

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636110>

EDN: NAZYSM

Повышение эффективности работы соломоизмельчителя зерноуборочного комбайна за счёт дополнительного воздействия на обрабатываемую массу

О.В. Гордеенко¹, С.И. Козлов¹, В.М. Кузюр², С.И. Будко²¹ Белорусская сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь;² Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Важным условием обеспечения стабильности урожаев является внесение органических удобрений. Подготовка и использование традиционных видов органических удобрений требует значительных затрат. Измельчение и заделка растительных остатков в почву является перспективным агротехническим приемом, поэтому необходима модернизация соломоизмельчителя зерноуборочного комбайна для оптимального механического воздействия.

Цель — оценка энергозатрат процесса плющения совместно с измельчением соломы.

Методы. Объектом проведения экспериментального исследования является солома зерновых культур и процесс различных вариантов механического воздействия. Исследования проводились на разработанной лабораторной установке, позволяющей изменять количество циклов и значений сил на исследуемый материал с целью определения предельного уплотнения при определенном усилии на плющения соломы и энергоёмкости данного процесса.

Результаты. Установлено, что с увеличением количества последующих нагрузок степень сжатия соломы увеличивается, но для применения в зерноуборочном комбайне достаточно единичной нагрузки, чтобы степень плющения соломы достигла 70%. Стоит заметить, что для плющения сухой соломы нужно не очень большое усилие, а значит и энергозатраты на механизм для плющения будут небольшие — около 5 Дж.

Заключение. Учет энергозатрат на плющение соломы может быть использован при конструировании специальных устройств и приспособлений.

Ключевые слова: солома; плющение; энергоёмкость; соломоизмельчитель; сжатие.

Как цитировать:

Гордеенко О.В., Козлов С.И., Кузюр В.М., Будко С.И. Повышение эффективности работы соломоизмельчителя зерноуборочного комбайна за счёт дополнительного воздействия на обрабатываемую массу // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 3. С. 319–325. DOI: 10.17816/0321-4443-636110 EDN: NAZYSM

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-636110>

EDN: NAZYSM

Improving the Efficiency of the Grain Harvesters Straw Grinder Due to Additional Effects on the Processed Mass

Oleg V. Gordeenko¹, Stepan I. Kozlov¹, Vasily M. Kuzyur², Sergey I. Budko²¹ Belarusian Agricultural Academy, Gorki, Republic of Belarus;² Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Applying organic fertilizers is an important condition for ensuring stable yields. The preparation and use of traditional types of organic fertilizers requires significant costs. Crushing and embedding of plant residues in the soil is a promising agrotechnical technique, therefore, it is necessary to modernize the straw grinder of a combine harvester for optimal mechanical action.

AIM: assessment of the energy consumption of the flattening process in conjunction with straw crushing.

METHODS: The object of the experimental study is the straw of grain crops and the process of various types of mechanical impact. The research was carried out on a developed laboratory installation that allows changing the number of cycles and the values of forces on the material under study in order to determine the maximum compaction at a certain straw flattening force and the energy intensity of this process.

RESULTS: It was found that with an increase in the number of subsequent loads, the degree of compression of the straw increases, but for use in a combine harvester, a single load is sufficient for the degree of flattening of the straw to reach 70%. It is worth noting that flattening dry straw does not require a very large effort, which means that the energy consumption for the flattening mechanism will be small — about 5 joules.

CONCLUSION: Accounting for energy consumption for flattening straw can be used in the design of special devices and devices.

Keywords: straw; flattening; energy consumption; straw grinder; compression.

To cite this article:

Gordeenko OV, Kozlov SI, Kuzyur VM, Budko SI. Improving the Efficiency of the Grain Harvesters Straw Grinder Due to Additional Effects on the Processed Mass. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(3):319–325. DOI: 10.17816/0321-4443-636110 EDN: NAZYSM

Submitted: 16.09.2024

Accepted: 07.07.2025

Published online: 07.07.2025

ВВЕДЕНИЕ

Снизить используемое количество удобрений поможет применение такого материала, как солома, она позволяет уменьшить затраты на покупку и использование минеральных удобрений, а также улучшить гумусовый состав почвы [1, 2, 3].

Составной частью многих технологических процессов, выполняемых сельскохозяйственными машинами, является деформация сжатия [4]. Сжатие стеблей, веток, побегов и других материалов может быть в поперечном и продольном направлениях. Сжатие в продольном направлении может привести к потере устойчивости (продольному изгибу), и большинство растительных материалов вследствие своей небольшой жёсткости его не выдерживает.

Сжатие в поперечном направлении при отсутствии ограничений и их наличии исследовано на стеблях льна, пшеницы, ржи и кенафа, а при действии сил по взаимно перпендикулярным направлениям — на моделях (его сравнивали со сжатием при отсутствии ограничений). Сжатие стебля силами, действующими по всему периметру, не исследовано вообще. У одних растительных материалов (сено, солома) поперечное сжатие не приводит к отрицательным результатам, а у других (стебли льна, семена, плоды, ягоды) может привести к нежелательным (меньший выход длинного льноволокна, порча семян, плодов, ягод и т.д.). Следует отметить, что под термином «сжатие» стебля подразумевается сжатие его трубки (то есть её плющение), во время которого происходит изгиб материала стебля в продольном и поперечном направлениях [5, 6].

МЕТОДЫ

Поперечное сжатие может быть, как на небольших, так и на больших, в сравнении с длиной стебля, участках. В процессе переработки растений возможны также случаи сжатия ранее нарезанных частей стеблей. Ниже рассмотрены закономерности сжатия отдельных участков стеблей, причем сначала проанализировано сжатие при отсутствии ограничений по обеим сторонам от линии действия сил. Для исследования поперечного сжатия разработаны специальные приборы. С этой целью можно использовать также экстензометр со специальным приспособлением [7].

При дальнейшем увеличении нагрузки деформация растёт ещё быстрее, при этом начинается расплющивание стебля.

При поперечном сжатии стебля с ограничениями по обеим сторонам от линии действия сил сопротивление сжатию возрастает. Характер деформации растения при таком нагружении зависит от сорта и состояния культуры. Влияют на этот процесс и такие факторы, как давление, площадь деформатора, толщина стенки трубки и др.

Процесс деформации свежесжатых стеблей состоит из ряда фаз. Сначала под действием силы сжатия

окружность стебля принимает форму, близкую к прямоугольной, затем происходят деформация боковых стенок трубки вследствие потери ими устойчивости и сплющивание стебля [8].

Процесс деформации сухих стеблей также состоит из ряда фаз. Сначала на стеблях появляются трещины, разрывы и изгибы, а затем происходит полное сплющивание стеблей с образованием значительного числа трещин и разрывов.

Исследованием процесса сжатия сухих стеблей при наличии ограничений сбоку установлена закономерность изменения линейной деформации в зависимости от давления, которая в значительной степени аналогична закономерности, для свежесжатых стеблей, но имеются и некоторые отличия, обусловленные хрупкостью сухих стеблей [9, 10].

При сжатии стебля происходит смыкание внутренних стенок трубок и деформации их мягких частей, а также древесины стебля, что приводит к увеличению сопротивления сжатию.

Исследования проводили на собранной установке (рис. 1), для эксперимента использовалась солома ячменя.

Опыт предусматривал изучение уплотнения соломы при воздействии определённых усилий.

Повторное сжатие стеблей может иметь место при одном и том же ходе поршня или при разных его ходах, одной и той же силе, или разных силах. Кроме этого, сжиматься повторно могут одни и те же стебли, или эти же стебли, но с добавлением к ним новой порции стеблей перед каждым повторным сжатием.

Наиболее простой случай — сжатие одной группы стеблей одной и той же силой без добавления новой порции.

Экспериментальное исследование сжатия стеблей в плоскости проводили следующим образом.

В лабораторную установку для сжатия стеблей (рис. 2, а) закладывали сухие стебли ячменя (рис. 2, б, 2, с). Затем они подвергаются воздействию постоянной

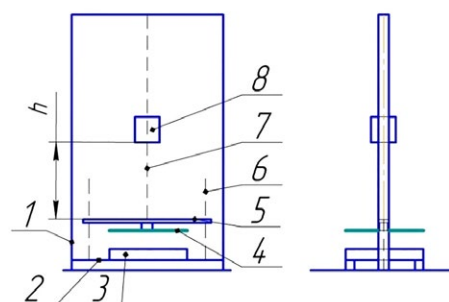


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — корпус установки; 2 — опора установки; 3 — ёмкость для укладки соломы; 4 — прижимная плита; 5 — направляющая; 6 — штырь направления; 7 — стержень для груза; 8 — груз.

Fig. 1. Layout of the laboratory installation: 1, installation body; 2, installation support; 3, straw packing container; 4, pressure plate; 5, guide rail; 6, direction pin; 7, rod for load; 8, load.

силы (рис. 2, *d*), при этом замеряется значение уплотнения (рис. 2, *e*) после каждого воздействия груза на солому.

Для определения силы воздействия массы груза на солому воспользуемся следующими формулами:

Сила воздействия груза:

$$F_1 = m \cdot a_1, \text{ Н}, \quad (1)$$

Ускорение груза за промежуток времени:

$$a_1 = (V_1 - V_0) \cdot t_1, \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

Скорость движения груза:

$$V_1 = \sqrt{2g \cdot h}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

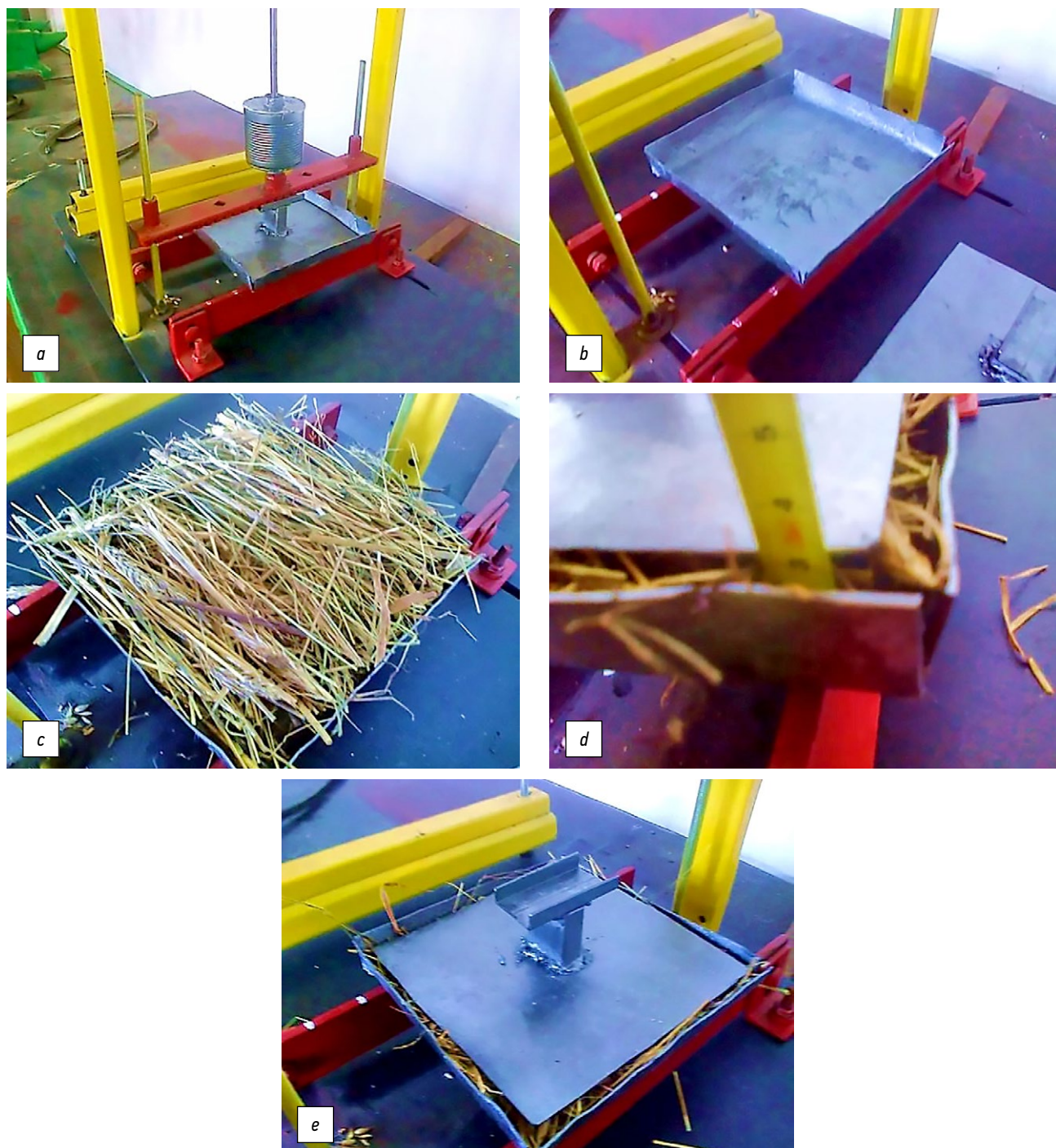


Рис. 2. Исследование плющения соломы: *a* — лабораторная установка; *b* — ёмкость для закладки соломы; *c* — закладка стеблей; *d* — воздействие начальной силы; *e* — измерение уплотнения.

Fig. 2. Study of straw flattening: *a*, laboratory installation; *b*, container for laying straw; *c*, laying the stems; *d*, the effect of the initial force; *e*, measurement of the compression.

Время удара:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}, \text{ с}, \quad (4)$$

где h — расстояние от груза до пластины плющения;
 m — масса груза (0,7 кг).

Для определения энергозатрат (E) воспользуемся формулой:

$$E_i = m \cdot g \cdot h_i, \text{ Дж}. \quad (5)$$

Данные, полученные по стеблям ячменя, представлены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В опытах каждая последующая нагрузка прилагается после прекращения сжатия (причём, последующая нагрузка равна предыдущей).

После проведенных опытов были построены графики первого и последнего опытов, в котором была отображена самая большая и самая маленькая сила воздействия на солому (рис. 3) изменения толщины слоя соломы от количества повторов сжатия и воздействия определенной силы.

Из графика установлено, что сжатие стеблей будет увеличиваться с ростом циклов нагрузок. В итоге сжатие группы стеблей стремится к некоторому пределу уплотнения, при котором стебли приобретают упруго-уплотненное состояние.

Опыты, проведенные при различных значениях силы с сухими стеблями ячменя, показали, что уже через 7...11 циклов наступает предел уплотнения.

Оценивая степень сжатия соломы (рис. 4), было установлено, что для уплотнения 71% сухой соломы достаточно единожды приложить нагрузку.

Следует отметить, что после смыкания внутренних стенок стеблей и изменения формы их мягких частей, начинает изменяться свойства стебля, что характеризуется большим сопротивлением сжатию.

Таблица 1. Сжатие стеблей при повторных нагрузках

Table 1. Compression of stems under repeated loads

Варианты опытов	Количество сбросов груза по порядку	1	2	3	4	5	6	$F_{пл}, \text{ Н}$	$E, \text{ Дж}$
1	Высота сброса груза, м					0,7			
	Толщина слоя соломы, мм	70	20	15	14	12	10	7,21	4,81
2	Высота сброса груза, м					0,6			
	Толщина слоя соломы, мм	70	24	18	16	14	13	6,86	4,12
3	Высота сброса груза, м					0,5			
	Толщина слоя соломы, мм	70	29	22	20	18	16	6,81	3,43
4	Высота сброса груза, м					0,4			
	Толщина слоя соломы, мм	70	33	25	23	20	17	6,76	2,75
5	Высота сброса груза, м					0,3			
	Толщина слоя соломы, мм	70	37	28	26	23	21	6,68	2,06

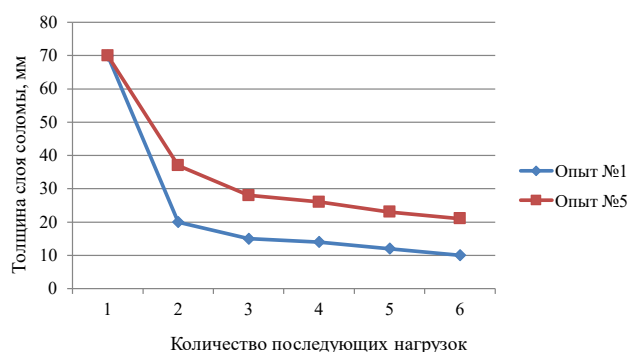


Рис. 3. Изменение толщины слоя соломы от количества повторяющихся нагрузок.

Fig. 3. The change in the thickness of the straw layer from the number of repetitive loads.

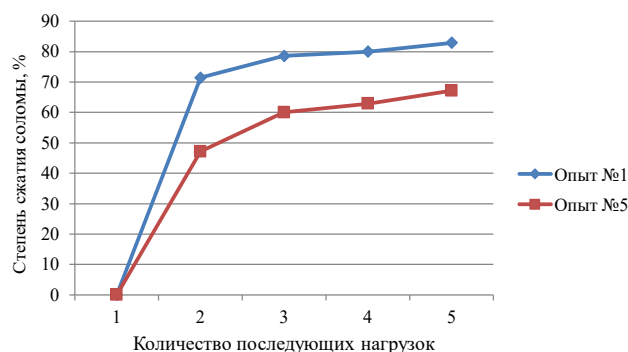


Рис. 4. Степень сжатия соломы.

Fig. 4. The degree of compression of the straw.

ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе полученных графиков установлена закономерность сжатия соломы, представленная в виде двух графиков. Один график (см. рис. 3) построен в координатах «количество нагрузок — толщина слоя соломы», т. е. по оси абсцисс отложено количество последующих нагрузок с одной и той же силой, а по оси ординат — сжатие материалов в миллиметрах.

Другой график (см. рис. 4) построен в координатах «количество нагрузок — степень сжатия», т. е. по оси абсцисс отложены количество последующих нагрузок с одной и той же силой, а по оси ординат — степень сжатия в процентах.

Можно заметить, что с увеличением количества последующих нагрузок степень сжатия соломы увеличивается, но для применения в зерноуборочном комбайне достаточно единичной нагрузки, чтобы степень сжатия соломы достигла 70%. Стоит заметить, что для сжатия сухой соломы нужно сравнительно небольшое усилие, а значит и энергозатраты на механизм для плющения будут небольшие — около 5 Дж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённых исследований можно судить о том, что усилие, необходимое на плющение, незначительно. При этом, с увеличением силы воздействия на солому, увеличивается её степень плющения.

Использование плющения соломы позволяет ускорить её разложение, а уровень плющения в 70% соломы достигается однократным воздействием силы, энергия которой равна 4,81 Дж. Это позволяет повысить эффективность уборки, при этом незначительно увеличивая энергозатраты на плющение соломы.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.В. Гордеенко — научное руководство, формулирование основной концепции исследования, общее руководство экспериментальными исследованиями, проведение критического анализа результатов и формулирование выводов; С.И. Козлов — анализ литературных данных, проведение экспериментов и обработка их результатов; В.М. Кузюр — анализ литературных данных, проведение экспериментов и обработка их результатов; С.И. Будко — анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста, проведение экспериментов и обработка их результатов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: O.V. Gordeenko: scientific guidance, formulation of the basic concept of research, general management of experimental research, critical analysis of results and formulation of conclusions; S.I. Kozlov: analysis of literary data, conducting experiments and processing their results; V.M. Kuzyur: analysis of literary data, conducting experiments and processing their results; S.I. Budko: analysis of literary data, preparation of the initial version of the text and revision of the text, conducting experiments and processing their results. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Lapa VV, Mikhailovskaya NA. Activity of mineralization and humification processes in highly cultivated sod-podzolic light loamy soil depending on

the application of fertilizers. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2016;60(3):122–128. (In Russ.) EDN: WHHMD

2. Naimi OI. Features of using straw as an organic fertilizer. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2019;(9-1):10–13. doi: 10.24411/2500-1000-2019-11552 (In Russ.)
3. Bogdanchikov IYu, Borychev SN, Drozhzhin KN, Mitrofanov SV. Results of field experience in using straw as fertilizer. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2023;15(3):85–91. (In Russ.) EDN: ATEJOL
4. Bukhalenkov MA, Kokoshin SN. Mechanical properties of agricultural plants and their influence on the harvesting process. In: *Current issues of science and economics: new challenges and solutions. Collection of materials of the LIII International Student Scientific and Practical Conference*. 2019:236–242. (In Russ.) EDN: BRMEJA
5. Skorlyakov VI. Evaluation of the power of a combine harvester for the mode of operation with crushing and spreading straw. In: *Scientific and information support for the innovative development of agriculture. Materials of the X International scientific and practical Internet Conference*. 2018:253–257. (In Russ.) EDN: UCUTWP
6. Brusentsov AS, Tumanova MI. Straw shredder for a combine harvester. *AgroForum*. 2019;(5):16–17. (In Russ.) EDN: LIQBIF
7. Bumar IV, Prisyazhnaya IM, Sakharov VA, et al. Calculation of parameters and operating modes of the soybean straw shredder. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2022;16(2):132–141. doi: 10.22450/19996837_2022_2_132 (In Russ.)
8. Rodimtsev SA, Yagelsky MYu. Assessment of the degree of splitting of straw stalks as a quality criterion for grinding the non-grain part of the crop with a combine chopper. *Agrotechnics and energy supply*. 2018;(3(20)):54–60. (In Russ.) EDN: YLQPMT
9. Kuvshinov AA, Sakharov VA, Lipkan AV. On the methodology of soybean straw crushing research. In: *Agro-industrial complex: problems and prospects of development. materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Blagoveshchensk. 2023:114–120. doi: 10.22450/9785964205401_2_114 (In Russ.)
10. Sadretdinov DR. The relationship between the length of straw crushing and the structural design of the shredder spreader. *Tractors and agricultural machinery*. 2016;84(5):42–45. (In Russ.) EDN: VXBZIV

ОБ АВТОРАХ

* Будко Сергей Иванович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Технический сервис»;
адрес: Россия, 243365, Брянская обл., Выгоничский р-он,
Кокино, ул. Советская, д. 2;
ORCID: 0000-0002-1291-4235;
eLibrary SPIN: 7502-3169;
e-mail: s.budko.32@bk.ru

Гордеенко Олег Васильевич,

канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины»;
ORCID: 0009-0006-6229-9396;
eLibrary SPIN: 4845-7178;
e-mail: sxm@baa.by

Козлов Степан Иванович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Механизация животноводства
и электрификация сельскохозяйственного производства»;
ORCID: 0000-0003-0128-3455;
eLibrary SPIN: 4731-8381;
e-mail: Stepan-61@mail.ru

Кузюр Василий Михайлович,

канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Технический сервис»;
ORCID: 0009-0002-0232-6680;
eLibrary SPIN: 4505-9405;
e-mail: kvming@mail.com

AUTHORS' INFO

* Sergei I. Budko,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Technical Service Department;
address: 2a Sovetskaya st, Kokino, Vygonichsky district,
Bryansk region, Russia, 243365;
ORCID: 0000-0002-1291-4235;
eLibrary SPIN: 7502-3169;
e-mail: s.budko.32@bk.ru

Oleg V. Gordeenko,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Head of the Agricultural Machinery Department;
ORCID: 0009-0006-6229-9396;
eLibrary SPIN: 4845-7178;
e-mail: sxm@baa.by

Stepan I. Kozlov,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Animal Husbandry Mechanization
and Electrification of Agricultural Production Department;
ORCID: 0000-0003-0128-3455;
eLibrary SPIN: 4731-8381;
e-mail: Stepan-61@mail.ru

Vasilii M. Kuzyur,

Cand. Sci. (Engineering), assistant professor,
Assistant professor of the Technical Service Department;
ORCID: 0009-0002-0232-6680;
eLibrary SPIN: 4505-9405;
e-mail: kvming@mail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author