

УДК 621.757

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХРОМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А.Н. Котомчин, Ю.В. Штефан, В.А. Зорин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследования высокопроизводимых хромовых покрытий для восстановления деталей автомобилей требуют много затрат времени и энергии. Для сокращения количества проводимых опытов необходимо провести математическое моделирование эксперимента для сокращения количества проводимых опытов и сведения к определённому алгоритму для получения достоверных и точных данных, которые позволят получить хорошие результаты в исследованиях при получении хромовых покрытий с максимальной производительностью – высоким выходом по току.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовалось необходимое оборудование для получения гальванических покрытий, разработан новый состав электролита для получения качественных высокопроизводительных хромовых осадков, а также программа Statistica 13.0, которая позволила сократить время на проведение расчётов и построение необходимых графиков и уравнений регрессии.

Результаты. Проведённый анализ методов и способов математического анализа полученных результатов с целью их обработки и построения модели показал, что с доверительным коэффициентом регрессии 0,95 наиболее предпочтительнее проводить исследования влияния состава электролита хромирования на выход по току в промежутке значений плотности тока от 125...250 А/дм², количества плавиковой кислоты 0,6...1,2 г/л и рабочей температуры электролита 16...27 °С.

Обсуждение и заключение. В результате полученной математической модели можно утверждать, что исследования влияния состава электролита на плотность тока позволят получить достоверные данные с наименьшим количеством проводимых опытов. При этом возможно получить ещё больший выход по току, если провести дополнительно исследования с изменением факторов в большую или меньшую сторону. Однако неизвестно, как будет меняться качество покрытия и сцепляемость с основой детали, которые являются важным фактором получения износостойких гальванических покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гальванические покрытия, хромирование, математическая модель, планирование, адекватность, регрессия, доверительный интервал.

БЛАГОДАРНОСТИ. БЛАГОДАРНОСТЬ рецензентам статьи.

Поступила 23.11.20, принята к публикации 25.12.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. **Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: А.Н. Котомчин, Ю.В. Штефан, В.А. Зорин. Моделирование ограничений при оптимизации эффективности хромирования деталей машин. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

© Котомчин А.Н., Штефан Ю.В., Зорин В.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

SIMULATION OF CURRENT OUTPUT DURING CHROME PLATING OF PARTS FOR HARDENING AND CAR PARTS RESTORATION

Aleksei N. Kotomchin, Yuri V. Shtefan, Vladimir A. Zorin
Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. Conducting an experiment when conducting research on electroplating coatings requires a lot of time and energy. To reduce the number of experiments performed, it is necessary to conduct mathematical modeling of the experiment to reduce the number of experiments performed and reduce it to a specific algorithm to obtain reliable and accurate data. The obtained reliable data will allow to get good results in studies of obtaining chrome coatings, with maximum performance, including current output.

Materials and methods. To conduct the research, the necessary equipment for obtaining electroplating coatings, developed a new electrolyte composition for obtaining high-quality high-performance chrome precipitation, as well as the Statistica 13.0 program, which allowed us to reduce the time for calculations and building the necessary graphs, was used.

Results. The analysis of methods and methods of mathematical analysis of the results obtained in order to process them and build a model showed that with a confidence regression coefficient of 0.95, it is most preferable to study the effect of the composition of the chromating electrolyte on the current output, in the range of current density values from 125 ... 250 A / dm², the amount of hydrofluoric acid 0.6...1.2 g / l and the operating temperature of the electrolyte 16 ... 27 °C.

Discussion and conclusion. As a result of the obtained mathematical model, it can be argued that studies of the influence of the electrolyte composition on the current density will allow to obtain reliable data with the least number of experiments. At the same time, it can also be argued that it is possible to obtain an even greater current output if additional research is carried out with a change in factors up or down. However, it is not known how the quality of the coating and the adhesion to the base of the part will change, which is an important factor in obtaining wear-resistant electroplating.

KEYWORDS: Electroplating, chrome plating, mathematical model, planning, adequacy, regression, confidence interval.

GRATITUDES. Thanks to the reviewers of the article.

Submitted 23.11.20, revised 25.12.2020.

The 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: Aleksei N. Kotomchin, Yuri V. Shtefan, Vladimir A. Zorin. Simulation of current output during chrome plating of parts for hardening and car parts restoration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (6): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

© Kotomchin A.N., Shtefan Y.V., Zorin V.A.



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

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации автомобилей и другой техники наступает момент, когда происходит потеря работоспособности автомобиля. Основной причиной потери работоспособности является отказ основных узлов и деталей, при котором происходит выход из строя детали, что приводит к отказу узла или агрегата в целом. Предприятию приходится тратить большие средства на поддержание в исправном состоянии техники во время её эксплуатации. Стоимость запасных частей автомобилей, особенно ресурсопределяющих, с каждым годом растёт, но качество из-за большого количества выпущенных деталей «по лицензии» снижается, из-за чего возрастает стоимость эксплуатации техники [1].

Одним из способов сокращения затрат предприятий на новые запасные части – восстановление их. При этом восстановленная деталь автомобиля может служить не меньше срока, который до этого проработала, а иногда и больше. Это условие использовано при восстановлении оригинальных деталей с предельным износом, не имеющим запас прочности для дальнейшей эксплуатации.

При проведении исследований применимости различных способов восстановления было выявлено, что большинство современных деталей имеют предельный износ, при котором происходит потеря работоспособности, в пределах 0,1...0,5 мм. Поэтому использование гальванических покрытий, в частности хромирования, при восстановлении деталей автомобилей оставляет их весьма перспективными и в настоящее время¹ [1].

Однако при анализе способов и составов электролитов хромирования были выявлены следующие преимущества хромирования [2, 3,4,5]:

1. Высокая износостойкость и твёрдость.
2. Высокая кроющая способность.
3. Отсутствие термического влияния на поверхность детали при осаждении.
4. Хорошее сцепление с основой детали и т.д.

В работах [4, 5, 6] проведён анализ известных высокопроизводительных электролитов, который показал большое разнообразие способов осаждения и составов электролитов хромирования. Однако многие составы элек-

тролитов в связи с технологической сложностью промышленного внедрения не нашли практического использования при восстановлении деталей автомобилей.

При обзоре существующих высокопроизводительных электролитов объектом исследования был выбран холодный саморегулирующийся электролит хромирования [6]. При осаждении данным составом хрома получались износостойкие осадки с выходом по току до 40%, с микротвёрдостью до 10500 МПа. Однако недостатком данного электролита был диапазон рабочих температур электролита, который составлял 18...23 °С. При повышении температуры выход по току резко падал, образовались дендриты на поверхности, увеличивалось количество сквозных трещин, что снижало коррозионную стойкость поверхности. Поэтому для поддержания рабочей температуры требовалось использовать мощные холодильные установки, что усложняло конструкцию ванны хромирования и увеличивало энергозатраты на работу холодильных установок [6].

Для снижения влияния температуры на выход по току и качество покрытий нами были проведены исследования, которые показали, что добавление неорганической добавки сульфата никеля и плавиковой кислоты увеличило диапазон рабочих температур электролита с 23 до 35 °С, при этом увеличился выход по току и скорость осаждения. Также качество покрытий не ухудшилось, а местами даже улучшилось – повышение микротвёрдости (до 12000 МПа) и отсутствие сквозных трещин, что улучшало коррозионную стойкость покрытия [6].

ТЕОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований было установлено, что выход по току при получении качественных хромовых покрытий играет важную роль при выборе способа восстановления деталей автомобилей. Известно, что выход по току в основном зависит от режимов электролиза, состава электролита и условий нанесения покрытий, поэтому особый интерес представляют почти все параметры и условия электролиза, которые оказывают влияние на структурообразование при электроосаждении хрома [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

В результате анализа проведённых иссле-

¹ Штефан Ю.В., Зорин В.А. Методы выявления и оценки рисков в дорожном строительстве и машиностроении : монография. Москва, МАДИ, 2017. 136 с. URL: <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel17M587.pdf>.

дований получили, что выход по току хрома в основном зависит от следующих составляющих:

- катодной плотности тока (D_k) в пределах 50÷200 А/дм²;
- концентрации катализирующего компонента в электролите (в нашем случае плавиковой кислоты (K_{HF})) в пределах 0÷1,0 г/л;
- рабочей температуры электролита в пределах 18÷35 °С.

В общем виде зависимость выхода по току хрома от параметров электролиза имеет вид

$$\eta = f(D_k; K_{HF}; t_{эл}; t). \quad (1)$$

Задача сводится к тому, чтобы выделить доминирующие факторы при помощи различных методов на «шумовом фоне» остальных факторов. При исследовании многомерных функций от нескольких переменных (m) можно разложить на систему функций от одной или двух переменных, для чего следует зафиксировать все значения переменных (кроме искомого) и результаты усреднить. Именно так поступают при построении поверхностей откликов при визуализации результатов планирования эксперимента после его статистической обработки².

Если искомая многомерная функция представляет собой сумму функций для каждой из переменных, решение может быть найдено, когда будет встречаться один раз комбинация любого значения переменной с любым значением другой переменной. Обычные многофакторные математические модели оказываются неприемлемыми, так как число экспериментов и затраты вычислительного времени на обработку данных становятся большими. Особенно усложняется задача при исследовании влияния парных воздействий, а также при случайном поиске важных факторов возникают такие же трудности. Поэтому нами в работе использовались проверенные и надежные методы, которые при выполнении ряда предпосылок позволяют выявлять существенные факторы с помощью небольшого числа экспериментов с относительно небольшими затратами по времени. К ним относятся³:

1. Дисперсионный анализ. В его основе лежит предположение о том, что существенность некоторого (дискретного) фактора характеризуется его вкладом в дисперсию выходной величины. Он позволяет отсеивать незначимые факторы модели.

2. Насыщенные дробные факторные планы. Основываются на предположении о наличии лишь линейных эффектов и приводят к оценке существенности факторов по их вкладу в математическое ожидание выходной величины. Эти планы как наиболее простые мы использовали для предварительного анализа при выборе наиболее значимых факторов.

3. Насыщенные экспериментальные планы Плакетта-Бермана. Для них предполагается наличие только линейных эффектов⁴.

4. Метод случайного баланса. Применяется в предположении, что среди рассматриваемых факторов не все являются существенными. Благодаря этому можно применять сверхнасыщенное планирование, в котором число факторов больше числа экспериментов.

Для приводимых методов значение имеют понятия числа степеней свободы и степени насыщенности планов эксперимента. Под числом степеней свободы φ понимают разность числа экспериментов N и числа искомого параметра k модели

$$\varphi = N - k. \quad (2)$$

При этом если:

а) $\varphi > 0$, $N > k$, т. е. число проведенных экспериментов превышает число оцениваемых параметров, то планы называют ненасыщенными. В этом случае возможна проверка адекватности модели;

б) $\varphi = 0$, $N = k$, т.е. число экспериментов равно числу искомого параметров, такие планы называют насыщенными. Для проверки адекватности здесь уже не остается степеней свободы;

в) $\varphi < 0$, $N < k$, т. е. число оцениваемых параметров превышает число экспериментов, планы называют сверхнасыщенными.

При планировании эксперимента исследований высокопроизводительных саморегулируемых электролитов хромирования было

² Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд. Москва, Наука, 1976. 280 с.

³ Волков П.Н. Планирование эксперимента. Москва, МАДИ, 1972г.

⁴ Крупин, А. Е. Анализ способов выделения существенных факторов при планировании эксперимента // Современный взгляд на будущее науки. Уфа, РИО МЦИИ Омега Сайнс. 2014. С. 15-16.

использовано ненасыщенное планирование вида 3^p , где по формуле (2) $p=3$ с проверкой адекватности.

После предварительного изучения объекта исследования и выделения существенных факторов переходят к поиску и изучению области оптимума, т. е. такого сочетания выделенных факторов, влияющих на выходной параметр, при которых параметр достигает своего оптимального значения (максимум или минимум)⁵.

Для решения задачи нахождения оптимума выбранной целевой величины в соответствии с конкретными условиями и требованиями применимы два принципиально различных подхода:

1. Определение оптимальных условий с помощью математической модели объекта. Здесь предполагается, что имеется статистическая (экспериментальная) модель, т.е. полученное с помощью планирования эксперимента математическое описание его результатов.

2. Нахождение оптимальных условий без использования модели (вслепую) методом последовательного приближения к оптимуму.

Вторая модель менее надежна, ибо не позволяет вмешиваться в процесс эксперимента до тех пор, пока все эксперименты не будут завершены и статистически обработаны. Но и первая модель без «прикидочных» опытов не может с первого раза выбрать нужные интервальные границы факторов.

Статистическая обработка результатов опытов, как правило, сводится к проверке среднеквадратичной ошибки опыта для отсеивания выбросов, доверительных интервалов и ошибки эксперимента. Грубые ошибки при повторных экспериментах определяются с использованием критерия Стьюдента по формуле [15]:

$$\frac{y_{i+1} - \bar{y}}{S} \geq t_T, \quad (3)$$

где y_{i+1} – значение сомнительного результата измерений; \bar{y} – среднее арифметическое значение измерения, вычисленное без учета сомнительного результата; S – средняя ква-

дратичная ошибка, вычисленная без учета сомнительного результата; t_T – табличное значение критерия Стьюдента для доверительного уровня вероятности при определенном количестве экспериментов.

Если вычисленное значение критерия Стьюдента оказывается больше табличного, сомнительный результат подвергается дополнительной экспериментальной проверке или не принимается во внимание [15].

Другим способом проверки наличия выбросов в результатах экспериментов и проверки воспроизводимости опытов является сравнение дисперсий и проверка их по критерию Фишера через отношение большей дисперсии воспроизводимости к меньшей⁶:

$$F_{\text{расч}} = \frac{(D_R)/\nu_2}{D_E/\nu_1}, \quad (4)$$

где $D_R = \sum_{i=1}^N (\dots - \bar{y})^2$ – дисперсия большей по модулю выборки; $D_E = \sum_{i=1}^{N_0} (\dots - \bar{y})^2$ – дисперсия меньшей по модулю выборки; ν_1 и ν_2 – число степеней свободы⁷.

Если полученное значение $F_{\text{расч}}$ с учетом степеней свободы числителя и знаменателя превышает пороговое значение 0,05, то делается вывод о том, что выборочные дисперсии принадлежат одной генеральной совокупности и могут быть приравнены.

Рассчитанное таким образом значение F -критерия сравнивают также с табличным значением или можно использовать функцию, встроенную в MS Excel, имеющую синтаксис ДИСП.В(массив Y1), ДИСП.В (массив Y2), ДИСП.В (массив Y3). Найти табличное значение критерия Фишера можно также через функцию, имеющую синтаксис ФРАСПОБР ($p; \nu_1; \nu_2$). Чтобы проверить условие равенства дисперсий воспроизводимости повторных опытов в каждой точке плана можно также воспользоваться встроенной функцией, имеющей синтаксис ФРАСП (Fрасч; N-m-1; N-m-1)

Количество повторных экспериментов в каждой точке плана от 3 до 5.

⁵ J.A., Cornell. 1990. www.StatSoft.ru. How to Apply Response Surface Methodology, in Basic References in Quality Control: Statistical Techniques. 1990. Vol. 8 (дата обращения: 09.11.2020).

⁶ Как найти табличное значение критерия Фишера. Функция Фишер в Excel и примеры ее работы. 1990. URL: <https://maintorrent.ru/kak-naiti-tablichnoe-znachenie-kriteriya-fishera-funkciya-fisher-v-excel/> (дата обращения: 09.11.2020).

⁷ Соловьев Д.С., Литовка Ю. В. Математическое моделирование гальванической ванны с циклическим включением анодных секций // Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств: сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции. 2010. С. 142-143.

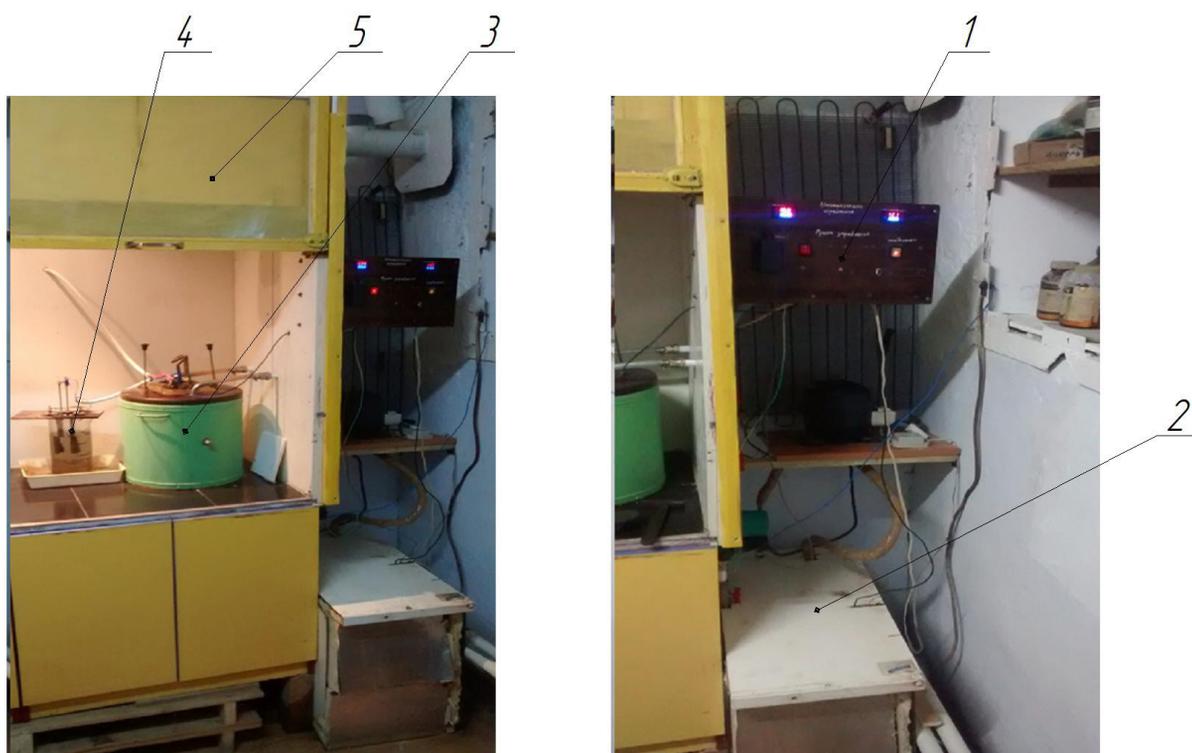


Рисунок 1 – Установка для исследований гальванических покрытий хрома [16]:
 1 – пульт управления установкой по контролю и поддержанию температуры электролита,
 2 – холодильник, 3 – бак с ванночкой для хромирования, 4 – ванночка для травления,
 5 – вытяжной шкаф

Figure 1 – Installation for research of chrome electroplating coatings [16]:
 1 – control panel of the installation for monitoring and maintaining the temperature of the electrolyte,
 2 – refrigerator, 3 – tank with a bath for chrome plating, 4 – etching bath, 5 – fume hood

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Лабораторные исследования с целью изыскания наиболее эффективных условий электролиза (с точки зрения скорости наращивания слоя хрома и качества покрытий) производились в стационарной ванне. Экспериментальная установка была изготовлена для работ, проводимых в НИЛ «Реновация машин и оборудования» БПФ ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко» (Приднестровье) и оборудована необходимыми устройствами, приспособлениями и приборами [16]. Внешний вид щита управления и электролизера представлен на рисунках 1 и 2.

Комплект рабочего оборудования составлял:

1. Ванны хромирования емкостью 3 и 8 л.
2. Источники питания.
3. Холодильная установка для автоматического регулирования температуры электролита.
5. Пусковая, регулировочная и контрольно-измерительная аппаратура.

6. Ванна для электрохимического травления поверхностей образцов (деталей) перед хромированием.

Ванны – стеклянные химико- и теплостойкие и винипластовые. Внутри каждой из них вмонтирован змеевик-теплообменник, изготовленный из цельнотянутой стальной трубки; датчик электроконтактного термометра; контрольный ртутный термометр и нагревательный элемент. Снаружи ванн, на кронштейнах, укреплялись токопроводящие элементы (штанги). К каждой из 6 групп образцов соответственно были изготовлены специальные подвесные приспособления и свинцовые аноды (свинец с содержанием 6% сурьмы и 5% олова). Отношение площади катода к аноду было принято 1:2, а межэлектродные расстояния – 90...100 мм.

Для определения оптимального состава электролита в качестве базового был выбран холодный саморегулирующийся электролит хромирования с неорганическими добавками сульфата никеля и плавиковой кислоты.

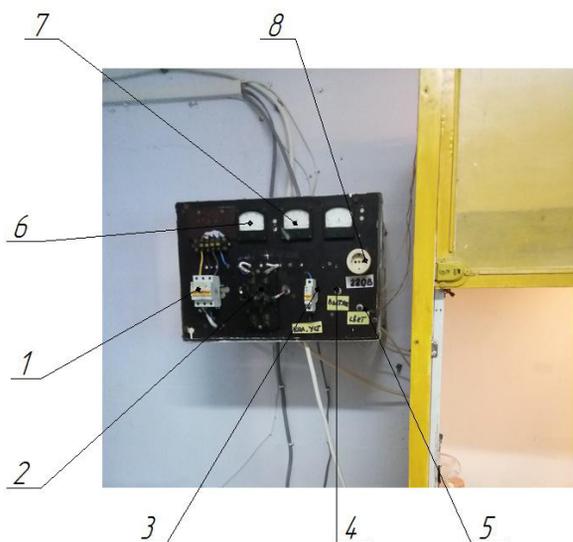


Рисунок 2 – Пульт управления установкой для хромирования:

1 – трёхфазный автомат, 2 – ключ управления электролизом, 3 – однофазный автомат установки по контролю и поддержанию температуры, 4 – тумблер включения вытяжки в шкафу, 5 – тумблер включения освещения в шкафу, 6 – вольтметр, 7 – амперметр, 8 – розетка на 220 В

Figure 2 – Remote control for chrome plating: 1 – three-phase machine, 2 – a key control electrolysis, 3 – phase machine installations to control and maintain the temperature, 4 – switch hoods in the closet, 5 – switch lighting in the closet, 6 – voltmeter, 7 – amperemeter, 8 – socket 220 V

Электролиты готовили путем растворения химических реактивов квалификации ХЧ (химически чистые) в дистиллированной воде по ГОСТ 6709–72.

Для проведения исследований концентрацию составляющих электролита изменяли, в г/л: CrO_3 – 250...450 г/л, через 50 г/л; CaCO_3 – 0...80 г/л, через 5 г/л; сульфат никеля семи водного ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 5...10 и $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 5...10 через каждые 2,5 г/л, а плавиковой кислоты (HF) – 0...2 через каждые 0,05 г/л [16].

Хромовые покрытия наносили на цилиндрические образцы из стали 45 диаметром 12 мм, с общей площадью покрываемой поверхности 0,075 дм² в стационарной ванне объёмом 3 л. Питание электролизёра осуществлялось от источника постоянного тока с двухполупериодной схемой выпрямления. Перед нанесением электролитических покрытий образцы подвергали обезжириванию в венской извести и анодному травлению в 30% водном растворе серной кислоты с добавкой соли сульфата железа в количестве 15 г/л при температуре электролита травления $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Все образцы после обезжиривания и травления тщательно

промывались в дистиллированной воде и просушивались [16,17,18].

При проведении исследований катодную плотность тока (D_k) изменяли от 50 до 200 А/дм² и температуру электролита ($T_{\text{эл}}$) от 18 до 35°C , через каждые 2,5...5 $^\circ\text{C}$, с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Изменения и контроль температуры электролита осуществлялись с помощью разработанной установки для поддержания рабочей температуры электролита. Плотность тока рассчитывали как силу тока, приходящуюся на единицу площади электрода, А/дм²:

$$D_k = I/S, \quad (5)$$

где I – сила тока, А; S – площадь поверхности электрода, дм².

Хромовые покрытия наносились на образцы нескольких групп, которые изготавливались для определения количественного значения выхода хрома по току и скорости осаждения металла.

Для определения выхода металлического хрома по току использовали гравиметрический метод, с точностью до 10^{-5} г, с использованием аналитических весов АДВ-200М. Кроме того, выход по току определялся по толщине покрываемого слоя хрома, измеряемой с помощью микрометра МК-0-25 ГОСТ 6507–90 [19].

Выход тока гравиметрическим методом вычисляли по формуле, %:

$$\eta = \frac{m_{\phi}}{m_T} \cdot 100, \quad (6)$$

где m_{ϕ} – фактическое количество осаждённого хрома, г.

$$m_{\phi} = G_2 - G_1, \quad (7)$$

где G_1 – первоначальная масса образца перед покрытием хромом, г; G_2 – масса образца после покрытия хромом, г;

m_T – теоретически возможное количество выделенного на катоде хрома, г.

$$m_T = c \cdot I \cdot T \quad (8)$$

где c – электрохимический эквивалент хрома (0,324 г/А·ч); I – сила тока, А; T – время электролиза, ч.

После приготовления электролита для хромирования делалась необходимая обязательная его проработка с целью выделения в растворе трёхвалентного хрома в количестве от 2...10 г/л, чтобы производительность вышла на заданную величину.

Режим электролиза следующий: травление – $D_A=130...140$ А/дм², в течение 1,5–2 мин, электролит состоящий из 30% серной кислоты и 15 г/л сульфата железа. Декапирование в электролите хромирования – $D_A=50...200$ А/дм², в течение 30–60 с. Хромирование производилось в диапазоне плотностей тока – $D_k=50...200$ А/дм², с температурным режимом электролиза – $t_{эл}=18...35$ °С. Анодное травление в электролите хромирования после завершения электролиза – $D_A=50...200$ А/дм², в течение 1,5–2 мин – для снятия межэлектродных напряжений в хромовом покрытии [20, 21, 22].

После проведения осаждения хрома образцы тщательно промывались в тёплой и холодной дистиллированной воде, потом просушивались на воздухе в течение 1 часа и далее помещались в муфельную печь и просушивались при температуре 200 ± 15 °С, с целью вывода водорода из хромированной поверхности и улучшения физико-механических свойств покрытия. Процесс проводили в течение 1–1,2 ч [23, 24].

После сушки образцы взвешивались на весах 1-го класса точности АДВ-200 и определялся выход хрома по току. Микрометром МК 0-25 по ГОСТ 6507–90 измерялась толщина покрытия как косвенного показателя выхода по току.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проводилось планирование модели экстремального полнофакторного эксперимента для определения оптимальных условий электролиза при получении высокого выхода по току. Для квадратичной модели функции отклика можно искомое уравнение записать с коэффициентами регрессии $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2. \quad (9)$$

Проверка значимости коэффициентов проводится о t-критерию Стьюдента $t = |\beta_i| / S_{\beta_i}$, где $|\beta_i|$ – абсолютное значение i-го параметра коэффициента регрессии; S_{β_i} – квадратичная ошибка коэффициента регрессии; t – табличное значение критерия Стьюдента по формуле в Excel, имеющей синтаксис СТЬЮДРАС-ПОБР(α ;f) при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы

$$f = (n-1)N, \quad (10)$$

где N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов.

Поскольку известно, что уровень значимости численно равен сумме отсеченных хвостов кривой нормального распределения, то модель будет более точной, если величина отбрасываемых значений α минимальна⁸. Оценку адекватности модели проводили, используя критерий Фишера: (F-критерий). Модель считается адекватной, если выполнялось условие

$$F_p < F_{кр}, \quad (11)$$

где $F_{кр}$ – критическое значение; F-критерия для степеней свободы $f_{ад} = N - m$ и $f_e = N(n - 1)$ и уровне значимости $\alpha=0,05$. Критическое значение находили при помощи функции, имеющей синтаксис =FРАСПОБР (α ;p;n-p-1), где α – вероятность, связанная с данным распределением; p и n – числитель и знаменатель степеней свободы соответственно.

Расчетное значение F-критерия определяли по формуле

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}. \quad (12)$$

Дисперсия адекватности определяется из выражения

$$S_{ад} = \frac{n}{N-m} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad (13)$$

где N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов; m – число членов аппроксимирующего полинома; \bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в точке плана; \bar{y}_j – значение параметра оптимизации, вычисленное по аппроксимирующему полиному.

Дисперсия воспроизводимости определяется из выражения

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (14)$$

где y_{ji} – значение i-го параметра оптимизации в j-й точке плана; \bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в j-й точке плана; N – число точек плана в матрице планирования; n – число параллельных экспериментов.

На основании вышеизложенного для сокращения проведения объема экспериментальных исследований было использовано математическое планирование эксперимента.

⁸ Крупин, А. Е. Анализ способов выделения существенных факторов при планировании эксперимента // Современный взгляд на будущее науки. 2014. С. 15-16.

За параметр оптимизации был принят выход по току. Для обеспечения высокой производительности электролитического процесса осаждения хрома, повышения коррозионной стойкости и износостойкости покрытия нами было предпринято комбинирование неорганическими добавками $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в количестве от 5 до 10 г/л каждого компонента и добавление плавиковой кислоты (HF) в количестве 0...1,0 г/л. В связи с тем что влияние этих факторов носит нелинейный характер, было применено планирование экстремального полнофакторного эксперимента модели, матрица которого приведена в таблице 1. Как видно из правой части таблицы, случайные выбросы, не удовлетворяющие критерию по формуле (3), были все устранены.

Проведенные предварительные экспериментальные исследования позволили установить влияние плотности тока, концентрацию плавиковой кислоты, сульфата кобальта и никеля в растворе, рабочей температуры электролита на выход по току и выбрать наиболее влияющие факторы, а прочие отсеять как «шумы». Среди перечисленных факторов, наиболее влиявших на выход по току, выбрали три и установили их уровни варьирования (-1, 0,1) для матрицы планирования эксперимента (таблица 1).

Опыты проводились с 3-кратной повторностью в случайном порядке, что позволило снизить влияние систематических погрешностей.

В результате статистического анализа полученной математической модели было установлено следующее:

1. Среди незначимых коэффициентов модели оказались по критерию Стьюдента все парные взаимодействия, кроме $x_1 * x_2$, поскольку его значение коэффициента по модулю $\beta_{1,2} = 0,66 > t_{\text{табл}}(0,05;27(3-2)) \cdot s_{\text{bij}} = 0,244$.

Оставшиеся коэффициенты признаны малозначимыми, но оставлены в модели для повышения ее адекватности и точности расчетных значений отклика. Также малозначимым (на самой нижней границе) признан коэффициент $\beta_3^2 = 0,444 < t_{\text{табл}} s_{\text{bij}} = 0,489$.

2. Проверка условия (10) для полученной модели выполнена, поскольку условие соблюдается. Расчетное значение F-критерия $F_p = \frac{S_{\text{ад}}}{S^2\{y\}} = \frac{9,322}{4,385} = 2,126$, что меньше табличного значения критерия Фишера $F_{\text{РАСПО-БР}}(0,05;27;16) = 2,213$. Полученная при этом дисперсия адекватности по формуле (13) $S_{\text{ад}} = 9,322$, а дисперсия воспроизводимости по формуле (14) $S_y = 4,385$.

Поскольку полученная модель признана адекватной проведенным экспериментам по результатам статистического анализа, о чем

также свидетельствует полученный результат множественной регрессии в одноименном модуле ПМ Statistica 13.0 с полученным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,806$ и нормально распределенным предсказанным остаткам, дальнейший анализ модели проводили в модуле «Планирование эксперимента» ПМ Statistica 13.0.

Было установлено, что все 27 точек плана в целом по модели всего факторного пространства распределены симметрично относительно нуля и закон их распределения близок к нормальному, следовательно, влияние систематических ошибок на результат сведено к минимуму. Уровень корреляции до $r = 0,91$ также свидетельствует о достаточно высокой способности математической модели предсказывать получаемые значения выхода по току без проведения дополнительных экспериментов в других точках внутри исследованного факторного пространства. И хотя, как известно из свойств нормального распределения, лучше всего модель предсказывает значения в середине факторного пространства, нас больше интересовала правая часть кривой нормального распределения, позволившая нам повысить выход по току путем поиска оптимальных сочетаний факторов. Это позволит в дальнейшем при проведении экспериментов идти по кратчайшему пути к экстремально высоким выходам по току методом крутого восхождения [25, 26, 27]. Так результаты анализа профиля желательности показали, что экстремальные или критические значения независимых факторов лежат за пределами проанализированного факторного пространства как по плотности тока $x_1^{\text{крит}} = 1,25$, так и по рабочей температуре электролита $x_3^{\text{крит}} = -1,86$. Второй фактор $x_2^{\text{крит}} = 0,84$ смещается в большую сторону, но остается внутри факторного пространства. Такому экстремальному сочетанию факторов модель предсказывает крайне высокий выход по току – до 52...55%. По видимому это объясняется тем, что процесс подчиняется закону Фарадея: чем больше затрачивается энергии, тем больше происходит осаждение металла на катоде, а также имеется влияние неорганической добавки на растворимость и активность неорганической добавки плавиковой кислоты при низких температурах в электролите хромирования.

Однако, как видно на рисунке 3, за границами факторного пространства желательность максимизировать выход по току стремительно падает, что свидетельствует о правильном исходном выборе границ регулирования факторного пространства.

Таблица 1
Исходные данные для планирования

Table 1
Initial data for planning

№ опыта	Уровни варьирования факторов						Значения отклика: выход по току, %		
	Кодированные			Натуральные			Среднее из трех повторных измерений		
	X ₁	X ₂	X ₃				Y1	Y2	Y3
1	-1	-1	-1	50	0	18	34	37	37
2	-1	-1	0	50	0	27	32	34	36
3	-1	-1	1	50	0	35	30	32	28
4	-1	0	-1	50	0,5	18	40	36	38
5	-1	0	0	50	0,5	27	43	43	40
6	-1	0	1	50	0,5	35	38	41	41
7	-1	1	-1	50	1,0	18	43	43	46
8	-1	1	0	50	1,0	27	45	46	41
9	-1	1	1	50	1,0	35	39	36	39
10	0	-1	-1	125	0	18	37	39	38
11	0	-1	0	125	0	27	39	34	35
12	0	-1	1	125	0	35	32	35	35
13	0	0	-1	125	0,5	18	46	45	47
14	0	0	0	125	0,5	27	43	45	44
15	0	0	1	125	0,5	35	41	38	41
16	0	1	-1	125	1,0	18	50	49	45
17	0	1	0	125	1,0	27	45	50	49
18	0	1	1	125	1,0	35	45	47	40
19	1	-1	-1	200	0	18	41	41	38
20	1	-1	0	200	0	27	37	34	37
21	1	-1	1	200	0	35	34	35	33
22	1	0	-1	200	0,5	18	47	50	47
23	1	0	0	200	0,5	27	46	47	45
24	1	0	1	200	0,5	35	45	40	47
25	1	1	-1	200	1,0	18	51	48	51
26	1	1	0	200	1,0	27	44	48	43
27	1	1	1	200	1,0	35	43	40	43

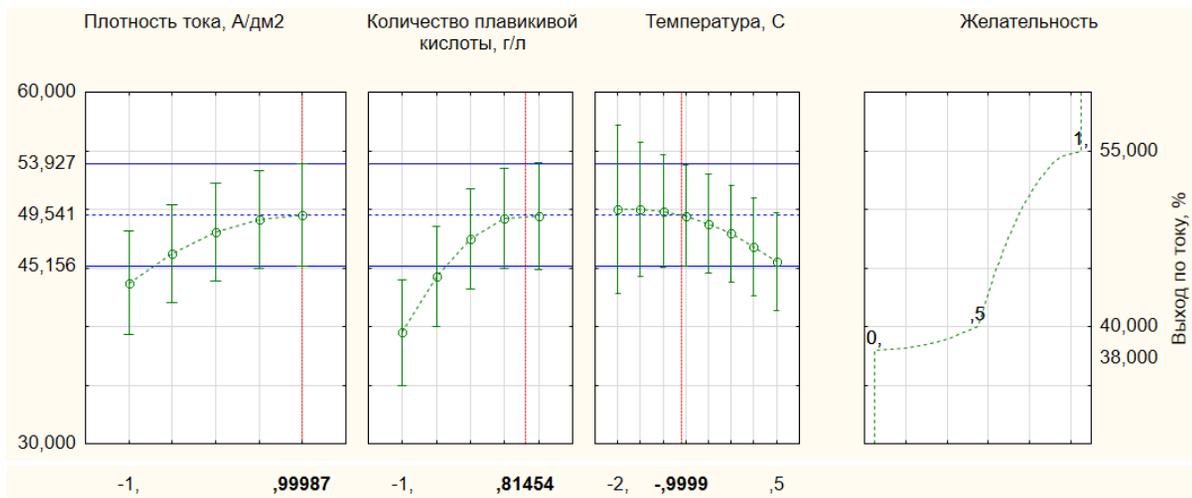


Рисунок 3 – Разбросы предсказываемых значений максимального выхода по току на границе исследованного факторного пространства

Figure 3 – Spread of predicted values of the maximum current output at the boundary of the studied factor space

Полученные математические зависимости удобно анализировать по графическому ма-

териалу, полученному с помощью программы Statistika 13.0 и представленному на рисунке 4.

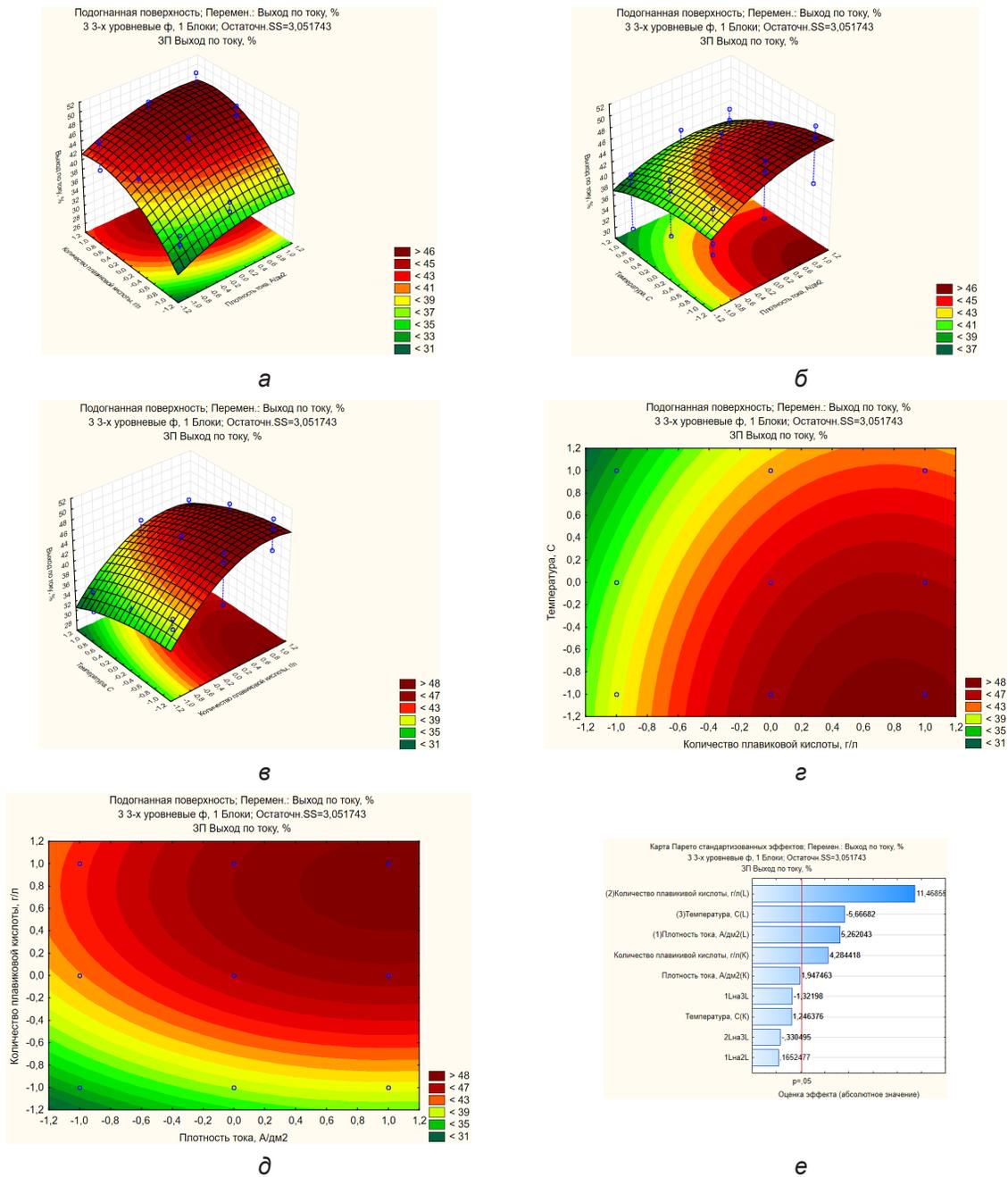


Рисунок 4 – Результаты математических зависимостей:
 а – влияние количества плавиковой кислоты x_2 и плотности тока x_1 на отклик выход по току Y при фиксированном уровне температуры $x_3=0$; б – влияние температуры x_3 и плотности тока x_1 на отклик выход по току Y при фиксированном количестве плавиковой кислоты $x_2=0$;
 в – влияние температуры x_3 и количества плавиковой кислоты x_2 на отклик выход по току Y при фиксированной плотности тока $x_1=1$; г – влияние температуры x_3 и количества плавиковой кислоты x_2 на отклик выход по току Y при фиксированной плотности тока $x_1=1$; д – влияние количества плавиковой кислоты x_2 и плотности по току x_1 на отклик выход по току Y при фиксированной температуре $x_3=-1$; е – диаграмма Парето для влияния независимых факторов на выход по току

Figure 4 – Results of mathematical relationships and the influence of the quantity of hydrofluoric acid x_2 and a current density of x_1 on the response of the current output Y at a fixed temperature level $X_3=0$; б – Influence of temperature X_3 and a current density of x_1 on the response of the current output Y given a fixed amount of hydrofluoric acid $x_2=0$; в – Influence of temperature X_3 and the quantity of hydrofluoric acid x_2 on the response of the current output Y at a fixed current density of $x_1=0$; г – Influence of temperature X_3 and the quantity of hydrofluoric acid x_2 on the response of the current output Y at a fixed current density of $x_1=1$; д – the Effect of the amount of hydrofluoric acid x_2 and the current density x_1 on the response of the current output Y at a fixed temperature $X_3=-1$; е – Pareto Diagram for the influence of independent factors on the current output

Значения коэффициентов уравнения регрессии можно получить при помощи встроенного модуля «Дисперсионный анализ» ПМ Statistica 13.0, где красным цветом программа помечает статистически значимые факторы (таблица 2).

Таблица 2
Полученные коэффициенты уравнения регрессии
в натуральных и кодированных значениях

Table 2
Obtained coefficients of the regression equation in natural and encoded values

Фактор	Оценки эффектов; R-кв.=,92732;Скор.,88885 (Таблица исходных данных 2 3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=3,051743 ЗП Выход по току, %						
	Эффект	Ст.Ош.	t(17)	p	-95, % Дов.Пред	+95, % Дов.Пред	Козф.
Сред/Св.член	41,07407	0,336196	122,1731	0,000000	40,36476	41,78338	41,07407
(1)Плотность тока, А/дм ² (L)	4,33333	0,823508	5,2620	0,000064	2,59588	6,07078	2,16667
Плотность тока, А/дм ² (К)	1,38889	0,713179	1,9475	0,068190	-0,11579	2,89356	0,69444
(2)Количество плавиковой кислоты, г/л(L)	9,44444	0,823508	11,4686	0,000000	7,70699	11,18189	4,72222
Количество плавиковой кислоты, г/л(К)	3,05556	0,713179	4,2844	0,000502	1,55088	4,56023	1,52778
(3)Температура, С(L)	-4,66667	0,823508	-5,6668	0,000028	-6,40412	-2,92922	-2,33333
Температура, С(К)	0,88889	0,713179	1,2464	0,229528	-0,61579	2,39356	0,44444
1L на 2L	0,16667	1,008587	0,1652	0,870698	-1,96127	2,29460	0,08333
1L на 3L	-1,33333	1,008587	-1,3220	0,203688	-3,46127	0,79460	-0,66667
2L на 3L	-0,33333	1,008587	-0,3305	0,745064	-2,46127	1,79460	-0,16667

Искомое уравнение регрессии по формуле (9) принимает вид

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{1,2} X_1 X_2 + \beta_{1,3} X_1 X_3 + \beta_{2,3} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 = 41,074 + 2,167 X_1 + 4,72 X_2 - 2,33 X_3 + 0,083 X_1 X_2 - 0,667 X_1 X_3 - 0,167 X_2 X_3 + 0,694 X_1^2 + 1,523 X_2^2 + 0,444 X_3^2$$

Поиск экстремальных значений методом крутого восхождения

Желательность увеличивается за пределами факторного пространства по температуре в меньшую сторону и достигает своего максимума при значении в кодированных единицах -2. При этом интервал предсказания моделью сильно увеличивается и границы выхода по току расширяются: от 40 до 55. Плотность тока за границей факторного пространства выше 1,0 начинает снижать желательность и дает диапазон выхода по току от 42 до 55. Такое сочетание факторов, которое показано на рисунке 3 красной границей, независимых факторов позволяет назначить коэффициенты

значимости для уравнения (9), предсказываемые данной моделью для перехода к новой системе координат со смещенным центром и границами факторов. Модель предсказывает в интервале от 47,16 до 51,91 среднее значение выхода по току 49,5%.

Если задать новые интервалы варьирования, представленные в таблице 3, а в качестве отклика задать значения, предсказанные уравнением регрессии модели, полученным выше, то можно будет вывести новые уравнения, описывающие факторное пространство вблизи предсказанного моделью максимума выхода по току. Тогда новое уравнение регрессии примет вид

$$Y = 44,63 + 2,167 X_1 + 3,846 X_2 + 2,33 X_3 + 0,667 X_1 X_3 + 0,136 X_2 X_3 - 1,389 X_1^2 - 2,027 X_2^2 - 0,889 X_3^2$$

Таблица 3
Новые уровни варьирования факторов после оптимизации

Table 3
New levels of factor variation after optimization

Факторы		Нижний уровень: кодированное/натуральное	Верхний уровень: кодированное/натуральное
Плотность тока, А/дм ²	X ₁	0,4/155	1,2/215
Количество плавиковой кислоты, г/л	X ₂	0,4/0,7	1,2/1,1
Рабочая температура электролита, °С	X ₃	-1,2/16,3	-0,8/19,7

В результате статистического анализа новой математической модели установили:

1. Среди незначимых коэффициентов модели оказались по критерию Стьюдента все парные взаимодействия и квадратичные коэффициенты, то есть степень искривления поверхности отклика вблизи оптимума минимальна и превращается в плоскость.

2. Проверка условия (11) для полученной модели выполнена, поскольку условие соблюдается при условии сохранения дисперсии воспроизводимости. Расчетное значение F-критерия $F_p = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}} = \frac{0,007}{4,385} = 0,002$, что меньше критического значения критерия Фишера

$F_{РАСПОБР(0,05;27;22)} = 2,004$, поэтому модель адекватна.

3. Все коэффициенты уравнения регрессии для дальнейшего приближения к оптимуму оказываются малозначимыми и позволяют получить значение отклика Y до 55%. Дальнейшее движение по факторному пространству ближе к оптимуму без проведения повторных опытов нецелесообразно и в то же время требует более жестких интервалов варьирования независимых параметров. Характер кривизны факторного пространства вблизи предсказанного оптимума можно увидеть на рисунке 5, а степень влияния каждого фактора по диаграмме Парето на рисунке 6.

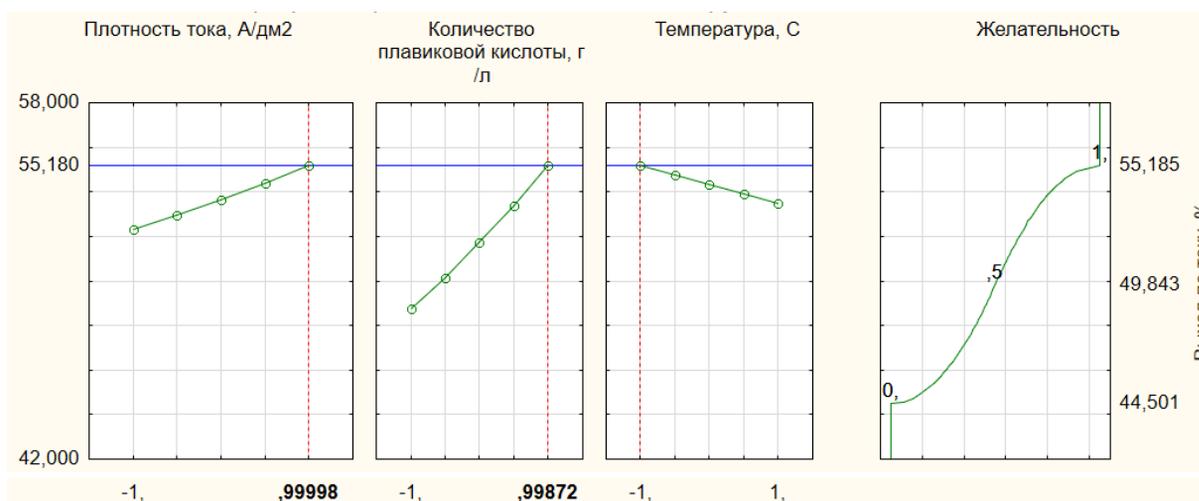


Рисунок 5 – Степень искривления факторного пространства вблизи прогнозного максимума

Figure 5 – The degree of curvature of the factor space near the maximum after the forecast

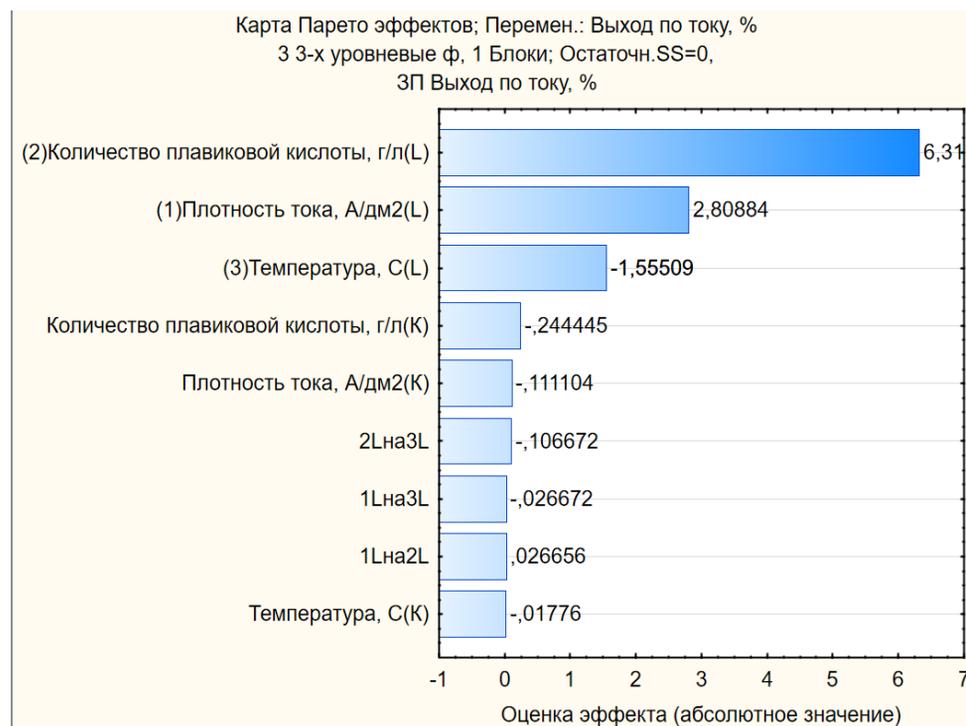


Рисунок 6 – Диаграмма Парето для новой зависимости прогноза вблизи максимума

Figure 6 – Pareto Diagram for the new forecast dependence near the maximum

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сделать следующие главные выводы:

1. Вблизи спрогнозированного моделью оптимума факторное пространство максимально вытягивается и превращается в плоскость, где парные и квадратичные зависимости не влияют на значения получаемого отклика. При этом сохраняется максимальное влияние количества плавиковой кислоты X_2 , плотности тока X_1 и температуры X_3 (см. рисунок 6). Остальные факторы модель считает «шумом» и отбрасывает как малозначимые. Это объясняется необходимостью повторных опытов вблизи факторного пространства, поскольку новая математическая модель получена из прогнозной, неспособна спрогнозировать значение отклика при оптимальных сочетаниях независимых факторов.

2. Назначенные в таблице 3 новые сочетания факторов со смещенными центрами, полученные из анализа рисунка 4,г и 4,д по максимизации выхода по току более 48% позволили получить новое уравнение регрессии, описывающее поведение функции вблизи экстремума. Анализ нового уравнения по-

казывает, что максимизации выхода по току способствуют все линейные коэффициенты в порядке их значимости: x_2, x_1, x_3 , а также парное воздействие $x_1 x_3$. Остальные факторы либо уменьшают выход по току, либо малозначимы. Отрицательные коэффициенты перед квадратичными членами уравнения регрессии свидетельствуют о наличии экстремума функции в виде максимизации выхода по току. Но для этого нужны новые опыты со смещенными центрами и границами варьирования.

3. Наилучшим образом описывает поведение функции на всем факторном пространстве первое уравнение регрессии, где наибольший вклад в увеличение выхода по току приносят x_2, x_3, x_1 в порядке их убывания. После чего значимым признано количество плавиковой кислоты – квадратичный член x_2 с положительным коэффициентом, который свидетельствует о наличии минимального/оптимального ее количества, поскольку положительный.

4. Благодаря математическому моделированию эксперимента получили границы для новых экспериментов, а полученное уравнение может прогнозировать выход по току до 48%. Для получения выхода по току свыше

50 до 55 процентов следует максимизировать плотность тока и количество плавиковой кислоты при одновременном снижении температуры электролита до 16,3...19,5 °С. Однако это усложняет технологический процесс необходимостью применения специальных охлаждающих экзотермическую реакцию устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин // Вестник СибАДИ. 2020. № 17(1). С. 84-97.
2. Фомичев В.Т., Садовникова В.В., Москвичева Е.В. Легирование электролитического хрома молибденом в электролите, содержащем органические добавки // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3. С. 44-46.
3. Ткаченко И.Д. [и др]. Усовершенствование технологии хромирования с применением неорганических и органических композиций // Разработка и применение твердых металлических покрытий. Днепропетровск. 1981. С. 223-224.
4. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Сравнительная характеристика электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин. ВИНТИ, «Транспорт: наука, техника», Научно-информационный сборник, управление». 2020. № 7. С. 50-55.
5. Newby Kenneth, R. Functional chromium plating // Metal Finish. 2004. Vol. 102. №4А. Pp. 188-198.
6. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Усовершенствование холодного саморегулирующегося электролита хромирования при упрочнении и восстановлении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2019. №4 (67). С. 17-24.
7. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф., Корнейчук Н.И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. №3 (70). С. 22-32.
8. Елинек Т.В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27. №3. С. 4-14.
9. Едигарян А.А., Полукаров Ю.М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Cr (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9. №3. С. 17-18.
10. Максименко С.А., Балакина О.А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №3–4. С. 47-50.
11. Петров Ю.Н., Корнейчук Н.И. [и др.] Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинёв: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М.В. Фрунзе, 1979. С. 48-51.
12. Кудрявцев В.Н., Винокуров Е.Г., Кузнецов В.В. Толстослойное хромирование из электролитов на основе сернистого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6. №1. С. 24-30.
13. Солодкова Л.Н., Ващенко С.В., Кудрявцев В.Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11. № 3. С. 31-33.
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. №317-318. Pp. 612-618.
15. Зорин, В.А., Штефан Ю.В., Тимченко М.И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79. № 4. С. 5-13.
16. Котомчин А.Н., Синельников А.Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020;17(4). С. 500-511.
17. Петроченкова И.В., Помогаев В.М., Волкович А.В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск, НИ РХТУ. 2004. С. 44-51.
18. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Т. 11. Pp. 2888-2896.
19. Bolch T., Linde R. U.A. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. Pp. 2095-2100.
20. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen Galvanotechnik. 2005. №9. Т. 1. pp. 2063-2071.
21. Корнейчук Н.И., Ковбасюк А.В. [и др.]. Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. №144. С. 17-23.
22. Аджиев, Б.У., Ващенко С.В., Соловьева З.А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. №1. С. 28-31.
23. Солодкова Л.Н., Соловьева З.А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30. №10. С. 1254-1256.
24. Шлугер М.А., Ток Л.Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 32. №3. С. 297-305.
25. Галдина В.Д., Черногородова М.С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента // Вестник СибАДИ. 2017. 2(54). С. 90-98.
26. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактошина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск. 2004. Т. 7. Ч. 1. С. 3-11.

27. Горбунов И.П., Горбунов Д.И. Математическое моделирование процесса диффузионного хромирования стали. Теория и практика производства листового проката // Сборник научных трудов. Ч. 2. Липецк, ЛГТУ, 2008. С. 68-72.

REFERENCES

1. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. K voprosu vybora sposoba vosstanovlenija detalej mashin [To the question of choosing a method for restoring machine parts]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(1): 84-97. (in Russian)
2. Fomichev V.T., Sadovnikova V.V., Moskvicheva E.V. Legirovanie jelektroliticheskogo hroma molibdenom v jelektrolite, soderzhashhem organicheskie dobavki [Alloying of electrolytic chromium with molybdenum in an electrolyte containing organic additives]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1 (3): 44-46. (in Russian)
3. Tkachenko I.D. i dr. Uovershenstvovanie tehnologii hromirovanija s primeneniem neorganicheskikh i organicheskikh kompozicij [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions]. *Razrabotka i primeneniye tverdykh metallicheskih pokrytij*. 1981. 223-224. (in Russian)
4. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. Sravnitel'naja harakteristika jelektrolitov hromirovanija dlja vosstanovlenija i uprochnenija detalej mashin [Comparative characteristics of chrome plating electrolytes for the restoration and hardening of machine parts]. *VINITI «Transport: nauka, tehnika*. 2020; 7: 50-55. (in Russian)
5. Newby Kenneth, R. Functional chromium plating. *Metal Finish*. 2004; 102 (4A): 188-198.
6. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F. Uovershenstvovanie holodnogo samoregulirujushhegosja jelektrolita hromirovanija pri uprochnenii i vosstanovlenii detalej mashin [Improvement of cold self-regulating electrolyte of chromium plating for hardening and restoration of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2019; 4 (67): 17-24. (in Russian)
7. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F., Kornejchuk N.I. Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin [Intensification of the process of electrolytic chrome plating during restoration and hardening of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2020; 3 (70): 22-32. (in Russian)
8. Elinek T.V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody [Advances in electroplating. World literature review for 2017-2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2019; 27 (3): 4-14. (in Russian)
9. Edigarjan A.A., Polukarov Ju.M. Jelektroosazhdenie hroma i ego splavov iz sul'fatnyh rastvorov Sg (III) [Electrodeposition of chromium and its alloys from SG (III) sulphate solutions]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2001; 9 (3): 17-18. (in Russian)
10. Maksimenko S.A., Balakina O.A. Jelektroosazhdenie hromovyh pokrytij iz jelektrolitov na osnove hroma (3) i murav'inoj kisloty [Electrodeposition of chromium coatings from electrolytes based on chromium (3) and formic acid]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1(3-4): 47-50. (in Russian)
11. Petrov Ju.N., Kornejchuk N.I. i dr. Progressivnye sposoby vosstanovlenija detalej mashin i povyshenija ih prochnosti [Progressive ways to restore machine parts and increase their strength]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. Kishinjov, Kishinevskij sel'skohozjajstvennyj institut im. M.V. Frunze*. 1979. 48-51. (in Russian)
12. Kudrjavcev V.N., Vinokurov E.G., Kuznecov V.V. Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokisllogo hroma [Thick-layer chrome plating of electrolytes based on chromium sulphate]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1998; 6 (1). 24-30. (in Russian)
13. Solodkova L.N., Vashhenko S.V., Kudrjavcev V.N. Vysokoproizvoditel'nyj jelektrolit iznosostojkogo hromirovanija [High-performance wear-resistant chrome-plated electrolyte]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2003; 11 (3): 31-33. (in Russian)
14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes. *J. Alloys and Compounds*. 2001; 317-318: 612-618.
15. Zorin, V.A., Shtefan Ju.V., Timchenko M.I. Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnyh materialov [Planning experiments when creating parts from composite materials]. *Mehanzacija stroitel'stva*. 2018; 79(4): 5-13. (in Russian)
16. Kotomchin A.N., Sinel'nikov A.F. Ustanovka dlja podderzhanija rabochej temperatury jelektrolitov pri vosstanovlenii detalej mashin gal'vanicheskimi pokrytijami [Anlage zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur der Elektrolyte bei der Reparatur von Maschinenteilen mit galvanischen Beschichtungen]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(4): 500-511. (in Russian)
17. Petrochenkova I.V., Pomogaev V.M., Volkovich A.V. Osobennosti vlijanija temperatury na rasseivajushhuju sposobnost' jelektrolitov [Features of temperature influence on the scattering capacity of electrolytes]. *Sb. nauchnyh trudov: Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii*. Novomoskovsk, NI RHTU, 2004. 44-51. (in Russian)
18. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006; 12 (11): 2888-2896.
19. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren. *Galvanotechnik*. 2005; 103: 2095-2100.
20. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. Chromsaurelosungen Galvanotechnik. 2005; 9 (1): 2063-2071.
21. Kornejchuk N.I., Kovbasjuk A.V. i dr. Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating]. *Trudy Kishinevskogo SHI*. 1975; 144:17-23. (in Russian)
22. Adzhiev, B.U., Vashhenko S.V., Solov'eva Z.A. Vlijanie struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv

hroma na iznosostojkost' hromovyh pokrytij [Influence of the structure and physical and mechanical properties of chromium on the wear and resistance of chrome coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1(1): 28-31. (in Russian)

23. Solodkova L.N., Solov'eva Z.A. Issledovanie plenki na katode pri jelektrovozstanovlenii hromovoj kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid]. *Jelektrohimiya*. 1994; 30 (10): 1254-1256. (in Russian)

24. Shluger M.A., Tok L.D. Novye jelektrolity dlja pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for chromium and its alloys coatings]. *Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D.I. Mendeleeva*. 1988; 32 (3): 297-305. (in Russian)

25. Galdina V.D., Chernogorodova M.S. Podbor sostavov aktivirovannyh mineral'nyh poroshkov s ispol'zovaniem metoda planirovanija jeksperimenta [Selection of activated mineral powder compositions using the experiment planning method]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. 2(54). 90-98. (in Russian)

26. Vitjaz' P.A., Zhilinskij O.V., Laktjushina T.V. Komp'juternaja metodologija vybora tehnikeski optimal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovanija materialov [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design] // *Fizicheskaja me-zome-hanika*. 2004; 7 (1): 3-11.27. (in Russian)

27. Gorbunov I.P., Gorbunov D.I. Matematicheskoe modelirovanie processa diffuzionnogo hromirovanija stali [Mathematical modeling of the process of diffusion chrome plating of steel] // *Teorija i praktika proizvodstva listovogo prokata. Sbornik nauchnyh trudov*. Lipeck, LGTU, 2008; 2: 68-72. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Котомчин Алексей Николаевич. Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи.

Штефан Юрий Витальевич. Математическая обработка и анализ полученных результатов.

Зорин Владимир Александрович. Методическое и научное сопровождение при подготовке статьи, получение достоверных результатов исследований и их подтверждение.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Alexei N. Kotomchin. The main work on research and collection of information for the preparation of the article.

Yurii V. Shtefan . Mathematical processing and analysis of the results.

Vladimir A. Zorin. Methodological and scientific support in the preparation of the article, obtaining reliable research results and their confirmation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» МАДИ (125329, Россия, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Ленинградский проспект, 64, Москва), старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования» Приднестровского государственного университета. Т. Г. Шевченко (3300, Молдова, Приднестровье, Тирасполь, ул. 25 Октября, 128), e-mail: aleshka81@list.ru, ORCID 0000-0002-4750-5255.

Штефан Юрий Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин, МАДИ, e-mail: shtefan@madi.ru, ResearcherID T-2184-2017, ORCID: 0000-0002-7882-4873.

Зорин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин, МАДИ, e-mail: madi-dm@list.ru, ResearcherID Q-6455-2016.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI) (125329, Russia, Moscow, 64, Leningradsky Ave.), Senior Researcher of the Renovation of Machinery and Equipment Laboratory, T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University named (3300, Moldova, Tiraspol, 128, 25-go Oktiabria St., e-mail: aleshka81@list.ru, ORCID 0000-0002-4750-5255.

Yurii V. Shtefan – Cand. of Sci., Associate Professor of the Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, MADI, e-mail: shtefan@madi.ru, ResearcherID T-2184-2017, ORCID: 0000-0002-7882-4873

Vladimir A. Zorin – Dr. of Sci., Professor, Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department, MADI, e-mail: madi-dm@list.ru, ResearcherID Q-6455-2016.