

Научная статья  
УДК631.354  
doi:10.35694/YARCX.2023.62.2.016

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ОЧЁСЫВАЮЩЕ-ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА НА ЭНЕРГОЁМКОСТЬ ПРОЦЕССА УБОРКИ

**Дмитрий Владимирович Рудой<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия

rudoy.d@gs.donstu.ru, ORCID 0000-0002-1916-8570

**Реферат.** Снижение энергоёмкости процесса выделения зерна из колоса представляется возможным за счёт использования принципиально новых методов обмолота. Одним из таких методов является очёс, который в настоящее время успешно реализуется в конструкциях очёсывающих жаток, агрегатируемых с комбайнами. Известно, что на работу комбайнов затрачивается большое количество энергии. В связи с этим был создан новый очёсывающе-обмолачивающий агрегат, позволяющий убирать зерно на разных стадиях спелости и значительно снизить затраты на топливо за счёт создания резонансных явлений в рабочем органе агрегата, под действием которых выделение зерна происходит при наименьших энергозатратах, в сравнении с классическим обмолотом. Снижение энергозатрат происходит также за счёт его агрегатирования с трактором. В результате математического моделирования энергоёмкости процесса, в зависимости от конструкции очёсывающе-обмолачивающего агрегата, определена зависимость энергоёмкости процесса уборки от длины очёсывающего барабана (жатвенной части агрегата) и выведена формула определения его оптимальной длины.

*Ключевые слова:* уборка зерновых, энергоэффективность, очёс, пшеница, агрегат для уборки, теоретические исследования, сельское хозяйство

## THEORETICAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE COMBING-THRESHING UNIT DESIGN ON THE ENERGY INTENSITY OF THE HARVESTING PROCESS

**Dmitriy V. Rudoy<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Agricultural Research Centre "Donskoy", Zernograd, Russia

rudoy.d@gs.donstu.ru, ORCID 0000-0002-1916-8570

**Abstract.** Reducing the energy intensity of the process of separating grain from the ear is possible due to the use of fundamentally new threshing methods. One of these methods is combing which is currently being successfully implemented in the designs of combing harvester aggregated with combines. It is known that a large amount of energy is spent on the operation of combine harvesters. In this regard a new combing and threshing unit was created which makes it possible to harvest grain at different stages of maturity and significantly reduce fuel costs due to the creation of resonant phenomena in the working body of the unit, under the action of which the separation of grain occurs at the lowest energy consumption in comparison with classic threshing. Energy cost reduction is also due to its aggregation with a tractor. As a result of mathematical modeling of the energy intensity of the process depending on the design of the combing and threshing unit, the dependence of the energy intensity of the harvesting process on the length of the stripping cylinder (the harvesting part of the unit) was determined and a formula for determining its optimal length was derived.

*Keywords:* grain harvesting, energy efficiency, combing, wheat, harvesting unit, theoretical studies, agriculture

**Введение.** Энергоёмкость является одним из ключевых требований, предъявляемых к процессу уборки зерновых колосовых культур. При классической комбайновой уборке до 80% мощности затрачивается на обмолот и перетирание соломы и только около 7% энергии расходуется на выделение зерна из колоса [1]. Таким образом, традиционная технология является энергетически затратной, кроме того, такая технология предполагает сбор зерна, достигшего полной спелости, и не позволяет убирать его на ранних стадиях, когда в зерне содержится повышенное количество питательных веществ, микро- и макроэлементов [2].

Разработкой новых и усовершенствованием существующих методов обмолота хлебной массы с целью снижения энергоёмкости процесса занимается большое количество учёных. К примеру, Д. В. Скрипкин [3] разработал математическую модель инерционно-очёсного обмолота зерновых колосовых культур и создал молотильно-сепарирующее устройство, позволяющее снизить энергоёмкость обмолота в 9 раз, в сравнении с классическим молотильным аппаратом.

Сухопаров А. И. заменил в конструкции комбайна бильный молотильный аппарат на молотильно-сепарирующее устройство с зубовыми бичами. Это позволило снизить энергоёмкость процесса, при этом расход топлива уменьшился на 13% [4].

Тем не менее, такой способ выделения зерна из колоса является одним из наиболее энергоёмких процессов возделывания зерновых колосовых культур. Кроме того, обмолот зерна ранних фаз спелости, когда в нём содержится максимальное количество питательных веществ, невозможно осуществить за счёт ударного воздействия, поскольку на ранних стадиях спелости зерно имеет сильную связь с колосом, что не позволяет выделить его из колоса традиционным ударным воздействием в молотильных устройствах комбайнов. Таким образом, модернизация рабочих органов молотильных устройств не позволяет в значительной мере снизить энергоёмкость и убирать зерно на ранних стадиях спелости, что требует создания принципиально новых методов выделения зерна из колоса, исключающих непосредственное механическое воздействие рабочих органов.

Менее энергоёмкий процесс выделения зерна из колоса наблюдается при использовании метода очёса. Доказано, что применение очёсывающих жаток позволяет уменьшить энергозатраты и снизить расход топлива на 30–45% [5]. Тем не менее, применение очёсывающих жаток, агрегируемых с комбайнами, не позволяет в значительной степени снизить энергоёмкость процесса. В

связи с этим был разработан очёсывающе-обмолачивающий агрегат [6], агрегируемый с трактором, который имеет меньший расход топлива. Его конструкция позволяет создавать резонансные частоты в диапазоне от 7 до 26 кГц, под действием которых зерно отделяется от цветоложа при минимальных энергозатратах [2].

Определение зависимости энергоёмкости процесса уборки от конструкции очёсывающего барабана агрегата следующее. Общие затраты энергоёмкости процесса уборки зерновых колосовых культур можно определить по формуле (1):

$$N = N_g + N_k + N_{uu} + N_n \quad (1)$$

где  $N_g$  – затраты энергии на обмолот, кВт (2);  $N_k$  – затраты энергии на транспортировку зерна из молотильного зазора, кВт (3);  $N_{uu}$  – затраты энергии на транспортировку вороха шнеком из агрегата, кВт (4; 5);  $N_n$  – затраты энергии на перемещение агрегата по полю, кВт.

Согласно [1], мощность, расходуемая на отрыв зерновки от стебля и вымолот зерна, определяется соотношением (2):

$$N_g = \frac{F_{omp} \cdot S \cdot q \cdot M}{m_k}, \quad (2)$$

где  $F_{omp}$  – усилие отрыва зерна из цветоложа, Н;  $S$  – величина пути вымолота, м;  $q$  – доля зерновки в убираемой зерновой массе, %;  $M$  – секундная производительность агрегата, кг/с;  $m_k$  – масса зерна, кг.

Мощность, расходуемая на транспортировку зерна из камеры очёса, зависит от угловой скорости барабана и его размера [1] (3):

$$N_k = \frac{M \cdot v_z^2}{2} = \frac{M \cdot \omega_p^2 \cdot r_n^2}{2}, \quad (3)$$

где  $v_z$  – скорость зерновки, м/с;  $\omega_p$  – угловая скорость очёсывающего ротора, с<sup>-1</sup>;  $r_n$  – наружный радиус лопасти, м.

Мощность, необходимая для транспортировки зерновой массы в шнеке, зависит от угловой скорости геометрических параметров. Однако для её нахождения следует учесть, что зерновая масса попадает в шнек по всей его длине, поэтому рассмотрим приращение мощности для элемента длины  $dx$ , находящегося на расстоянии  $x$  от выхода из шнека (4):

$$dN_{uu} = Q \cdot dx \cdot k \cdot x, \quad (4)$$

Тогда полная мощность может быть найдена интегрированием функции (4) по ширине захвата жатки  $L$ , получим следующее (5):

$$N_{uu} = \int_0^L Q \cdot p \cdot x \cdot dx = Q \cdot k \cdot \frac{L^2}{2}, \quad (5)$$

где  $Q$  – объёмный вес зернового вороха на единицу длины, кг/м<sup>3</sup>;  $x$  – расстояние, которое необходимо преодолеть зерновому вороху вдоль шнекового транспортёра для выхода из агрегата, м;  $k$  – коэффициент, зависящий от кинематических и геометрических параметров шнека.

Энергоёмкость, затрачиваемая на перемещение агрегата по полю  $N_n$ , зависит от площади убираемого поля ( $S = a \cdot b$ ), скорости передвижения агрегата  $v$  и состояния почвы, препятствующего перемещению ( $k_p$ ). Количество гонов определяется исходя из длины гона  $a$  (длины поля), ширины захвата жатки  $L$  и ширины поля  $b$ . Тогда время  $T$ , затрачиваемое на уборку зерна агрегатом на площади  $S$ , определим по формуле (6):

$$T = \frac{a}{v} \cdot \frac{b}{L}. \quad (6)$$

Энергия для перемещения определяется, как (7):

$$E_n = \frac{a \cdot b \cdot k_p}{L}. \quad (7)$$

Энергоёмкость  $N$  вращающегося очёсывающего барабана определяется, как произведение крутящего момента ( $M_{кр}$ , Н·м) на угловую скорость ( $\omega$ , об/мин) (8):

$$N = M_{кр} \cdot \omega. \quad (8)$$

При проведении лабораторных исследований уборки зерна агрегатом была выбрана длина очёсывающего барабана  $l = 2$  м. Экспериментально определён крутящий момент  $M_{кр}$  соответствующий

этой длине. Тогда энергоёмкость, требуемая для длины очёсывающего барабана  $L$  представляется в виде (9):

$$N = N_e + N_k = \frac{M_{кр}}{l} \cdot L \cdot \omega. \quad (9)$$

Приняв все параметры, влияющие на процесс = const, зависимость полной энергии  $E$  от длины жатвенной части  $L$  для обработки поля определённого размера представим в следующем виде (10):

$$E = \frac{a_1 + a_2 \cdot L + a_3 \cdot L^2}{L}, \quad (10)$$

где коэффициенты  $a_i = a_i(\omega_j, R_k, \dots)$  зависят от кинематических, геометрических и других параметров процесса:  $a_1$  – учитывает количество энергии, затраченное на передвижение;  $a_2$  – учитывает количество энергии, затраченное на обмолот (отрыв от колоса);  $a_3$  – учитывает количество энергии, затраченное шнеком на передвижение хлебной массы.

Исследование зависимости энергии от параметра  $L$  позволило определить оптимальный размер  $L_{opt}$  из соотношения (11):

$$E(L) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Характерный график функции  $E(L)$  при положительных значениях коэффициентов  $a_i$  представлен на рисунке 1.

Найдём производную функции  $E(L)$  (12):

$$E'_L = -\frac{a_1}{L^2} + a_3. \quad (12)$$

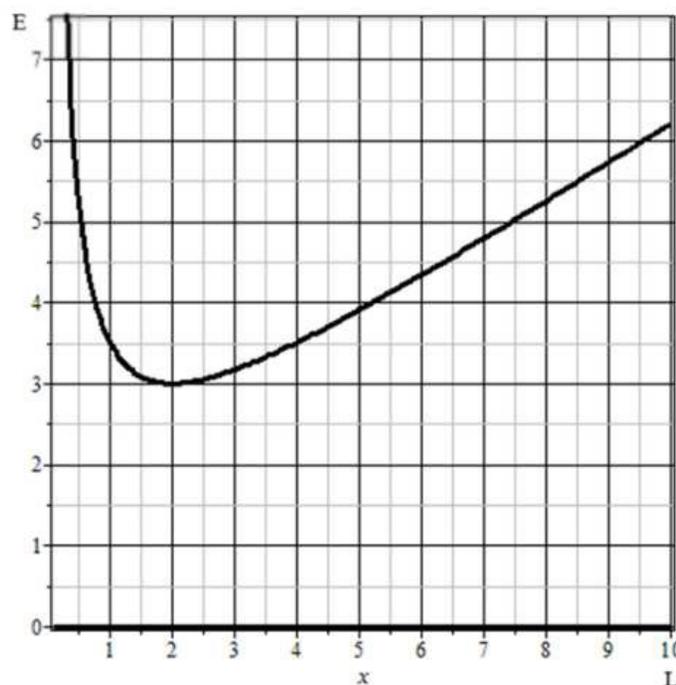


Рисунок 1 – Характерный график функции  $E(L)$  при положительных значениях коэффициентов  $a_i$

Тогда оптимальное значение длины очёсывающего барабана равно (13):

$$L_{opt} = \sqrt{\frac{a_1}{a_3}}. \quad (13)$$

**Выводы.** Снижение энергоёмкости процесса выделения зерна из колоса представляется возможным за счёт использования принципиально новых методов обмолота. Одним из таких методов является очёс, который в настоящее время успешно реализуется в конструкциях очёсывающих жаток, агрегируемых с комбайнами. Известно, что на работу комбайнов затрачивается большое количество энергии. В связи с этим был создан новый очёсывающе-обмолачивающий агрегат, по-

зволяющий убирать зерно на разных стадиях спелости и значительно снизить затраты на топливо за счёт создания резонансных явлений в рабочем органе агрегата, под действием которых выделение зерна происходит при наименьших энергозатратах, в сравнении с классическим обмолотом, а также снижение энергозатрат происходит за счёт его агрегирования с трактором. В результате математического моделирования энергоёмкости процесса, в зависимости от конструкции очёсывающе-обмолачивающего агрегата, определена зависимость энергоёмкости процесса уборки от длины очёсывающего барабана (жатвенной части агрегата) и выведена формула определения его оптимальной длины.

#### Список источников

1. Скворцов А. К. Разработка ресурсосберегающих технологий и средств механизации уборки зерновых культур на основе использования инерционно-очёсных молотильных аппаратов : дис. ... д-ра техн. наук : специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства / Волгогр. гос. с.-х. акад. Волгоград, 2005. 357 с.
2. Meskhi B., Rudoy D., Lachga Y. [et al.] Finite Element and Applied Models of the Stem with Spike Deformation // Agriculture. 2021. Т. 11, № 11. С. 1147. DOI 10.3390/agriculture11111147.
3. Скрипкин Д. В. Совершенствование молотильно-сепарирующего устройства и технологии обмолота зерновых колосовых культур на корню : дис. ... канд. техн. наук : специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства / Волгогр. гос. с.-х. акад. Волгоград, 2005. 143 с.
4. Сухопаров А. И. Повышение эффективности уборки зерновых культур повышенной влажности путем применения комбайнов, оснащенных молотильным аппаратом с зубowymi бичами : дис. ... канд. техн. наук : специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства / Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. Санкт-Петербург, 2007. 169 с.
5. Ожерельев В. Н., Никитин В. В. Перспективные направления снижения энергоёмкости процесса выделения зерна из колоса // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 30–31. ISSN 0321-4443.
6. Пат. 2729811 Российская Федерация, МПК А01D 41/08 (2006.01) А01D 41/00 (2006.01). Агрегат для уборки урожая / Лачуга Ю. Ф., Алабушев А. В., Пахомов В. И., Бурьянов А. И., Александров Е. А., Рудой Д. В. ; патентообладатель ФГБНУ «АНЦ «Донской». № 2019126701 ; заявл. 22.08.2019 ; опубл. 12.08.2020, Бюл. № 23. 9 с.

#### References

1. Skvortsov A. K. Razrabotka resursosberegayushchih tekhnologij i sredstv mekhanizacii uborki zernovyh kul'tur na osnove ispol'zovaniya inercionno-ochyosnyh molotil'nyh apparatov : dis. ... d-ra tekhn. nauk : special'nost' 05.20.01 – Tekhnologii i sredstva mekhanizacii sel'skogo hozyajstva / Volgogr. gos. s.-h. akad. Volgograd, 2005. 357 s.
2. Meskhi B., Rudoy D., Lachga Y. [et al.] Finite Element and Applied Models of the Stem with Spike Deformation // Agriculture. 2021. Т. 11, № 11. С. 1147. DOI 10.3390/agriculture11111147.
3. Skripkin D. V. Sovershenstvovanie molotil'no-separiruyushchego ustrojstva i tekhnologii obmolota zernovyh kolosovyh kul'tur na kornyu : dis. ... kand. tekhn. nauk : special'nost' 05.20.01 – Tekhnologii i sredstva mekhanizacii sel'skogo hozyajstva / Volgogr. gos. s.-h. akad. Volgograd, 2005. 143 s.
4. Sukhoparov A. I. Povyshenie effektivnosti uborki zernovyh kul'tur povyshennoj vlazhnosti putem primeneniya kombajnov, osnashchennyh molotil'nyim apparatom s zubovymi bichami : dis. ... kand. tekhn. nauk : special'nost' 05.20.01 – Tekhnologii i sredstva mekhanizacii sel'skogo hozyajstva / Sev.-Zap. nauch.-issled. in-t mekhanizacii i elektrifikacii sel. hoz-va. Sankt-Peterburg, 2007. 169 s.
5. Ozherel'ev V. N., Nikitin V. V. Perspektivnye napravleniya snizheniya energoemkosti processa vydeleniya zerna iz kolosa // Traktory i sel'hozmashiny. 2012. № 8. S. 30–31. ISSN 0321-4443.
6. Pat. 2729811 Rossijskaya Federaciya, МПК А01D 41/08 (2006.01) А01D 41/00 (2006.01). Agregat dlya uborki urozhaya / Lachuga Yu. F., Alabushev A. V., Pakhomov V. I., Bur'yanov A. I., Aleksandrov E. A., Rudoj D. V. ; patentoobladatel' FGBNU «ANC «Donskoj». № 2019126701 ; zayavl. 22.08.2019 ; opubl. 12.08.2020, Byul. № 23. 9 s.

*Сведения об авторе*

**Дмитрий Владимирович Рудой** – кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Агропромышленный», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»; старший научный сотрудник отдела механизации растениеводства, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Аграрный научный центр «Донской», spn-код: 3297-3460.

*Information about the author*

**Dmitriy V. Rudoy** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Dean of Agribusiness faculty, Federal State-Funded Educational Institution of higher Education Don State Technical University; Senior Researcher at the Department of Mechanization of Crop Production, Agricultural Research Center "Donskoy", spin-code: 3297-3460.

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК АПК ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ»  
включён в Перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК)**

№ п/п	Наименование издания	ISSN	Научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени	Дата включения издания в Перечень
342.	Вестник АПК Верхневолжья	1998-1635	4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)	с 01.02.2022
			1.5.20. Биологические ресурсы (биологические науки) 4.2.2. Санитария, гигиена, экология, ветеринарно-санитарная экспертиза и биобезопасность (биологические науки) 4.2.2. Санитария, гигиена, экология, ветеринарно-санитарная экспертиза и биобезопасность (ветеринарные науки) 4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства (сельскохозяйственные науки) 4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (биологические науки) 4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные науки) 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки) 4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)	с 29.03.2023

Ссылка на Перечень ВАК (по состоянию на 22.05.2023 года)

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=91107547002&f=18671>