

Ресурсная и экологическая эффективность гальванического производства: вопросы водопотребления

© 2021. Е. Г. Винокуров^{1,2}, д. х. н., профессор,
Х. А. Невмятулина^{1,2}, к. т. н., доцент,

Т. В. Гусева³, д. т. н., профессор, заместитель директора,
И. С. Курошев³, начальник отдела,

¹Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,

²Всероссийский институт научной и технической информации РАН,
125190, Россия, г. Москва, ул. Усиевича, д. 20,

³Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»,
115054, Россия, г. Москва, Стремянный пер., д. 38,
e-mail: vin-62@mail.ru

Проведён анализ возможностей повышения ресурсной и экологической эффективности гальванического производства. Цель исследования – проанализировать причины изменения водоёмкости операций гальванотехники и оценить возможности её снижения с учётом наилучших доступных технологий. Обобщены данные различных литературных источников, характеризующих величину уноса раствора для различных периодов развития технологии. Показано, что средний удельный унос раствора составляет 0,065 л/м² и может являться обоснованным значением для установления оптимальных технологических показателей при проектировании гальванических линий. Установлено, что годовой объём потребляемой воды в соответствии с действующими нормативными документами превышает в 2,5 раза объём, рассчитанный по результатам научных исследований. Отмечена целесообразность проведения бенчмаркинга и установления количественных требований к ресурсной и экологической эффективности производства при актуализации документов по наилучшим доступным технологиям.

Ключевые слова: экологическая эффективность, ресурсная эффективность, гальваническое производство, водопотребление, унос раствора, покрытия, промывные воды.

Resource efficiency and environmental performance of electroplating processes: water consumption aspects

© 2021. E. G. Vinokurov^{1,2} ORCID: 0000-0002-5376-0586

Kh. A. Nevmyatullina^{1,2} ORCID: 0000-0002-5519-467X

T. V. Guseva³ ORCID: 0000-0001-5399-6196 I. S. Kuroshev⁴ ORCID: 0000-0003-2398-6776

¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,

²All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, RAS,
20, Usievicha St., Moscow, Russia, 125190,

³Research Institute “Environmental Industrial Policy Centre”,
38, Stremyanny Pereulok, Moscow, Russia, 115054,
e-mail: vin-62@mail.ru

The article analyses opportunities for enhancing resource and environmental efficiency of modern electroplating processes. These parameters highly depend on metal and water use efficiency. Water is consumed primarily for washing details after the plating. Authors analyse reasons for changing water intensity of electroplating processes and opportunities for reducing water consumption while implementing Best Available Techniques (BAT). Data on solution carry-over published in the research literature, norms and standards are compared. Various periods of the technology development and environmental regulation are considered (1939 to date). Specific water consumption grows since 1970s which is caused both by the increase of concentrations of main components of technological solutions and by the introduction of GOST 9.047-75 standard. The standard sets an elevated solution carry-over value: if in 1959–1968, this value varied between 0.055 and 0.073 L/m², in 1972 the new value was set at 0.2 L/m². Authors assume that this decision was caused

by the environmental regulation requirements which became more stringent at that time. Increased solution carry-over norms allowed using water to dilute wastewater and thereby to reduce concentrations of contaminants. The average solution carry-over value is 0.065 L/m², while the most probable values vary between 0.04 and 0.08 L/m² and may be considered as environmentally and resource sound when setting BAT requirements for designing electroplating processes. For the two-stage washing process, parameter ($qK^{1/2}$) is calculated. This parameter characterises the specific washing water volume. Annual water consumption in the electroplating processes is assessed. The consumption calculated based on existing norms, varies from 3.4 to 6.2 mln m³ per year; it is 2.5 times higher than the consumption reported in the research articles.

Keywords: environmental performance, resource efficiency, electroplating, water consumption, solution carry-over, metal coating, washwater.

В различных отраслях промышленности (наиболее активно с 1920 г. [1]) используют электрохимическое или химическое нанесение металлических покрытий. Часто гальванические производства характеризуются значительным разнообразием покрытий при сравнительно небольшой производственной программе по каждому из них [2].

В работе [3] показано, что в Европейском союзе и в Российской Федерации (РФ) нанесение покрытий отнесено к категории производственных процессов, требующих особого внимания в связи с потенциально значимым негативным воздействием на окружающую среду (ОС). Экологическое регулирование таких производственных процессов осуществляется на основе концепции наилучших доступных технологий (НДТ). В экологическом плане гальваника создаёт две основные и взаимосвязанные проблемы. Первая – высокая водоёмкость производства и вторая – загрязнение ОС за счёт сброса сточных вод. Отчасти вторая проблема решается за счёт усугубления первой: снижение концентрации загрязняющих веществ нередко достигается путём разбавления растворов, что приводит к росту объёмов потребляемой воды.

Ежегодно в РФ электрохимическим методом обрабатывается 200–370 млн м² поверхности [3]. Гальваническое производство является крупным потребителем важных природных ресурсов (цветные металлы и вода), а показатели ресурсоэффективности [3] свидетельствуют о нерациональном использовании материалов: в технологических растворах находятся десятки миллионов тонн цветных металлов; непосредственно на покрытия расходуется десятки тысяч тонн, а в сточные воды уносятся тысячи тонн. По разным оценкам [4, 5] для гальванохимии поступление загрязняющих веществ в ОС со сточными водами составляет 83–85% и, следовательно, при совершенствовании технологического нормирования приоритетное внимание следует уделять повышению эффективности использования воды. Анализ факторов воздействия

на ОС гальванохимического производства определяется, прежде всего, концентрацией компонентов технологических растворов и величиной их удельного уноса поверхностью деталей [6–8].

В РФ предприятия, производящие работы «по поверхностной обработке металлов и пластических материалов (с технологических ванн суммарным объёмом 30 м³ и более)», отнесены к I категории негативного воздействия на ОС [9], что обязывает их применять НДТ. Для гальванического производства разработан информационно-технический справочник (ИТС) по НДТ (ИТС 36-2017 «Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов»), в котором ключевое внимание уделяется решениям, направленным на повышение ресурсной эффективности применяемых процессов и снижению негативного воздействия на ОС.

Сокращение уноса технологических растворов обрабатываемой поверхностью, контроль концентрации загрязняющих веществ в сточных водах являются важными задачами обеспечения экономической, ресурсной и экологической эффективности гальванических производств. Анализ опубликованных результатов указывает на актуальность и необходимость формирования научно обоснованных подходов к минимизации таких потерь.

Цель исследования – проанализировать причины изменения водоёмкости при гальванохимическом нанесении покрытий и оценить возможности её снижения в условиях перехода к технологическому нормированию в сфере охраны окружающей среды на основе наилучших доступных технологий.

Современное состояние изученности проблемы

В производственной деятельности предприятия ориентируются на действующие нормативные документы, регламенты и стандарты. В СССР нормативные требования к воде для промывок впервые были определены

в стандарте на покрытия (ГОСТ 9.047-75), а затем в документах, устанавливающих требования к воде для гальванического производства (ГОСТ 9.314-90, ГОСТ Р 58431-2019). Следует заметить, что такие показатели, как удельный унос раствора и концентрация компонентов в последней ванне промывки во всех документах практически одинаковы.

В гальванических цехах начинают внедряться элементы бережливого производства [10], главной задачей которого является устранение потерь, в данном контексте это относится, прежде всего, к ресурсам воды.

Объём промывных сточных вод и концентрация в них загрязняющих веществ определяют технологию очистки, состав оборудования очистных сооружений и их производительность [11]. До последнего времени предприятия должны были обосновывать нормативы допустимого сброса таким образом, чтобы в принимающем водном объекте не превышался уровень предельно допустимых концентраций (ПДК). Требования ПДК загрязняющих веществ для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения являются весьма жёсткими [12, 13]. Это обстоятельство приводит к тому, что водопользователи в стремлении продемонстрировать соблюдение требований увеличивают объёмы воды, используемой в производстве.

С 2019 г. предприятия I категории рассчитывают технологические нормативы, основанные на отраслевых показателях НДТ. Для гальванических производств такие показатели не установлены; вероятно, их обоснование произойдёт во время актуализации ИТС 36-2017 (до 2024 г.). В соответствии с поручением Президента РФ в актуализированном ИТС 36-2017 будет усилено внимание к ресурсосбережению [14]. Предполагается, что для выделения так называемого «зелёного» финансирования будет учитываться достижение показателей ресурсоэффективности.

В научно-технической литературе опубликовано достаточно много работ, посвящённых исследованиям в области снижения негативной нагрузки на ОС. Так, в [6, 15, 16] для повышения ресурсной и экологической эффективности гальванического производства предлагается использовать низкоконцентрированные растворы. Авторы [17] исследовали характеристики нового оборудования, которое предусматривает повторное использование в технологическом процессе промывных вод.

Приведённые данные заставляют задуматься о перспективах развития водного хо-

зяйства промышленных предприятий. Объём воды, используемой на производстве, должен сводиться к возможному минимуму; во многих ИТС к наилучшим доступным техническим решениям отнесены водооборотные циклы. Значительно изменилась и экономическая ситуация. С точки зрения микроэкономики (затрат предприятий) обычно обсуждается рост тарифов на воду, ставок платежей за негативное воздействие на водные объекты, а также штрафов за несоблюдение установленных требований. Однако более значимыми представляются аспекты устойчивого развития. Принятые на международном уровне цели устойчивого развития (ЦУР) требуют перехода к ответственным моделям производства и потребления (ЦУР 12) и обеспечения доступа к чистой воде (ЦУР 9). Эти цели коррелируют с национальными целями развития РФ, а критерии «зелёного» финансирования содержат показатели ресурсной и экологической эффективности производства [18].

Таким образом, для повышения рентабельности гальванических производств, обеспечения доступа к «зелёному финансированию» и снижения репутационных рисков необходимо разрабатывать курс действий по оптимизации водопотребления. При этом приоритетное внимание следует уделить наиболее водоёмкой стадии – промывке деталей после операций электроосаждения металлов [19].

Сравнительный анализ требований к эффективности использования воды в гальванических процессах

В таблице 1 на основе опубликованных данных приведены для различных периодов времени величины основных факторов (удельный унос и концентрация компонентов в технологическом растворе и последней ванне промывки), определяющих ресурсную и экологическую эффективность гальванических производств. По этим данным в условиях двухступенчатой промывки по методике, описанной в ГОСТ Р 58431-2019, рассчитана величина ($qK^{1/2}$), характеризующая удельный объём промывной воды и не зависящая от площади обрабатываемой продукции. Динамика $qK^{1/2}$ для потребления воды после нанесения покрытий никелем и хромом представлена на рисунке 1.

Потребление воды до 1968 г. было примерно одинаковым и минимальным по сравнению с последующими периодами. Приблизительно с 1970-х гг. расход воды увеличился, что связа-

Таблица 1 / Table 1

Характеристики параметров промывки в гальванических процессах, приведённые в различных источниках
Washing parameters described in various information sources

Параметры промывки Washing parameters	Периоды времени, год / Time, years								
	1939–1948	1949–1958	1959–1968	1969–1978	1979–1988	1989–1998	1999–2008	2009–2018	2019
	Никелирование / Nickel plating								
Удельный унос технологического раствора никелирования (q), л/м ² / Specific technological solution carry-out, Nickel plating (q), L/m ²	0,080 [20]	0,125 [24]	0,073 [22]	0,15 [24], 0,20 (ГОСТ 9.047-75)	0,080 [25], 0,200 [26], (ГОСТ 9.047-75)	0,200 [7], (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов никеля в последней ванне промывки (c_{Ni}), мг/л / Ni ions concentration in the last washing basin (c_{Ni}), mg/L	10	10	10	10 (ГОСТ 9.047-75)	10 [26, 27], (ГОСТ 9.047-75)	10 [7], (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов никеля в технологическом растворе (c_{Ni}), г/л [15] / Ni ions concentration in technological solutions, (c_{Ni}), g/L [15]	32	32	40	46	61	61	71	71	71
Коэффициент разбавления (K_{Ni})	3200	3200	4000	4600	6100	6100	7100	7100	7100
Удельный расход воды на промывку после никелирования ($qK^{0,5}$), л/м ² / Specific washing water consumption, Nickel plating ($qK^{0,5}$), L/m ²	4,5	7,1	4,6	10,2–13,6	6,2–15,6	15,6	16,8	16,8	16,8
	Хромирование / Chromium plating								
Удельный унос технологического раствора хромирования (q), л/м ² / Specific technological solution carry-out (q), Chromium plating, L/m ²	0,150 [20]	0,125 [24]	0,055 [22]	0,117 [24], 0,20 (ГОСТ 9.047-75)	0,180–0,380 [26], 0,200 [26], (ГОСТ 9.047-75)	0,200 [7], (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ 9.314-90)	0,200 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация хрома в последней ванне промывки (c_{Cr}), мг/л / Cr ions concentration in the last washing basin (c_{Cr}), mg/L	73	73	73 [23]	10 (ГОСТ 9.047-75)	12 [25], 10 [26, 27], (ГОСТ 9.047-75)	10 [7], (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ 9.314-90)	10 (ГОСТ Р 58431-2019)
Концентрация ионов хрома в технологическом растворе (c_{Cr}), г/л [15] / Cr ions concentration in technological solutions (c_{Cr}), g/L [15]	156	156	150	140	138	118	118	104	104
Коэффициент разбавления (K_{Cr})	2137	2137	2137	11667	12545	11800	11800	10400	10400
Удельный расход воды на промывку после хромирования ($qK^{0,5}$), л/м ² / Specific washing water consumption, Chromium plating ($qK^{0,5}$), L/m ²	6,9	5,8	2,5	12,6	22,4	21,7	21,7	20,4	20,4

но (табл. 1) как с повышением концентрации, например, никеля в технологических растворах [15] или уменьшением концентрации хрома в последней ванне промывки, так и с введением в 1975 г. (ГОСТ 9.047-75) увеличенных значений удельного уноса растворов (в 1959–1968 гг. – 0,055–0,073 л/м², в 1975 г. – 0,2 л/м²).

Постепенно меняющиеся методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты используют подходы, которые были разработаны именно в 1970–1980-е годы, то есть, вероятно, что увеличенные нормативы уноса были связаны с ужесточением природоохранных требований.

Завышение значений удельного уноса растворов сверх необходимого приводит к росту объёма воды, потребляемой для уменьшения концентрации загрязняющих веществ в последней ванне промывки и, соответственно, в сточных водах в целом.

В работе [28] показано, что концентрация отмываемого компонента в последней ванне промывки за достаточно долгое время не успевает достичь ПДК_в. Эти результаты подтверждают цель введения завышенных значений удельного уноса и вызывают сомнения в научной обоснованности нормированных значений (ГОСТ Р 58431-2019).

В работе [29] с помощью радиометрического метода (в качестве метки использовался изотоп ⁸²Br, время стекания раствора 10 с) определён удельный унос (в л/м²) различных электролитов: для никелирования, цинкования – 0,029–0,047, для обезжиривания – 0,048, для хромирования – 0,018, для травле-

ния в HCl – 0,051–0,073, для процесса активации в H₂SO₄ – 0,094. Также показано [30], что для растворов с низким поверхностным натяжением (щелочные растворы и растворы с поверхностно активными веществами) величины удельного уноса уменьшаются до 0,035 л/м² по сравнению с данными для кислых и нейтральных растворов с высоким поверхностным натяжением (0,04 л/м²). Аналогичные результаты получены и другими авторами [31]: для кислых растворов меднения удельный унос составляет 0,013–0,021 л/м², для раствора никелирования – 0,013–0,040 л/м². Приведённые значения также не противоречат величинам, используемым до 1968 г. (табл. 1): 0,055; 0,073; 0,080; 0,125; 0,150 л/м². Статистическая обработка всех приведённых значений позволила получить их распределение (рис. 2), согласно которому среднее значение удельного уноса раствора составляет 0,065 л/м², а наиболее вероятная величина лежит в диапазоне 0,04–0,08 л/м² и может являться научно обоснованным значением для применения в нормативно-технической документации и использоваться при проектировании гальванических линий с целью оптимизации промывных операций и снижения поступления загрязняющих веществ в сточные воды.

Используя научно обоснованные значения удельного уноса раствора 0,065 л/м² и рекомендуемые ГОСТ Р 58431-2019, оценим годовой расход воды на промывку, основываясь на данных [3] о площади обрабатываемой поверхности в год и методике расчётов по ГОСТ Р 58431-2019 для двухступенчатой противоточной промывки (табл. 2).

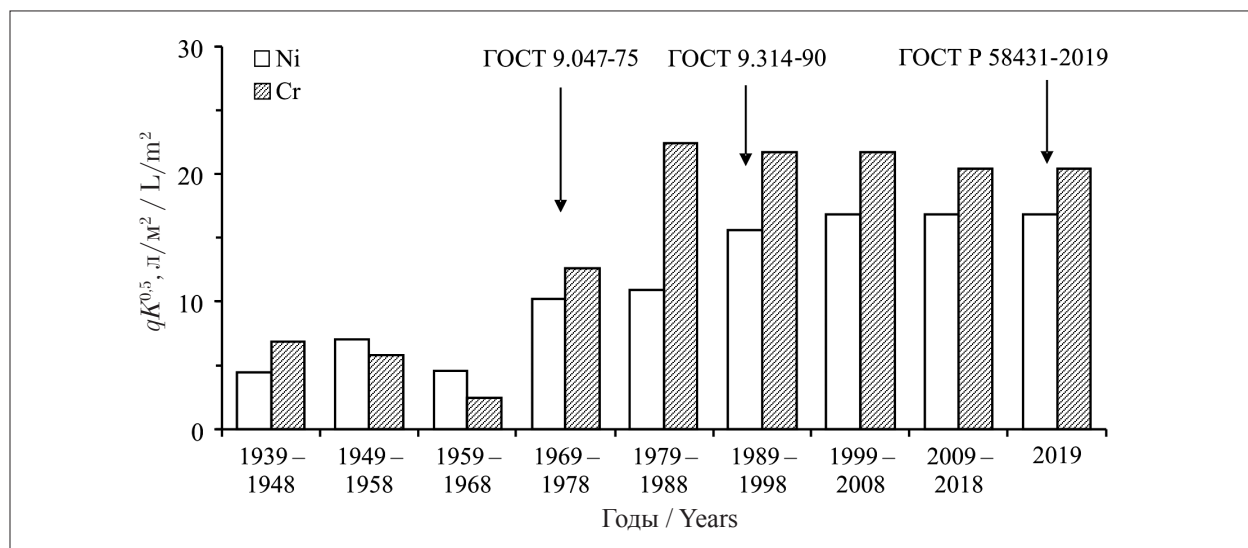


Рис. 1. Динамика удельного потребления воды на промывки ($qK^{0.5}$) после никелирования и хромирования
 Fig. 1. Dynamics of specific washing water consumption ($qK^{0.5}$) after Nickel and Chromium plating

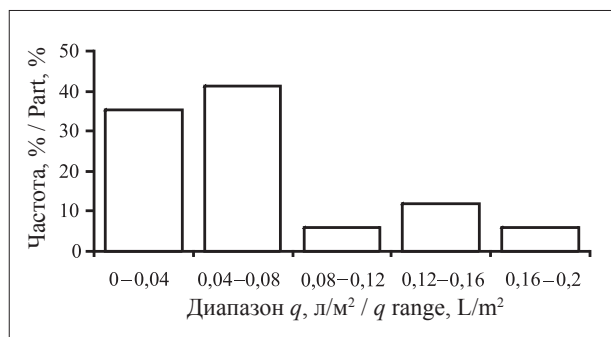


Рис. 2. Статистическое распределение значений удельного уноса технологических растворов
Fig. 2. Statistic distribution of the specific technological solution carry-out

Исходя из данных таблицы 2, несложно оценить, насколько эффективно используются ресурсы воды. Объем воды, потребляемой согласно нормативным документам, превышает в 2,5 раза объем, рассчитанный по данным научных исследований. Безусловно, эти численные значения носят ориентировочный характер, но их соотношение заставляет задуматься об обоснованности применяемых норм, в конечном счёте, о ресурсной и экологической эффективности отечественных предприятий.

Эти обстоятельства следует учесть при актуализации информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 36-2017. При проведении бенчмаркинга (сравнительного анализа показателей деятельности предприятий) це-

лесообразно использовать не только данные анкетирования, но и результаты научно-исследовательских работ. Технологические показатели НДТ, то есть показатели ресурсной (удельное потребление воды, металлов, энергии и др.) и экологической (удельный унос, концентрации загрязняющих веществ в промывных растворах и сточных водах), которые имеют обязательную силу для предприятий I категории, следует устанавливать таким образом, чтобы мотивировать предприятия к эколого-технологической модернизации, рациональному использованию ресурсов и применению принципов бережливого производства.

Заклучение

Водопотребление в гальваническом производстве за последние 30 лет значительно возросло: годовой объем потребляемой воды достигает 3,4–6,2 млн м³. Расчёты на основе статистической оценки значения удельного уноса раствора (0,065 л/м²) позволяют предположить, что объем воды на промывные операции можно сократить в 2,5 раза. При проектировании гальванических линий целесообразно руководствоваться научно обоснованными значениями удельного уноса. Эти критерии могут найти применение при установлении количественных требований к ресурсной и экологической эффективности

Таблица 2 / Table 2

Годовой расход воды на промывки при гальванохимическом нанесении покрытий
 Annual water consumption for washing operations in electroplating processes

Показатель Parameter	ГОСТ Р 58431-2019 GOST R 58431-2019	Научно-обоснованные показатели Research-based parameters
Площадь обрабатываемой поверхности, млн м²/год [3] Surface plated, mln m²/year [3]	200–370	
Удельный унос раствора, л/м² Specific solution carry-over, L/m²	0,2	0,065
Концентрация отмываемого компонента (на примере соединений никеля) в последней ванне промывки, г/л Concentration of the component to be washed out (Ni) in the last washing basin, g/L	0,01	0,01
Среднее значение концентрации ионов никеля в технологическом растворе, г/л [15] Average concentration of Ni ions in the technological solution, g/L [15]	71	
$qK^{0,5}$	16,8	6,5
Объем потребляемой воды на промывки, млн м³/год Annual water consumption, mln m³/year	3,4–6,2	1,3–2,4
Неэффективность использования, % / Inefficiency, %	160	

производства в ИТС 36-2017 «Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов».

Работа выполнена в рамках ГЗ 020-00002-21-01.

References

1. Budreiko E.N. Historical approach to the industrial electroplating (1870–1920) // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2017. V. 25. No. 2. P. 14–19 (in Russian). doi: 10.47188/0869-5326_2017_25_1_8
2. Jelinek T.V. Advances in metal finishing – an assessment of the international literature 2017–2018 // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2019. V. 27. No. 2. P. 4–8 (in Russian). doi: 10.47188/0869-5326_2019_27_2_4
3. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Guseva T.V. Electroplating industry in Russia: assessment approach, improvement tasks of resource and environmental effectiveness // Tekhnologiya metallov. 2020. No. 7. P. 2–6 (in Russian). doi: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-2-6
4. Pal'gunov P.P., Sumarokov M.V. Utilization of industrial waste. Moskva: Stroyizdat, 1990. 352 p. (in Russian).
5. Fellenberg G. Pollution of the natural environment. Introduction to environmental chemistry. Moskva: Mir, 1997. 232 p. (in Russian).
6. Khranilov Yu.P. Ecology and electroplating: problems and solutions. Kirov: Izd. VyatGU, 2000. 97 p. (in Russian).
7. Zubchenko V.L., Zakharov V.I., Rogov V.M., Kovalev V.V., Mareichev A.V., Shenderov Yu.D., Shilin A.I. Flexible automated galvanic lines: A Handbook / Ed. V.L. Zubchenko. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 672 p. (in Russian).
8. Kolesnikov V.A., Il'in V.I. Ecology and resource conservation in electrochemical industries. Mechanical and physicochemical methods of cleaning rinsing and waste water. Moskva: D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2004. 220 p. (in Russian).
9. Decree of the Government of the Russian Federation of December 31, 2020 No. 2398 “On the approval of criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment to objects of I, II, III and IV categories” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202101040010> / (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).
10. Andreev I.A. Use of lean manufacturing tools in an electroplating shop // Vestnik Kontserna VKO “Almaz-Antei”. 2020. No. 2. P. 32–44 (in Russian). doi: 10.38013/2542-0542-2020-2-32-44
11. Rodionov A.I., Klushin V.N., Sister V.G. Environmental safety technological processes. Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoy, 2000. 800 p. (in Russian).
12. Bepamyatnov G.P., Krotov Yu.A. Maximum allowable concentration of chemicals in the environment. Leningrad: Khimiya Leningr. otd-nie, 1985. 528 p. (in Russian).
13. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Order 552 dated December 13, 2016 “On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies” (as amended on March 10, 2020) [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201701160006/> (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).
14. The list of instructions of the President of the Russian Federation based on the results of checking the implementation of the provisions of the legislation of the Russian Federation on the management of industrial and consumer waste classified as hazard class III dated September 16, 2020. Project 1489, p. 1b-1 [Internet resource] <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/64046/> (Accessed: 24.01.2021) (in Russian).
15. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Kolesnikov V.A., Fadina S.V. Concentration criterion for classifying resource-saving compositions of solutions for metal electroplating // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. V. 46. No. 5. P. 486–491. doi: 10.1134/S004057951205020X
16. Fadina S.V., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Kolesnikov V.A. Total concentration of main components in solutions for metal electroplating as a criterion for classifying and choosing resource-saving compositions of solutions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2013. V. 47. No. 5. P. 593–599. doi: 10.7868/S0040357113040052
17. Nester A.A., Nikitin A.A., Romanishina O.V., Mysliborskij V.V., Ataev S.V., Tyutyunnik O.S., Gordij N.M. Economic effect of environmental safety of galvanic production // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-086-092
18. Skobelev D.O. Resource efficiency of the economy: strategic planning aspects // Menedzhment v Rossii i za rubezhom. 2020. No. 4. P. 3–13 (in Russian).
19. Kazakov V.A., Vinogradov O.S., Gulyaeva N.A., Krevskii I.G. Software for waterconsuming minimization in electroplating at the stage of water filtering // Otkrytoe obrazovanie. 2011. No. 2. P. 251–254 (in Russian).
20. Shvyryaev G.K., Trespe G.G. Corrosion and fight against it. 1941 [Quote from Lainer V.I., Kudryavtsev N.T. The basics of pity vanity. Moskva: Metallurgizdat, 1957. V. 2. 647 p. (in Russian)].
21. Bakhvalov G.T., Birkgan L.N., Labutin V.P. Electroplating directory. Moskva: Metallurgizdat, 1954. 651 p. (in Russian).
22. Krusenstjern A., Schmidt G. Verschleppungsverluste galvanischer Bäder. Metalloberfläche, 1961. No. 10. [Quote from Pletnev D.V., Brusentsova V.N. Fundamentals of the technology of wear-resistant and antifriction coatings. Moskva: Mechanical Engineering, 1968. 272 p. (in Russian)].

23. Bartl D., Mudrokh O. Technology of chemical and electrochemical treatment of metal surfaces. Moskva: Mashgiz, 1961. 712 p. (in Russian).
24. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. A short guide to electroplating. Leningrad: Mashinostroenie, 1972. 224 p. (in Russian).
25. Mel'nikov P.S. Handbook of electroplating in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie, 1979. 296 p. (in Russian).
26. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. A short guide to electroplating. Leningrad: Mashinostroenie, 1981. 269 p. (in Russian).
27. Azhogin F.F. Electroplating. Moskva: Metallurgiya, 1987. 736 p. (in Russian).
28. Domrachev R.A., Shishkina S.V., Mamaev V.I. A software package for calculating the balance of toxic heavy metals and optimizing washing operations in electroplating industries // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2002. V. 10. No. 3. P. 51–55 (in Russian).
29. Suss M. Bestimmung elektrolytspezifischer Ausschleppverluste // Galvanotechnik. 1992. V. 83. No. 2. P. 462 (in German).
30. Domrachev R.A., Shishkina S.V., Mamaev V.I. Investigation of the specific entrainment of a solution with parts from technological baths // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2003. V. 11. No. 4. P. 11–12 (in Russian).
31. Fadina S.V., Burukhina T.F., Vinokurov E.G. Physical-chemical properties of solutions and the reduction of their loss caused by drag-out // Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti. 2015. V. 23. No. 3. P. 47–52 (in Russian).