

АГРОИНЖЕНЕРИЯ / AGRICULTURAL ENGINEERING

УДК 631.353.6

doi: 10.15507/2658-4123.033.202304.524-541

Оригинальная статья



Параметры и режимы работы срезающе-измельчающего аппарата

Е. В. Труфляк , А. Н. Потebня*Кубанский государственный аграрный университет
(г. Краснодар, Российская Федерация)* *trufljak@mail.ru*

Аннотация

Введение. Для повышения эффективности уборки сельскохозяйственных культур необходимо совершенствовать существующие рабочие органы косилок и жаток комбайнов, которые будут обеспечивать их универсальность и многофункциональность. Повышение энерговооруженности отрасли в существующих экономических и политических условиях может быть достигнуто применением принципов ресурсосбережения и использованием альтернативных конструкций косилок и жаток комбайнов. Существующие режущие аппараты этих сельскохозяйственных машин не обеспечивают одновременное срезание, сбор и измельчение стеблей кукурузы, подсолнечника, камыша, а также веток с целью дальнейшей заделки в почву или сбора массы для использования в животноводстве. Поэтому обоснование конструктивно-технологической схемы, определение параметров и режимов работы универсального срезающе-измельчающего аппарата является актуальным.

Цель статьи. Повышение эффективности среза и измельчения растений путем обоснования структурно-функциональной схемы агрегата, рациональных параметров и режимов работы режущего аппарата.

Материалы и методы. С позиции теории вероятностного подхода обоснована физическая суть показателя кинематического режима. Исследования проводились в лаборатории кафедры эксплуатации и технического сервиса и учебном парке Кубанского государственного аграрного университета.

Результаты исследования. Обоснована структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа. Для принятых условий работы аппарата, с позиций вероятностного подхода к взаимодействию ножей со стеблестоем, обоснована физическая суть показателя кинематического режима, характеризующего интенсивность взаимодействия определенного количества ножей с растениями на корню и распределенным по площади с различной плотностью стеблестоем.

Обсуждение и заключение. Полученные данные необходимы для проектирования и конструирования универсальных машин нового типа, обеспечивающих не только срез, но и сбор резанных стеблей, измельчение, возможный сбор измельченной массы или разбрасывание по полю. В зависимости от частоты вращения шнекового рабочего органа и показателя кинематического режима мощность изменяется от 4,99 кВт до 11,02 кВт, производительность – от 0,5 кг/с до 1,22 кг/с, а энергоемкость – от 11,02 до 4,99 кВт·с/кг.

© Труфляк Е. В., Потebня А. Н., 2023

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

Ключевые слова: режущий аппарат, шнек, срез, измельчение, сегменты, косилка, жатка

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Труфляк Е. В., Потебня А. Н. Параметры и режимы работы срезающе-измельчающего аппарата // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 524–541. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.524-541>

Original article

Parameters and Operation Modes of the Cutting and Chopping Apparatus

E. V. Truflyak , A. N. Potebnya

Kuban State Agrarian University

(Krasnodar, Russian Federation)

 trufliak@mail.ru

Abstract

Introduction. To improve the efficiency of harvesting crops, it is necessary to improve the existing tools of mowers and headers of combine harvesters that will ensure their versatility and multifunctionality. The increased power availability per the industry in the current economic and political conditions can be achieved by applying the principles of resource conservation and using alternative designs of reaper and headers. The existing cutting units of these agricultural machines do not provide simultaneous cutting, harvesting and chopping of corn stalks, sunflower stalks, reed stems and branches for the purpose of further incorporation into the soil or collection of plant mass to use in livestock. Therefore, substantiating the design and technological scheme and determining the parameters and modes for the universal cutting and chopping apparatus is relevant.

Aim of the Article. The aim of the work is to increase the efficiency of cutting and chopping plants by substantiating the structural and functional scheme of the unit and the ration parameters and operating modes of the cutting unit.

Materials and Methods. The physics of the kinematic mode indicator is substantiated in terms of the probability-based approach. The research was carried out in the laboratory of the Department of Operation and Technical Service and in the training park of Kuban State Agrarian University.

Results. There is substantiated the structural and functional scheme of the chopper unit with a cutterbar of cutting and chopping type. The physics of the kinematic mode index characterizing the intensity of interaction of a certain number of knives with plants on the root and stems distributed over the area with different density, is substantiated for the accepted conditions of the unit operation, in terms of probabilistic approach to the interaction of knives with stems in the form of plants on the root.

Discussion and Conclusion. The obtained data are necessary for designing universal machines of a new type, providing not only cutting, but also collecting of cut stems, chopping and possible collecting of the chopped crop or spreading chopped crop on the field. Depending on the rotational speed of the auger tool, an indicator of the kinematic mode, the power varies from 4.99 kW to 11.02 kW, productivity from 0.5 kg/s to 1.22 kg/s, and energy consumption from 11.02 to 4.99 kW-s/kg.

Keywords: cutting unit, auger, cutting, chopping, segments, mower, header

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

For citation: Truflyak E.V., Potebnya A.N. Parameters and Operation Modes of the Cutting and Chopping Apparatus. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):524–541. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.524-541>

Введение

Парк машин для сельского хозяйства имеет высокий износ при малой оснащённости. Производство кормо- и зерноуборочных комбайнов сократилось на 14 и 32 % соответственно в 2022 г. Более 70 % работающей сельскохозяйственной техники имеют эксплуатационный срок более 10 лет. Имеет место низкая энергетическая вооружённость отрасли. На 1 тыс. га в России приходится 2 комбайна, в Казахстане – 3 комбайна, в Беларуси – 5, в Канаде – 7, в Германии – 12, в США – 18. При этом необходимо ежегодно обновлять парк машин на 15 тыс. комбайнов. Подобное несоответствие ведёт к низкой производительности труда, повышению агросроков и увеличению потерь при уборке урожая до 10–20 % от валового сбора.

Для увеличения эффективности уборки сельскохозяйственных культур необходимо совершенствовать существующие рабочие части косилок и жаток комбайнов, которые будут обеспечивать их универсальность и многофункциональность.

Повышение энерговооружённости отрасли в существующих экономических и политических условиях может быть достигнуто применением принципов ресурсосбережения и использования альтернативных конструкций косилок и жаток комбайнов.

Существующие режущие аппараты данных сельскохозяйственных машин не обеспечивают одновременное срезание, сбор и измельчение стеблей кукурузы, подсолнечника, камыша и веток с целью дальнейшей заделки в почву, разбрасывания по ее поверхности или сбора для животноводства.

Поэтому обоснование конструктивно-технологической схемы, определение параметров и режимов работы универсального срезающе-измельчающего аппарата является актуальной задачей.

Вопросы теоретического обоснования срезания, сбора и измельчения одним аппаратом различных культур до конца не решены. Необходимо обосновать структурно-функциональную схему агрегата для срезания и измельчения растений, провести исследования по обоснованию физической сути показателя кинематического режима.

Проблема состоит в отсутствии конструктивно-технологической схемы, параметров и режимов работы срезающе-измельчающего режущего аппарата, обеспечивающего одновременный срез, сбор и измельчение стеблей.

Цель исследования – повышение эффективности среза и измельчения растений путем обоснования структурно-функциональной схемы агрегата, рациональных параметров и режимов работы режущего аппарата.

Обзор литературы

Современные устройства содержат различные элементы для среза и измельчения стеблей: ножи, цепные элементы, молотки. При этом они обеспечивают срез узкого диапазона культур (толстостебельных или тонкостебельных) с ограниченной универсальностью использования. Отсутствуют режущие аппараты, совмещающие вращательное движение шнека среза.

Выполнен обзор имеющихся конструкций косилок, кормо- и зерноуборочных комбайнов, мульчировщиков, измельчителей¹, некоторые из которых представлены на рисунке 1.

¹ АгроБаза [Электронный ресурс]. URL: https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_1fb07c04-79b4-441b93a1-ffc217988fac (дата обращения: 01.08.2023).



Р и с. 1. Косилки-измельчители, плющилки и мульчировщики слева направо верхний ряд: КДП-310; КРС-1,4; роторная КИР-1,85М; КИН-Ф-1500; слева направо нижний ряд: с цеповым аппаратом MU-LW; молотковая; SEPPi SMO pick-up; MasterCut

F i g. 1. Reaper-chopper, conditioners and mulchers from left to right in the top row: KDP-310; KRS-1,4; rotor KIR-1,85M; KIN-F-1500; from left to right in the bottom row: chain machine MU-LW; hammer; SEPPi SMO pick-up; MasterCutt

Также проведен обзор современных измельчителей стеблей, некоторые из которых представлены на рисунке 2.



Р и с. 2. Измельчители стеблей и растительных остатков слева направо: ИМС-2,4; ИРО-3,0; ИС-3; EFX
F i g. 2. Stem and plant residue chopper from left to right: IMS-2.4; IRO-3.0; IS-3; EFX

В результате обзора был проведен анализ 50 протоколов испытаний косилок и косилок-плющилок по данным Государственного испытательного центра² на 10 машиноиспытательных станциях за 2015–2022 гг.³ (табл. 1).

Цель анализа – выявление существующих промышленных образцов режущих аппаратов с дополнительной возможностью измельчения стеблей, прошедших государственные испытания с заданными агротехническими требованиями.

Анализ протоколов испытаний показал:

– существующие машины преимущественно предназначены для выполнения одной или двух технологических операций одним рабочим органом (срез, плющение, измельчение);

² Государственный испытательный центр [Электронный ресурс]. URL: <http://sistemamis.ru> (дата обращения: 01.09.2023).

³ Алтайская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://altmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Владимирская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://vladmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Кировская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://kirovvmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Кубанская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kubvmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023); Поволжская государственная зональная машиноиспытательная станция [Электронный ресурс]. URL: <http://www.povvmis.ru> (дата обращения: 01.09.2023).

– срез с плющением обеспечивают дисковая косилка Krone Easy Cut 2800/1CV, косилка-плющилка TAARUP 433 2LT и Мещера Е-403; жатки Е-025, SH-309Т, Е-033; косилки-плющилки FC-303GC, КП-500; косилка роторная КРП-350-01;
 – срез с измельчением – жатки ЖГР-4,5-1Е, КВК-6025.12-07; комбайн Ягуар 870; косилка-измельчитель КИР-1,5Н;
 – отсутствуют универсальные режущие устройства, обеспечивающие одним аппаратом не только срез, но и сбор и измельчение срезанной массы.

Таблица 1
Table 1

Результаты анализа испытаний промышленных образцов
Results of the analysis of test reports

МИС / Machine testing stations	Название, марка, производитель / Name, brand, manufacturer	Культуры / Cultures	Плющение / Squashing	Измельчение, мм / Shredding, mm	Высота среза, см / Cutting height, cm	Ширина захвата, м / Working width, m	Рабочая скорость, км/ч / Working speed, km/h	Производительность, га/ч / Productivity, ha/h
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алтайская / Altayskaya	Дисковая косилка Krone Easy Cut 2800/1CV, ООО «РУФ-2», г. Барнаул / disk mower Krone Easy Cut 2800/1CV, Ltd. "RUF-2", Barnaul	Сеяные и естественные травы / seeded and natural grasses	да	нет	–	2	12	2,78
Владимирская / Vladimirskaya	Косилка-плющилка TAARUP 4332 LT, «Kverneland Group», Дания / mower conditioner TAARUP 4332 LT, "Kverneland Group", Denmark		да	нет	6	3–3,5	12	3,8
Кубанская / Kubanskaya	Жатка для грубостебельных культур ЖГР-4,5-1Е, ОАО «Гомсельмаш», республика Беларусь, г. Гомель / reaper for coarse-stemmed crops ЖГР-4,5-1Е, "Gomselmash", Republic of Belarus, Gomel	Сеяные и естественные травы / seeded and natural grasses	нет	20–30	–	4,2	7,8	2,4–3
Подольская / Podolskaya	Самоходная косилка-плющилка Мещера Е-403, ОАО «Егорьевский механический завод», Московская обл., г. Егорьевск / self-propelled mower-conditioner "Meshchera E-403", "Egorievsky Mechanical Plant", Moscow region, Egorievsk		да	нет	5,7	4,2	7,7	3,2

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Северо-Западная / Northwestern	Косилка-измельчитель роторная КИР-1,5М, АО «Корммаш», п. Орловский Ростовской области / rotary mower-shredder КИР-1,5М, "Kormmash", Orlovsky, Rostov region	Сеяные и естественные травы, кукуруза, подсолнечник / seeded and natural grasses, corn, sunflower	нет	22–61	9	1,47	7,3	13,4 т/ч

Проведен анализ теоретическо-экспериментальных исследований ряда авторов в данной области.

Режущий аппарат, содержащий шнек, изучен в работе Т. П. Погорова [1]. Представлено теоретическое обоснование устройства, а Н. В. Алдошин предложил режущий аппарат, снабженный сегментами без лезвий, и модернизированный сегментно-пальцевый аппарат [2; 3].

В статье В. В. Красовского обоснованы параметры и режимы работы аппарата для среза растений, которые произрастают в садах и виноградниках [4].

В. А. Гулевский и А. А. Вертий в работах [5; 6] усовершенствовали технологию для измельчения стеблей в кормопроизводстве. Предложили измельчитель, содержащий шарнирные подвешенные комбинированные ножи, выполнили математическое моделирование измельчителя.

В публикациях ученые анализируют разные типы аппаратов: например, конструкции измельчителей концентрированных кормов [7], шнековый режущий аппарат подпорного и бесподпорного среза тонко- и толстостебельных культур [8; 9; 10], дисковый ротационный режущий аппарат, установленный на кукурузоуборочном комбайне [11] и др.

В зарубежной работе [12] предложены косилки-измельчители с вертикальными и горизонтальными шнеками для резания кустарников и веток.

В исследовании таких авторов как Х. Ган, С. Матанкер, А. Момин, Б. Кунс, Н. Стоффел, А. Хансен, Т. Грифт [13] сравнивалось резание тремя сегментами (прямое лезвие 0° , лезвие под углом 30° и зубчатое). При использовании угловых или зубчатых лезвий оператор может поддерживать высокую скорость машины, что приводит к значительному увеличению производительности.

Встречаются зарубежные исследования измельчения и перемешивания стеблей для кормов в животноводстве. В работе китайских ученых [14] рассмотрен анализ процесса замешивания и нарезки стебля солодки в горизонтальном смесителе шнекового типа смешанного рациона.

Фундаментальные исследования работы шнековых питателей отражены в работе Ю. Юнцинь⁴, однако, данные устройства не позволяют работать на уборочных машинах.

Исследования работы срезающе-измельчающего режущего аппарата шнекового типа в зарубежных работах нами не обнаружены.

Несмотря на существующие исследования вопросы теоретического обоснования срезания, сбора и измельчения одним аппаратом различных культур до конца

⁴ Yu Y. Theoretical Modelling and Experimental Investigation of the Performance of Screw Feeders. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of doctor of philosophy. 1997. 254 p. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2601&context=theses> (дата обращения: 01.09.2023).

не решены. Отсутствует комплексный подход к структурно-функциональной схеме машины. Необходимо обосновать структурно-функциональную схему агрегата для срезания и измельчения растений, провести исследования по обоснованию физической сути показателя кинематического режима.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи в лаборатории кафедры эксплуатации и технического сервиса Кубанского государственного аграрного университета было проведено изучение подпорного и бесподпорного среза стеблей подсолнечника, кукурузы, камыша, веток на экспериментальной установке (рис. 3), которая позволяла изменять частоту вращения и высоту расположения шнека, скорость подачи, шаг и междуудье стеблей.



Р и с. 3. Варианты лабораторной установки для изучения резания и измельчения стеблей: бесподпорного (а) и подпорного (б) среза

F i g. 3. Variants of a laboratory setup for studying stem cutting and chopping: unsupported (a) and supported (b) cutting

Лабораторные исследования выполнялись в варианте бесподпорного среза (рис. 3а), подпорного среза с противорежущей пластиной (рис. 3б), в трех вариантах подпорного среза с противорежущими сегментами (рис. 4).



Р и с. 4. Варианты лабораторной установки подпорного среза слева направо:
а – спаренные сегменты, расположенные смежно с углом 90° ;
б – угол наклона противорезов в горизонтальной плоскости 30° ;
с – расстояние между режущим и противорежущими элементами 5 мм

F i g. 4. Variants of the laboratory setup of the retaining shear from left to right:
а – paired segments arranged adjacent to 90° angle;
б – angle of contrails in the horizontal plane 30° ;
с – distance between cutting and contrails 5 mm

В результате анализа существующей информации, проведения лабораторных исследований, отсева несущественных факторов были выбраны значения для планирования эксперимента, которые представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Значения параметров и уровни изменения значений
Values of parameters and levels of variation of values

Изменение значений / Change of values	Значения параметров / Parameter values		
	Частота вращения шнекового рабочего органа, $n_{\text{шн.}}(x_1)$, мин^{-1} / rotation frequency of auger working body, $n_{\text{шн.}}(x_1)$, min^{-1}	Угол наклона режущей части сегментного ножа, $\alpha_c(x_2)$, град / angle of inclination of the cutting part of the segment knife, $\alpha_c(x_2)$, deg	Шаг установки сегментов по винтовой кромке, $l_c(x_3)$, мм / pitch of screw edge segments, $l_c(x_3)$, mm
+1	1170	80	300
0	850	60	180
-1	530	40	60

В полевых условиях было проведено планирование эксперимента при уборке подсолнечника (рис. 4).



Р и с. 5. Полевая экспериментальная установка

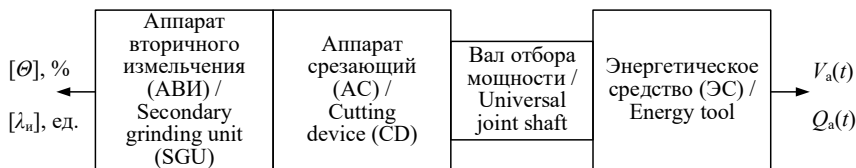
F i g. 5. Field experimental device

В лабораторных исследованиях предусматривалось изучение среза и измельчения тонко- и толстостебельных культур на стационарной установке с определением качественных показателей среза и измельчения, а также параметров и режимов работы срезающе-измельчающего аппарата.

Для полевых исследований был выбран многофакторный эксперимент для обоснования рациональных параметров и режимов предложенного устройства.

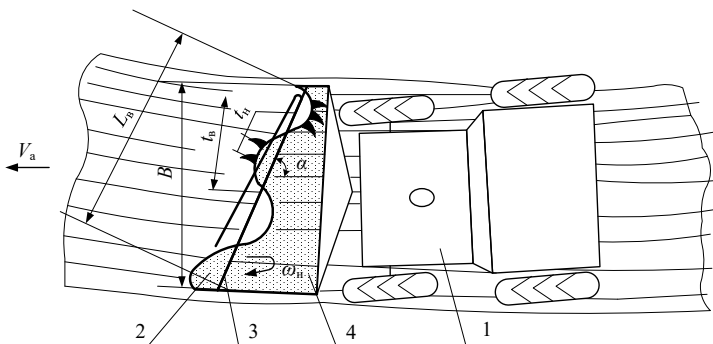
Результаты исследования

На рисунке 6 представлена структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа, включающая энергетическое средство, срезающий аппарат и устройство вторичного измельчения.



Р и с. 6. Структурно-функциональная схема агрегата
F i g. 6. Structural and functional diagram of the unit

Схема агрегата представлена на рисунке 7.



Р и с. 7. Схема агрегата: 1 – энергетическое средство; 2 – винт измельчителя; 3 – вал винта; 4 – стеблестой; L_0 – длина вала винта; t_e – шаг винтов; t_n – шаг ножей; B – ширина захвата; α – угол атаки; ω_n – угловая скорость ножей
F i g. 7. Scheme of the unit: 1 – power tool; 2 – chopper screw; 3 – screw shaft; 4 – stalk; L_0 – screw shaft length; t_e – screw pitch; t_n – knife pitch; B – width of grasp; α – angle of attack; ω_n – angular velocity of knives

При рассмотрении взаимодействия стеблей, размещенных в рядках (кукуруза, подсолнечник) или условных рядках (камыш), и ножей, размещенных по винтовой линии шнека с определенным шагом (в проекции на поверхность поля), возникает необходимость оценки интенсивности такого взаимодействия.

Для описания данного процесса примем, что количество стеблей во всех рядках по ширине захвата агрегата B равно – M_1 , а количество ножей по длине винтовой линии равно M_2 на площади $B \times L_0$, где L_0 – расстояние, которое проезжает агрегат за время – t_i .

Определим количество стеблей Z_q через какой-то промежуток времени работы агрегата – T , а число ножей, обеспечивающих срез, обозначим Z_2 . Оценим возможность взаимодействий стеблей и ножей за малый промежуток времени Δt . Количественное изменение числа стеблей ΔZ_1 определяется их срезом (случайная величина).

За промежуток времени, равный Δt , каждый из ножей Z_2 обеспечивает $X_2 \cdot \Delta t$ фактических срезов, где $X_2 = \xi \cdot \rho_2$ – средняя интенсивность появления ножей в области нахождения стеблей в единицу времени, а ρ_2 – вероятность среза конкретным ножом конкретного стебля из всего их множества в рядке на элементарной площади ΔS , ξ – число ножей за t .

В этой связи имеем равенство:

$$\Delta Z_1 = -X_2 \cdot Z_2 \cdot \Delta t, \quad (1)$$

а его дифференциальное уравнение может быть представлено как:

$$\frac{dZ_1}{dt} = -X_2 \cdot Z_2. \quad (2)$$

По аналогии имеем также, что

$$\frac{dZ_2}{dt} = -X_1 \cdot Z_1. \quad (3)$$

Это система дифференциальных уравнений при начальных условиях $Z_1(0) = M_1$ и $Z_2(0) = M_2$.

Дифференцирование и соответствующая замена дает следующее уравнение:

$$\frac{d^2 Z_1}{dt^2} = X_1 \cdot X_2 \cdot Z_1. \quad (4)$$

Общим решением данного уравнения является:

$$Z_1 = C_1 \exp \sqrt{X_1 \cdot X_2} \cdot T + C_2 \exp \left(-\sqrt{X_1 \cdot X_2} \cdot T \right). \quad (5)$$

При использовании гиперболических функций имеем:

$$Z_1 = C_3 \operatorname{ch} \left[(X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T \right] + C_4 \operatorname{sh} \left[(X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T \right]. \quad (6)$$

На основании дифференцирования получаем, что

$$Z_2 = -C_3 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0.5} \cdot \operatorname{sh} (X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T - C_4 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0.5} \cdot \operatorname{ch} (X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T. \quad (7)$$

При принятых выше начальных условиях определим значения постоянных:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= M_1; \\ C_4 &= -\left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0.5} \cdot M_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

На основании этого можно записать, что

$$Z_1 = M_1 \cdot \operatorname{ch} (X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T - M_2 \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0.5} \cdot \operatorname{sh} (X_1 \cdot X_2)^{0.5} \cdot T. \quad (9)$$

$$Z_2 = -M_1 \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^{0,5} \cdot sh(X_1 \cdot X_2)^{0,5} \cdot T + M_2 \cdot ch(X_1 \cdot X_2) \cdot T. \quad (10)$$

Для упрощения данных зависимостей перейдем от абсолютных значений к относительным через доли:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{Z_1}{M_1}; \\ \Psi_2 &= \frac{Z_2}{M_2} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Разделив правые и левые части уравнений на M_1 и M_2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= -X_2 \cdot \frac{M_2}{M_1} \cdot \Psi_2; \\ \frac{d\Psi_2}{dt} &= -X_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \Psi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Интегрирование уравнений системы при $\Psi_1 = \Psi_2 = 1$ и $T = 0$ с заменой:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= X_1 \cdot \frac{M_1}{M_2}; \\ \gamma_2 &= X_2 \cdot \frac{M_2}{M_1} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

В результате этого получим, что

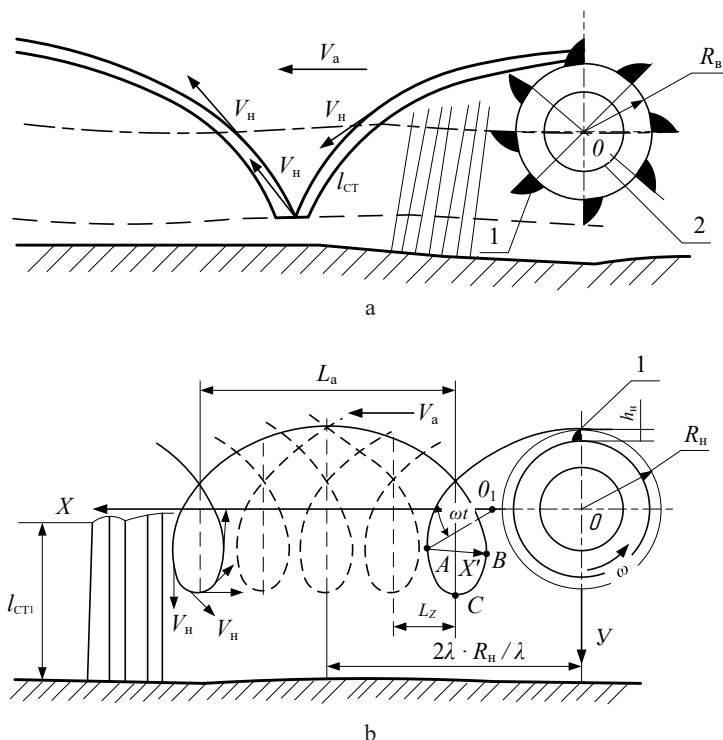
$$\left. \begin{aligned} d\Psi_1 &= -\gamma_2 \cdot \Psi_2; \\ d\Psi_2 &= -\gamma_1 \cdot \Psi_1 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Физический смысл γ_1 и γ_2 состоит в том, что они показывают интенсивность взаимодействия какого-либо количества ножей срезающе-измельчающего аппарата с каким-либо количеством стеблей на определенном участке определенной площади за промежуток времени, равный Δt_i с определенной вероятностью – ρ_2 . Данный факт подтверждается тем, что взаимодействие стеблей одиночных (зерновые) и разветвленных (камыш) с ножами аппарата осуществляется по циклоидальной кривой. Такая кривая может быть укороченной (рис. 8а), с параметрами

$$\lambda = \frac{V_n}{V_a} = 1, \quad (15)$$

где V_n, V_a – соответственно линейные скорости ножей и агрегата, или удлиненной (рис. 8b):

$$\lambda \gg 1. \quad (16)$$



Р и с. 8. Схема к обоснованию показателя кинематического режима:
 а – схема движения лезвия ножа по укороченной траектории при $\lambda = 1$;
 б – схема движения лезвия ножа при $\lambda \gg 1$

F i g. 8. Scheme to substantiate the kinematic mode parameter:
 а – scheme of knife blade motion along the shortened trajectory at $\lambda = 1$;
 б – scheme of knife blade motion at $\lambda \gg 1$

Решение системы уравнений (14) путем замены переменных дает следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= ch(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T - \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{0,5} \cdot sh(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T; \\ \Psi_2 &= ch(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T - \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^{0,5} \cdot sh(\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{0,5} \cdot T \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Рассмотрим результаты подпорного среза стеблей с возможностью дополнительного измельчения (табл. 3).

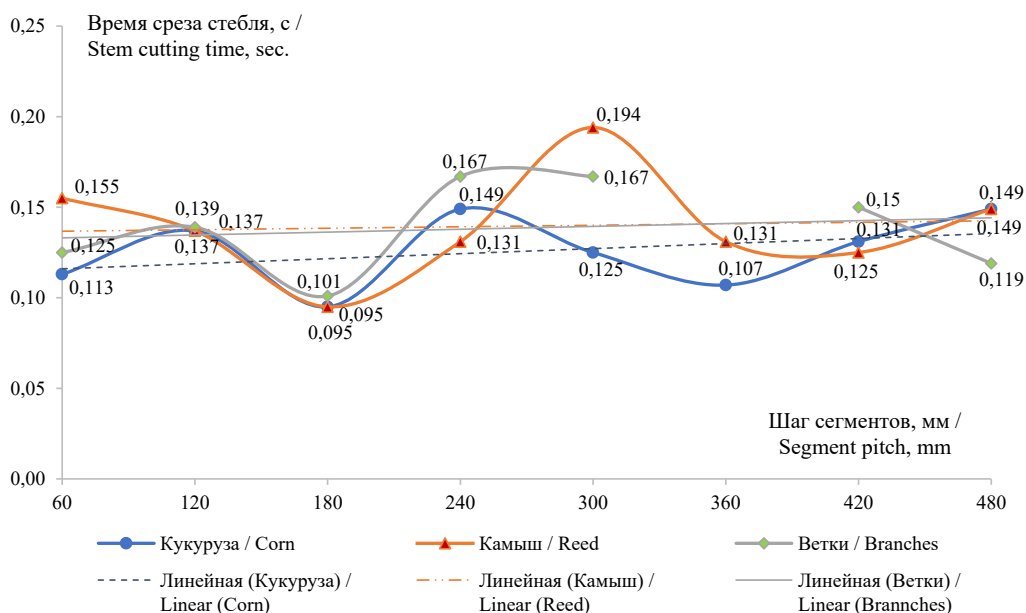
Наилучшие результаты получены при использовании варианта 1 (рис. 4).

Минимальное значение времени среза стеблей t_{cp} при шаге установки сегментов по винтовой кромке $l_c = 180$ мм в случае с кукурузой составило 0,095 с; с камышом – 0,095 с; с ветками – 0,101 с. При этом $t_{cp} = 0,095-0,194$ с (рис. 9).

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

Длина стеблей после среза и измельчения стеблей камыша, мм
Length of stems after cutting and crushing of reed stems, mm

Вариант / Option	Показатели статистики / Statistics indicators				
	\bar{X} , мм	S, мм	ν , %	$S_{\bar{X}}$, мм	$S_{\bar{X}}$ %
1	106	59	55	4	4
	90	59	65	5	5
	83	54	65	5	6
2	126	57	45	6	4
3	152	54	36	6	4



Р и с. 9. Зависимость « $t_{cp} - l_c$ »
F i g. 9. Dependence “ $t_{cp} - l_c$ ”

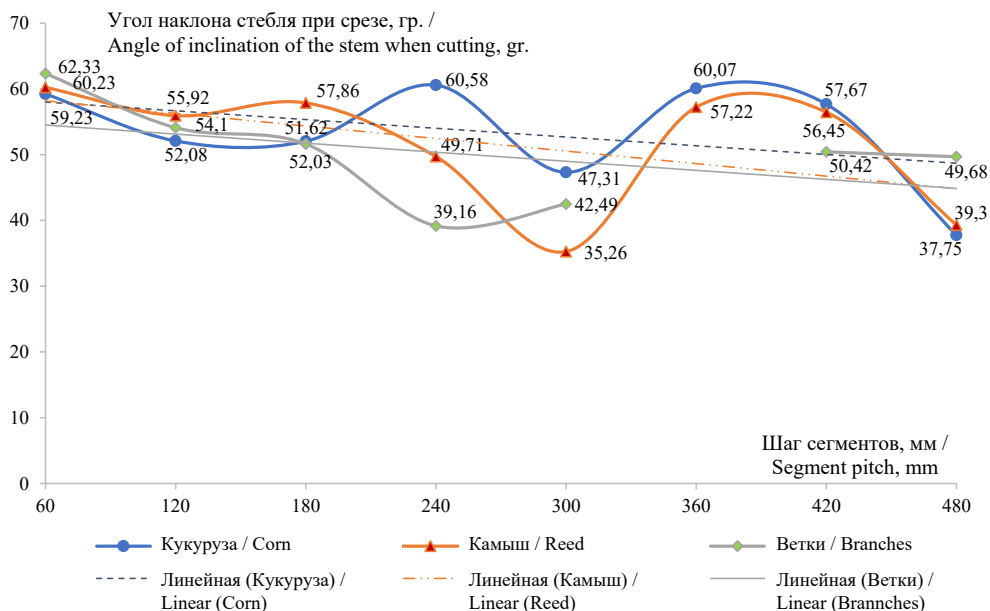
Максимальные значения угла наклона стебля при срезе $\alpha_{ст}$ при $l_c = 240, 360$ мм – 60° , для камыша при $l_c = 60$ мм – 60° , веток при $l_c = 60$ мм – 62° (рис. 10).

На первом этапе полевых исследований изучался процесс работы агрегата с режущим аппаратом срезающе-измельчающего типа и его оценка по критерию удельных затрат энергии (энергоёмкости).

В общем виде искомая зависимость представлена следующим образом:

$$N_3 / \gamma_1 = f(n_{ш}; l_c; t_{np}) \rightarrow \min, \tag{18}$$

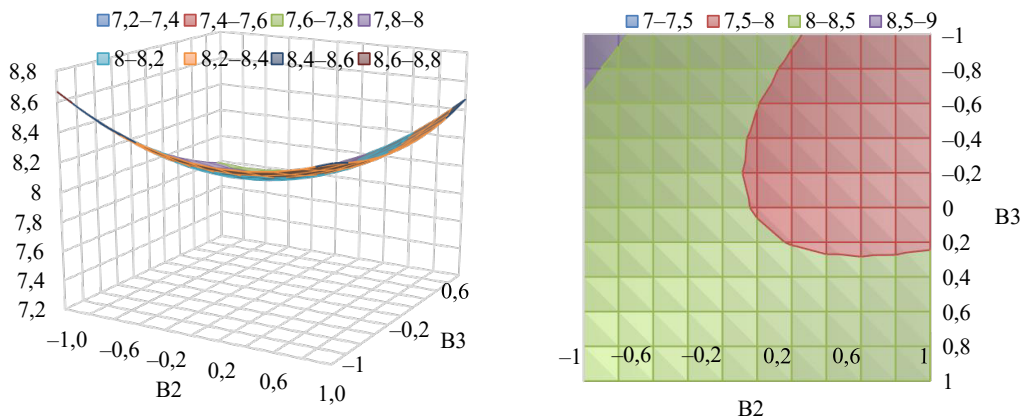
где N_3 / γ_1 – энергоёмкость процесса, кВт·с/кг; $\beta_1 / n_{ш}$ – частота вращения шнекового рабочего органа с режуще-измельчающими сегментами, мин⁻¹; β_2 / l_c – шаг установки сегментов по винтовой кромке шнека, мм; β_3 / t_{np} – шаг установки противорежущих сдвоенных сегментов, мм.



Р и с. 10. Зависимость «α_{ст} – l_c»
F i g. 10. Dependence “α_{ст} – l_c”

Оптимальными значениями являются:

- частота вращения шнекового рабочего органа $n_{ш} = 849–850 \text{ мин}^{-1}$;
- шаг установки сегментов $l_c = 180 \text{ мм}$;
- шаг установки противорезущих сегментов $t_{пр} = 61,00$.

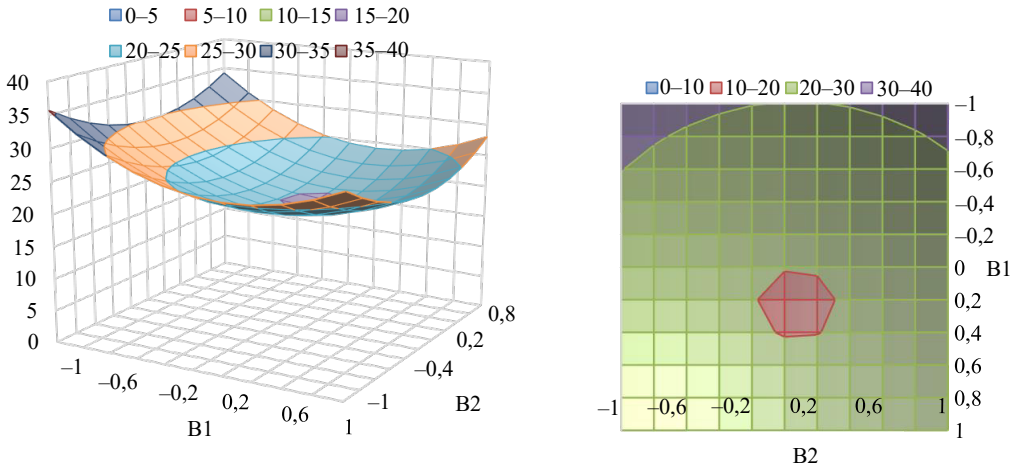


Р и с. 11. Графическое место точек для зависимости $\gamma_1 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$
F i g. 11. Graphical location of points for the dependence $\gamma_1 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$

На втором этапе исследований найдена искомая зависимость, общий вид которой представлен следующим выражением:

$$v_n / \gamma_2 = f(n_{ш}; l_A; \alpha_A) \rightarrow \min, \tag{19}$$

где v_n / γ_2 – неравномерность распределения частиц стеблестоя по полю, %; $\beta_1 / n_{ш}$ – частота вращения шнекового рабочего органа с режуще-измельчающими сегментами, мин^{-1} ; β_2 / l_c – шаг установки сегментов по винтовой кромке шнека, мм; β_3 / α_c – угол наклона режущей части сегментного ножа, градус.



Р и с. 12. Графическое место точек для зависимости $\gamma_2 = f(\beta_1; \beta_2; \beta_3 = 0) \rightarrow \min$
 F i g. 12. Graphical location of points for the dependence $\gamma_2 = f(\beta_1; \beta_2; \beta_3 = 0) \rightarrow \min$

На третьем этапе исследований проведена оценка работы СИА по трем критериям оптимизации с соответствующей совокупностью параметров:

$$v_4 / \gamma_3 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt; \quad (20)$$

$$\Pi / \gamma_4 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt; \quad (21)$$

$$\lambda_n / \gamma_5 = f(\lambda_k; l_A; t_{np}) \rightarrow opt, \quad (22)$$

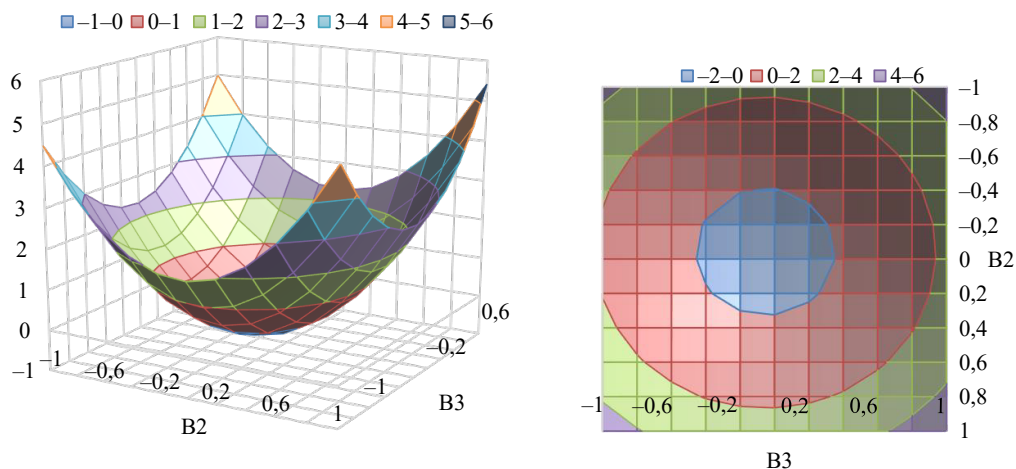
где v_4 – неоднородность частиц по длине, %; Π – показатель потерь в виде несрезанного стеблестоя, %; λ_n – степень измельчения стеблестоя, ед.; λ_k – показатель кинематического режима работы агрегата, ед.

Обсуждение и заключение

Обоснована структурно-функциональная схема измельчающего агрегата с режущим аппаратом срезаво-измельчающего типа.

Для принятых условий работы аппарата обоснована физическая суть так называемого показателя кинематического режима, характеризующего интенсивность взаимодействия какого-либо количества ножей с растениями на корню и распределенным по площади с различной плотностью стеблестоем, создана система уравнений.

В результате изучения резания стеблей в лабораторных условиях получено: по кукурузе: $\min t_{cp} = 0,095$ с при $l_c = 180$ мм; $\max l_c = 240$ мм ($60,58^\circ$), при $\min l_c = 480$ мм ($37,75^\circ$); по камышу: $\max t_{cp} = 0,095$ с при $l_c = 180$ мм; $\max l_c$ при $l_c = 60$ мм ($60,26^\circ$), при $\min l_c = 300$ мм ($35,26^\circ$).



Р и с. 13. Графическое место точек для зависимости $\gamma_4 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$
 F i g. 13. Graphical location of points for the dependence $\gamma_4 = f(\beta_1 = 0; \beta_2; \beta_3) \rightarrow \min$

Проведенными исследованиями по методике многофакторного эксперимента после соответствующей математической обработки установлено, что значениями параметров являются: $n_{ш} = 850,0 \text{ мин}^{-1}$; $l_c = 180,0 \text{ мм}$; $\alpha_c = 60,0^\circ$; $t_{пп} = 60,0 \text{ мм}$; $\lambda_k = 5,34 \text{ ед.}$

При которых: $N_3 = 8,01 \text{ кВт}\cdot\text{с/кг}$; $v_n = 18,2 \%$; $v_d = 14,5 \%$; $\Pi = 1,8 \%$; $\lambda_n = 3,51 \text{ ед.}$; $H_{cp} = 51,8 \text{ мм}$; $\zeta = 31,19 \%$.

Полученные данные необходимы для проектирования и конструирования машин предложенного типа.

Установлено, что в зависимости от параметра $n_{ш}$ (мин^{-1}) и показателя кинематического режима λ_k (ед.) мощность изменяется от 4,99 кВт до 11,022 кВт, производительность – от 0,5 кг/с до 1,22 кг/с, энергоемкость – от 11,022 до 4,99 кВт·с/кг.

Расхождение результатов, полученных теоретических и экспериментальных данных $Q_a = 1,0 \text{ кг/с}$, $v_n = 13,35 \text{ м/с}$, $v_a = 2,5 \text{ м/с}$ и $\lambda_k = 5,34 \text{ ед.}$, составляет, соответственно, $\delta_Q = \pm 0,5 \%$ и $\delta_N = \pm 6,4 \%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погоров Т. А., Лобанов Г. Л. Математическая модель траектории движения ножей шнекового режущего аппарата в зоне резания стеблей растений // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 1 (13). С. 207–216. URL: <https://clck.ru/36raQK> (дата обращения: 01.05.2023).

2. Алдошин Н. В. Режущий аппарат с сегментами без лезвий // Материалы междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 3–7. EDN: **KMDFEY**

3. Алдошин Н. В., Лылин Н. А. Модернизированный сегментно-пальцевый режущий аппарат // Материалы международного конгресса: материалы для обсуждения. 2017. С. 174–175. EDN: **FCBLVL**

4. Красовский В. В. Экспериментальные исследования параметров и режимов работы косилки для скашивания сидератов в междурядьях садов и виноградников // Сборник тезисов участников V науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых. 2019. С. 80–82. EDN: **EGDPR**

5. Гулевский В. А., Вертий А. А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами // Вестник *Agricultural engineering*

Воронежского государственного аграрного университета. 2019. Т. 12, № 1 (60). С. 73–81. <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>

6. Гулевский В. А., Вертий А. А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (18). С. 120–128. EDN: VMNYNQ

7. Вольвак С. Ф., Шаповалов В. И. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 4 (36). С. 14–24. EDN: KSSZAW

8. Труфляк И. С. Теоретическое обоснование резания стеблей шнековым режущим аппаратом // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 2282–2297. EDN: SZVWTT

9. Труфляк И. С. Жатка зерноуборочного комбайна нового типа // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 2298–2310. EDN: SZVWXP

10. Труфляк И. С., Трубилин Е. И. Новый режущий аппарат косилок // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 2012. № 101. С. 370–371. EDN: SWYSHF

11. Исследование ротационного режущего аппарата / А. Е. Матушенко [и др.]. // Теория и практика финансово-хозяйственной деятельности предприятий различных отраслей. 2021. С. 478–482. EDN: EGDETK

12. Ehlert D., Pecenka R., Wiehe J. New Principle of a Mower-Chipper for Short Rotation Coppices // Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy. 2012. p. 332–336. <https://doi.org/10.15150/lt.2012.330>

13. Effects of Three Cutting Blade Designs on Energy Consumption During Mowing-conditioning of Miscanthus Giganteus / H. Gan [et al.] // Biomass and Bioenergy. 2018. Vol. 109. p. 166–171. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417304543> (дата обращения: 01.05.2023).

14. Power Consumption Analysis and Experimental Study on the Kneading and Cutting Process of Licorice Stem in Horizontal Total Mixed Ration Mixer / W. Li [et al.] // Processes. 2021. Vol. 9, Issue 12. <https://doi.org/10.3390/pr9122108>

*Поступила в редакцию 21.04.2023; поступила после рецензирования 30.05.2023;
принята к публикации 10.06.2023*

Об авторах:

Труфляк Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации и технического сервиса, руководитель центра прогнозирования и мониторинга в области точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, trufliak@mail.ru

Потебня Андрей Николаевич, аспирант Кубанского государственного аграрного университета (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2899-6564>, panpotar76@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. В. Труфляк – общее руководство исследованием, участие во всех этапах эксперимента, обработка и анализ данных.

А. Н. Потебня – обзор литературы, участие во всех этапах полевых исследований, обработка полученных экспериментальных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Pogorov T.A., Lobanov G.L. Mathematical Model of a Screw Cutter Knife Trajectory in the Cutting Zone of Plant Stems. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2017;(1):207–216. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/36raQK> (accessed 01.09.2023).

2. Aldoshin N.V. Cutting Machine With Segments without Blades. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2019;3–7. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [KMDFEY](#)
3. Aldoshin N.V., Lysin N.A. Modernization of the Segmented Finger Cutter. In: Proceedings of the International Congress: Materials for Discussion. 2017;174–175. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [FCBLVL](#)
4. Krasovsky V.V. Experimental Studies of Parameters and Modes of Operation of the Mower for Mowing Green Manure in the Inter-Row Orchards and Vineyards. In: Collection of Abstracts of Participants of the 5th Scientific-Practical Conference of Professors, Graduate Students, Students and Young Scientists. 2019;80–82. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [EGDPPR](#)
5. Gulevsky V.A., Vertiy A.A. Improvement of Rough Stalk Fodder Chopping Technology by a Chopper With Articulated Combined Knives. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2019;12(1):73–81. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.73>
6. Gulevsky V.A., Vertiy A.A. Mathematical Modeling of a Fodder Chopper Operation. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*. 2018;18(3):120–128. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [VMNYNQ](#)
7. Volvak S.F., Shapovalov V.I. Study of the Process of Grinding of Concentrated Fodder. *Innovations in the Agroindustrial Complex: Problems and Prospects*. 2022;(4):14–24. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [KSSZAW](#)
8. Truflyak I.S. Theoretical Substantiation of Stem Cutting by Auger Cutting Apparatus. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(101):2282–2297. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SZVWTT](#)
9. Truflyak I.S. Reaper of a Combine Harvester of a New Type. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2014;(101):2298–2310. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SZVWXP](#)
10. Truflyak I.S., Trubilin E.I. New Cutting Apparatus of Mowers. *Scientific Support of Agroindustrial Complex*. 2012;(101):370–371. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [SWYSHF](#)
11. Matushchenko A.E., Poluektov A.A., Vulshinskaya I.V., Glazkov D.V. Investigation of Rotary Cutting Unit. Theory and Practice of Financial and Economic Activity of Enterprises in Various Industries. In: Science and Society: Current Problems and Solutions. 2021;478–482. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: [EGDETK](#)
12. Ehlert D., Pecenka R., Wiehe J. New Principle of a Mower-Chipper for Short Rotation Coppices. In: Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy. 2012;332–336. <https://doi.org/10.15150/lt.2012.330>
13. Gan H., Mathanker S., Momin M.A., Kuhns B., Stoffel N., Hansen A., et al. Effects of Three Cutting Blade Designs on Energy Consumption During Mowing-Conditioning of *Miscanthus Giganteus*. *Biomass and Bioenergy*. 2018;109:166–171. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417304543> (accessed 01.09.2023).
14. Li W., Wen B., Song P., Shi Y., Zhang J., Li J., et al. Power Consumption Analysis and Experimental Study on the Kneading and Cutting Process of Licorice Stem in Horizontal Total Mixed Ration Mixer. *Processes*. 2021;9(12):2108. <https://doi.org/10.3390/pr9122108>

Submitted 21.04.2023; revised 30.05.2023; accepted 10.06.2023

About the authors:

Evgeniy V. Truflyak, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Operation and Technical Service, Head of the Center for Forecasting and Monitoring in the Field of Precision Agriculture, Automation and Robotization of the Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>, Researcher ID: D-1301-2018, trufliak@mail.ru

Andrey N. Potebnya, Postgraduate Student, Kuban State Agrarian University (13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2899-6564>, panpotap76@mail.ru

Authors contribution:

E. V. Truflyak – general management of the study, participation in all stages of the experiment, data processing and analyzing.

A. N. Potebnya – literature review, participation in all stages of field research, processing experimental data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.