

Научная статья
УДК 669.058.7
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-270-288>
EDN: JYBAKN



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МЕДНЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

А.С. Янута¹✉, Г.С. Задорожный¹, Ю.В. Штефан²

¹Бендерский политехнический филиал Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко, г. Бендеры, Молдова (Приднестровье)

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
ianyta_anton@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование восстановленных деталей автотранспортной техники позволяет снизить финансовые затраты на ремонт техники. Стоимость восстановленных деталей должна быть не более 50% стоимости новой детали. Повышение производительности (скорости осаждения) электролитического медного покрытия при восстановлении деталей автотранспортной техники требует учета технологических и экономических аспектов процесса восстановления. Исследование факторов (условий осаждения), влияющих наибольшим образом на процесс осаждения медного покрытия, анализ полученных результатов эксперимента и его статистическая обработка и позволили оптимизировать технологию восстановления медных деталей для создания наиболее целесообразных режимов осаждения с максимальной производительностью, снижая таким образом себестоимость восстановления деталей автотранспортной техники. Целью проведенных исследований является разработка математической модели влияния условий осаждения (температура электролита, катодная плотность тока) и состава электролита (концентрация сульфата меди и серной кислоты) на производительность процесса осаждения медного покрытия, для дальнейшей разработки наиболее производительной технологии восстановления коллекторов электродвигателей автотранспортной техники.

Материалы и методы. Исследования проводили на оборудовании, позволяющем получать необходимые данные с требуемой точностью. Математическую обработку проводили с применением современных средств обработки статистических данных, которые исключали возможные ошибки, позволяя получать зависимость факторов с необходимой точностью.

Результаты. В ходе исследований сульфатно-медных электролитов для получения электролитического медного покрытия, с дальнейшей разработкой технологии восстановления деталей автотракторной техники, возникла необходимость определения влияния условий осаждения – «факторов» (плотность катодного тока, температура электролита, концентрация сульфата меди, концентрация серной кислоты) на скорость осаждения – «отклик». Было выявлено, что фактор «плотность катодного тока» и сочетание факторов «плотность катодного тока» и «концентрация серной кислоты» являются наиболее значимыми. Оптимизированы условия осаждения с целью получения наиболее производительной технологии восстановления коллекторов электродвигателей автотранспортной техники путем осаждения медного покрытия. Оптимальными значениями условий осаждения, согласно полученной модели, для получения максимальной скорости осаждения является температура электролита 35...40 °С, плотность катодного тока более 5 А/Дм², концентрация сульфата меди 200...250 г/л, концентрация серной кислоты 40...70 г/л.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: коллектор электродвигателя, детали автомобилей, восстановление, электролитическое меднение, скорость осаждения, уравнение регрессии, статистическая обработка

БЛАГОДАРНОСТИ: благодарность рецензентам статьи.

© Янута А.С., Задорожный Г.С., Штефан Ю.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Янута А.С., Задорожный Г.С., Штефан Ю.В. Математическая модель процесса меднения при восстановлении деталей автотранспортной техники // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 270-288. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-270-288>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-270-288>

EDN: JYBAKN

A MATHEMATICAL MODEL OF THE COPPER PLATING PROCESS IN RESTORATION OF ROAD TRANSPORT EQUIPMENT PARTS

Anton S. Ianuta¹ ✉, Grigorii S. Zadorozhnyi¹, Yurii V. Shtephan²

²Bendery Polytechnic Branch of T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University, Bendery, Moldova (Pridnestrovie)

¹Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

✉ corresponding author
ianyta_anton@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of restored parts of motor vehicles makes it possible to reduce the financial costs of repairing equipment. The cost of the restored parts should not exceed 50% of the cost of the new part. Increasing the productivity (deposition rate) of an electrolytic copper coating during the restoration of parts of motor vehicles requires taking into account the technological and economic aspects of the restoration process. The study of the factors (deposition conditions) that most affect the deposition process of the copper coating, the analysis of the experimental results and its statistical processing made it possible to optimize the technology of restoration of copper parts to create the most appropriate deposition modes with maximum productivity, thus reducing the cost of restoration of parts of motor vehicles. The purpose of the research is to develop a mathematical model of the effect of deposition conditions (electrolyte temperature, cathode current density) and electrolyte composition (concentration of copper sulfate and sulfuric acid) on the performance of the deposition process of copper coating, for further development of the most productive technology for restoring collectors of electric motors of motor vehicles.

Materials and methods. The studies on equipment that allows obtaining the necessary data with the required accuracy were carried out. Mathematical processing using modern statistical data processing tools that excluded possible errors, providing to obtain the dependence of factors with the necessary accuracy was carried out.

Results. In the course of studies of copper sulfate electrolytes to obtain an electrolytic copper coating, with the further development of technology for the restoration of automotive parts, it became necessary to determine the effect of deposition conditions – “factors” (cathode current density, electrolyte temperature, copper sulfate concentration, sulfuric acid concentration) on the deposition rate – “response”. It was found that the factor “cathode current density” and the combination of factors “cathode current density” and “sulfuric acid concentration” are the most significant. The deposition conditions in order to obtain the most productive technology for restoring collectors of electric motors of motor vehicles by depositing a copper coating have been optimized. According to the obtained model, the optimal values of the deposition conditions for obtaining the maximum deposition rate are the electrolyte temperature of 35...40 °C, the cathode current density of more than 5 A/Dm², the concentration of copper sulfate 200...250 g/l, the concentration of sulfuric acid 40...70 g/l.

KEYWORDS: electric motor collector, car parts, restoration, electrolytic copper plating, deposition rate, regression equation, statistical processing.

ACKNOWLEDGEMENTS: Reviewers of the article.

© Ianuta A.S., Zadorozhnyi G.S., Shtephan Y.V., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 15.03.2024; accepted for publication 22.04.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Ianuta A.S., Zadorozhnyi G.S., Shtephan Y.V. A Mathematical model of the copper plating process in restoration of road transport equipment parts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (2): 270-288. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-270-288>

ВВЕДЕНИЕ

В современной автомобильной технике широкое применение получили различные электронные и мехатронные системы, позволяющие повысить точность работы узлов и агрегатов, снизить трудоемкость выполняемых процессов, повысить безопасность работ. Одним из исполнительных механизмов в электронных системах и наиболее встречаемый тип электродвигателя в автотранспортной технике – коллекторный электродвигатель. Причинами отказа электродвигателя могут быть как механические, так и электрические неисправности. Наиболее распространенными механическими неисправностями являются износ щеток, втулок якоря, коллектора якоря. При износе коллектора в большинстве случаев якорь не имеет других дефектов, т.е. можно утверждать, что коллектор якоря является ресурсопределяющей частью якоря.

Проведя анализ существующих способов восстановления коллектора электродвигателей, встречающихся в конструкции автомобильного транспорта, было выявлено, что при износе коллектора его невозможно восстановить или данная работа не целесообразна с экономической точки зрения¹. Применение восстановленных деталей в автомобильном транспорте позволяет снизить экономические затраты на покупку новых деталей до 50% [1]. Ресурс восстановленных деталей составляет не менее 80% новой. Восстановление деталей позволяет снизить простои ре-

монтируемой техники в случаях сложностей в логистике поставок или дефиците новых деталей.

Существуют различные технологии восстановления деталей автомобильной, автотракторной, дорожно-строительной и спецтехники. Наиболее распространенными являются технологии нанесения композиционных материалов и осаждения электролитических покрытий² [2, 3, 4, 5, 6]. Электролитическое хромирование позволяет создавать износ- и коррозионностойкие покрытия [7, 8]. Благодаря высокой микротвердости (более 10 000 МПа) и бестрещиновой структуре хромирование зарекомендовало себя при восстановлении деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании [9, 10, 11]. К недостаткам электролитического хромирования относятся низкий выход по току, высокая токсичность шестивалентного хрома, нагрев электролита, вследствие чего приходится применять дорогостоящие и сложные холодильные установки [12, 13].

Способ восстановления деталей автомобильного транспорта путем нанесения электролитического покрытия на основе железа является более экономичным, производительным и требующим меньших затрат на охрану труда и экологические аспекты производства по сравнению с хромированием³ [14, 15, 16]. Применение легирующих добавок позволяет повысить физико-механические свойства получаемого покрытия. Наиболее распространенными легирующими добавками для

¹ Лоскунин А.Э., Янута А.С. Анализ способов восстановления коллекторов электродвигателей автомобильного транспорта // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2022: материалы VIII Международной научно-практической конференции. Горловка: Автомобильно-дорожный институт ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». 2022. С. 38–42. EDN QNNCQH.

² Янута А.С. Применение гальванического покрытия сплава на основе железа для восстановления изношенных деталей дорожно-строительной техники // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: сборник статей 26-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 12–13 мая 2022 года. Москва: Российский государственный аграрный университет. МСХА им. К.А. Тимирязева. 2022. С. 585–589. EDN MUNUNV.

³ Янута А.С., Синельников А.Ф. Исследование влияния режимов осаждения на процесс осаждения сплава Fe-Cr из сульфатного электролита // Высокие технологии и инновации в науке: сборник избранных статей Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 28 января 2021 года. Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие». 2021. С. 177–180. EDN TUEVBL.

получения электролитического сплава на основе железа являются хром, никель, молибден, вольфрам^{4, 5} [17, 18, 19].

Широкое распространение в ремонтном производстве получили композиционные материалы [20, 21, 22]. Они применяются как для восстановления изношенных поверхностей, так и для создания коррозионностойкого покрытия [23, 24].

По нашему мнению, наиболее эффективным способом восстановления медных деталей по трудоемкости, объему капитальных вложений, экологичности и себестоимости является электролитическое меднение. В основном электролитическое осаждение меди применяется для получения защитно-декоративного покрытия или подложечного слоя. Исследования о применении электролитического меднения как способа восстановления деталей практически не встречаются. Однако данный процесс имеет много преимуществ: высокий выход по току, используются малотоксичные электролиты, низкая энергоемкость, возможность механизации процесса. Недостатком процесса является его низкая производительность.

Нами был проведен аналитический обзор составов электролитов, применяемых для получения медного покрытия. Всего было проанализировано 35 составов. В ходе анализа даны основные составы электролитов, определена классификация электролитов по базовому составу: сульфатные, цианистые, пиррофосфатные, карбонатные, железосинеродистые, борфтористоводородные. Наиболее многочисленными являются сульфатные электролиты меднения.

Проведенные исследования осаждения медного покрытия из сульфатных электролитов при различных условиях выявили возмож-

ность получения покрытий толщиной 0,3 мм и более^{6, 7}. Однако полученные результаты влияния условий осаждения (плотности катодного тока, состава электролита) на скорость осаждения носят фрагментарный характер.

В различных научных работах встречаются исследования моделирования электролитических процессов хромирования, железнения и др. [25, 26, 27]. Исследования, связанные с электролитическим меднением и его моделированием процесса, в научной литературе не встречаются.

На основании вышеизложенного целью настоящих исследований является разработка математической модели влияния условий осаждения (температура электролита, катодная плотность тока) и состава электролита (концентрация сульфата меди и серной кислоты) на производительность процесса осаждения медного покрытия, для дальнейшей разработки наиболее производительной технологии восстановления коллекторов электродвигателей автотранспортной техники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований использовались цилиндрические медные образцы (рисунок 1), на которые наносилось электролитическое медное покрытие.

Для исследования процесса осаждения медного покрытия приготавливали сульфатный электролит следующим образом. Соль сульфата меди растворялась в необходимом количестве дистиллированной воды. Полученный раствор перемешивался в электромагнитной мешалке до полного растворения соли. После приготовления электролит сутки отстаивался. Для приготовления электролита применялись реактивы классификации «Ч» и

⁴ Янута А.С., Федоров В.К., Корнейчук Н.И. Легирование как способ совершенствования технологии электролитического железнения // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2022: материалы VIII Международной научно-практической конференции. Горловка, 2022. С. 92–96. EDN DUQOFD.

⁵ Янута А.С., Федоров В.К., Корнейчук Н.И. Оценка влияния кислотности электролита на содержание хрома в бинарном гальваническом покрытии на основе железа // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Вологда, 8 декабря 2022 года / Ответственный редактор В.А. Раков. Вологда: Вологодский государственный университет. 2023. С. 265–268. EDN IQQWPB.

⁶ Задорожный Г.С., Янута А.С. Влияние плотности тока на скорость осаждения медного покрытия из сульфатного электролита // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2022: материалы VIII Международной научно-практической конференции. Горловка: Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет». 2022. С. 33–37. EDN EENMMC.

⁷ Задорожный Г.С., Янута А.С. Влияние состава сульфатно-медного электролита на процесс осаждения медного покрытия // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XVII Международной научно-технической конференции, Вологда, 8 декабря 2022 года. Вологда: Вологодский государственный университет. 2023. С. 225–231. EDN DWFZQC.

«ХЧ», а также дистиллированная вода и серная кислота^{8,9}.

Площадь применяемых цилиндрических образцов $S=0,03 \text{ Дм}^2$. Аноды изготовлены были из того материала, что и образцы – медь. Осаждение вели в электролитической ячейке с поддержанием необходимой температуры с точностью измерения $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 2, а). Источником тока для ячейки являлся лабораторный блок питания. Кислотность электролита проверяли при помощи pH-метра Smart Sensor модели AS218 с точностью измерения $0,01$ ед. pH. Калибровка pH-метра производилась трехточечными буферными растворами. Измерение толщины образцов проводилось рычажным микрометром $0\text{--}25 \text{ мм}$ с точностью $0,001 \text{ мм}$. Масса осажденного покрытия рассчитывалась исходя из взвешивания образца до осаждения и после на аналитических весах модели ВЛР-200 с точностью $0,00005 \text{ г}$ (рисунок 2, б).

Перед осаждением образцы подготавливались путем обработки наждачной бумагой крупностью $800\text{--}1000$, промывки водой в течение 10 с , далее образец химически травился в 10% -ном растворе серной кислоты в течение 10 мин ¹⁰.

Исследования производились на базе учебно-исследовательской лаборатории «Реновации машин и оборудования» при кафедре «Транспортно-технологические машины и комплексы» Бендерского политехнического филиала Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления оптимальных технологических режимов проводили планирование экспериментов с целью построения математической модели зависимости скорости осаждения меди, измеренной с точностью до одного микрона $y_1...y_3$ от температуры электролита (x_1), плотности тока (x_2), концентрации сульфата меди (x_3) и концентрации серной кислоты (x_4) в процессе гальванического осаждения медного покрытия. Решение о выборе модели принимали экспертным путем для минимизации количества проводимых опытов. Исследова-

ния проводили с применением планирования эксперимента на модели ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) (таблица 1), откуда видно, что варьировали 4 фактора на трех уровнях каждый, в центре плана и в звездных точках. После чего проводили эксперимент и осуществляли его статистическую обработку. Проведено 25 опытов в различных точках факторного пространства, предлагаемых выбранной моделью.

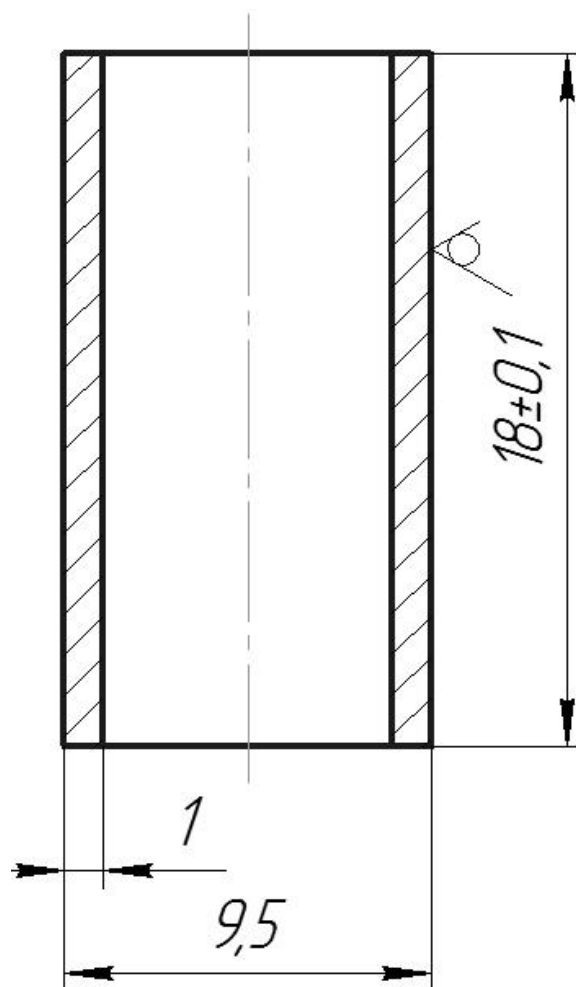


Рисунок 1 – Цилиндрический медный образец
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Cylindrical copper sample
Source: compiled by the author.

⁸ ГОСТ Р 58144–2018 Вода дистиллированная. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 14 с.

⁹ ГОСТ 2184–2013 Кислота серная техническая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 36 с.

¹⁰ Дасоян М.А., Пальмская И.Я., Сахарова Е.В. Технология электрохимических покрытий. Л.: Машиностроение: Ленингр. отделение, 1989. 390 с.

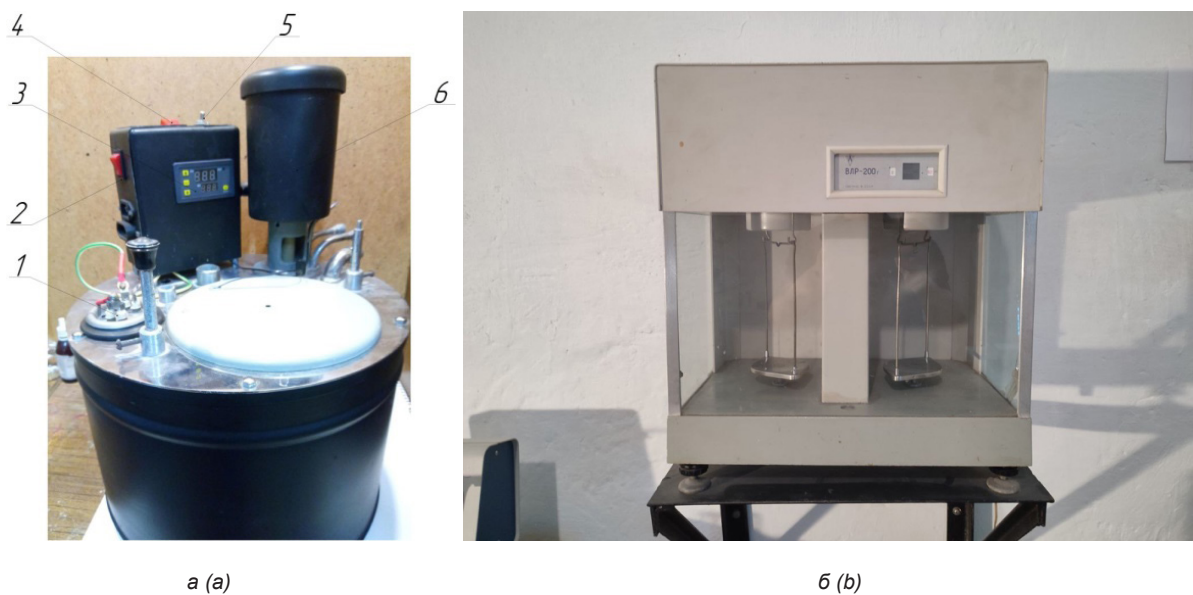


Рисунок 2 – Применяемое оборудование:
а – электролитическая ячейка:
1 – ТЭНы,
2 – кнопка включения электролизера, 3 – термореле водяной бани,
4 – кнопка управления питания ТЭНа,
5 – кнопка включения электронасоса,
6 – электронасос водяной бани;
б – аналитические весы ВЛР-200
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – The equipment used:
a – electrolytic cell:
1 – heating elements,
2 – electrolyzer switch, 3 – the thermal relay of the water bath,
4 – button to control the power supply of the heating element,
5 – button to turn on the electric pump,
6 – electric water bath pump;
b – VLR-200 analytical scales
Source: compiled by the author.

Таблица 1
Варьируемые факторы при планировании эксперимента
Источник: составлено авторами.

Table 1
Variable factors when planning an experiment
Source: compiled by the author.

№ опыта	Кодированные значения факторов				Натуральные значения факторов				Отклик – толщина покрытия, мм/ч			
					температура, °С	плотность тока Дк, x10 ⁻¹ А/Дм ²	концентрация сульфата меди, x10 г/л	концентрация серной кислоты, г/л				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{ср}
1	-1	-1	-1	-1	25	30	15	50	0,092	0,140	0,105	0,112
2	-1	-1	-1	1	25	30	15	70	0,071	0,098	0,105	0,091
3	-1	-1	1	-1	25	30	35	50	0,095	0,138	0,153	0,129
4	-1	-1	1	1	25	30	35	70	0,108	0,121	0,125	0,118
5	-1	1	-1	-1	25	70	15	50	0,168	0,220	0,193	0,194
6	-1	1	-1	1	25	70	15	70	0,286	0,229	0,211	0,242
7	-1	1	1	-1	25	70	35	50	0,167	0,165	0,164	0,165

№ опыта	Кодированные значения факторов				Натуральные значения факторов				Отклик – толщина покрытия, мм/ч			
					температура, °C	плотность тока Дк, $\times 10^{-1}$ А/Дм ²	концентрация сульфата меди, $\times 10$ г/л	концентрация серной кислоты, г/л				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	y ₁	y ₂	y ₃	y _{ср}
8	-1	1	1	1	25	70	35	70	0,164	0,165	0,167	0,165
9	1	-1	-1	-1	45	30	15	50	0,287	0,286	0,305	0,292
10	1	-1	-1	1	45	30	15	70	0,140	0,157	0,131	0,143
11	1	-1	1	-1	45	30	35	50	0,253	0,288	0,283	0,275
12	1	-1	1	1	45	30	35	70	0,093	0,091	0,090	0,091
13	1	1	-1	-1	45	70	15	50	0,091	0,141	0,130	0,121
14	1	1	-1	1	45	70	15	70	0,320	0,314	0,288	0,307
15	1	1	1	-1	45	70	35	50	0,225	0,222	0,192	0,213
16	1	1	1	1	45	70	35	70	0,182	0,179	0,180	0,180
17	-2	0	0	0	15	50	25	60	0,182	0,165	0,188	0,178
18	2	0	0	0	55	50	25	60	0,207	0,253	0,208	0,222
19	0	-2	0	0	35	10	25	60	0,100	0,088	0,103	0,097
20	0	2	0	0	35	90	25	60	0,333	0,317	0,360	0,336
21	0	0	-2	0	35	50	5	60	0,248	0,253	0,249	0,250
22	0	0	2	0	35	50	45	60	0,117	0,115	0,122	0,118
23	0	0	0	-2	35	50	25	40	0,229	0,228	0,227	0,228
24	0	0	0	2	35	50	25	80	0,226	0,271	0,270	0,256
25	0	0	0	0	35	50	25	60	0,216	0,248	0,264	0,242

Представленная в таблице 1 матрица планирования эксперимента для независимых друг от друга факторов была реализована нами в лабораторных условиях. Полученные при этом полиномы II степени дали возможность предположить, что адекватность полученной при планировании эксперимента модели будет достаточной, что и было проверено после статистической обработки результатов эксперимента по методике, изложенной в работах [28]. Сравнивали дисперсии полученных откликов и по критерию Фишера проверяли их принадлежность к генеральной совокупности. Максимальная дисперсия наблюдалась для $y_1 = 0,0060$ мм, а для y_2 – минимальная 0,0051 мм. Тогда отношение большей к меньшей дисперсии дает расчетное значение критерия Фишера $F_p = 0,006/0,0051 = 1,178$, что меньше табличного значения критерия для уровня доверительной вероятности 95% $F_T(0,05) = 3,049$. В то время как р-уровень значимости, определяемый при помощи встроенной функции «ФТЕСТ» в Microsoft Excel ра-

вен 0,692, что более уровня значимости 0,05, следовательно, делается вывод о равенстве дисперсий. Также проверили близость откликов в параллельных опытах каждого из 25 сочетаний переменных факторов по критерию Кохрена. Как видно из таблицы 1, максимальная дисперсия наблюдалась в строке № 6, где дисперсия трех параллельных экспериментов составила 0,001533. Сумма всех дисперсий получена на уровне 0,009. Тогда расчетное значение G-Критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{s_{\max}}{\sum s_k} = \frac{0,001533}{0,009} = 0,175. \quad (1)$$

Табличное значение критерия Кохрена получено методом интерполяции для числа степеней свободы $m_1 = 25 - 1 = 24$ между значениями $m_1 = 16$ и 36 на уровне 0,5179. Следовательно, условие равномерности – однородности дисперсий в параллельных трех опытах каждой точки плана эксперимента, $G_p < G_T$ выполняется, т.к. $0,175 < 0,5179$.

Таблица 2
Результаты преобразования Бокса-Кокса для расчета критериев согласия, полученные в ПМ Statistica
Источник: составлено авторами.

Table 2
The results of the Box-Cox transformation for calculating the consent criteria obtained in PM Statistica
Source: compiled by the author.

Преобразование Б-К зависимой переменной: Y - скорость осаждения меди 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн. SS = .003582 ЗП Y - скорость осаждения меди - 0,000 мм					
	Лямбда	SSE(I)	Хи^2(1)	p	
Статистики	0.097884	0.035317	2.845301	0.091651	

Встроенные функции Excel позволили наряду с программным модулем Statistica 10.0 (компании StatSoft – официального представителя компании TIBCO в России и странах СНГ – далее по тексту ПМ Statistica 10.0) проверить не только значимость каждого полученного коэффициента уравнения регрессии по критерию Стьюдента, но и адекватность полученной модели через расчет дисперсии адекватности, как и в работе¹¹, сравнивая полученное расчетное значение с табличным по критерию Фишера:

$$F_p \leq F_T, \quad (2)$$

где F_p – расчетное значение критерия Фишера; $F_T(p=0,05; k_1=4; k_2=20)=2,503$; k_1 – число степеней свободы числителя для четырехфакторной модели $k_1 = 4$, k_2 – знаменатель табличного значения F-распределения Фишера, который зависит от числа наблюдений $n = 75$ и количества факторов $m = 4$.

По условию (2) проверяли гипотезу об адекватности полученной модели:

$$F_p = \frac{S_{\text{адек}}^2}{S_y^2} = \frac{0,08}{0,01} = 1,665 < F_T(0,05; 4; 70) = 2,503. \quad (3)$$

Одно из несомненных достоинств ПМ Statistica 10.0 состоит в быстрой возможности проверить способность статистически предсказывать поведение модели в различных точках факторного пространства с помощью множественной регрессии еще до построения уравнений регрессии и поверхностей откли-

ка. Результаты проверки полученной модели представлены в таблице 2.

Близость спрогнозированных моделью зависимостей к полученным в лаборатории результатам измерений скорости осаждения была оценена при помощи критериев согласия:

– Пирсона (критерий Хи-квадрат) получен при помощи ПМ Statistica 10.0 (см. таблицу 2) $\chi^2=2,85$, что меньше табличного значения $P(0,99; 21) = 8,89$ (получено в Excel через синтаксис =ХИ2ОБР ($\alpha=0,99$; степеней свободы $25-4=21$), следовательно, по критерию согласия Пирсона теоретический закон распределения, предсказанный математической моделью близок к фактическому;

– Колмогорова-Смирнова часто используется в теории надежности. Он проверялся согласно методике, изложенной в работах¹² [29]. По результатам сравнений, полученных в ходе эксперимента средними результатами скорости меднения и расчетными по уравнению (4), получили максимальную разность $d=0,2548-0,121=0,134$. Различия между двумя распределениями могут считаться достоверными, если $d_{\text{эмп}}$ достигает или превышает $d_{0,05}$, и тем более достоверным, если $d_{\text{эмп}}$ достигает или превышает $d_{0,01}$. По нашим расчетам $d_{\text{эмп}} = 0,134$, что меньше критического значения для уровней значимости 0,05 и 0,01 соответственно – 0,623 и 0,747. Поскольку $d_{\text{эмп}}$ меньше критического значения, расхождения между распределениями статистически не достоверны, следовательно, модель правильно предсказывает результаты, как это видно на оси значимости (рисунок 3).

¹¹ Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

¹² Штефан Ю.В., Федоров В.К. Основы теории надежности: учебно-методическое пособие к семинарским занятиям и лабораторным работам. М.: МАДИ, 2023. 168 с.

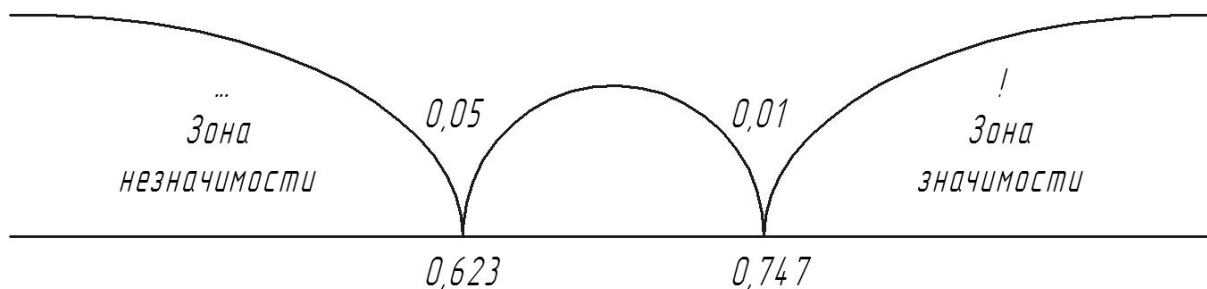


Рисунок 3 – Недостижение эмпирического значения $d_{эмп}$ зоны значимости для расхождений результатов прогнозирования математической моделью
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Failure to achieve the empirical significance of the $d_{эмп}$ zone of significance for discrepancies in the results of forecasting by a mathematical model
Source: compiled by the author.

По критерию Колмогорова, позволяющему оценить справедливость гипотезы о законе распределения при малых объемах наблюдений случайной величины, получили для экспоненциального распределения Вероятностного калькулятора: $P[\lambda = 0,1] = 0,9179$. По результатам этой проверки был также сделан вывод о случайности расхождения между теоретическими и опытными результатами, а также о соответствии теоретического и фактического распределения.

По результатам статистической обработки результатов испытаний получено уравнение регрессии зависимости скорости меднения от варьируемых входных параметров в кодированных значениях переменных:

$$Y(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,242 + 0,02x_1 + 0,034x_2 - 0,018x_3 - 0,005x_4 - 0,016x_1^2 - 0,012x_2^2 - 0,02x_3^2 - 0,057x_4^2 - 0,019x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,012x_1x_4 - 0,007x_2x_3 - 0,018x_3x_4 + 0,035x_2x_4. \quad (4)$$

Парный коэффициент при x_1x_3 уравнения регрессии в программном модуле признан незначимым, что видно из таблицы 3 (максимальное значение p в графе 2) по критерию $p < 0,05$, и был нами проверен по критерию Стьюдента. Так дисперсия парных взаимодействий по результатам расчетов составила

$$s_{bij} = \frac{s_y^0}{n \cdot \sum_{i \neq j=1}^n (x_i \cdot x_j)^2} = \frac{0,005}{4 \cdot 16} = 0,00008, \quad (5)$$

где дисперсия воспроизводимости в центре плана $s_y^0 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2}{k} = \frac{0,043}{9} = 0,005$; ($\bar{y} = 0,21$) – величина среднего значения отклика по всем

центральному точкам плана; k – количество центральных точек плана; n – количество факторов в математической модели.

Следовательно, условие значимости коэффициентов при парных взаимодействиях выполнены: $b_{ij} > |s_{bij} \cdot t|$, поскольку превысили по модулю произведение $|s_{bij} \cdot t| = 0,00008 \cdot 2,647 = 0,0002$. Табличное значение критерия Стьюдента определяли в Excel при помощи встроенной функции, имеющей синтаксис СТЬЮДРАСПОБР $(0,01; 71) = 2,647$ для уровня доверительной вероятности 99% и числе степеней свободы $s = N - 4 = 75 - 4 = 71$.

Поэтому этот самый маленький парный коэффициент может быть оставлен в модели.

Первый столбец справа в таблице 3 включает оценки коэффициентов для нелинейного уравнения регрессии (см. уравнение 3) в кодированных значениях факторов, в которых можно сопоставить влияние каждого фактора, когда масштабы всех четырех независимых факторов условно одинаковы и находятся в интервале от -1 до +1, а с учетом звездных точек этот интервал увеличен от -2 до +2. Полученную при этом точность предсказания можно проанализировать по рисунку 4.

Как показал анализ уравнения регрессии 4 и графического изображения факторного пространства при фиксации двух других факторов на критическом уровне (см. рисунок 4), представленных на рисунке 5, значения выхода скорости осаждения меди более 0,4 достигается в углах факторного пространства.

Задача математической модели – максимально точное описание всего факторного пространства, результаты представлены на рисунках 5, 7, 9.

Таблица 3
Оценки эффектов для определения уравнения регрессии
Источник: составлено авторами.

Table 3
Effect estimates for determining regression equation
Source: compiled by the author.

Фактор	Оценки эффектов; R-кв.=.69334;Скор..30305 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=.003582 ЗП Y - скорость осаждения меди - 0,000 мм			
	р	-95.% Дов.Пред	+95.% Дов.Пред	Козф.
Сред/Св.член	0.000133	0.149188	0.335479	0.242333
(1)X1 температура электролита t(L)	0.120033	-0.012597	0.094958	0.020590
X1 температура электролита t(K)	0.286207	-0.095175	0.030945	-0.016057
(2)X2 плотность тока Дк, А/10дм2(L)	0.018006	0.014069	0.121625	0.033924
X2 плотность тока Дк, А/10дм2(K)	0.419456	-0.087091	0.039029	-0.012016
(3)X3 концентрация сульфата меди, 10г/л(L)	0.170643	-0.089597	0.017958	-0.017910
X3 концентрация сульфата меди, 10г/л(K)	0.186516	-0.103425	0.022695	-0.020182
(4)X4 концентрация серной кислоты, г/л(L)	0.720841	-0.062736	0.044819	-0.004479
X4 концентрация серной кислоты, г/л(K)	0.697124	-0.074508	0.051612	-0.005724
1L на 2L	0.242795	-0.102802	0.028927	-0.018469
1L на 3L	0.865524	-0.071052	0.060677	-0.002594
1L на 4L	0.430708	-0.090343	0.041385	-0.012240
2L на 3L	0.646622	-0.079968	0.051760	-0.007052
2L на 4L	0.037300	0.004990	0.136718	0.035427
3L на 4L	0.251391	-0.102093	0.029635	-0.018115

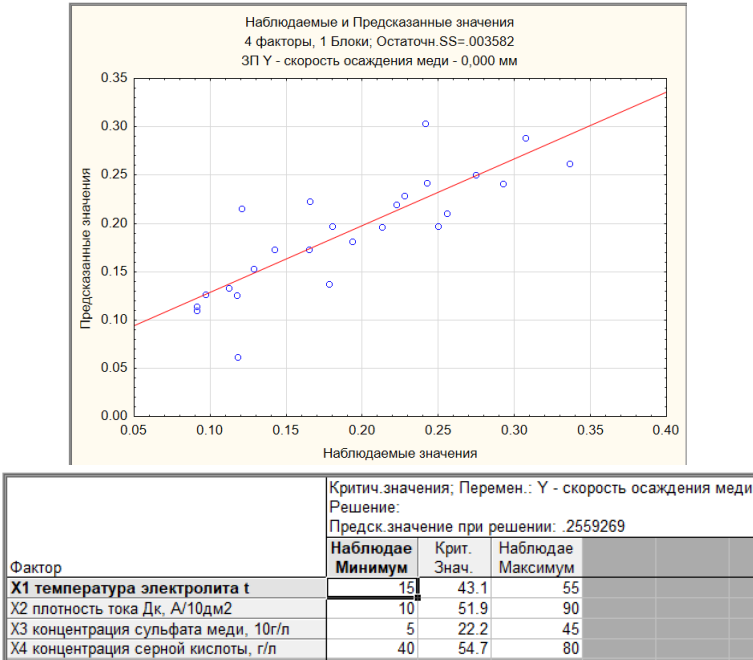


Рисунок 4 – Близость полученных средних значений отклика к предсказываемым моделью и критические значения факторов для максимизации отклика
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The proximity of the obtained average response values to those predicted by the model
Source: compiled by the author.

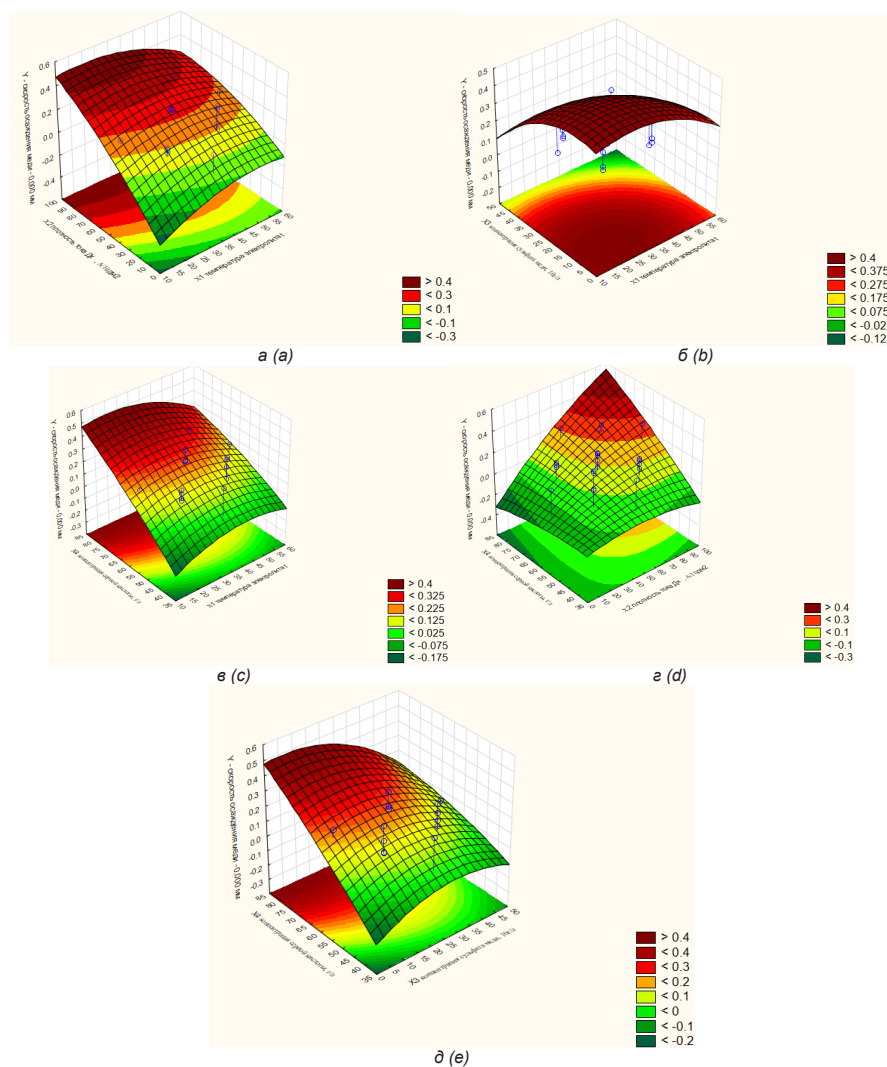


Рисунок 5 – Изображения полученных поверхностей скорости формирования покрытия Y , мм/3ч при проведении статистического анализа:

- а – поверхность отклика «скорость» от факторов «температура» и «плотность тока» в натуральных значениях факторов при X_3 на среднем, а X_4 на максимальном уровне;
 б – поверхность отклика «скорость» от факторов «температура» и «концентрация CuSO_4 » в натуральных значениях факторов при X_2 и X_4 на максимальном уровне;
 в – поверхность отклика «скорость» от факторов «температура» и «концентрация H_2SO_4 » в натуральных значениях факторов при X_2 и X_3 на максимальном уровне;
 г – поверхность отклика «скорость» от факторов «плотность тока» и «концентрация H_2SO_4 » в натуральных значениях факторов при X_1 и X_3 на среднем уровне;
 д – поверхность отклика «скорость» от факторов концентрация CuSO_4 » и «концентрация H_2SO_4 » в натуральных значениях факторов при X_1 на среднем, а X_2 на максимальном уровне
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Images of the obtained coating surfaces of the formation rate Y , mm in three hours, during statistical analysis:

- a – the surface of the response "speed" from the factors "temperature" and "current density" in the natural values of the factors at X_3 at the middle level, and X_4 at the maximum level;
 b – the surface of the response "speed" from the factors "temperature" and "concentration of CuSO_4 " in natural values of factors at X_2 and X_4 at the maximum level;
 c – the response surface "velocity" from the factors "temperature" and "H₂SO₄ concentration" in the natural values of the factors at X_2 and X_3 at the maximum level;
 d – the response surface "velocity" from the factors "current density" and "H₂SO₄ concentration" in the natural values at X_1 and X_3 at the middle level;
 d – is the response surface "velocity" from the factors "CuSO₄" and "H₂SO₄ concentration" in the natural values of the factors at X_1 at the middle and X_2 at the maximum level
 Source: compiled by the author.

		Предсказ. знач.; Прм.:Y - скорость осаждения меди - 0,000 мм; R-кв.=.69334; 4 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=.003582 3П Y - скорость осаждения меди - 0,000 мм			
Фактор	Регрес. Коеф.	Знач.	Коеф. * Знач.		
Постоян.	-0.672610				
(1)X1 температура электролита t(L)	0.025909	15.000	0.388628		
X1 температура электролита t(K)	-0.000161	225.000	-0.036129		
(2)X2 плотность тока Дк, А/10дм2(L)	-0.001814	90.000	-0.163305		
X2 плотность тока Дк, А/10дм2(K)	-0.000030	8100.000	-0.243316		
(3)X3 концентрация сульфата меди, 10г/л(L)	0.021840	5.000	0.109199		
X3 концентрация сульфата меди, 10г/л(K)	-0.000202	25.000	-0.005046		
(4)X4 концентрация серной кислоты, г/л(L)	0.006377	80.000	0.510125		
X4 концентрация серной кислоты, г/л(K)	-0.000057	6400.000	-0.366333		
1L на 2L	-0.000092	1350.000	-0.124664		
1L на 3L	-0.000026	75.000	-0.001945		
1L на 4L	-0.000122	1200.000	-0.146875		
2L на 3L	-0.000035	450.000	-0.015867		
2L на 4L	0.000177	7200.000	1.275375		
3L на 4L	-0.000181	400.000	-0.072458		
предсказан			0.434778		
-95. % Дов.			-0.018362		
+95. % Дов.			0.887917		
-95. % Пред.			-0.037120		
+95. % Пред.			0.906676		

Рисунок 6 – Результаты предсказания моделью максимального значения отклика «Y»
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Results of the model's prediction of the maximum value of the "Y" response
Source: compiled by the author.

Наиболее обобщенным критерием предсказания зависимых параметров отклика от варьируемых независимых факторов является коэффициент детерминации модели по критерию R^2 . И хотя предсказание благодаря ПМ Статистика выходит не ниже $R^2 = 0,693$ (см. рисунок 6 и таблицу 3), но общий коэффициент корреляции между предсказанными по уравнению регрессии значения отклика модели с получаемыми результатами замеров в лаборатории для данной математической модели, рассчитанные в Excel при помощи встроенной функции, имеющей синтаксис КОРРЕЛ от двух массивов $y_{расч}$ по уравнению (4) и $y_{ср}$, было получено на уровне $R^2 = 0,746$ можно также считать достаточно высоким уровнем предсказания математической модели.

Для более точного изучения факторного пространства вблизи оптимального (максимального) значения отклика в ПМ Statistica 10.0 есть модуль «Предсказания значений через функцию желательности», для получения которого можно задать полученные критические значения в кодированных переменных: $x_1 = -2$; $x_3 = -2$ $x_4 = +2$. Этому сочетанию факторов модель предсказывает значение отклика

$y = 0,336$ мм/3ч в доверительном интервале от 0,018 до 0,888 с 95% уровнем надежности, что принято за условное значение отклика «желательности» 1 (см. рисунки 8, 9). Как показывает анализ рисунков 8 и 10, наиболее значимыми факторами для получения «желательности» более 1 являются такие факторы, как «плотность тока» x_2 , парное воздействие «плотность тока» x_2 и «концентрация H_2SO_4 » x_4 . Также выход модели Y повышает фактор «температура электролита t» x_1 , хоть и в меньшей степени. Числовое значение экстремума функции получили, подставив в уравнение 2 значения $x_1 = -2$; $x_3 = -2$ $x_4 = +2$, и нашли максимум скорости осаждения меди при этом уже за пределами факторного пространства при $x_2 = 6,5$, что соответствует скорости образования покрытия меди с 95% уровнем вероятности $Y = 0,47 \pm 2\sigma = 0,476 \pm 2 \cdot 0,227$ мм/3ч:

$$\begin{aligned} Y(x_2) &= 0,242 - 0,02 \cdot 2 + 0,018 \cdot 2 - \\ &- 0,005 \cdot 2 - 0,016 \cdot 4 - 0,012x_2^2 - 0,02 \cdot 4 - \\ &- 0,057 \cdot 4 + 0,019 \cdot 2x_2 - 0,003 \cdot 4 + \\ &+ 0,012 \cdot 4 + 2 \cdot 0,0354x_2 + 0,018 \cdot 4 \\ \text{или } Y(x_2) &= -0,012x_2^2 + 0,157x_2 - 0,036. \end{aligned} \tag{6}$$

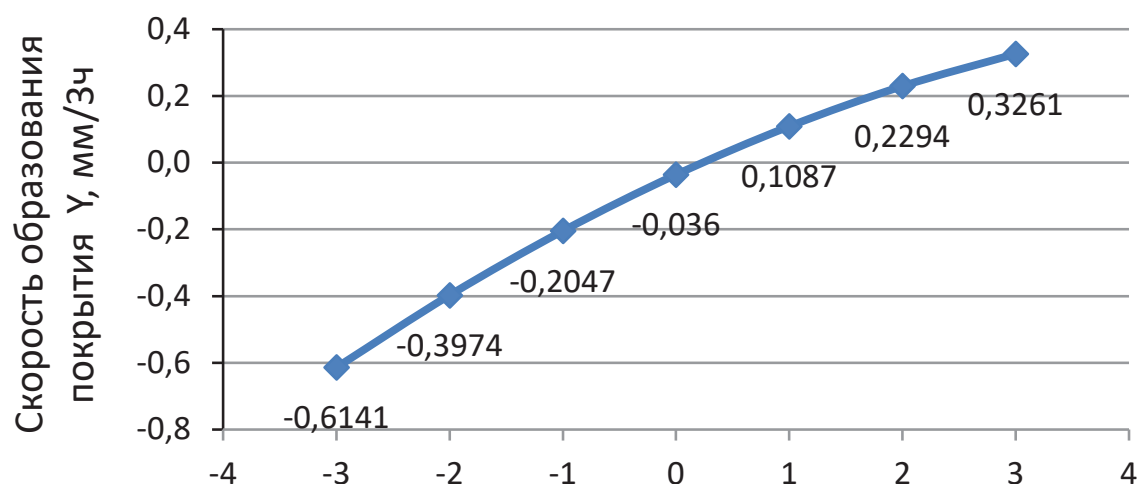


Рисунок 7 – Зависимость, построенная по формуле (4)
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependence based on formula 4
Source: compiled by the author.

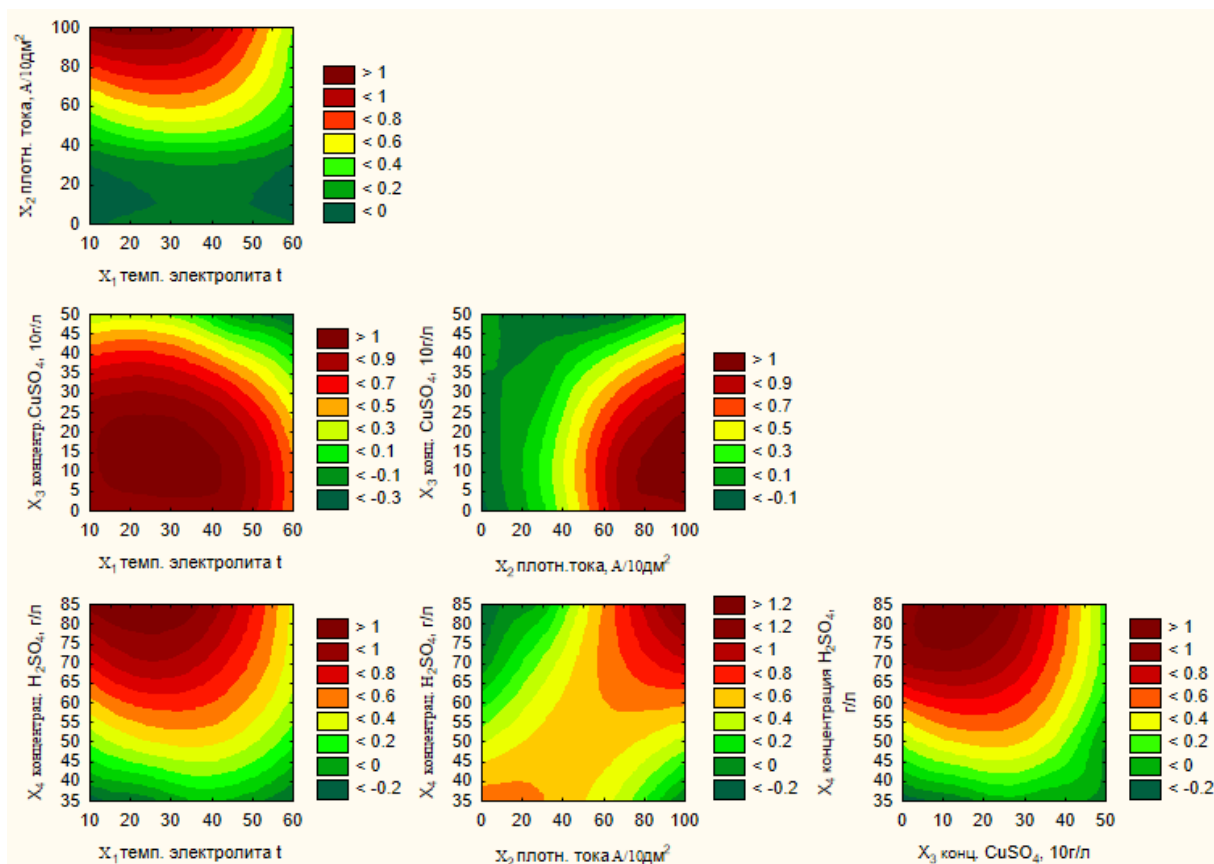


Рисунок 8 – Контурные линии поверхностей профиля желательности:
за 1 принято предсказываемое моделью максимальное значение скорости меднения 0,336 мм/3ч
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Contour lines of the surfaces of the desirability profile: the maximum value
of the copper plating rate of 0.336 mm/3h predicted by the model is taken as 1
Source: compiled by the author.

Как показано на рисунках 9 и 10, максимизацию производительности процесса меднения можно получить внутри исследованного факторного пространства при минимальной температуре $X_1 = -2$ (точнее в интервале от 15 до 40 °С в натуральных значениях): наибольшее положительное влияние на производительность процесса осаждения меди имеют температура и плотность тока с парным воздействием «плотность тока» и «содержание H_2SO_4 ». При плотности тока 80...100 А/10дм² концентрация соляной кислоты должна быть 75...85 г/л. Чем ниже температура электролита, тем выше должна быть концентрация соляной кислоты. Остальные факторы и их парные воздействия незначительны, но снижают отклик модели, о чем можно судить по отрицательной величине абсолютного значения

эффекта и отрицательному коэффициенту в уравнении (4). Отрицательные коэффициенты у квадратичных коэффициентов переменных x свидетельствуют о явно выраженной квадратичной зависимости и наличии экстремума функции в виде максимума, что мы и наблюдаем по форме поверхностей отклика, контурным линиям и выпуклым кривым на рисунках 5,7,8,9.

На рисунке 9 видно, что оптимально высокие значения скорости осаждения получаются точно в середине интервалов варьирования первого, третьего и четвертого факторов. Максимум скорости достигается при плотности катодного тока от середины интервала до его максимального значения, как показано на рисунке 5 а, б, г.

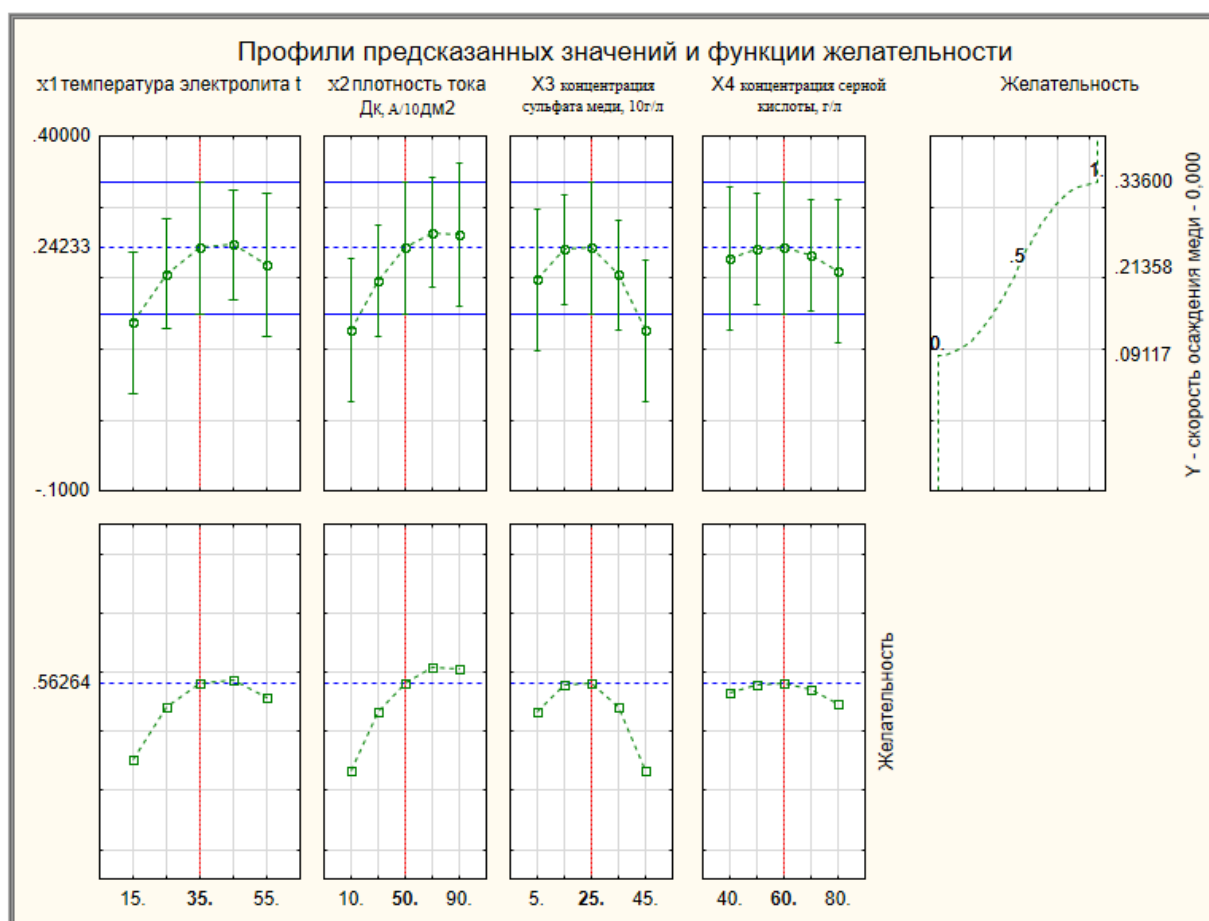


Рисунок 9 – Доверительные интервалы профиля желательности
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Confidence intervals of the desirability profile
Source: compiled by the author.

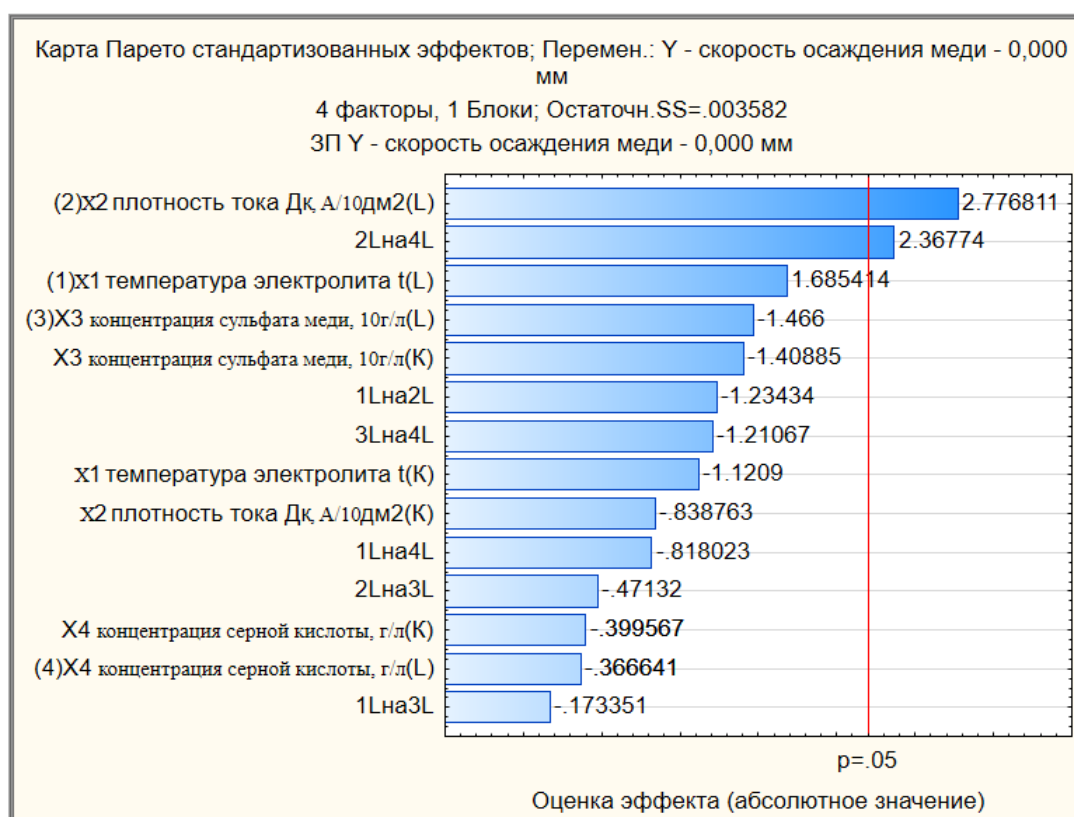


Рисунок 10 – Карта Парето для коэффициентов регрессии
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Pareto map for regression coefficients
Source: compiled by the author.

Отсюда был сформулирован вывод о том, что повышение плотности катодного тока может дать экстремально высокие показатели скорости процесса осаждения. Соотношение в электролите содержания сульфата меди и кислоты должны находиться ближе к максимуму содержания кислоты и до 250 г/л содержания сульфата меди. Что подтверждает результаты наблюдений и замеров в процессе проведения испытаний, поскольку концентрация сульфата меди в электролите за 3 ч проведенного опыта снизилась незначительно. Увеличение же температуры выше 40 градусов не имеет смысла, как видно из рисунка 8.

Графически анализировать влияние каждого коэффициента уравнения регрессии (см. уравнения (4) и (6) можно на рисунке 10 при помощи карты Парето, располагающей в порядке убывания значимости влияния на отклик регрессионные коэффициенты. Такой анализ подтвердил сделанные нами выше заключе-

ния, позволившие оптимизировать технологический процесс меднения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили определить оптимальные режимы осаждения и получить адекватную математическую модель зависимости скорости формирования медного покрытия от независимых переменных технологических факторов. Четырехфакторная модель позволила установить характеристики электролита и его температурного режима при максимизации скорости меднения.

Наибольшее влияние имеют такие показатели, как плотность тока и кислотность электролита, которую удобно контролировать в процессе электролитического осаждения при помощи pH-метра. Поэтому крайне важным является необходимость контроля кислотности электролита, а также своевременные кор-

ректировки кислотности при выполнении процесса восстановления деталей автомобилей меднением.

Оптимальными значениями условий осаждения, согласно полученной модели, для получения максимальной скорости осаждения является температура электролита 35...40 °С, плотность катодного тока более 5 А/Дм², концентрация сульфата меди 200...250 г/л, концентрация серной кислоты 40...70 г/л.

Результаты моделирования эксперимента позволили оптимизировать условия осаждения для повышения производительности технологии восстановления коллектора электродвигателя автотранспортной техники электролитическим меднением. Интенсивность роста его во времени в 1, 2 и 3 ч требуют дополнительных исследований с целью определения зависимости интенсивности электролиза от времени реакции при восстановлении деталей автомобильного транспорта технологией электролитического осаждения в кислом сульфатно-медном электролите.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин. Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2020; 17(1): 84–97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>
2. Sinelnikov A.F., Bomeshko E.V., Korneychuk N.I., Ianuta A.S. Electrolytic alloying of iron-chromium during deposition of coatings from a sulfate-chloride electrolyte // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (14th–16th December 2020, Moscow). Moscow. 2020. pp. 1–9.
3. Колмыков Д.В. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей гальваническими покрытиями // Главный механик. 2010. № 10. С. 33–38.
4. Янута А.С. Исследование влияния режимов осаждения на структуру электролитического бинарного покрытия Fe-Cr, полученного из сульфатно-хлоридного электролита // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2022. № 3 (70). С. 17–21.
5. Ляхов Е.Ю., Зорин В.А. Повышение эффективности эксплуатации дорожных машин и автомобилей за счет применения ремонтных полимерных материалов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2021. № 1(95). С. 39–43. EDN WMKAWS.
6. Ляхов Е.Ю., Зорин В.А. Исследование релогических свойств полимерных композиционных материалов методом конечных элементов // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2020. № 3(66). С. 114–119. EDN SZJJOE.
7. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1(64). С. 11–17.
8. Котомчин А.Н. Оптимизация работы ванны хромирования при восстановлении деталей автотранспорта. Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2021; 18(4): 390–405. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405>
9. Котомчин А.Н., Корнейчук Н.И. Производственные рекомендации по применению электролита хромирования в условиях предприятий Приднестровья // Мир транспорта и технологических машин. 2021. № 3(74). С. 24–34. DOI:10.33979/2073-7432-2021-74-3-24-34
10. Котомчин А.Н., Ляхов Е.Ю. Восстановление деталей узлов и агрегатов техники, работающих при гидроабразивном изнашивании // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 5. С. 8–12. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-5-8-12. EDN EOTTUJ.
11. Котомчин А.Н., Корнейчук Н.И. Оптимизация условий электролиза при восстановлении золотников гидрораспределителя р-80 хромированием // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2021. № 3(69). С. 113–119. EDN PBCCLG.
12. Задорожный Г.С., Бомешко Е.В., Янута А.С. К вопросу о методах анализа состава электролитов для гальваноосаждения покрытий на основе железа // Гальванотехника и обработка поверхностей. 2023. Т. 31. № 2. С. 4–14. DOI 10.47188/0869-5326_2023_31_2_4. EDN JMTVUA.
13. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2020; 17(4): 500–511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>
14. Бомешко Е.В., Корнейчук Н.И. Электроосаждение двойных и тройных сплавов на основе железа и хрома: теоретические представления и практические рекомендации // Вестник ПГУ. 2019. Т. 3, № 53. С. 153–165. EDN LWYMBV
15. Корнейчук Н.И. Перспективы интенсификации восстановления деталей машин электролитическим хромированием // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 197–203. EDN SZTTDP.
16. Корнейчук Н.И., Ерхан Ф.М., Бомешко Е.В. Влияние параметров периодического тока с обратным регулируемым импульсом на структуру и микротвердость электролитических железных покрытий // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2017. № (3)57. С. 81–87. EDN YLDAZW.
17. Серебровский В.И., Серебровский В.В., Сафронов Р.И., Гнездилова Ю.П. Упрочняющее ле-

гирование электроосажденного железа // Вестник Курской ГСХА. 2015. № 4. С. 68–71.

18. Корнейчук Н.И., Лялякин В.П. Перспективы использования индустриальных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 254–264.

19. Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е., Лысенко А.Н., Обозов А.А. Повышение износостойкости деталей электрохимическими сплавами на основе железа // Сельский механизатор. 2017. № 2. С. 34–35. EDN ZDEDMR.

20. Мухин В.В., Баурова Н.И. Оценка коррозионной стойкости соединений, восстановленных с использованием полимерных композиционных материалов // Технология металлов. 2022. № 10. С. 39–45. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-10-39-45. EDN VTFHFQ.

21. Мухин В.В. Методика оценки свойств эпоксидных композиционных материалов, работающих во влажной среде // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 7. С. 35–39. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-7-35-39. EDN ZAQXKD.

22. Ляхов Е.Ю. Моделирование процессов усталостного разрушения поверхностей подшипниковых узлов автомобилей, восстановленных полимерными материалами // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 1(60). С. 25–30. EDN FKHJTC.

23. Емельянов А.А. Способы обеспечения антикоррозионной защиты кузовов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 9. С. 36–39. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-9-36-39. EDN TFNOOS.

24. Мухин В.В., Баурова Н.И. Исследование тиксотропных свойств дисперснонаполненных материалов, используемых при ремонте машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 2(73). С. 28–32. EDN TJNKKA.

25. Янута А.С., Штефан Ю.В., Фёдоров В.К., Корнейчук Н.И. Моделирование процесса электролитического покрытия сплава железо-хром из сульфатно-хлоридного электролита при восстановлении деталей машин. Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2023; 20(2): 260–276. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>. EDN: CBHVWL

26. Артемчук В.В., Босов А.А. Теоретические основы математического моделирования процессов электролитического покрытия // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2007. № 15. С. 52–56.

27. Хлыстов А.В., Бабенко В.А. Математическое моделирование и оптимизация режимов железнения в «горячих» хлористых электролитах на асимметричном токе // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 4(5). С. 44–47.

28. Штефан Ю.В., Зорин В.А. Методы выявления и оценки рисков в дорожном строительстве и машиностроении: монография. Москва: МАДИ, 2017. 136 с.

29. Штефан Ю.В., Абдуллаев А.Р. Математическая модель технологии изготовления кубовидного щебня на основе теории надежности // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 37. С. 132–138. EDN VFGHLS.

REFERENCES

1. Kotomchin A.N., Sinelnikov A.F., Korneychuk N.I. Restoration of machine parts: choice of the method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1): 84–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

2. Sinelnikov A.F., Bomeshko E.V., Korneychuk N.I., Ianuta A.S. Electrolytic alloying of iron-chromium during deposition of coatings from a sulfate-chloride electrolyte. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (14th–16th December 2020, Moscow). Moscow. 2020: 1–9.

3. Kolmykov D.V. Restoration and hardening of automobile parts by galvanic coatings. *Chief mechanical engineer*. 2010; 10: 33–38. (In Russ.)

4. Ianyta A.S. Investigation of the effect of deposition modes on the structure of an electrolytic binary Fe-Cr coating obtained from a sulfate-chloride electrolyte. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2022; 3(70): 17–21. (In Russ.)

5. Lyakhov E.Yu., Zorin V.A. Increasing the efficiency of operation of road machines and vehicles through the use of repair polymeric materials. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2021; 1(95): 39–43. (In Russ.) EDN WMKAWS.

6. Lyakhov E.Yu., Zorin V.A. Research of the rheological properties of polymeric composite materials using the finite element method. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2020; 3(66): 114–119. EDN SZJJOE. (In Russ.)

7. Kotomchin A.N., Sinelnikov A.F., Korneychuk N.I. Use of wear-resistant chromium plating in the restoration and hardening of automotive parts. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta (MADI)*. 2021; 1(64): 11–17. (In Russ.)

8. Kotomchin A.N. Optimization of the chrome plating bath operation during the restoration of vehicle parts. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(4): 390–405. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-4-390-405>

9. Kotomchin A.N., Korneychuk N.I. Production recommendations for the use of chrome plating electrolyte in the conditions of Pridnestrovian enterprises. *World of transport and technological machines*. 2021; 3(74): 24–34. (In Russ.) DOI:10.33979/2073-7432-2021-74-3-24-34

10. Kotomchin A.N., Lyakhov E.Yu. Restoration of the parts of the machinery units and assemblies

working under the hydro-abrasive wear. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija*. 2019; 5: 8–12. DOI 10.31044/1684-2561-2019-0-5-8-12. EDN EOTTUJ.

11. Kotomchin A.N., Korneychuk N.I. Optimization of electrolysis conditions during the restoration of the valves of the hydraulic distributor p-80 by chrome plating. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Serija: Fiziko-matematicheskie i tehnicheckie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2021; 3(69): 113–119. (In Russ.) EDN PBCCLG.

12. Zadorozhny G.S., Bomeshko E.V., Yanuta A.S. To the question of methods for analyzing the composition of electrolytes for electroplating of iron-based coatings. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2023; T. 31, no 2: 4–14. (In Russ.) DOI 10.47188/0869-5326_2023_31_2_4. EDN JMTVUA.

13. Kotomchin A.N., Sinelnikov A.F. Installation for maintaining the operating temperature of electrolytes when restoring machine parts with electroplated coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(4): 500–511. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>

14. Bomeshko E.V., Korneichuk N.I. Electrodeposition of double and ternary alloys based on iron and chromium: theoretical concepts and practical recommendations. *Vestnik PGU*. 2019; T. 3, no 53: 153–165. (In Russ.) EDN LWYMBV.

15. Korneichuk N.I. Prospects of intensification of machine parts restoration by electrolytic chromium plating. *Trudy GOSNITI*. 2010; T. 106: 197–203. (In Russ.) EDN SZTTDP.

16. Korneichuk N.I., Erhan F.M., Bomeshko E.V. Effect of parameters of periodic current with reverse regulated impulse on the structure and microhardness of electrolytic iron coatings. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Serija: Fiziko-matematicheskie i tehnicheckie nauki. Jekonomika i upravlenie*. 2017; (3): 57: 81–87. (In Russ.) EDN YLDAZW.

17. Serebrovsky V.I., Serebrovsky V.V., Saifonov R.I., Gnezdilova Y.P. Strengthening alloying of electrodeposited iron. *Vestnik Kurskoj GSHA*. 2015; 4, 2015: 68–71. (In Russ.)

18. Korneichuk N.I., Lyalyakin V.P. Prospects for the use of industrial methods of restoration of worn machine parts by galvanic and polymer coatings in modern conditions of development of agro-industrial technical service. *Trudy GOSNITI*. 2018; T. 130: 254–264. (In Russ.)

19. Guryanov G.V., Kisel Yu.E., Lysenko A.N., Obozov A.A. Increasing the wear resistance of parts by electrochemical iron-based alloys. *Sel'skij mehanizator*. 2017; 2: 34–35. (In Russ.) EDN ZDEDMR.

20. Mukhin V.V., Baurova N.I. Assessment of corrosion resistance of the joints restored with the use of polymer composite materials. *Tekhnologija metallov*. 2022; 10: 39–45. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-10-39-45. (In Russ.) EDN VTFHFQ.

21. Mukhin V.V. Methodology of Estimation of Properties of Epoxy Composite Materials Working in Wet Environment. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija*. 2022; 7: 35–39. (In Russ.) DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-7-35-39. EDN ZAQXKD.

22. Lyakhov E.YU. Modeling of fatigue failure processes of bearing units of the cars restored with polymeric materials. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta (MADI)*. 2020; 1(60): 25–30. (In Russ.) EDN FKHJTC.

23. Emelyanov, A.A. Methods of body corrosion protection. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija*. 2022; 9: 36–39. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-9-36-39. (In Russ.) EDN TFNOOS.

24. Muhin V.V., Baurova N.I. Investigation of thixotropic properties of dispersed fillers used in the repair of machines. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta (MADI)*. 2023; 2(73): 28–32. (In Russ.) EDN TJNKKA.

25. Lanuta A.S., Shtefan Yu.V., Fiodorov V.K., Korneichuk N.I. Electrolytic coating of iron-chromium alloy of sulphate-chloride electrolyte in machine parts recovery process modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(2): 260–276. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>. EDN: CBHVWL

26. Artemchuk V.V., Bosov A.A. Theoretical bases of mathematical modeling of electrolytic coating processes. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznizhnogo transportu im. akademika V. Lazarjana*. 2007; 15: 52–56.

27. Khlystov, A.V.; Babenko, V.A. Mathematical modeling and optimization of regimes of iron making in "hot" chloride electrolytes on asymmetric current. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta*. (In Russ.) 2004; 4(5): 44–47.

28. Stefan Y.V., Zorin V.A. Methods of identification and assessment of risks in road construction and engineering: a monograph. Moscow: MADI, 2017:136.

29. Stefan Yu.V., Abdullaev A. R. Mathematical model of cube-shaped crushed stone production technology based on reliability theory. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2023; 37: 132–138. (In Russ.) EDN VFGHLS.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Янута А.С. – анализ и систематизация экспериментальных данных, работа с текстом рукописи.

Задорожный Г.С. – проведение экспериментального исследования.

Штефан Ю.В. – применение статистических, математических методов для анализа данных, обработка и описание математической модели.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Anton S. lanuta. Analysis and systematization of experimental data, work with the text of the manuscript.

Grigori S. Zadorozhnyi. Conducting an experimental study.

Yurii V. Shtefan. Use of statistical and mathematical methods for data analysis, processing and description of a mathematical model.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янута Антон Сергеевич – ст. преподаватель кафедры «Транспортно-технологические машины и комплексы» БПФ ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко» (MD-3200, г. Бендеры, ул. Бендерского Восстания, 7), **ORCID:** 0000-0002-7134-6979, **SPIN-код:** 2532-4888, e-mail: ianyta_anton@mail.ru

Задорожный Григорий Сергеевич – ведущий специалист учебно-исследовательской лаборатории «Реновации машин и оборудования» (MD-3200 г. Бендеры, ул. Бендерского Восстания, 7), **ORCID:** 0009-0006-0732-0295, **SPIN-код:** 9151-2462, e-mail: mr.a.i.d.o@mail.ru

Штефан Юрий Витальевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета МАДИ (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64), **ORCID:** 0000-0002-7882-4873, **SPIN-код:** 7856-2194, e-mail: shtephan_y_v@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton S. Ianyta. Senior lecturer of the Transport and Technological machines and Complexes Department Taras Shevchenko PSU (MD-3200, Bender city, Bender Vosstaniya str. 7), **ORCID:** 0000-0002-7134-6979, **SPIN-code:** 2532-4888, e-mail: ianyta_anton@mail.ru

Grigorii S. Zadorozhnii. Leading specialist of educational and research Renovation of machinery and equipment laboratory (MD-3200, Bender city, Bender Vosstaniya str. 7), **ORCID:** 0009-0006-0732-0295, **SPIN-code:** 9151-2462, e-mail: mr.a.i.d.o@mail.ru

Yurii V. Shtefan. Cand. of Sci., Associate Professor of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (125319, Moscow, Leningradskii Prospekt, 64), **ORCID:** 0000-0002-7882-4873, **SPIN-code:** 7856-2194, e-mail: shtephan_y_v@mail.ru