общей для основных ботанических групп кукурузы формы профиля зерна и его эффективной площади контакта с воздушным потоком. Проведена аппроксимация построенных в среде Компас-3D фронтальных и профильных проекций зерна зубовидной и кремнистой кукурузы, взятой из комля, середины и носка початка. Установлены значения обобщённых коэффициентов в полиномах, определяющих усреднённую геометрию для профиля зерна кукурузы и эффективной площади контакта зерна с воздушным потоком. При этом среднее значение эффективной площади контакта с воздушным потоком находится в пределах 76...82 мм². Полученные значения коэффициентов позволяют рассчитать параметры воздушной завесы выгрузного окна роторного молотильно-сепарирующего устройства для кукурузы с уменьшенной на 10...15% длиной ротора. Предложено испытать усовершенствованное роторное молотильно-сепарирующее устройство в условиях обмолота початков кукурузы с влажностью более 14% и без предварительного снятия листовой обертки.

Ключевые слова: роторное молотильно-сепарирующее устройство, устройство с воздушной завесой выгрузного окна, обмолот кукурузы, сход свободным зерном, аппроксимация, полином

Для цитирования: Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Бурнукин А.Е., Швыдченко С.А. Концепция обмолота кукурузы роторным молотильно-сепарирующим устройством с воздушной завесой выгрузного окна // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 2. С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>

ORIGINAL ARTICLE

Concept of corn threshing by a rotary threshing-and-separating unit with an air curtain of the discharge port

A.G. Pastukhov^{1✉}, D.N. Bakharev², S.F. Volvak³, A.E. Burnukin⁴, S.A. Shvydchenko⁵

^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Belgorod, Russia

⁴ Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, Luhansk, Russia

⁵ College of Metro and Railway Transport; St. Petersburg, Russia

¹ pastukhov_ag@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

² baharevsn_82@mail.ru

³ volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

⁴ andrey_243@mail.ru

⁵ schvidtschenko@mail.ru

Abstract. To increase the efficiency of harvesting corn for grain, some improvement is necessary in the design of the rotary threshing-and-separating unit, which has a massive rotor and an increased length of the path of active separation of grain mass during threshing. Reducing the size of rotary threshing units is possible by stopping the free grain flow into the discharge port at the output of the threshing chamber. This can be achieved by using an air curtain of the discharge port. At the same time, the free grain flow will be within regulated rates with a reduced rotor length and, accordingly, a shortened path length of the active separation of the grain mass. The stopping effect on the free-flowing grain in the discharge port should ensure its movement to the lower part of the threshing zone, where it is advisable to install a vibrating section of the deck that intensifies separation. Controlling the air curtain operation requires determining the shape of the grain profile common to the main botanical groups of corn and its effective area of contact with the air flow. The authors constructed the approximation of frontal and profile projections of dent and flint corn grains, taken from the lump, middle and toe of the cob, in the Compas-3D environment. The values of generalized coefficients in polynomials determining the averaged geometry for the corn grain profile and the effective area of grain contact with the air flow were established. At the same time, the average value of the effective area of contact with the air flow is within 76 to 82 mm². The obtained coefficient values are necessary to calculate the parameters of the air curtain of the discharge port of a rotary threshing and separating unit for corn with a rotor length reduced by 10 to 15%. The authors propose to test an improved rotary threshing and separating unit in conditions of threshing corn cobs with a moisture content of more than 14% and without previous husk removing.

Keywords: rotary threshing-and-separation unit, unit with an air curtain of the discharge port, corn threshing, free grain release, approximation, polynomial

For citation: Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F., Burnukin A.E., Shvydchenko S.A. Concept of corn threshing by a rotary threshing-and-separating unit with an air curtain of the discharge port. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(2):4-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-4-12>

Введение

Зерновые культуры являются основой продовольственной безопасности России [1]. Одной из основных зерновых культур является кукуруза. Увеличение объёмов ее производства является перспективной многоуровневой задачей, один из уровней которой занимает уборка урожая с применением совершенных систем обмолота.

Существующие роторные молотильно-сепарирующие устройства (МСУ), установленные на самоходные комбайны, например, комбайны Ростсельмаш Torum или стационарные молотилки кукурузных початков (МКП-10, МКП-12 и МКП-30), характеризуются максимальной производительностью и способны сохранять работоспособное и технически исправное состояние при продолжительной непрерывной

работе¹. Их основным недостатком является высокая материалоемкость, вызванная необходимостью применения массивного ротора и деки.

Все роторные МСУ можно условно подразделить на 2 группы:

- с большими габаритными размерами, без заслонки верхней половины выгрузного окна (МСУ комбайна Ростсельмаш Torum², Threshing machine (sheller) MSH-25³);

¹ Петунина И.А. Обмолот початков кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ, 2006. 200 с.

² Сельхозтехника Ростсельмаш. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/> (дата обращения: 23.10.2023).

³ ООО «Сербия продукт». Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.serbiaproduct.rs/ru/l-g> (дата обращения: 23.10.2023).

- с уменьшенными габаритными размерами и с заслонкой верхней половины выгрузного окна (МКП-10, МКП-12, МКП-30)^{4,5}.

Наличие заслонки выгрузного окна создает противоход части обмолачиваемой массы, что позволяет использовать более короткий ротор (на 10...15%) [2-4]. Кроме того, заслонка позволяет разрушать направленный воздушный поток, создаваемый лопастями ротора в конце молотильной камеры, что минимизирует сход свободным зерном в выгрузное окно. Без заслонки обеспечивается более равномерный и контролируемый режим трения при обмолоте, но требуется применение удлиненного ротора и, соответственно, деки увеличенной площади, а это делает молотильную систему материалоемкой. Нахождение компромисса между этими двумя конструктивными решениями является важной и актуальной научной задачей.

Цель исследований: создание научных предпосылок для разработки технологического процесса обмолота кукурузы роторным молотильно-сепарирующим устройством с воздушной завесой выгрузного окна.

Материалы и методы

Общая форма профиля зерна кукурузы и его эффективная площадь контакта с воздушным потоком определялись на зёрнах кремнистой и зубовидной кукурузы, отделённых из комля, середины и носка початка. Использовались методы системного анализа и эвристического принятия инженерных решений при разработке конструкций молотильных устройств для кукурузы. Применялся способ построения фронтальных и профильных проекций зерна в среде Компас-3D с последующей аппроксимацией полученных кривых в среде Excel, усреднением коэффициентов в полиномах и 3D-моделированием искомым профилей зерна.

Результаты и их обсуждение

Применение заслонки выгрузного окна МСУ не всегда является оправданным, поскольку искусственно создаваемый противоход части обмолачиваемой массы делает процесс трения в молотильной камере хаотичным и неконтролируемым, а это сопряжено с большими затратами энергии. В результате существенный выигрыш в энергоёмкости отсутствует. Отказ от применения заслонки требует создания МСУ больших габаритных размеров. Например, МСУ комбайна Ростсельмаш Тorum имеет ротор длиной 3200 мм и диаметром 762 мм, общая

ширина молотилки составляет 1500 мм, что создает увеличенную (не менее 12,8 м) длину пути активной сепарации зерновой массы при обмолоте.

Отметим, что внушительные габаритные размеры оказывают положительное влияние на производительность МСУ. Благодаря большой производительности (до 45 т/ч) комбайны Ростсельмаш Тorum-785 являются одними из самых эффективных современных комбайнов для уборки кукурузы на зерно.

Принципиальная схема работы МСУ с заслонкой выгрузного окна представлена на рисунке 1.

В МСУ, разработанных для стационарных условий обмолота, например, семенной или продовольственной кукурузы, отказ от применения заслонки выгрузного окна приводит к необходимости разработки многоступенчатых молотилок, реализующих принцип дифференцированного обмолота. Отметим конструкцию MSH-25 «Сербия продукт», в которой последовательно установлены независимые молотильная и сепарирующая части. Машина работает весьма эффективно, однако обладает увеличенными габаритными размерами.

Обеспечить контроль за процессом обмолота можно, регулируя силу удара частотой вращения ротора и дифференцируя силу трения посредством пневмоадаптивной деки [5, 6]. МСУ с пневмоадаптивной декой разработано для стационарного обмолота семенной кукурузы без листовой обёртки и после предварительной сушки початков до влажности 14% (рис. 2). Однако это МСУ обладает всеми конструктивными элементами, позволяющими его использовать для решения более широкого диапазона задач. Например, в качестве молотилки роторного селекционного комбайна, убирающего кукурузу на зерно с влажностью, существенно более 14%, без предварительного снятия листовой обёртки.

С целью компромиссного объединения достоинств конструктивных схем, представленных на рисунках 1 и 2, предлагается в МСУ с пневмоадаптивной декой внести два конструктивных изменения. Первое – подача в верхнюю половину выгрузного окна (в противоход обмолачиваемой массе и под углом к оси ротора) направленного воздушного потока, создающего эффект воздушной завесы, которая аналогично заслонке разворачивает отделившееся от початков зерно и направляет его к отверстиям нижней части деки. Это минимизирует потерю зерна с выбрасываемой ротором незерновой массой без увеличения длины ротора. Поскольку дополнительная масса зерна сгружается в нижнюю часть зоны домолота, то для повышения ее эффективности вводится второе конструктивное изменение: в зоне домолота нижней части деки добавляются дополнительные вынужденные колебания, то есть полудека становится вибрационной.

⁴ Курасов В.С., Куцеев В.В., Самурганов Е.Е. Механизация работ в селекции, сортоиспытании и первичном семеноводстве кукурузы: Монография. Краснодар: КубГАУ, 2013. 151 с.

⁵ Голик М.Г. Хранение и обработка початков и зерна кукурузы: Монография. М.: Колос, 1968. 337 с.

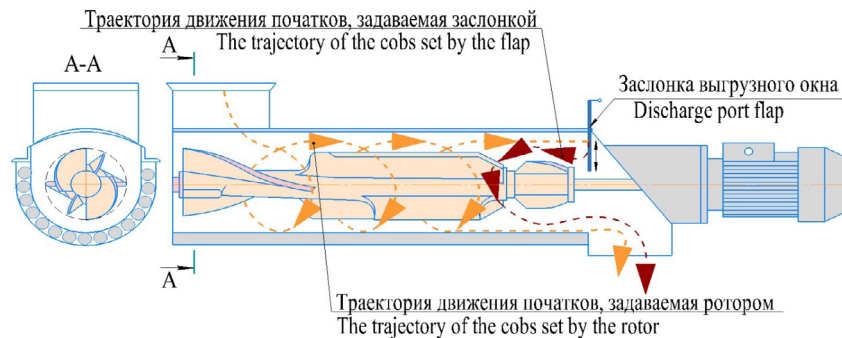


Рис. 1. Принципиальная схема работы молотильно-сепарирующего устройства с заслонкой выгрузного окна
Fig. 1. Schematic operation diagram of the threshing-and-separating unit with the discharge port air curtain

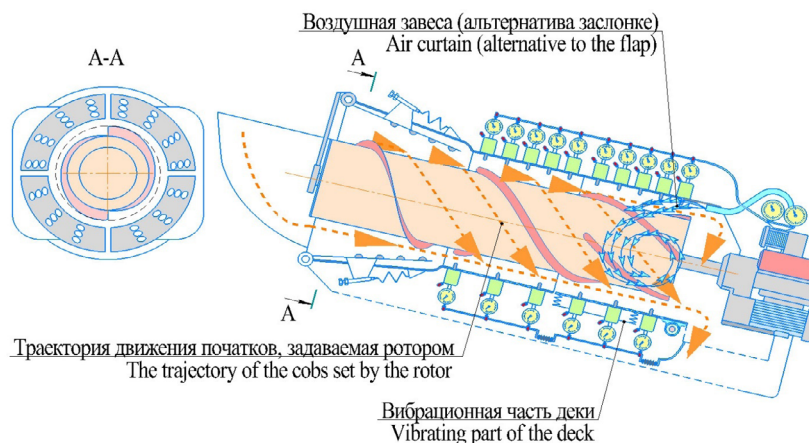


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированного молотильно-сепарирующего устройства с пневмоадаптивной декой

Fig. 2. Schematic diagram of the upgraded threshing-and-separating unit with a pneumoadaptive deck

Указанные конструктивные изменения повысят эффективность работы МСУ с пневмоадаптивной декой при следующих условиях:

- воздушная завеса будет разрушать направленный поток воздуха, создаваемый лопастями ротора и выбрасывающий зерно в выгрузное окно, а также смещать отделившееся зерно к началу вибрирующей части деки в зоне домолота;

- вибрирующая часть деки будет обеспечивать сепарацию обмолачиваемой массы без повреждений зерна.

Ротор МСУ с пневмоадаптивной декой при стационарном обмолаоте очищенных и высушенных початков должен вращаться с частотой 154...162 мин⁻¹. В таком режиме сход свободным зерном не превышает 1% [5, 6]. В условиях прямого комбайнирования, при влажности зерна более 14% и наличия листовой обертки на початках, потребуется более высокая частота вращения ротора. При этом сход свободным зерном может выйти за регламентированные рамки. Причина данного эффекта заключается в том, что в зоне домолота часть свободного зерна, получившая ударный импульс от быстро вращающегося ротора, летит в направлении выгрузного окна и попадает в интенсивный направленный воздушный поток,

создаваемый лопастями ротора. Для исключения этого эффекта необходима воздушная завеса, обеспечивающая останавливающее воздействие на свободное зерно, летящее в выгрузное окно. Завеса должна исключить возможность вылета свободного зерна в выгрузное окно, преодолев движущую силу, вызванную ударным импульсом, и разрушив направляющее действие выходящего в выгрузное окно воздушного потока, создаваемого лопастями ротора. Теоретическое обоснование таких условий требует усреднения геометрии зерна, определяющей условия его полёта в воздушном потоке, а именно определения общего для основных ботанических групп кукурузы профиля зерна и его эффективной площади контакта с воздушным потоком [7, 8]. Это осуществлено посредством аппроксимации кривых, задающих природную форму зерна кукурузы, и последующего 3D-моделирования профилей по усреднённым значениям полученных полиномов.

Для получения кривых, задающих природную форму зерна, было отобрано по 5 початков кукурузы сорта Достойный и Эффектный. Размеры початков соответствовали среднестатистическим параметрам, заявленным оригинатором. От каждого початка было

отделено по 5 зёрен из комля, середины и носка, что позволило сформировать по 3 выборки для каждого сорта. Затем методом деления квадрата было выделено 6 зёрен, характеризующих сорт (по одному из каждой выборки). Отобранные зёрна фотографировали, создавалась цифровая фотокопия с высоким разрешением, которая накладывалась как слой

на миллиметровую сетку в программе Компас-3D с сохранением размеров и пропорций зёрен. Далее, обходя зерно по контуру, отмечали по 20 точек на миллиметровой сетке, затем фото удалялось, а контур зерна сохранялся. Соединение этих точек позволяло создать искомые фронтальные и профильные проекции (рис. 3, 4).

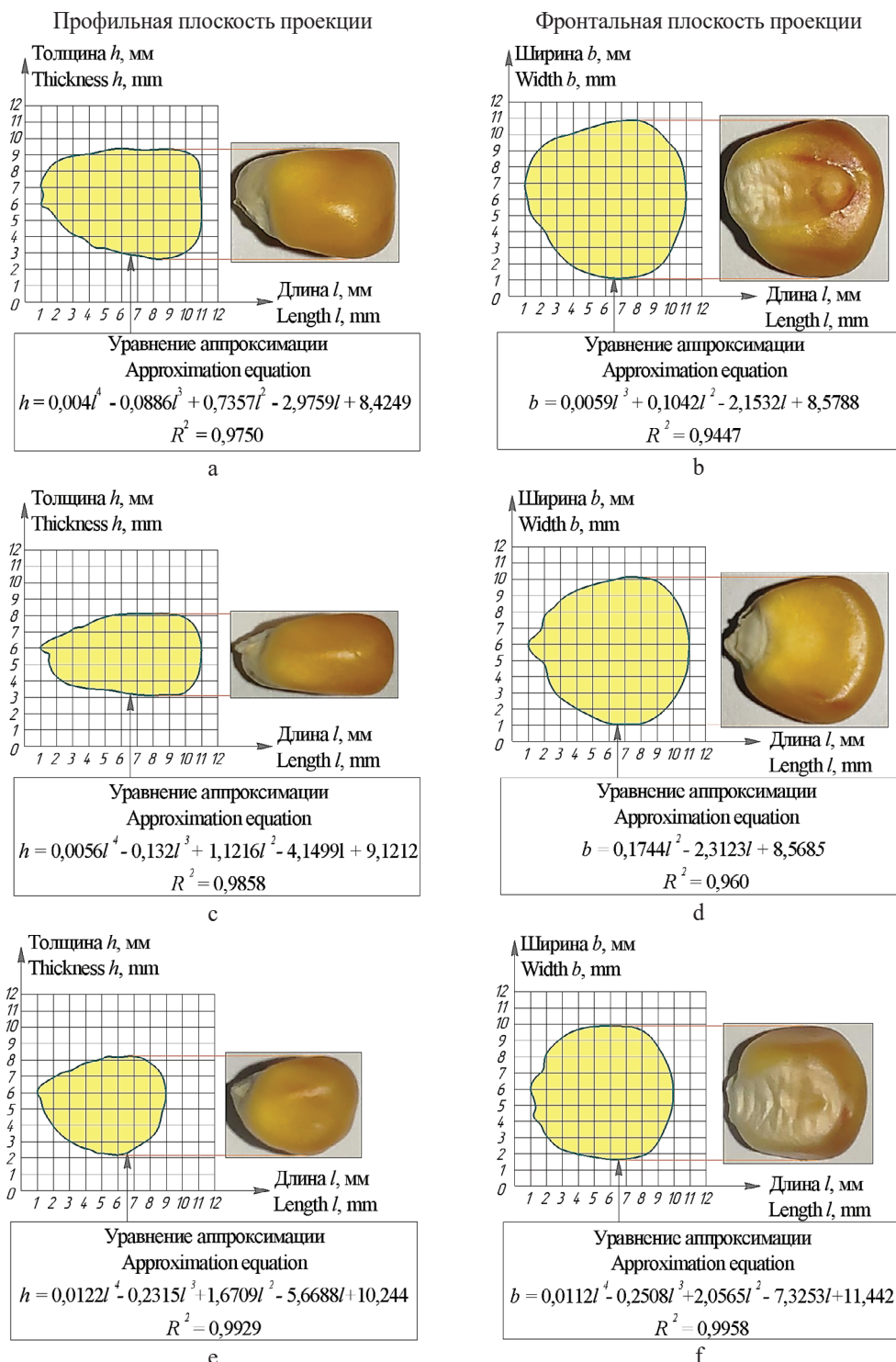


Рис. 3. Ортогональные проекции зерна кремнистой кукурузы, взятого из комля (a, b), средней части (c, d) и носка (e, f) початка

Fig. 3. Orthogonal projections of flint corn grain taken from the bottom of the corn cob (a, b), the middle of the corn cob (c, d), and the top of the corn cob (e, f)

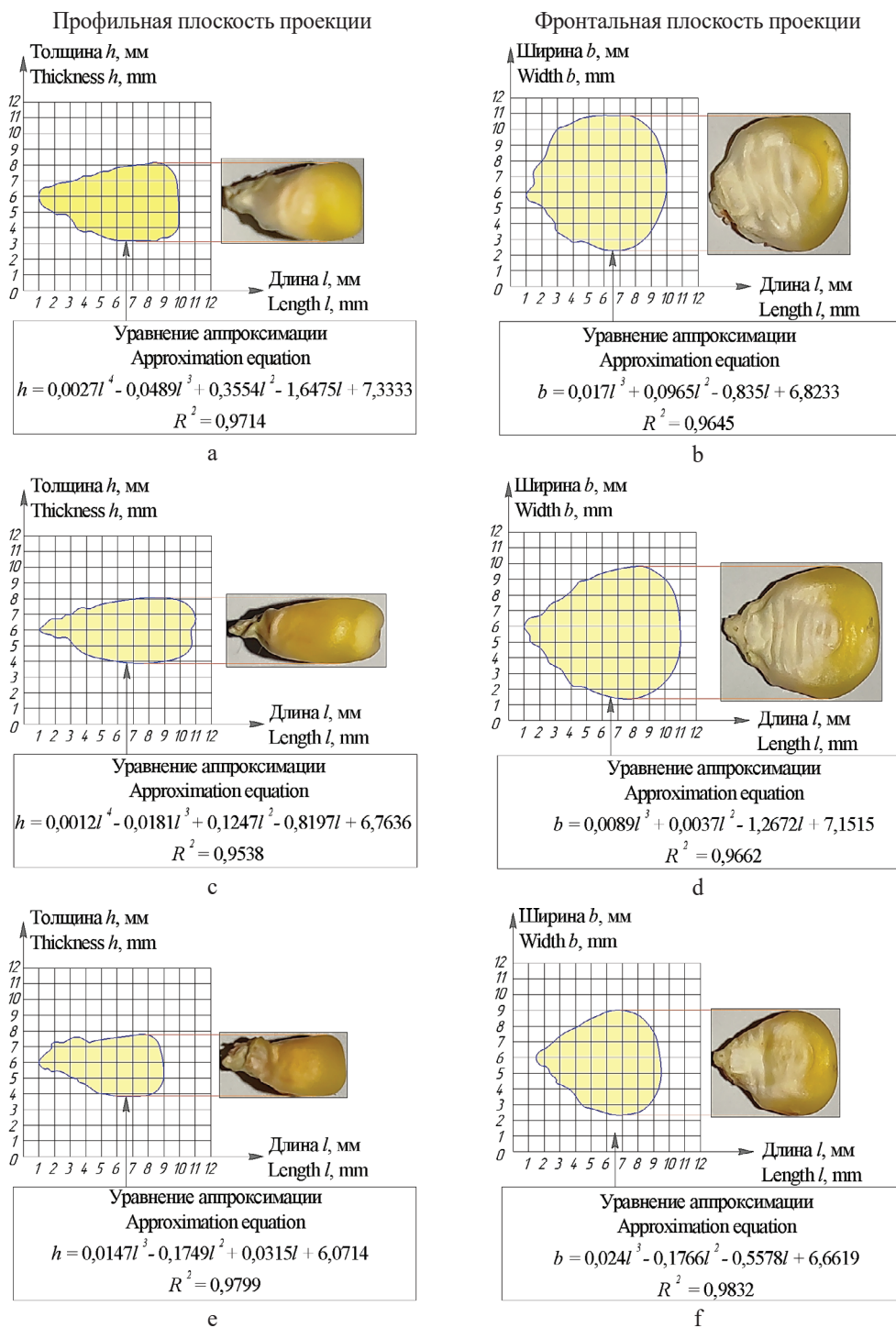


Рис. 4. Ортогональные проекции зерна зубовидной кукурузы, взятого из комля (а, б), средней части (с, д) и носка (е, ф) початка

Fig. 4. Orthogonal projections of dent corn grain taken from the bottom of the corn cob (a, b), the middle of the corn cob (c, d), and the top of the corn cob (e, f)

Аппроксимация фронтальных и профильных проекций зерна зубовидной и кремнистой кукурузы, взятой из комля, середины и носка початка, представлена на рисунках 3 и 4. Уравнения (полиномы) получены посредством функции «Параметры линии тренда» в программе Microsoft Excel. Результат усреднения коэффициентов в полученных полиномах приведен в таблице.

В результате усреднения коэффициентов получены два полинома, определяющих обобщённую форму профиля h и форму фронтальной проекции зерна кукурузы b (рис. 5, 6):

$$h = 0,0043l^4 - 0,0841l^3 + 0,6389l^2 - 2,5384l + 7,9931, \quad (1)$$

$$b = 0,0019l^4 - 0,0325l^3 + 0,3765l^2 - 2,4085l + 8,2040. \quad (2)$$

Обобщение коэффициентов уравнений аппроксимации

Generalization of coefficients from approximation equations

Зона початка <i>Cob area</i>	the Polynomial coefficients				
	При l^4 <i>At l^4</i>	При l^3 <i>At l^3</i>	При l^2 <i>At l^2</i>	При l <i>At l</i>	Свободный член <i>Free member</i>
Зерно кремнистой кукурузы в профильной плоскости проекции / Profile projection of flint corn grain					
Комель / <i>Bottom of the corn cob</i>	0,0040	-0,0886	0,7357	-2,9759	8,4249
Средняя часть / <i>Middle of the corn cob</i>	0,0056	-0,1320	1,1216	-4,1499	9,1212
Носок / <i>Top of the corn cob</i>	0,0122	-0,2315	1,6709	-5,6688	10,244
Среднее значение / <i>Average value</i>	0,0073	-0,1507	1,1761	-4,2649	9,2634
Зерно кремнистой кукурузы во фронтальной плоскости проекции / Frontal projection of flint corn grain					
Комель / <i>Bottom of the corn cob</i>	0	0,0059	0,1042	-2,1532	8,5788
Средняя часть / <i>Middle of the corn cob</i>	0	0	0,1744	-2,3123	8,5685
Носок / <i>Top of the corn cob</i>	0,0112	-0,2508	2,0565	-7,3253	11,442
Среднее значение / <i>Average value</i>	0,0037	-0,0816	0,7784	-3,9303	9,5298
Зерно зубовидной кукурузы в профильной плоскости проекции / Profile projection of dent corn grain					
Комель / <i>Bottom of the corn cob</i>	0,0027	-0,0489	0,3554	-1,6475	7,3333
Средняя часть / <i>Middle of the corn cob</i>	0,0012	-0,0181	0,1247	-0,8197	6,7636
Носок / <i>Top of the corn cob</i>	0	0,0147	-0,1749	0,0315	6,0714
Среднее значение / <i>Average value</i>	0,0013	-0,0174	0,1017	-0,8119	6,7228
Зерно зубовидной кукурузы во фронтальной плоскости проекции / Frontal projection of dent corn grain					
Комель / <i>Bottom of the corn cob</i>	0	0,0170	0,0965	-0,8350	6,8233
Средняя часть / <i>Middle of the corn cob</i>	0	0,0089	0,0037	-1,2672	7,1515
Носок / <i>Top of the corn cob</i>	0	0,0240	-0,1766	-0,5578	6,6619
Среднее значение / <i>Average value</i>	0	0,0166	-0,0255	-0,8867	6,8789
Общее среднее для двух ботанических групп / Overall average for two botanical groups					
В профильной плоскости проекции <i>In the profile plane of projection</i>	0,0043	-0,0841	0,6389	-2,5384	7,9931
Во фронтальной плоскости проекции <i>In the frontal plane of projection</i>	0,0019	-0,0325	0,3765	-2,4085	8,2040

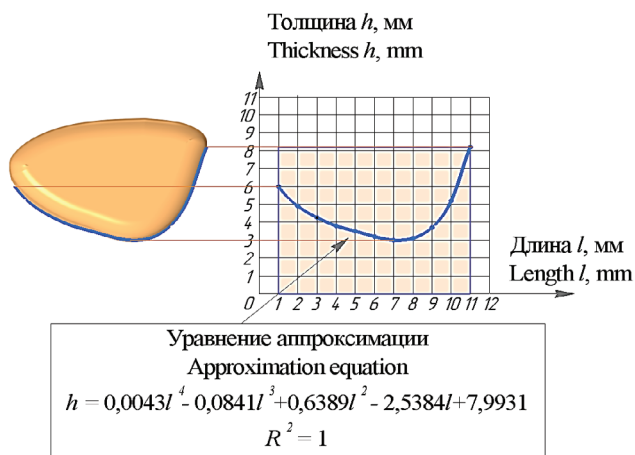


Рис. 5. Обобщённая модель профиля зерна кукурузы
Fig. 5. Averaged model of the profile of corn grain

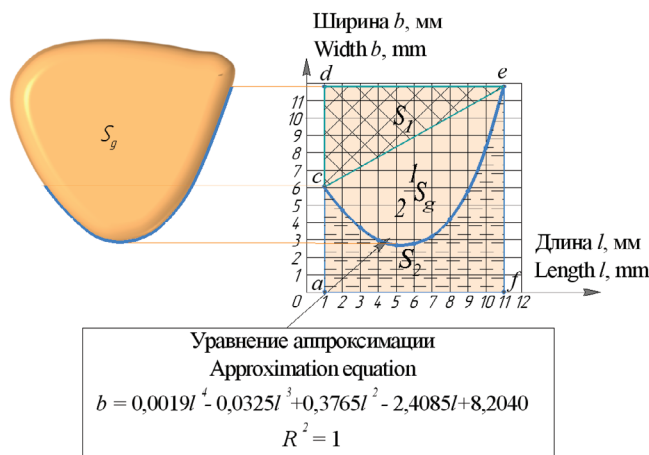


Рис. 6. Обобщённая модель фронтальной проекции зерна кукурузы
Fig. 6. Averaged model of the frontal projection of corn grain

Площадь фронтальной проекции по своей физической сути является эффективной площадью контакта зерна с воздушным потоком.

Модели сохраняют естественную симметрию зерна во фронтальной проекции и асимметрию – в его профильной проекции. Обобщённая площадь фронтальной проекции S_g зерна кукурузы по данным рисунка 6 из геометрических соображений определяется выражением:

$$S_g = 2k \cdot (S_0 - S_1 - S_2) = \\ = 2k \cdot \left(S_0 - \frac{1}{2}HL - \int_a^f (0,0019l^4 - 0,0325l^3 + \right. \\ \left. + 0,3765l^2 - 2,4085l + 8,2040) dl \right), \quad (3)$$

где k – поправка на искривление профиля в области зародыша зерна, $k = 0,90 \dots 0,95$; S_0 – прямоугольная площадь $adef$ на рисунке 6; S_1 – площадь треугольного участка cde на рисунке 6. Расстояние $cd = H$, $de = L$; S_2 – площадь фигуры, ограниченной графической интерпретацией усреднённого полинома, осью абсцисс и пределами интегрирования от a до f .

Расчёт, произведённый посредством выражения (3), показал, что в пределах интегрирования $a = 1$ мм, $f = 11$ мм, выбранных на основании анализа природных размеров зерна, среднее значение эффективной площади контакта с воздушным потоком S_g находится в пределах $76 \dots 82$ мм².

Используя знания об усреднённой геометрии зерна кукурузы, опираясь на известные математические модели, можно с достаточной точностью рассчитать

Список источников

1. Сотченко В.С. Роль кукурузы в повышении продовольственной независимости страны // Вестник Российской академии наук. 2015. Т. 85, № 1. С. 12-14. EDN: TELWMV
2. Алдошин Н.В., Бердышев В.Е., Малла Б. Обоснование режимов работы аксиально-роторных зерноуборочных комбайнов на уборке смешанных посевов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2019. № 3 (91). С. 17-22. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
3. Бахарев Д.Н., Добрицкий А.А. Аналитическое обоснование размерных характеристик ротора молотильно-сепарирующего устройства для кукурузоуборочного комбайна // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 2 (38). С. 11-16. EDN: DKТОМФ
4. Жалнин Э.В., Чаплыгин М.Е. Динамика фракционно-го состава зерносоматистой массы, обмолачиваемой в молотильном аппарате зерноуборочного комбайна // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 249-262. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
5. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Молотильно-сепарирующее устройство для первичного семеноводства кукурузы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 1. С. 34-39. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-34-39>
6. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н., Вольвак С.Ф., Черников Р.В. Пневматическая система дифференцированного обмолота кукурузы // Сельскохозяйственные

требуемую скорость воздуха в завесе, определить уточнённые значения коэффициента парусности, скорости витания и т.д. [9-12].

Предложенный концептуальный подход к процессу обмолота кукурузы расширяет возможности применения молотильно-сепарирующего устройства с пневмоадаптивной декой.

Выводы

1. Уменьшить габаритные размеры роторного молотильно-сепарирующего устройства для кукурузы на $10 \dots 15\%$ можно за счёт применения воздушной завесы верхней половины выгрузного окна и вибрационной активизации нижней полудеки домолочивающей части.
2. Посредством воздушной завесы можно создать условия, при которых разрушается направленный поток воздуха, создаваемый лопастями ротора, а отделившееся зерно смещается к началу вибрирующей части деки в зоне домолота.
3. Полученные модели для расчёта параметров воздушной завесы выгрузного окна роторного молотильно-сепарирующего устройства учитывают профиль зерна кукурузы и его эффективную площадь контакта с воздушным потоком, среднее значение которой составляет $76 \dots 82$ мм².
4. Для проверки предложенной концепции обмолота кукурузы на практике предлагаемую конструкцию молотильно-сепарирующего устройства целесообразно испытать в условиях обмолота початков кукурузы с влажностью более 14% и без предварительного снятия листовой обертки.

References

1. Sotchenko V.S. The role of corn in increasing the country's food independence. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015;85(1):12-14. (In Russ.)
2. Aldoshin N.V., Berdyshchev V.Ye., Mala Bahaa. Determining operating modes of axial-rotary combine harvesters for harvesting mixed crops. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019;3(91):17-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-3-17-22>
3. Bakharev D.N., Dobritskiy, A.A. Analytical justification of the dimensional characteristics of the rotor of a threshing and separating unit for a corn harvester *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2023;2(38):11-16. (In Russ.)
4. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.249-262>
5. Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Maize threshing and separating device for primary seed production. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(1):34-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-1-34-39>
6. Pastukhov A.G., Bakharev D.N., Volvak S.F., Chernikov R.V. Pneumatic system of variable-force corn threshing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(4):42-47. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-42-47>
7. Pastukhov A.G., Bakharev D.N. Procedure for engineering calculation of a set of technical tools for step-by-step threshing

машины и технологии. 2019. Т. 13, № 4. С. 42-47. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-42-47>

7. Пастухов А.Г., Бахарев Д.Н. Методика инженерного расчёта комплекта технических средств для поэтапного обмолота початков семенной кукурузы // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 4 (32). С. 61-72. EDN: IQRXHT

8. Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н. Взаимосвязь аэродинамических показателей фракций сыпучего материала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 4 (75). С. 90-96. EDN: GATZVO

9. Василенко В.В., Оробинский В.И., Василенко С.В., Посохов Д.Н. Разброс значений коэффициента парусности семян пшеницы при аэродинамической сепарации // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2 (77). С. 98-105. EDN: PZSDFM

10. Московский М.Н., Борзенко С.И. Распределение высокозагрязнённого соевого материала в глубоком воздушном канале // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 4. С. 42-48. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48>

11. Добрицкий А.А. Экспериментальные исследования сушилки высоковлажных семян бахчевых культур // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 4 (32). С. 9-25. EDN: SKVCDB

12. Добрицкий А.А. Обоснование и разработка модели функционирования сушилки высоковлажных семян бахчевых культур // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 4 (36). С. 25-29. EDN: NITSJS

Информация об авторах

Александр Геннадиевич Пастухов¹, д-р техн. наук, профессор; pastukhov_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

Дмитрий Николаевич Бахарев², д-р техн. наук, доцент; baharevdn_82@mail.ru

Сергей Федорович Вольвак³, канд. техн. наук, профессор; volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

Андрей Евгеньевич Бурнукин⁴, старший преподаватель; andrey_243@mail.ru

Сергей Анатольевич Швыдченко⁵, заведующий отделением; schvidtschenko@mail.ru

^{1,2,3} Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Российская Федерация, Белгородская обл., Белгородский р-он, пос. Майский, ул. Вавилова, 1

⁴ Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова; 291008, Российская Федерация, Луганская Народная Республика, Артемовский р-он, г. Луганск, тер. ЛНАУ, д. 1

⁵ Колледж метрополитена и железнодорожного транспорта; 192283, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Купчинская, 28, литера А

Вклад авторов

А.Г. Пастухов – концептуализация и общее научное руководство. Д.Н. Бахарев – компьютерная графика, 3D-моделирование, редактирование окончательной версии рукописи.

С.Ф. Вольвак – разработка аннотаций и литературный анализ. А.Е. Бурнукин – формулирование направлений совершенствования молотильного устройства, формирование проекций зерна, аппроксимация и обработка массива полученных данных. С.А. Швыдченко – создание и обработка фотоинформации, оформление черновика рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 25.10.2023, после рецензирования и доработки 14.02.2024, принята к публикации 16.02.2024

of cobs seed corn. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*. 2021;4(32):61-72. (In Russ.).

8. Vasilenko V.V., Orobinskiy V.I., Vasilenko S.V., Posokhov D.N. Relationship of the aerodynamic parameters of bulk material fractions. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University* 2022;15(4):90-96. (In Russ.)

9. Vasilenko V.V., Orobinskiy V.I., Vasilenko S.V., Posokhov D.N. Coefficient of sailing capacity of wheat seeds and its variations during aerodynamic separation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2023;16(2):98-105. (In Russ.)

10. Moskovskiy M.N., Borzenko S.I. Distribution of heterogeneous, highly impure soy material in a deep air channel. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):42-48. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48>

11. Dobritskiy A.A., Volvak S.F. Experimental studies of the dryer of high-moisture seeds of melon crops. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2021;4:9-25. (In Russ.)

12. Dobritskiy A.A. Justification and development of a functioning model of a dryer of high-moisture gourds seeds. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022;4:25-29. (In Russ.)

Author Information

Aleksandr G. Pastukhov¹, DSc (Eng), Professor; pastukhov_ag@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

Dmitry N. Bakharev², DSc (Eng), Associate Professor; baharevdn_82@mail.ru

Sergey F. Volvak³, CSc (Eng), Professor; volvak.s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

Andrey E. Burnukin⁴, Senior Lecturer; andrey_243@mail.ru

Sergey A. Shvydchenko⁵, Head of the Department; schvidtschenko@mail.ru

^{1,2,3} Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin, Vavilov Str., 1, Maysky, Belgorod district, Belgorod region, 308503, Russian Federation.

⁴ Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov, LNAU Str., 1, Lugansk, Artemovsk district, Lugansk People's Republic, 291008, Russian Federation.

⁵ College of Metro and Railway Transport, Kupchinskaya Str., 28 A, St. Petersburg, 192283, Russian Federation.

Author Contribution

A.G. Pastukhov – conceptualization and research supervision. D.N. Bakharev – computer graphics, 3D modeling, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

S.F. Volvak – abstract making and literature review.

A.E. Burnukin – searching for the ways to improve the threshing device, development of grain projections, approximation and processing of the array of data obtained.

S.A. Shvydchenko – visualization, original draft preparation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 25.10.2023; Revised 14.02.2024; Accepted 16.02.2024.