

## Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма

© 2024. С. Ю. Булатов , А. Н. Пронин

ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино, Российская Федерация

*При производстве комбикормов необходимо точное соблюдение рецептуры в момент ввода всех необходимых компонентов, для чего применяются различные типы дозаторов. В настоящее время широкое распространение получили автоматические системы, обеспечивающие повышение точности дозирования. Однако для каждого компонента необходимы индивидуальные настройки работы таких систем, что усложняет работу операторов. В статье представлено описание конструкции технического устройства, содержащего основной и дополнительный шнек и позволяющего взвешивать компоненты с разными физико-механическими свойствами при одних и тех же настроечных параметрах. Дано краткое описание рабочего процесса дозатора, перечислены факторы исследования и критерии оценки его работы. Определяли влияние пяти факторов установки частоты дозаторов  $n_1$ , установки упреждения досыпки  $t$ , установки включения скорости досыпки  $t$ , установки частоты дозаторов  $n_2$ , заданной массы навески  $M_z$  на точность дозирования. На первом этапе находили влияние исследуемых факторов при дозировании зерна. Для этого был реализован план Бокса-Бенкина для пяти факторов. В результате анализа полученных данных построена модель регрессии, на основании которой определены три комбинации значений факторов, при которых погрешность дозирования зерна дополнительным шнеком дозатора равна 0. На следующем этапе исследований определяли точность дозирования мела и соли при установленных комбинациях. Выявлено, что дозирование соли осуществляется по закономерности, близкой к кривой по зерну, а погрешность дозирования находится в допустимых пределах 5%. В результате проведенных исследований выявлена наилучшая комбинация факторов, при которой погрешность дозирования не превышает допустимое значение при взвешивании зерна, соли и мела:  $n_1 = 30,3$  Гц,  $t = 11,9$ %;  $n_2 = 40,9$  % от  $n_1$  (12,42 Гц),  $M_z = 202,8$  г. При данных значениях исследуемых параметров можно проводить дозирование компонентов с допустимой погрешностью массой навески более 200 г.*

**Ключевые слова:** лабораторная установка, мел, модель регрессии, план эксперимента, погрешность дозирования, соль

**Благодарности:** работа выполнена в рамках договора на проведение научно-исследовательской работы между ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» и ООО «ДОЗА-АГРО» (тема «Исследование и совершенствование рабочего процесса смесителя сухих сыпучих компонентов СЛГ-2А и модуля макро-дозирования ММД-1,5×4»).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Булатов С. Ю., Пронин А. Н. Результаты исследований шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов комбикорма. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):123–133.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133>

Поступила: 15.09.2023

Принята к публикации: 12.01.2024

Опубликована онлайн: 28.02.2024

## Research results of the screw dispenser of dry bulk feed components

© 2024. Sergey Yu. Bulatov , Alexey N. Pronin

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation

*In the production of compound feeds, it is necessary to follow the recipe at the time of introducing all the necessary components, for which various types of dispensers are used. Currently, automatic dosing systems are widely used, providing increased dosing accuracy. However, individual settings of such systems are required for each component, which makes the work of operators harder. The article describes the design of a technical device containing a main and an additional screw and allowing components with different physical and mechanical properties to be weighed at the same tuning parameters. A brief description of the dispenser's workflow is given, the research factors and criteria for evaluating its work are listed. The influence of five factors was determined: the frequency setpoint of the dispensers  $n_1$ , the pre-filling setpoint  $m$ , the setpoint for switching on the filling speed  $t$ , the frequency setpoint of the dispensers  $n_2$ , the set weight of the suspension  $M_z$  on the dosing accuracy. At the first stage, the influence of the studied factors on grain dosing was determined. To do this, the Box-Benkin plan was implemented for five factors. As a result of the analysis of the data obtained, a regression model was built, on the basis of which three combinations of factor values were determined, in which the grain dosing error by an additional dispenser screw was 0. At the next stage of the research, the accuracy of dosing chalk and salt was determined at the established combinations. It was revealed that salt dosing was carried out according to a pattern close to the grain curve, and the dosing error was within the permissible limits of 5%. As a result of the conducted studies, the best combination of factors was determined, in which the dosing error did not exceed the permissible value when weighing grain, salt and chalk:  $n_1 = 30.3$  Hz,*

$t = 11.9 \%$ ;  $n_2 = 40.9 \%$  of  $n_1$  (12.42 Hz),  $M_z = 202.8$  g. With these values of the studied parameters, it is possible to dose components with the permissible error of the weight of the suspension is over 200 g.

**Keywords:** laboratory setup, chalk, regression model, experimental plan, dosing error, salts

**Acknowledgements:** the work was performed within the framework of a research agreement between the Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University and DOZA-AGRO LLC (topic "Research and improvement of the workflow of the mixer of dry bulk components SLG-2A and the MMD-1.5×4 macrodosing module").

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated no conflict of interest.

**For citations:** Bulatov S. Y., Pronin A. N. Research results of the screw dispenser of dry bulk feed components. *Agrar-naya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):123–133. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.123-133>

Received: 15.09.2023

Accepted for publication: 12.01.2024

Published online: 28.02.2024

Обеспечение населения страны продукцией аграрного сектора является общегосударственной задачей. При этом большое внимание уделяется отрасли животноводства, где в последние годы наблюдается рост производства, в частности мяса птицы [1]. В режиме интенсивного ведения мясного производства особое внимание уделяется сбалансированности кормов [2]. Значительную роль в рационе сельскохозяйственных животных и птицы играют комбикорма. Ввиду сложившихся неблагоприятных международно-политических условий, главная задача комбикормовой отрасли – обеспечить импортозамещение в данной промышленности и не допустить удорожания комбикормов, премиксов и кормовых добавок, что может повлиять на рост цен сельскохозяйственных продуктов питания для жителей страны. Отечественные комбикорма, судя по результатам исследований, не только не уступают импортным, но и по некоторым показателям превосходят их [3, 4].

В процессе производства комбикормов важным является точное соблюдение рецептуры при внесении всех необходимых компонентов, для чего применяют различные типы дозаторов [5]. В силу универсальности дозирования компонентов с разными физико-механическими свойствами, простоты, надежности, относительной дешевизны, возможности расположения в составе технологической линии при производстве кормов рационально использование шнековых дозаторов [6]. Выделяют два вида шнеков: закрытые и открытые (или U-образные) [7]. U-образный шнековый конвейер удобен при перемещении тяжелых и связных материалов, но обладает низкой скоростью перемещения [8]. В закрытых шнеках скорость перемещения материалов значительно выше, следовательно, данный тип обладает более высокой пропускной способностью [7].

Несмотря на достаточную изученность работы шнековых машин, исследования в этом направлении остаются актуальными и на сегодняшний день. Исследования направлены на изучение параметров шнеков как на энергетические и количественные характеристики, так и на степень повреждения перемещаемого материала. Так, например, Р. Хевко и др. (R. Nevko et al.) установили оптимальную частоту вращения шнека, при которой наблюдается минимальное повреждение материала –  $550 \dots 650 \text{ мин}^{-1}$  [9]. Т. О. Оланреваджу, И. М. Иеремия и П. Э. Ониеанула (T. O. Olanrewaju, I. M. Jeremiah and P. E. Onyeonula) установили оптимальный угол наклона шнека при транспортировании гранулированных материалов влажностью 13 % [10]. О. Озбек (O. Ozbek) по критериям пропускной способности и энергозатратам, применив методологию нечеткой логики, определил оптимальные параметры шнека: частоту вращения  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ , шаг 100 мм, угол наклона  $15^\circ$  [11]. Развитие компьютерных технологий позволило разработать новые методы исследований. М. Пезо и др. (M. Pezo et al.) использовали возможности искусственной нейронной сети, что позволило им разработать модель перемещения частиц в пяти типах горизонтальных шнеков различной длины [12]. З. Янг и др. (Z. Yang et al.) на основе метода DEM создали модель осевого перемещения частицы в вертикальном шнеке, работоспособность которой подтвердили экспериментально [13]. С помощью цифровых технологий Л. Сан и др. (L. Sun et al.) определили влияние угла осевого наклона лопасти шнека на пропускную способность, выявив, что он должен быть на 5 % больше, чем у лопасти винта без осевого угла наклона, и составлять  $15^\circ$  [14].

Российские ученые определили основные физико-механические свойства компонентов комбикорма и установили, что их разнообразие, а также зависимость физико-механических

свойств компонентов от параметров окружающего воздуха существенно влияют на работу дозирующих устройств [15, 16].

В настоящее время широкое распространение получили автоматические системы дозирования, благодаря которым повышается точность дозирования [17]. Однако, как показали исследования, для каждого компонента необходимы индивидуальные настройки работы таких систем, которые могут содержать большое количество настроечных параметров [18]. Всё это усложняет работу операторов. В связи с этим предложено техническое устройство и программа управления им, с помощью которых возможно дозирование компонентов с разными физико-механическими свойствами при одних и тех же настроечных параметрах работы [19].

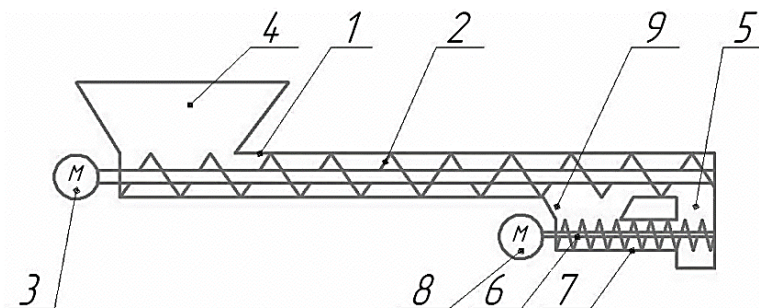
Несмотря на разработку новых технологий, дозирование компонентов остается неотъемлемой операцией [20, 21]

**Цель исследования** – поиск оптимальных параметров работы шнекового дозатора при дозировании компонентов с разными физико-механическими свойствами.

**Научная новизна** – разработан дозатор сухих сыпучих компонентов, способный проводить дозирование различных компонентов комбикорма с допустимой погрешностью.

**Материал и методы.** Исследования проводили в лаборатории «Системы гигиенизации и переработки зерна (кормовых смесей),

производства гранулированных кормов» ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» в течение 2023 года. Шнековый дозатор сухих сыпучих компонентов (рис. 1) состоит из расположенного в корпусе 1 основного шнека 2, привод которого осуществляется электродвигателем 3. Со стороны электродвигателя 3 в верхней части корпуса 1 смонтирован приемный бункер 4, с противоположной стороны от него в нижней части корпуса 1 выполнен выгрузной патрубок 5. Также в нижней части корпуса 1 перед выгрузным патрубком 5 параллельно шнеку 2 смонтирован шнек точного дозирования 6, расположенный в корпусе 7, а его выгрузной патрубок корпуса 7 объединён с выгрузным патрубком основного шнека 5. Привод шнека 6 точного дозирования осуществляется электродвигателем 8 с противоположной стороны от выгрузного патрубка 5. Со стороны электродвигателя 8 в верхней части корпуса 7 смонтирован загрузочный бункер 9 шнека 6, конструктивно связывающий корпуса 1 и 7 шнеков 2 и 6, при этом вал шнека 6 проходит через стенку бункера 7 точного дозирования и вращается электродвигателем 8. Данное устройство предназначено для дозированной подачи сухих сыпучих компонентов и может быть установлено в технологической линии по производству комбикормов.



**Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема шнекового дозатора сухих сыпучих компонентов: 1, 7 – корпуса; 2 – основной шнек; 3, 8 – электродвигатели; 4 – приемный бункер; 5 – выгрузной патрубок; 6 – шнек точного дозирования; 9 – загрузочный бункер /**

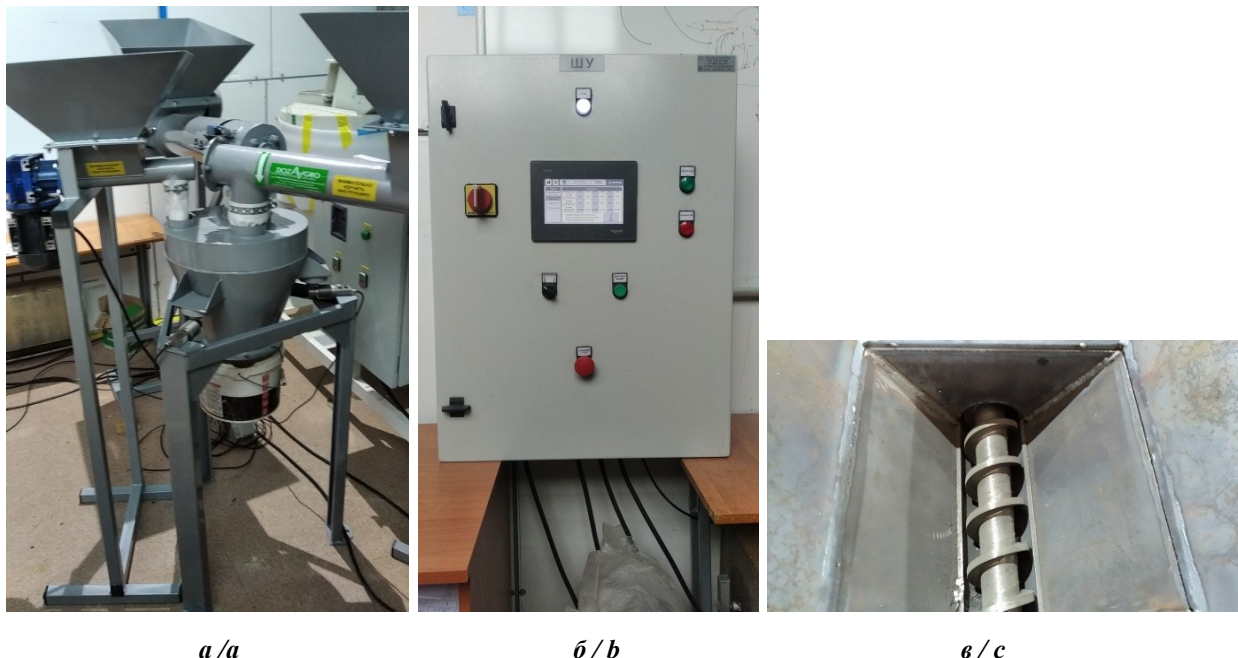
**Fig. 1. Design and technological scheme of the screw dispenser of dry bulk components: 1, 7 - housing; 2 – main auger; 3, 8 – electric motor; 4 – receiving hopper; 5 – discharge pipe; 6 – precise dosing auger; 9 – loading hopper**

Проведенные ранее исследования показали, что шнековыми дозаторами ДШ-60 и ДШ-100 достаточно точно можно осуществить дозирование отдельных компонентов массой не менее 1000 г [18]. Но для этого необходимо подбирать параметры работы дозатора для

каждого компонента. Принцип работы предлагаемого дозатора заключается в том, что основная масса дозируемого компонента подается основным шнеком 2, а оставшаяся незначительная часть – дополнительным 6, от работы которого зависит точность дозирования. Поэтому

были определены режимы работы дополнительного шнека б, при которых обеспечивается точное дозирование компонентов с разными физико-механическими свойствами.

Исследование рабочего процесса шнекового дозатора проводили методами планирования эксперимента. Для этого изготовили лабораторный образец дозатора ДШ-60 на базе шнека с диаметром 60 мм (рис. 2).



*Рис. 2. Лабораторная установка дозатора сыпучих компонентов: а – общий вид; б – шкаф управления; в – рабочий орган /*

*Fig. 2. General view of the laboratory installation of the dispenser of bulk components: a – general view; b – control cabinet; c – working body*

С целью получения регрессионной модели реализовали план Бокса-Бенкена для пяти факторов:  $n_1$  – уставки частоты дозаторов (Гц);  $m$  – уставки упреждения досыпки (г);  $t$  – уставки включения скорости досыпки (%);  $n_2$  – уставки частоты дозаторов (%);  $M_z$  – заданная масса навески (г) [18, 19]. Так как дозатор осуществляет дозирование сначала с высокой частотой вращения  $n_1$  шнека, а в конце дозирования переключается на меньшую частоту  $n_2$  с целью снижения погрешности, то уставка частоты дозаторов  $n_2$  не может быть больше  $n_1$ . Поэтому принято решение выразить данный фактор в процентном отношении от  $n_1$ . Работоспособность дозатора оценивали относительной погрешностью взвешивания  $\delta$ , выраженную в процентах. Каждый опыт проводили в трёхкратной повтор-

ности и рассчитывали среднее значение фактической массы навески  $M_f$ . Планирование эксперимента проводили при дозировании зерна ячменя. Далее при полученных данных проводили исследование на других компонентах, отличающихся физико-механическими свойствами. Значения параметров физико-механических свойств этих компонентов находятся в пределах значений параметров соли и мела, поэтому при проведении исследований выбраны именно эти компоненты.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследований работы дозатора приведены в таблице 1.

С помощью полученных данных в программе Statgraphics построена модель регрессии в закодированном виде при уровне достоверности 95 %:

$$y = 3,736 + 11,744x_1 - 16,113x_2 + 11,106x_3 + 14,619x_4 - 12,531x_5 - 8,85x_1x_5 + 13,375x_2x_5 + 8,073x_3^2 - 8,575x_3x_4 - 12,1x_3x_5 + 9,289x_4^2 + 8,805x_5^2. \quad (1)$$

Таблица 1 – Матрица плана Бокса-Бенкина и результаты исследований дозатора сыпучих компонентов / Table 1 – The matrix of the Box-Benkin plan and the results of research on the dispenser of bulk components

№ опыта / Experiment number	Фактор / Factor						Фактическая масса навески M <sub>г</sub> , г / The actual weight of the attachment M <sub>г</sub> , g			Относительная погрешность взвешивания δ, % / The relative error of weighing δ, %	
	установка частоты дозаторов n <sub>1</sub> , Гц / frequency setting of dispensers n <sub>1</sub> , Hz	установка упреждения досылки m, г / pre-filling setpoint m, g	установка включения скорости досылки t, % / setting points for switching on the filling speed t, %	установка частоты дозаторов n <sub>2</sub> , % / frequency settings of dispensers n <sub>2</sub> , %	заданная масса навески M <sub>з</sub> , г / the specified weight of the suspension M <sub>з</sub> , g	повторность / repetition					
						1	2	3			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	40	80	50	70	350	360	356	366	361	3,1	
2	30	30	50	70		374	385	377	379		8,3
3	50	30	50	70		440	451	441	444		26,9
4	30	130	50	70		286	280	289	285		-18,6
5	50	130	50	70		313	328	334	325		-7,1
6	40	80	10	40		300	315	316	310		-11,4
7	40	80	90	40		440	446	424	437		24,9
8	40	80	10	100		458	455	442	452		29,1
9	40	80	90	100		454	463	460	459		31,1
10	40	80	50	70		364	365	355	361		3,1
11	40	30	50	70		223	244	254	240		60,0
12	40	130	50	70		123	144	132	133		-11,3
13	40	30	50	70		612	618	611	614		11,6
14	40	130	50	70		511	519	519	516		-6,2
15	30	80	10	70		334	333	331	333		-4,9
16	50	80	10	70		407	390	398	398		13,7
17	30	80	90	70		362	348	365	358		2,3
18	50	80	90	70		480	476	472	476		36,0
19	40	80	50	70		366	367	365	366		4,6
20	40	80	50	40		181	205	182	189		26,0
21	40	80	50	100		235	248	243	242		61,3

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22	40	80	50	40	550	511	514	524	516	-6,2
23	40	80	50	100		673	659	662	665	20,9
24	40	30	10	70	350	419	431	428	426	21,7
25	40	130	10	70		303	322	312	312	-10,9
26	40	30	90	70	350	482	489	491	487	39,1
27	40	130	90	70		398	392	381	390	11,4
28	40	80	50	70	350	360	372	364	365	4,3
29	30	80	50	40		299	302	298	300	-14,3
30	50	80	50	40	350	378	381	382	380	8,6
31	30	80	50	100		380	370	377	376	7,4
32	50	80	50	100	350	517	501	510	509	45,4
33	40	80	10	70		147	151	164	154	2,7
34	40	80	90	70	150	241	245	242	243	62,0
35	40	80	10	70		268	560	552	560	1,8
36	40	80	90	70	550	620	622	617	620	12,7
37	40	80	50	70		350	379	372	370	374
38	30	80	50	70	150	151	151	137	146	-2,7
39	50	80	50	70		202	213	203	206	37,3
40	30	80	50	70	550	538	535	540	538	-2,2
41	50	80	50	70		563	558	568	563	2,4
42	40	30	50	40	350	372	269	373	371	6,0
43	40	130	50	40		298	307	312	306	-12,6
44	40	30	50	100	350	492	523	501	505	44,3
45	40	130	50	100		396	417	399	404	15,4
46	40	80	50	70	376	365	379	373	6,6	

Адекватность полученной регрессионной модели подтверждается высоким значением коэффициента детерминации, значение которого составило  $R^2 = 93,4212\%$ . Значимыми в данном случае являются 12 эффектов, так как они имеют Р-значения менее 0,05. В программе Statgraphics при анализе диаграммы Парето выявлено, что наиболее существенным является фактор  $x_2$ : с увеличением значения уставки упреждения досыпки  $m$  погрешность дозиро-

вания снижается. Анализ статистики Дарбина-Уотсона ( $DW = 2,47$ ) показал, что значение последовательной автокорреляции в остатках находится на уровне значимости 5%. Следовательно, полученная модель может быть признана адекватной и пригодной для описания исследуемого процесса.

С помощью программы Statgraphics определили значения факторов, сочетание которых дает погрешность дозирования, равную 0 (табл. 2).

Таблица 2 – Оптимальное сочетание факторов при дозировании зерна ячменя / Table 2 – Optimal combination of factors in the dosing of barley grain

Наименование / Name	Комбинации исследуемых факторов / Combinations of the studied factors		
	№ 1 / No 1	№ 2 / No 2	№ 3 / No 3
Уставка частоты дозаторов $n_1$ , Гц / Frequency setting of dispensers $n_1$ , Hz	39,9	31,4	30,3
Уставка упреждения досыпки $m$ , г / Pre-filling setpoint $m$ , g	83,5	34,8	31,8
Уставка включения скорости досыпки $t$ , % / setting points for switching on the filling speed $t$ , %	49,0	44,6	11,9
Уставка частоты дозаторов $n_2$ , % / Frequency settings of dispensers $n_2$ , %	66,1	59,2	40,9
Фактическая масса навески $M_F$ , г / The actual weight of the attachment $M_F$ , g	359,8	384,5	202,8

На следующем этапе исследований определяли точность дозирования мела и соли при установленных комбинациях факторов. Сначала определили влияние заданной массы навески  $M_z$  при комбинации факторов № 1. В результате выявлено, что дозирование соли осуществляется по закономерности, близкой к

кривой по зерну, а погрешность дозирования находится в допустимых пределах 5%. Мел при заданной комбинации факторов невозможно взвесить с допустимой точностью, даже при увеличении массы навески до 1 кг (рис. 3). В целом с увеличением массы навески наблюдается снижение погрешности дозирования.

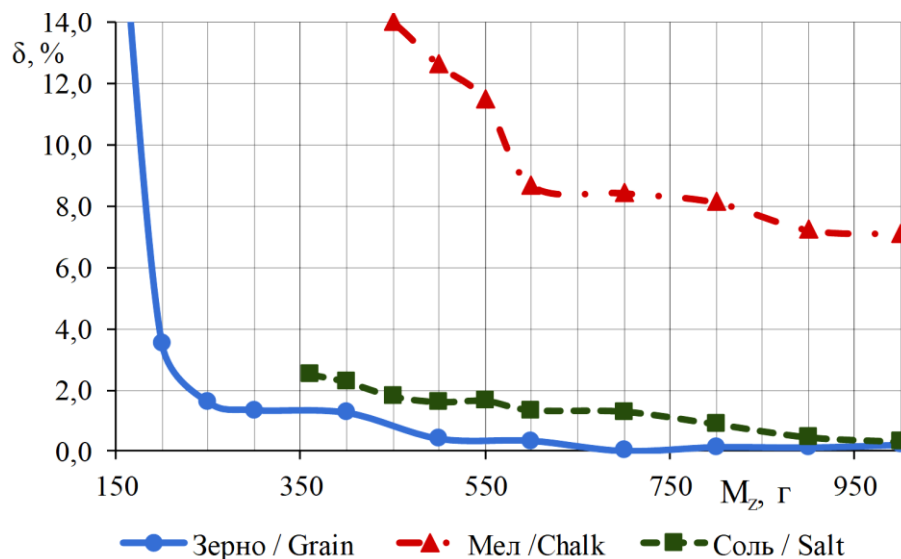
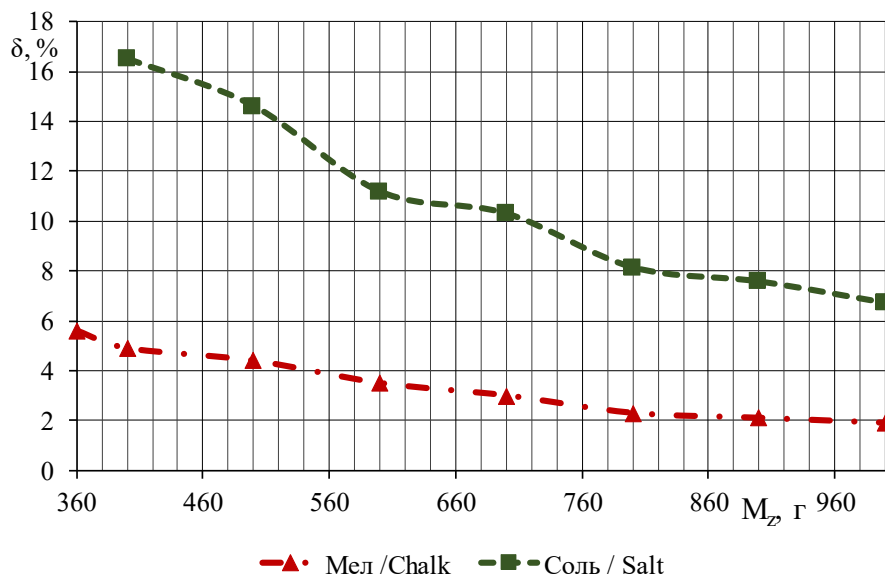


Рис. 3. Влияние массы навески  $M_z$  на точность дозирования при  $n_1 = 39,9$  Гц,  $t = 49,0\%$ ,  $n_2 = 66,1\%$  от  $n_1$  (26,4 Гц),  $m = 83,5$  г /

Fig. 3. The effect of the weight of the suspension  $M_z$  on the dosing accuracy at  $n_1 = 39.9$  Hz,  $t = 49.0\%$ ,  $n_2 = 66.1\%$  of  $n_1$  (26.4 Hz),  $m = 83.5$  g

Так как невозможно провести дозирование мела (даже 1 кг) при данных параметрах, принято решение изменить значение уставки упреждения досыпки  $m$ . Опыты показали, что допустимую погрешность дозирования мела наблюдали при снижении  $m$  до 30 г. Поэтому проведены дополнительные исследования при дозировании мела и соли в зависимости от за-

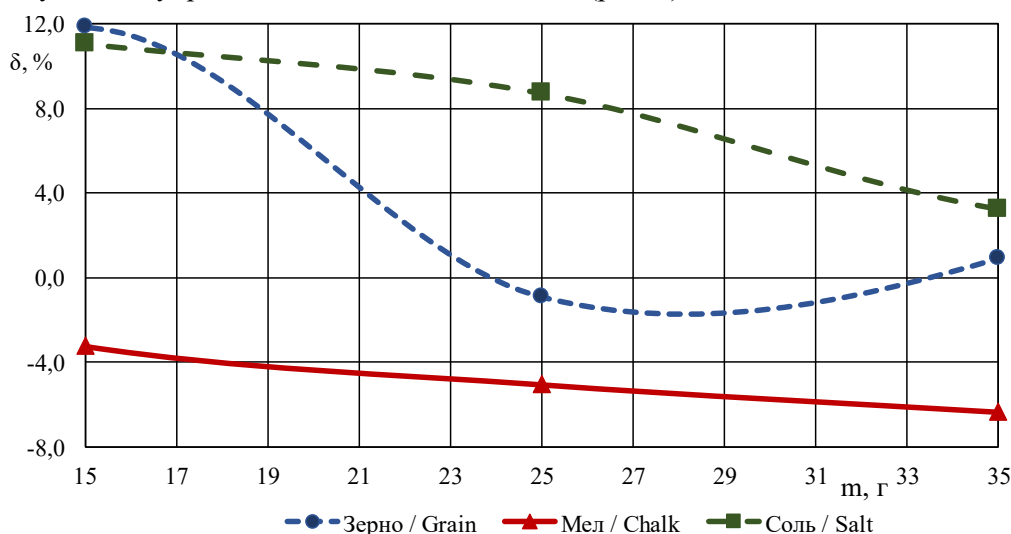
данной массы навески  $M_z$  при  $m = 30$  г. Как показывают результаты исследования, при заданных значениях исследуемых параметров невозможно добиться допустимой погрешности дозирования компонентов с различными физико-механическими свойствами (рис. 4). Принято решение отказаться от комбинации факторов № 1.



**Рис. 4. Влияние массы навески  $M_z$  на точность дозирования при  $n_1 = 39,9$  Гц,  $t = 49,0$  %,  $n_2 = 66,1$  % от  $n_1$  (26,4 Гц),  $m = 30$  г /**  
**Fig. 4. The effect of the weight of the suspension  $M_z$  on the dosing accuracy at  $n_1 = 39.9$  Hz,  $t = 49.0$  %,  $n_2 = 66.1$  % of  $n_1$  (26.4 Hz),  $m = 30$  g**

Так как с увеличением заданной массы навески  $M_z$  погрешность дозирования снижается, принято решение для последующих комбинаций определить влияние на критерий оптимизации уставки упреждения досыпки  $m$

при фиксированных значениях остальных факторов. Выявлено, что при комбинации факторов №2 невозможно достичь необходимой точности дозирования для всех компонентов (рис. 5).

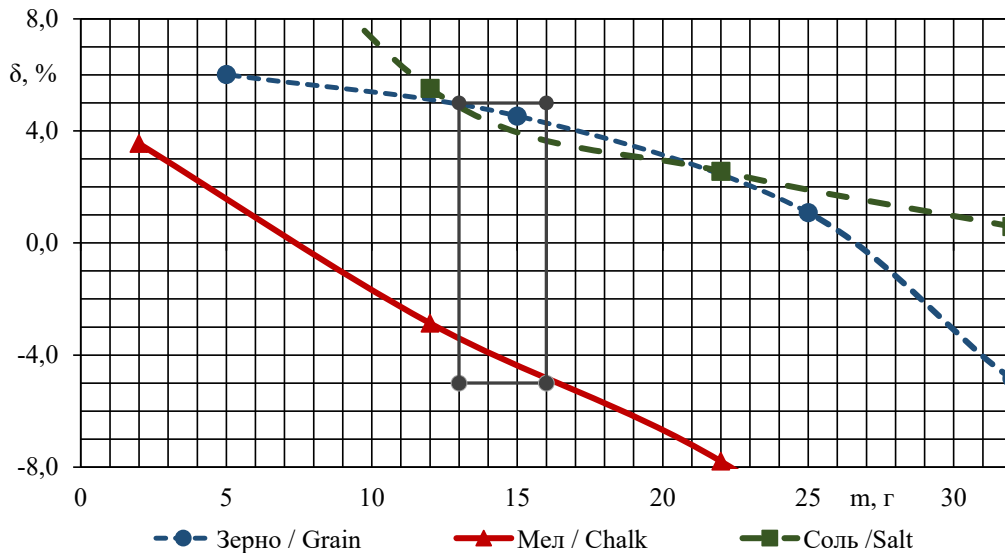


**Рис. 5. Влияние уставки упреждения досыпки  $m$  на точность дозирования при  $n_1 = 31,4$  Гц,  $t = 44,6587$  %,  $n_2 = 59,2$  % от  $n_1$  (18,6 Гц),  $M_z = 384,5$  г**  
**Fig. 5. Influence of the pre-filling setpoint  $m$  on the dosing accuracy at  $n_1 = 31.4$  Hz,  $t = 44.6587$  %,  $n_2 = 59.2$  % of  $n_1$  (18.6 Hz),  $M_z = 384.5$  g**



Комбинация факторов №3 – зерно и соль с допустимой погрешностью при  $m = 13...32$  г. В данном случае дозирование мела с необходимой точностью достигается при значениях уставки упреждения досыпки  $m$ , меньшими 15 г.

Методом наложения допустимых значений определили интервал значений уставки упреждения досыпки  $m = 13...16$  г, при котором достигается допустимая погрешность дозирования для всех исследуемых компонентов (рис. 6).



**Рис. 6.** Влияние уставки упреждения досыпки  $m$  на точность дозирования при  $n_1 = 30,3$  Гц,  $t = 11,9$  %,  $n_2 = 40,9$  % от  $n_1$  (12,42 Гц),  $M_Z = 202,8$  г

**Fig. 6.** Influence of the pre-filling setpoint  $m$  on the dosing accuracy at  $n_1 = 30.3$  Hz,  $t = 11.9$  %,  $n_2 = 40.9$  % of  $n_1$  (12.42 Hz),  $M_Z = 202.8$  g

**Заключение.** Проведенные исследования позволили определить наилучшую комбинацию факторов, при которой погрешность дозирования не превышает допустимое значение при взвешивании зерна, соли и мела:  $n_1 = 30,3$  Гц,  $t = 11,9$  %;  $n_2 = 40,9$  % от  $n_1$  (12,42 Гц),  $M_Z = 202,8$  г. При данных значениях исследуемых параметров можно производить дозирование компонентов

с допустимой погрешностью массой навески более 200 г. Кроме того, с допустимой погрешностью при найденных настроечных параметрах возможно осуществлять дозирование и других компонентов, насыпная плотность которых лежит в пределах насыпной плотности исследованных культур, а именно от 0,6 до 1,2 г/см<sup>3</sup>.

#### Список литературы

1. Буяров В. С., Буяров А. В. Технологические и экономические аспекты развития мясного птицеводства. Биология в сельском хозяйстве. 2022;(2(35)):7–12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48879096> EDN: ZAVDQW
2. Каиров В. Р., Газзаева М. С., Гатчиев М. А. Продуктивность и качественные показатели мяса цыплят-бройлеров при скормливании в составе рациона. Известия Горского государственного аграрного университета. 2020;57(1):68–73. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42572854> EDN: MPOTGO
3. Аржанкова Ю. В., Томаева О. Н. Рост цыплят-бройлеров при использовании комбикормов отечественного и импортного производства. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2022;(4(41)):10–20. DOI: <https://doi.org/10.56323/23088583> 2022\_04\_10 EDN: JSCTCB
4. Томаева О. Н., Аржанкова Ю. В. Абсолютный прирост цыплят-бройлеров при использовании комбикормов отечественного и импортного производства. Научно-практический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. тез. Междунар. студент. науч.-практ. конф. Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. Великие Луки, 2022. С. 44–47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50452794> EDN: VCYWJX
5. Буркина А. С. Технологические решения при производстве рассыпных комбикормов. Наука молодых – будущее России: сб. ст. V Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 49–52. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53811442> EDN: NNTWJF
6. Chongchitpaisan P., Sudsawat S. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications. Ladkrabang Engineering Journal. 2022;39(2):1–12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/361655904>
7. Minglani D., Sharma A., Pandey H., Dayal R., Joshi J. B., Subramaniam S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. Power Technology. 2020;366:369–381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066>

8. Wagner R. Bulk Material Characteristics. Material Code. Conveyor Size and Speed. Component Groups. In Handbook of Screw Conveyor for Bulk Material, Naples, FL, USA: Conveyor Equipment Manufacture Association. 2019;2(3):28–34. URL: [https://books.google.ru/books/about/Screw\\_conveyors.html?hl=ru&id=8dISAAAAAAAJ](https://books.google.ru/books/about/Screw_conveyors.html?hl=ru&id=8dISAAAAAAAJ)
9. Hevko R., Rohatynskiy R., Hevko M., Lyashuk O., Trokhaniak O. Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials. Research in Agricultural Engineering. 2020;66(1):18–26. DOI: <https://doi.org/10.17221/25/2019-RAE>
10. Olanrewaju T. O., Jeremiah I. M., Onyeonula P. E. Design and fabrication of a screw conveyor. Agricultural Engineering International. 2017;19(3):156–162. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4097>
11. Ozbek O. Fuzzy modeling of volumetric efficiency and specific energy consumption in agricultural screw conveyors. Rural Engineering. 2020;50(5):1–8. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190764>
12. Pezo M., Pezo L., Jovanovic A. P., Terzic A., Andric L., Loncar B., Kojic P. Discrete element model of particle and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018;336:255–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009>
13. Yang Z., Xiaoxia S., Wenjun M. Research on the axial velocity of the raw coal particles in vertical screw conveyor by using the discrete element method. Journal of Mechanical Science and Technology. 2021;35(6):2551–2560. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0526-z>
14. Sun L., Zhang X., Zeng Q., Gao K., Jiang K., Zhou J. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. Particology. 2022;61:91–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.001>
15. Сеидова И. А. Физико-механические свойства комбикорма и его основных компонентов. Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022;1(45):139–146. DOI: [https://doi.org/10.48136/2222-0364\\_2022\\_1\\_139](https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_1_139) EDN: SVBQGC
16. Ушаков Ю. А., Пушко В. А., Ягудин А. Р., Тимофеев А. О. Устройство объёмного дозирования сыпучих компонентов для производства комбикормов. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020;3(83):226–229. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43680090> EDN: RMYWFE
17. Буркина А. С. Совершенствование развития процесса дозирования комбикормов. Студенческие научные исследования: сб. ст. XVII Международн. научн.-практ. конф. Пенза: Наука и Просвещение, 2023. С. 76–78. Режим доступа: <https://elibrary.ru/mwuvxr> EDN: MWUVXR
18. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Сергеев А. Г., Савиных П. А. Результаты исследований весового дозирования ингредиентов комбикорма. Техника и оборудование для села. 2021;(1(283)):20–24. Режим доступа: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnal-a-besplatnyj-dostup/send/73-arkhiv-vypuskov-za-2021-god/1655-tekhnika-i-oborudovanie-dlya-sela-1-283-yanvar-2021>
19. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Пронин А. Н., Тареева О. А. Программа управления системой дозирования сухих сыпучих компонентов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023661766 Российская Федерация. № 2023619279; заявл. 15.05.2023; опубл. 01.06.2023. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54048560> EDN: GBEEPC
20. Зимин И. Б., Черепанов В. Н., Богатов Е. А., Смирнов А. В. Инновационная технология производства полнорационного комбикорма на промышленной основе в условиях крупных агропромышленных предприятий. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2021;(3(36)):50–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47152605> EDN: FQFFEF
21. Боровикова К. А., Лопаева Н. Л. Технология производства комбикормов. Молодежь и наука. 2023;5:30. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54283506> EDN: NLSGUY

#### References

1. Buyarov V. S., Buyarov A. V. Technological and economic aspects of the development of meat poultry. *Biologiya v sel'skom khozyaystve* = Biology in agriculture. 2022;(2(35)):7–12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48879096>
2. Kairov V. R., Gazzaeva M. S., Gattsiev M. A. Productivity and quality indicators of broiler chicken meat when feeding antioxidants as part of a diet. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of Gorsky State Agrarian University. 2020;57(1):68–73. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42572854>
3. Arzhankova Yu. V., Tomaeva O. N. The weight gain of broiler chickens when using domestic and imported compound feeds. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2022;(4(41)):10–20. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.56323/23088583\\_2022\\_04\\_10](https://doi.org/10.56323/23088583_2022_04_10)
4. Tomaeva O. N., Arzhankova Yu. V. Absolute growth of broiler chickens when using compound feeds of domestic and imported production. Scientific and practical progress in agricultural production: Collection of abstracts of the International Student Scientific and Practical Conference. *Velikolukskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya*. Velikie Luki, 2022. pp. 44–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50452794>
5. Burkina A. S. Technological solutions for the production of bulk feed. Science of the young is the future of Russia: collection. Collection of articles, V All-Russian scientific-practical conf. Penza: *Nauka i Prosveshchenie*, 2023. pp. 49–52. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53811442>
6. Chongchitpaisan P., Sudsawat S. A Review on Screw Conveyors for Bulk Materials in Various Applications. *Ladkrabang Engineering Journal*. 2022;39(2):1–12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/361655904>
7. Minglani D., Sharma A., Pandey H., Dayal R., Joshi J. B., Subramaniam S. A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Power Technology*. 2020;366:369–381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066>

8. Wagner R. Bulk Material Characteristics. Material Code. Conveyor Size and Speed. Component Groups. In Handbook of Screw Conveyor for Bulk Material, Naples, FL, USA: Conveyor Equipment Manufacture Association. 2019;2(3):28–34. URL: [https://books.google.ru/books/about/Screw\\_conveyors.html?hl=ru&id=8dlSAAAAAAAJ](https://books.google.ru/books/about/Screw_conveyors.html?hl=ru&id=8dlSAAAAAAAJ)
9. Hevko R., Rohatynskiy R., Hevko M., Lyashuk O., Trokhaniak O. Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials. Research in Agricultural Engineering. 2020;66(1):18–26. DOI: <https://doi.org/10.17221/25/2019-RAE>
10. Olanrewaju T. O., Jeremiah I. M., Onyeonula P. E. Design and fabrication of a screw conveyor. Agricultural Engineering International. 2017;19(3):156–162. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4097>
11. Ozbek O. Fuzzy modeling of volumetric efficiency and specific energy consumption in agricultural screw conveyors. Rural Engineering. 2020;50(5):1–8. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190764>
12. Pezo M., Pezo L., Jovanovic A. P., Terzic A., Andric L., Loncar B., Kojic P. Discrete element model of particle and premixing action in modified screw conveyors. Powder Technology. 2018;336:255–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.009>
13. Yang Z., Xiaoxia S., Wenjun M. Research on the axial velocity of the raw coal particles in vertical screw conveyor by using the discrete element method. Journal of Mechanical Science and Technology. 2021;35(6):2551–2560. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0526-z>
14. Sun L., Zhang X., Zeng Q., Gao K., Jiang K., Zhou J. Application of a screw conveyor with axial tilt blades on a shearer drum and investigation of conveying performance based on DEM. Particology. 2022;61:91–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.001>
15. Seidova I. A. Physico-mechanical properties of compound feed and its main components. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Omsk SAU. 2022;1(45):139–146. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.48136/2222-0364\\_2022\\_1\\_139](https://doi.org/10.48136/2222-0364_2022_1_139)
16. Ushakov Yu. A., Pushko V. A., Yagudin A. R., Timofeev A. O. The device for volumetric dosing of bulk components for mixed feeds production. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020;3(83):226–229. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43680090>
17. Burkina A. S. Improving the development of the process of dosing compound feeds. Student scientific research: collection of articles, XVII International scientific-practical conf. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2023. pp. 76–78. URL: <https://elibrary.ru/mwuvxr>
18. Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Sergeev A. G., Savinykh P. A. Results of research of weight batching of feed compound ingredients. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2021;(1(283)):20–24. (In Russ.). URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/tos/arkhiv-zhurnala-besplatnyj-dostup/send/73-arkhiv-vypuskov-za-2021-god/1655-tehnika-i-oborudovanie-dlya-sela-1-283-yanvar-2021>
19. Bulatov S. Yu., Nechaev V. N., Pronin A. N., Tareeva O. A. Control program for the dosing system of dry bulk components: Certificate of registration of a computer program RF No. 2023661766. 2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54048560>
20. Zimin I. B., Cherepanov V. N., Bogatov E. A., Smirnov A. V. Innovative technology for the complete feed production on an industrial basis in large agro-industrial enterprises. Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2021;(3(36)):50–58. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47152605>
21. Borovikova K. A., Lopaeva N. L. Technology of compound feed production. Molodezh' i nauka = Youth and science. 2023;5:30. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54283506>

#### Сведения об авторах

✉ Булатов Сергей Юрьевич, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Технический сервис», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, д. 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: [ngiei-126@mail.ru](mailto:ngiei-126@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, e-mail: [bulatov\\_sergey\\_urevich@mail.ru](mailto:bulatov_sergey_urevich@mail.ru)

Пронин Алексей Николаевич, аспирант, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ул. Октябрьская, д. 22, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация, 606340, e-mail: [ngiei-126@mail.ru](mailto:ngiei-126@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2410-3382>

#### Information about the authors

✉ Sergey Yu. Bulatov, DSc in Engineering, associate professor, professor at the Department of Technical Service, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 606340, e-mail: [ngiei-126@mail.ru](mailto:ngiei-126@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9099-0447>, e-mail: [bulatov\\_sergey\\_urevich@mail.ru](mailto:bulatov_sergey_urevich@mail.ru)

Alexey N. Pronin, postgraduate student, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktyabrskaya str., 22, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, Russian Federation, 606340, e-mail: [ngiei-126@mail.ru](mailto:ngiei-126@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2410-3382>

✉ – Для контактов / Corresponding author