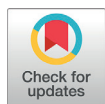


**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>EDN: <https://elibrary.ru/xddvim>

УДК / UDK 62:63

*Оригинальная статья / Original article***Технико-экономическое обоснование применения
аддитивных технологий при восстановлении
сельскохозяйственной техники****П. В. Сенин, М. Н. Чаткин, Е. А. Кильмьяшкин** *Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Российская Федерация* 40252@mail.ru*Аннотация*

Введение. Современная сельскохозяйственная техника состоит из многочисленных узлов, включающих в себя большое количество металлических и полимерных деталей. Выход из строя таких деталей приводит к неработоспособности узлов и простою машины. Существующие технологии ремонта утративших работоспособность деталей специализируются на изделиях из металла. Полимерные элементы конструкций восстановлению не подлежат и требуют замены. Данную проблему способно решить штучное производство таких деталей на местах с применением аддитивных технологий.

Цель исследования. Оценить эффективность аддитивного производства при ремонте сельскохозяйственной техники в агропромышленном комплексе.

Материалы и методы. Проводилась исследовательская работа на базе лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рапид-Про» Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Выполнялся ремонт электрического линейного привода подбарабана зерноуборочного комбайна John Deere методом 3D-печати. По предлагаемой методике проанализирована экономическая эффективность применения аддитивных технологий для производства деталей, утративших работоспособность при ремонте техники.

Результаты исследования. На основании проведенных работ была оценена эффективность восстановления полимерных элементов: стоимость ремонта линейного привода ниже стоимости новой детали. Традиционная технология изготовления в ремонте привода по сравнению с новой деталью дешевле в 7,6 раз, а аддитивная – в 23 раза.

Обсуждение и заключение. Сравнительная оценка экономической целесообразности ремонта традиционными и аддитивными технологиями показала, что при изготовлении детали на 3D-принтере ее цена в 3 раза меньше, чем при использовании фрезерования. Обработка резанием обходится дороже, так как требует дополнительной оснастки и определенного спектра оборудования. Применение аддитивного производства существенно снижает стоимость ремонта и значительно сокращает убытки от простоя техники. Современные аддитивные технологии обладают значительным потенциалом и могут широко использоваться в ремонтном производстве.

© Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмьяшкин Е. А., 2025

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

Ключевые слова: 3D-печать, традиционная технология, полимер, аддитивная технология, литье

Благодарности: авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли определенный вклад в исследование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмьяшкин Е.А. Технико-экономическое обоснование применения аддитивных технологий при восстановлении сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery

P. V. Senin, M. N. Chatkin, E. A. Kilmyashkin 

*National Research Mordovia State University,
Saransk, Russian Federation*

 40252@mail.ru

Abstract

Introduction. The complex design of modern agricultural machinery consists of numerous units having a large number of metal and polymer parts. Failure of these parts often leads to inoperability of the units and, as a rule, machine downtime. Existing technologies for repairing failed parts are based on the use of metal parts, while polymer structural parts cannot be restored and must be replaced. This problem can be solved through piece production of parts on-site using additive technologies.

Aim of the Study. The study is aimed at evaluating the efficiency of additive manufacturing in repairing agricultural machinery in the agro-industrial complex to reduce the time and cost of services.

Materials and Methods. The study was carried out on the basis of the Design and Rapid Prototyping laboratory of the Institute of Mechanics and Power Energy of the National Research Mordovia State University. The electric linear concave drive of the John Deer combine harvester was repaired using 3D-printing. According to the proposed methodology, there has been analyzed the economic efficiency of using additive technologies to produce failed parts during the repair of machinery.

Results. Based on the work carried out, the cost efficiency of restoring polymer elements was assessed. The cost of repairing a linear drive is lower than the cost of a new one. The traditional manufacturing technology used for repairing the drive is 7.6 times cheaper than buying the new part, and the additive technology is 23 times cheaper.

Discussion and Conclusion. A comparative assessment of the economic feasibility of repairing with the use of traditional and additive technologies has shown that the price of manufacturing a part on a 3D-printer is three times cheaper than when milling. Machining is more expensive because it requires additional equipment of a certain range. The use of additive technologies for manufacturing significantly reduces the repair cost and losses from equipment downtime. The study has shown that modern additive technologies have significant potential and can be widely used for repairing agricultural machinery.

Keywords: 3D-printing, traditional technology, polymer, additive technology, casting

Acknowledgments: The authors would like to acknowledge the third-party participants who contributed to the study.

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

For citation: Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Feasibility Study of Additive Technologies Application in Restoring Agricultural Machinery. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):770–785. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.770-785>

ВВЕДЕНИЕ

Частыми причинами отказа сельскохозяйственных машин являются заводской брак, неправильная эксплуатация, несвоевременное и некачественное техническое обслуживание и т. д. Особенно неблагоприятная ситуация складывается при внезапном выходе машин из строя. Таким образом, проблема восстановления работоспособности машин является актуальной.

Простой машины при внезапном отказе приводит к существенным материальным потерям в хозяйстве, поэтому сроки ремонта должны быть минимальны. Если имеются в наличии запасные части, которые могут заменить вышедшие из строя, то время ремонта сокращается. Однако в современных реалиях это не всегда так – запасные части приобретаются у сторонних поставщиков, у которых они не всегда есть в наличии, что приводит к увеличению сроков закупки. В некоторых случаях прибегают к оперативному ремонту или изготовлению новых деталей, используя свою или стороннюю ремонтную базу. Это целесообразно в случае простоты деталей, несложности их геометрии. Иначе стоимость запчастей, изготавливаемых по традиционным технологиям, оказывается высокой, а время работ – длительным.

Традиционные технологии подразумевают процесс изготовления будущей детали методом литья,ковки,штамповки,металлообработки и т. д. Насыщенность ремонтных предприятий металлообрабатывающим оборудованием позволяет решать многие стандартные задачи. Однако при возникновении потребности в производстве изделий сложной геометрической формы с высокими требованиями к точности, могут возникнуть трудности – потребуется дорогостоящее оборудование с широкой номенклатурой, а также высококвалифицированные специалисты для ее обслуживания. Не все мелкие ремонтные предприятия способны решать такие задачи, так как в основном они не имеют большого потока эксклюзивных заказов, что делает нецелесообразным глубокую модернизацию производства.

Решение части нестандартных задач видится в использовании инновационных технологий цифрового производства. С их помощью создаются трехмерные объекты методом послойного наращивания. Здесь в качестве материала детали используется мелкодисперсный порошок, листовый материал, для изготовления которых применяются различные металлы и полимеры. В качестве оборудования используется 3D-принтер. На основании данных CAD-модели происходит распределение материала на поверхности, где посредством различных технологий спекания или расплавления он принимает форму будущей детали.

Применение аддитивных технологий существенно расширяет спектр решаемых задач в производстве, поскольку отсутствуют ограничения в форме и точности производимых изделий, необходимость содержать большой парк станочного оборудования и специалистов, работающих на нем. Стоимость производства напрямую зависит от технологии 3D-печати: печать металлами дорогостоящая, в то время как печать с применением полимерных материалов имеет невысокую стоимость. В связи с этим принтеры, использующие технологии печати полимерными материалами, способны решать многие задачи в ремонтном производстве и при этом быть доступными даже для небольших предприятий.

В статье проведен анализ аддитивных технологий, основанных на применении полимерных материалов как наиболее доступных на сегодняшний день.

Целью исследования является анализ эффективности применения аддитивных технологий для восстановления изношенных или поврежденных деталей сельхозмашин.

Задачи исследования:

- 1) оценить последствия простоя сельскохозяйственной техники при внеплановом ремонте;
- 2) изучить номенклатуру полимерных деталей, входящих в состав современной техники;
- 3) проанализировать существующие технологии производства неметаллических изделий с оценкой их стоимости и возможности применения в ремонтном производстве;
- 4) провести сравнительный анализ технологий традиционного и аддитивного производства;
- 5) оценить целесообразность применения аддитивных технологий в ремонте сельскохозяйственной техники.

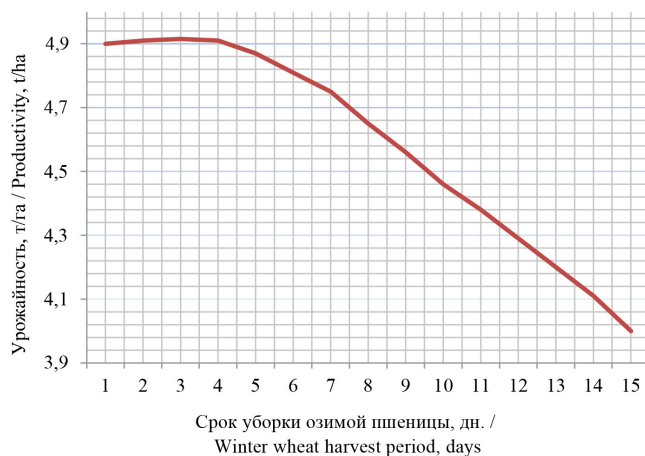
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При возникновении отказов техники главной задачей является введение ее в эксплуатацию в кратчайшие сроки. При этом необходимо подойти к решению возникшей проблемы, руководствуясь различными факторами: стоимостью ремонта, сроками его проведения и др. Отсутствие вышедшей из строя детали на складе предприятия приводит к необходимости заказа новой детали или ее восстановления. Время ожидания новой детали может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев, если это техника зарубежного производителя. Однако даже высокая стоимость новой детали становится незначительной причиной по отношению к убыткам, которые несет предприятие от простоя неисправной техники. Примером такого положения может быть выход из строя комбайна для уборки зерновых. При возделывании зерновых культур очень важным фактором урожайности является своевременная уборка. Чем позже производится сбор урожая, тем ниже урожайность (рис. 1) [1]. Чем дольше комбайн простаивает в период уборки, тем больше потери зерновых. Такая тенденция прослеживается не только при выполнении уборочных работ, но и на фермах – несвоевременное кормление крупнорогатого скота уменьшает удои до 5 %¹.

Решение проблемы восстановления работоспособности техники видится в ремонте изношенных ремонтпригодных деталей, что в некоторых случаях должно сократить сроки простоя. Как показывает практика, ремонтные детали для потребителя по стоимости практически в два раза дешевле новых [2–4]. При этом ремонтная продукция не утрачивает своих свойств. Однако, проанализировав востребованности рынком ремонтных деталей, можно заключить, что

¹ Федоренко В.Ф., Голубев И.Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. М.: ФГБНУ «Росинформагротех»; 2018. 140 с.

при восстановлении работоспособности машин используется свыше 80 % новых деталей [5–7] (табл.), поэтому проблемы сокращения простоя и снижения стоимости ремонта не решены.



Р и с. 1. Зависимость урожайности озимой пшеницы от срока уборки

Fig. 1. Dependence of winter wheat yield on harvesting time

Источник: составлено по материалам [1].

Source: compiled from the materials [1].

Т а б л и ц а

Table

Уровень использования новых и восстановленных деталей при ремонте

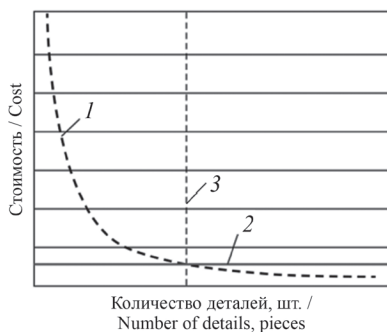
The level of using new and restored parts during repairs

Название агрегата / Name of the unit	Детали всех категорий на агрегат / Details of all categories for the unit		Число деталей нагруженных, дефицитных, дорогостоящих на агрегат, ед. / Number of parts loaded, scarce, expensive per unit, units	Из них на агрегат, % / Of which per unit, %			
	Среднее число, ед. / Average number, unit	Среднее число наименований, ед. / Average number of items, unit		Восстановленных / Restored	Годных / Good enough	Покупных / Purchased	Бракованных / Defective
Трактора / Tractors	7 850	2 400	1 900	3	35	54	3,0
Автомобили / Cars	6 200	2 050	1 200	7	5	37	2,5
Комбайны / Combine har- vester	5 100	2 050	1 200	1	38	52	3,0
Сельскохозяйственные аг- регаты / Agricultural units	350	160	170	5	39	53	3,0

Отдельного внимания заслуживает группа деталей в конструкциях современной сельскохозяйственной техники, изготовленная из полимерных материалов². Содержание пластика уже достигло среднего уровня около 15 % от собственной массы машины [8–10]. Разнообразие деталей из пластмасс в составе современных машин очень велико, что, в свою очередь, приводит к более 5 % их поломок из общего количества отказов [11]. В большинстве случаев такие детали не являются ремонтпригодными и требуют замены. Детали из пластика могут закупаться отдельно, но ввиду низкой стоимости продавцы отказываются поставлять их в единичном количестве. В сложившейся ситуации приходится закупать не одну деталь, а всю партию или приобретать полностью узел, в который входит деталь.

Производство изделий из пластмасс основано на применении различных традиционных технологий, таких как литье под давлением, прессование, экструзия, пневмоформование, свободное литье, механическая обработка и др. Все эти технологии, как правило, не распространены на ремонтных предприятиях по причине нерентабельности производства из-за высокой стоимости оборудования и оснастки, а также отсутствия серийности производства [12–14], что делает невозможным изготовление таких деталей на местах. Решение данной проблемы видится в применении аддитивных технологий.

Количество изделий, произведенных с применением аддитивных технологий, не имеет четкой зависимости от конечной стоимости. На графике точка рентабельности находится на пересечении кривых (рис. 2) [15].



Р и с. 2. Цена изделия в зависимости от применяемой технологии:

1 – традиционная технология; 2 – аддитивная технология;

3 – рентабельность аддитивного производства

F i g. 2. The price of the product depends on the technology used:

1 – traditional technology; 2 – additive technology; 3 – profitability of additive manufacturing

Источник: составлено по материалам [15].

Source: compiled from the materials [15].

Проанализировав график, можно заключить, что и традиционные и аддитивные технологии могут дополнять друг друга в ремонтном производстве. Использование традиционных методов производства целесообразно при изготовлении изделий

² Дорохов А.С., Свиридов А.С. Перспективы применения полимеров в деталях сельскохозяйственных машин. В: Сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф. «Горячкинские чтения», посвящ. 150-летию д-ра академика В. П. Горячкина (18 апреля 2018 г., г. Москва). М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева; 2019. С. 273–277. <https://www.elibrary.ru/xpncde>

большими партиями, тогда как аддитивные технологии более рентабельны при штучном производстве [16; 17].

Проблема реновации вышедшей из строя техники остается актуальной: простой техники во время ремонта нарушает технологический процесс производства и приводит к убыткам сельскохозяйственного производителя. В связи с этим существует необходимость в разработке и внедрении новых нетрадиционных технологий производства и ремонта [18; 19].

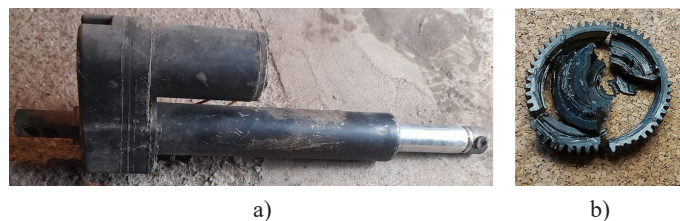
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В настоящее время в направлении развития аддитивных технологий прослеживается определенная тенденция, появляются различные консалтинговые организации, предлагающие услуги в области аддитивного производства, что позволяет сельхозпроизводителям с небольшими ремонтными базами не приобретать дополнительное оборудование. Такие услуги можно получить на стороне, например в лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рapid-Про» на базе Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Основная задача лаборатории – разработка и реализация полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати и вакуумного литья в силиконовые формы.

Для оценки возможности и целесообразности использования в ремонте сельскохозяйственной техники аддитивных технологий проведена исследовательская работа.

Первым этапом работы был выбор объекта для ремонта. Оснащение лаборатории 3D-принтерами позволяет производить печать по SLS и FDM-технологиям, т. е. полимерными материалами. Требования к объекту: частота выхода из строя, возможность применения доступных нам аддитивных технологий, ремонтпригодность, стоимость и др. Выбор пал на электрический линейный привод подбарабана зерноуборочного комбайна John Deer (рис. 3). Поломка данного узла препятствует дальнейшей эксплуатации машины, поэтому необходимо в кратчайшие сроки произвести ремонт привода или заменить его новым.



Р и с. 3. Объект исследования:

- a) электрический линейный привод подбарабана зерноуборочного комбайна;
b) разрушенное зубчатое колесо привода

F i g. 3. The study object:

- a) electric linear drive of the grain harvester concave; b) broken drive gear

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильмашкиным при дефектовке узла в ООО «Магма ХД» (раб. пос. Чамзинка, Республика Мордовия, 2023 г.).

Source: photographs are taken by the author E. A. Kilmyashkin during the defect identification of a unit at “Magma HD” (workers’ settlement Chamzinka, Republic of Mordovia, 2023).

Проведен сравнительный анализ стоимости ремонта с применением аддитивных и традиционных технологий.

Методы и процедура исследования

Потребители при закупке запасных частей ориентируются прежде всего на невысокую стоимость и короткий срок изготовления. Однако часто деталь получается приобрести быстрее за более высокую цену.

Существуют различные методики оценки экономической эффективности применения аддитивных технологий для производства деталей утративших работоспособность при ремонте техники³.

Алгоритм принятия решений:

1) пригодность аддитивных технологий в реализации производства определенных запасных частей;

2) определение технологии аддитивного производства, позволяющей получить детали требуемого качества в сравнении с деталями, произведенными традиционным способом;

3) оценка рынка услуг аддитивного производства и выбор конкретного изготовителя;

4) определение затрат, связанных с простоем вышедшей из строя техники с учетом логистики и времени доставки деталей произведенных с применением аддитивных технологий или традиционным способом;

5) сравнение стоимости деталей, произведенных с помощью традиционных технологий и аддитивных.

Выполнение условий подтверждает рентабельность использования аддитивных технологий:

$$Z_{\text{ПАТ}} < Z_{\text{РТ}},$$

где $Z_{\text{ПАТ}}$ – общие затраты, включающие в себя расходы на ремонтные работы по замене детали, изготовленной с применением технологии аддитивного производства (АТ); $Z_{\text{РТ}}$ – общие затраты, включающие в себя расходы на ремонтные работы по замене детали, изготовленной традиционным методом (Т).

$$Z_{\text{ПАТ}} = C_{\text{АТ}} + D_{\text{АТ}(t)} t_{\text{ДАТ}} + \Pi_{(t)}(t_{\text{ПАТ}} + t_{\text{ИАТ}} + t_{\text{ДАТ}}) + P;$$

$$Z_{\text{РТ}} = C_{\text{Т}} + D_{\text{Т}(t)} t_{\text{ДТ}} + \Pi_{(t)}(t_{\text{РТ}} + t_{\text{ИТ}} + t_{\text{ДТ}}) + P,$$

где $C_{\text{АТ}}$, $C_{\text{Т}}$ – рыночная стоимость; $D_{\text{АТ}(t)}$, $D_{\text{Т}(t)}$ – логистические расходы по времени; $\Pi_{(t)}$ – упущенная прибыль от простоя; $t_{\text{ПАТ}}$, $t_{\text{РТ}}$ – время, необходимое для ремонта; $t_{\text{ИАТ}}$, $t_{\text{ИТ}}$ – требуемое время на изготовление; $t_{\text{ДАТ}}$, $t_{\text{ДТ}}$ – требуемое время на логистику; P – расходы на замену детали.

В случае невозможности приобретения новой детали отдельно ввиду ее реализации исключительно в составе узла и, как следствие, высокой стоимости, целесообразно рассмотреть альтернативные варианты, включая использование деталей, произведенных с применением аддитивных технологий. Данные технологии

³ Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В., Филимонов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт; 2024. 145 с.

позволяют изготавливать изделия по индивидуальному заказу в единичном или мелкосерийном производстве. При этом, если сроки поставки новых деталей невелики, то решение о закупке запасных частей, произведенных с применением аддитивных технологий, будет зависеть от выполнения следующего условия:

$$C_{\text{ТС}} > C_{\text{АТ}},$$

где $C_{\text{ТС}}$ – стоимость узла, в состав которого входит Т-деталь.

В случае производства деталей с помощью традиционных технологий существенно увеличивается как время изготовления, так и сроки простоя техники. Тогда $\Pi_{(i)}$ имеет большое значение, а возможность использования аддитивных технологий будет связана с выполнением неравенства:

$$t_{\text{ПТ}} > t_{\text{ПАТ}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{ПАТ}}$, $t_{\text{ПТ}}$ – время на поставку запчастей.

$$t_{\text{ПАТ}} = t_{\text{ИАТ}} + t_{\text{ДАТ}} \text{ и } t_{\text{ПТ}} = t_{\text{ИТ}} + t_{\text{ДТ}}.$$

При выполнении условия (1) получим: $t_{\text{ИТ}} < t_{\text{ИАТ}}$ и $t_{\text{ДТ}} > t_{\text{ДАТ}}$. Из этих соотношений можно заключить, что в большинстве случаев на производство с применением аддитивных технологий требуется меньше времени, чем при использовании традиционных методов, особенно для изготовления малых серий. В то же время удаленность крупных предприятий от сельхозпроизводителей существенно увеличивает сроки поставок, а неразвитая логистическая сеть еще больше усугубляет проблему.

Выполнение неравенства (1) доказывает, что убытки из-за простоя в связи с большими сроками поставки деталей, произведенных традиционными технологиями, оказываются настолько значительными, что затраты на закупку деталей, изготовленных с применением аддитивных технологий, становятся незначительными, так как сроки изготовления и поставки уменьшаются, следовательно, уменьшается и простой техники.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Часто причиной выхода из строя электрического линейного привода подбарабана зерноуборочного комбайна John Deere является поломка редуктора, срез зубьев и разрушение зубчатых колес. Редукторы приводов в зависимости от производителя имеют в своем составе полимерные детали. Зубчатые колеса и шестерни к такому рода механизмам в продаже не найти. Цена нового изделия у поставщиков начинается от 73 тыс. руб. (без учета расходов по монтажу узла на комбайн и его простоя).

Произвести ремонт узла можно с помощью традиционной технологии резания или с применением 3D-печати. Материалом колес зубчатой передачи является нейлон. Имеющиеся в лаборатории 3D-принтеры позволяют работать с данным материалом.

Общая стоимость ремонта узла:

$$C = C_{\text{М}} + A + \text{ЗП} + C_{\text{ЭЛ}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{М}}$ – стоимость материалов, руб.; A – амортизационные отчисления, руб.; ЗП – заработная плата рабочих с отчислениями на страховые взносы, руб.; $C_{\text{ЭЛ}}$ – расходы на электроэнергию, руб.

Расчет стоимости ремонта традиционным способом

Существует два способа изготовления пластикового зубчатого колеса – литье и резание. Первый способ предположительно не применим в условиях небольшого ремонтного производства, поскольку требует специальной оснастки. Поэтому будем рассматривать технологию резанием модульными фрезами с помощью фрезерного обрабатывающего центра.

Одной из составляющих заработной платы является тарифная ставка оператора станка, установленная в размере 650 руб./ч. Примерное время производства зубчатого колеса – четыре часа. Без дополнительных отчислений заработная плата на изготовление зубчатого колеса оператора составит:

$$ЗП_0 = 4 \cdot 650 = 2\,600 \text{ руб.}$$

Отчисления на страховые взносы:

$$H_{CB} = \frac{H_{CO} \cdot ЗП_0}{100} = \frac{30 \cdot 2\,600}{100} = 780 \text{ руб.,}$$

где $H_{CO} = 30\%$ – страховых отчислений в Российской Федерации.

Суммарные расходы на заработную плату:

$$ЗП = H_{CB} + ЗП_0 = 780 + 2\,600 = 3\,380 \text{ руб.}$$

Под стоимостью материалов подразумевается как совокупная стоимость инструмента с оснасткой, так и стоимость расходных материалов. В нашем случае расходным материалом является нейлон стоимостью 75 руб. Заготовка и инструмент имеют стоимость 5 700 руб.:

$$C_M = 5\,700 + 75 = 5\,775 \text{ руб.}$$

Отчисления на амортизацию используемого в производстве оборудования рассчитываются из стоимости одного часа работы:

$$A_q = \frac{C_{\text{пер.}}}{t_{\text{см}} n_{\text{см}} \cdot T_{\text{исп}}} = \frac{750\,000}{8 \cdot 250 \cdot 10} = 37,5 \text{ руб./ч,}$$

где $C_{\text{пер.}} = 750\,000$ руб. – балансная цена фрезерного станка; $T_{\text{исп}} = 10$ лет – предполагаемый срок использования оборудования; $t_{\text{см}} = 8$ ч – продолжительность рабочей смены; $n_{\text{см}} = 250$ шт. – число смен в году.

Стоимость электроэнергии, израсходованной за время изготовления колеса:

$$C_{\text{эл}} = T_{\text{эл}} \cdot t_{\text{тех}} \cdot W = 10,7 \cdot 4 \cdot 0,5 = 21,4 \text{ руб.,}$$

где $T_{\text{эл}} = 10,7$ руб./кВт · ч – стоимость кВт · ч.; $t_{\text{тех}} = 4$ ч – суммарное время, затраченное на изготовление зубчатого колеса; $W = 0,5$ кВт/ч – усредненное значение потребляющей мощности станком (MonoFab SRM-20).

Суммарные отчисления на амортизацию оборудования при изготовлении детали:

$$A = t_{\text{тех}} \cdot A_q = 4 \cdot 37,5 = 150 \text{ руб.}$$

Использование фрезерного станка с числовым программным управлением, требует учета текущих расходов на подготовку САМ-файла конструктором, средняя часовая оплата которого составляет 490 руб./ч, примерное время создание файла – 2 ч. Далее по формуле (2) определим общие расходы производственного процесса:

$$C = 150 + 5\,775 + 21,4 + 2\,600 + 490 \cdot 2 = 9\,526,4 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости ремонта методом печати на 3D-принтере

Для изготовления зубчатого колеса необходима услуга конструктора, почасовая оплата которого приведена выше. В рассматриваемом случае разрабатываемая им цифровая модель детали одинаково подходит для обеих технологий изготовления. Величина оплаты оператора 3D-принтера – 370 руб./ч. Примерное время печати детали – 2 ч. Время напрямую зависит от размера и требуемого качества распечатки детали, подготовительных операций, последующей постобработки. Затраты на зарплату без страховых взносов:

$$ЗП_0 = 490 \cdot 2 + 370 \cdot 2,5 \text{ ч} = 1\,905 \text{ руб.}$$

Страховые взносы составят:

$$Н_{св} = \frac{1905 \cdot 30}{100} = 571,5 \text{ руб.}$$

Совокупные расходы на заработную плату:

$$ЗП = 571,5 + 1\,905 = 2\,476,5 \text{ руб.}$$

В стоимость материалов не входят дополнительные расходы на инструмент и оснастку. Предполагаемый вес зубчатого колеса составит 140 г. Средняя стоимость нейлонового филамента для 3D-печати – 3 576 руб./кг:

$$C_M = 3\,576 \cdot 0,14 = 500,64 \text{ руб.}$$

Амортизационные начисления, приходящиеся на один час работы указанного 3D-принтера:

$$A_q = \frac{C_{\text{перв.}}}{T_{\text{исп.}} \cdot t_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}}} = \frac{597\,000}{10 \cdot 8 \cdot 250} = 29,85 \text{ руб. / ч,}$$

где $C_{\text{перв.}} = 597\,000$ руб. – балансовая цена 3D-принтера.

Тогда амортизационные отчисления на изготовление шестерни составят:

$$A = t_{\text{ТЕХ}} \cdot A_q = 3 \cdot 29,85 = 89,55 \text{ руб.,}$$

где $t_{\text{тех}} = 3$ ч – суммарное время, затраченное на изготовление зубчатого колеса.

Стоимость израсходованной электрической энергии составит

$$C_{\text{эл}} = T_{\text{эл}} \cdot t_{\text{тех}} \cdot W = 10,7 \cdot 3 \cdot 0,6 = 19,26 \text{ руб.,}$$

$W = 0,6$ кВт/ч – усредненное значение потребляющей мощности принтером (принята мощность 3D-принтер Raise Pro2 Plus).

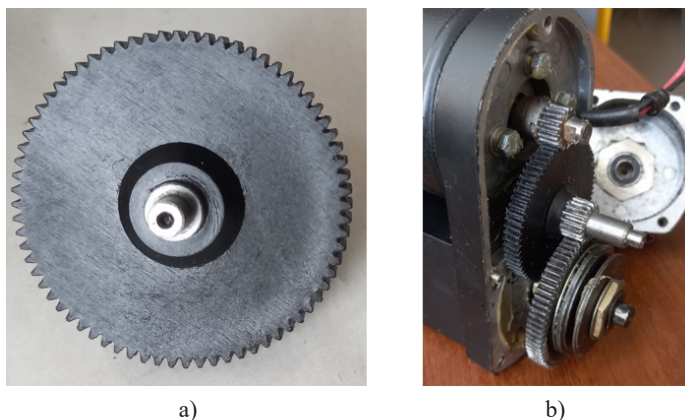
Следовательно, по формуле (2) находим общий объем затрат на изготовление шестерни с помощью 3D-печати из нейлона:

$$C = 19,26 + 89,55 + 500,64 + 2\,476,5 = 3\,085,95 \text{ руб.}$$

Целесообразность ремонта

Сопоставив полученные данные по стоимости ремонта линейного привода, можно заключить, что расходы выше при применении традиционной технологии, по сравнению с аддитивной. При этом расходы на ремонт традиционным методом и технологией 3D-печати меньше покупки новой детали в среднем в 7,6 и в 23 раза соответственно. В данном случае обе технологии ремонта целесообразны. Однако при восстановлении узлов, в состав которых входят детали сложной геометрической формы, применение традиционных технологий значительно дороже, поскольку требуется совершение дополнительных операций по обработке и дополнительное оборудование. Например, фрезерным станком невозможно изготовить шпоночный паз в ступице зубчатого колеса. Применение аддитивных технологий таких ограничений не имеет.

Проведя работы по восстановлению линейного электрического привода, спроектировали и распечатали на 3D-FDM-принтере зубчатое колесо с последующей запрессовкой металлической оси в ступицу и сборкой узла (рис. 4). Для печати использовался черный нейлоновый филамент диаметром 1,75 мм.



Р и с. 4. Восстановленный привод:
а) зубчатое колесо, произведенное методом 3D-печати; б) редуктор привода в сборе

F i g. 4. Restored drive:
a) gear wheel produced using 3D printing; b) a drive gearbox assembly

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильяшкиным при испытаниях метода аддитивного производства в лаборатории проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2024 г.).

Source: photographs are taken by the author E. A. Kilmyashkin during testing of the additive manufacturing method in the design and rapid prototyping laboratory “Rapid Pro” (2024).

Полимерные детали в конструкциях современной техники не подлежат ремонту и, как правило, требуют замены на новые. Однако, если они входят в состав узлов, то зачастую не могут быть заменены ввиду отсутствия их в продаже у поставщиков, что приводит к покупке узла целиком. Таким образом, существенно увеличивается стоимость ремонта машины. Время ожидания поставок новых деталей может быть существенным.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами статьи проведена сравнительная оценка экономической целесообразности ремонта традиционными и аддитивными методами. Результаты исследования показали, что использование аддитивных технологий значительно сокращает финансовые расходы на производство. Это связано с отсутствием потребности в специальной оснастке, необходимой на каждый вид деталей, режущего инструмента, а также его систематической заточки. Применение такой технологии сокращает время производства, особенно при широкой номенклатуре выпускаемых изделий.

Аддитивные технологии с применением полимерных материалов получили довольно широкое распространение благодаря своей низкой себестоимости. Совершенствование технологии позволяет охватывать все большую номенклатуру полимеров и получать изделия с различными требуемыми характеристиками. Такая технология 3D-печати становится пригодна не только для создания прототипов, но и функциональных изделий.

Организаций, предлагающих услуги аддитивного производства, становится больше и, как правило, они стараются локализоваться ближе к потребителям, в том числе предприятиям сельхозпроизводства, что упрощает логистическую составляющую. Оборудование, которым сейчас располагает аддитивное производство, имеет возможность распечатывать объекты больших размеров, что позволяет производить широкий спектр востребованных деталей. Таким образом, можно однозначно утверждать, что современные аддитивные технологии имеют право на существование и должны широко использоваться в ремонтном производстве.

Исследование, проведенное в данной статье, носит важный характер в вопросе реновации техники в агропромышленном комплексе. Оно помогает определять эффективность подходов в ремонте машин и целесообразность применяемых методов производства изделий из пластика, на примере технологий аддитивного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова Ю.А., Денисов В.А. Анализ отказов полимерных деталей сельскохозяйственной техники. *Технический сервис машин*. 2021;3:146–154. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
2. Некраш М.Ю. Учет потерь от неплановых отказов кормоуборочной техники. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2004;(76):48–54. <https://www.elibrary.ru/thypgd>
3. Конкин М.Ю. Утилизация как завершающая стадия жизненного цикла машины. *Международный научный журнал*. 2011;(5):107–110. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (дата обращения: 15.02.2025).
4. Лесконог Ю.А. Обоснование утилизации сельскохозяйственной техники. *Международный научный журнал*. 2011;(5):115–118. URL: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (дата обращения: 15.02.2025).
5. Игнатов В.И., Герасимов В.С., Мишина З.Н., Богатова Н.О. Пути совершенствования инженерной системы АПК по техническому обслуживанию сельскохозяйственной техники. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2018;(3):67–70 <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/67-70>
6. Корнейчук Н.И., Лялякин В.П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями

- в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса. *Труды ГОСНИТИ*. 2018;130:254–264. URL: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (дата обращения: 17.02.2025).
7. Никитченко С.Л., Воронов Е.В. Причины факторы снижения эксплуатационной надежности сельскохозяйственной техники. *Вестник НГИЭИ*. 2020;(2):56–65. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825 (дата обращения: 17.02.2025).
 8. Izmailov A.Yu., Moskovskiy M.N., Podlesniy D.S. Development of a Set of Working Units From Polymeric Materials for the Design of Combine Harvesters. In: MATEC Web of Conferences. 2018. Article no. 05010. URL: <https://clck.ru/3QHrFY> (дата обращения: 20.02.2025).
 9. Лунин А.С. Полимерные композиционные материалы группы Полипластик в современном автомобилестроении: история и развитие. *Пластические массы*. 2011;(8):28–38. <https://www.elibrary.ru/ogabjj>
 10. Петров Р.И. О мировом опыте организации национальных систем авторециклинга. *Рециклинг отходов*. 2008;(5):2–11.
 11. Журавлев С.Ю. Совершенствование методов и технологий технического сервиса сельскохозяйственной техники. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2025;(3):72–80. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-245-3-72-80>
 12. Нефёлов И.С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2018;(11):15–17. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
 13. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): a Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;(143):172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
 14. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: the Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
 15. Katkar R.A., Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
 16. Namiki M., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y.R. Matsuzaki 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Plastic. In: Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering. Seattle; 2014. P. 6. URL: https://www.researchgate.net/publication/286005621_3D_printing_of_continuous_fiber_reinforced_plastic (дата обращения: 17.02.2025).
 17. Голубев И.Г., Спицин И.А., Быков В.В., Голубев М.И. Перспективы применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники. *Труды ГОСНИТИ*. 2018;130:214–219. URL: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (дата обращения: 17.02.2025).
 18. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмашкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(4):584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
 19. Овчинников В.А., Кильмашкин Е.А., Князьков А.С., Овчинникова А.В., Жалнин Н.А., Зыкин Е.С. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования. *Инженерные технологии и системы*. 2022;32(2):222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

REFERENCES

1. Goncharova Yu.A., Denisov V.A. Failures of Polymer Parts of Agricultural Machinery. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2021;3:146–154. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-3-146-154>
2. Nekrash M.Yu. [Accounting for Losses from Unplanned Failures of Forage Harvesting Equipment]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2004;(76):48–54. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/thypgd>
3. Konkina M.Yu. Disposing as Final Phase of Machine Life Cycle. *International Scientific Journal*. 2011;(5):107–110. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (accessed 15.02.2025).

4. Leskonog Yu.A. Grounds for Farm Machinery Disposal. *International Scientific Journal*. 2011;(5):115–118. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.mmegapolis.ru/2011-g/24-vypusk-5.html> (accessed 15.02.2025).
5. Ignatov V.I., Gerasimov V.S., Mishina Z.N., Bogatova N.O. Ways to Improve of the Agricultural Complex Engineering System for Agricultural Machinery Maintenance. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2018;(3):67–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/67-70>
6. Korneychuk N.I., Lyalyakin V.P. Prospects for the Use of Industrial Methods of Repairing Worn Machine Parts Electroplating and Polymer Coating in Modern Conditions of Development of Agro-industrial Technical Services. *Proceedings of Gosniti*. 2018;130:254–264. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (accessed 17.02.2025).
7. Nikitchenko S.L., Voronov E.V. Causal Factors of Reduction of Operational Reliability of Agricultural Machinery. *Bulletin NGIEI*. 2020;(2):56–65. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1825 (accessed 17.02.2025).
8. Izmailov A.Yu., Moskovskiy M.N., Podlesniy D.S. Development of a Set of Working Units From Polymeric Materials for the Design of Combine Harvesters. In: MATEC Web of Conferences. 2018. Article no. 05010. Available at: <https://clck.ru/3QHrFY> (accessed 20.02.2025).
9. Lunin A.S. [The Use of Polymer Composite Materials produced by the company “Polyplastic” in Modern Automotive Engineering: History and Development]. *Plasticheskie massy*. 2011;(8):28–38. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ogabjj>
10. Petrov R.L. [On the World Experience in Organization of Vehicle Recycling National Systems]. *Retsikling otkhodov*. 2008;(5):2–11. (In Russ.).
11. Zhuravlev S.Yu. Improving of Methods and Technologies of Technical Service of Agricultural Machinery. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2025;(3):72–80. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-245-3-72-80>
12. Nefyolov I.S. Renewal of Worn-Out Parts of Machines with Application of Additional Repair Parts Made by Additive Technology Methods. *Repair, Reconditioning, Modernization*. 2018;(11):15–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
13. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): a Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;(143):172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
14. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: the Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
15. Katkar R.A., Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
16. Namiki M., Ueda M., Todoroki A., Hirano Y.R. Matsuzaki 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Plastic. In: *Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering*. Seattle; 2014. P. 6. Available at: https://www.researchgate.net/publication/286005621_3D_printing_of_continuous_fiber_reinforced_plastic (accessed 17.02.2025).
17. Golubev I.G., Spitsyn I.A., Bykov V.V., Golubev M.I. Prospects of Application of Additive Technologies in the Repair of Agricultural Machinery. *Proceedings of Gosniti*. 2018;130:254–264. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://vimtsm.ru/?cat=12> (accessed 17.02.2025).
18. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
19. Ovchinnikov V.A., Kilmyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhalnin N.A., Zykin E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Element for Applying Mineral Fertilizers Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Об авторах:

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-код: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Кильмашкин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-код: 6497-0730, 40252@mail.ru

Вклад авторов:

П. В. Сенин – постановка задач исследования, общее руководство.

М. Н. Чаткин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач.

Е. А. Кильмашкин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 14.05.2025; поступила после рецензирования 04.08.2025;
принята к публикации 14.08.2025*

About the authors:

Petr V. Senin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-code: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Evgeny A. Kilmyashkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-code: 6497-0730, 40252@mail.ru

Authors contribution:

P. V. Senin – formulating the study objectives, overall management of the study process.

M. N. Chatkin – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives

E. A. Kilmyashkin – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data; preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 14.05.2025; revised 04.08.2025; accepted 14.08.2025