

Кинетические характеристики процесса регенерационной утилизации отработанного раствора химического никелирования

© 2023. М. А. Шумилова, к. х. н., в. н. с., Н. Е. Суксин, м. н. с.,
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, Россия, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34,
e-mail: shumilovama@udman.ru

По степени отрицательного воздействия на окружающую среду гальванические производства занимают лидирующие позиции в промышленном производстве, поэтому внедрению технологии регенерационной утилизации уделяется всё большее внимание. Проведено исследование кинетики реакции утилизации отработанного раствора химического никелирования раствором гидроксида натрия. Определены кинетические характеристики изучаемого процесса. Установлено, что реакция осаждения относится к реакциям второго порядка. Рассчитаны наблюдаемые константы скорости, которые характеризуются высокими значениями коэффициентов аппроксимации. Значения энергии активации процесса и предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса, определённые как графическим, так и расчётным способами, имеют близкие значения. Найденная величина энергии активации указывает на слабую зависимость константы скорости реакции от температуры. Показано, что реакция осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия не требует больших энергетических затрат и может быть использована для регенерационной утилизации электролита.

Ключевые слова: отработанный раствор химического никелирования, гидроксид натрия, порядок реакции, константа скорости реакции, энергия активации.

Kinetic characteristics of the regenerative utilization process of the spent solution after chemical nickel plating

© 2023. M. A. Shumilova ORCID: 0000-0001-5582-0258
N. E. Suksin ORCID: 0000-0003-1516-545X
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
34, T. Baramzinoy St., Izhevsk, Russia, 426067,
e-mail: shumilovama@udman.ru

Galvanic production in terms of the degree of negative impact on the environment occupies a leading position in the global industrial production; therefore, the introduction of regenerative recycling technology is receiving increasing attention. The aim of the present work is to determine the kinetic characteristics of the precipitation reaction in a solution of nickel sulfate with sodium hydroxide to develop a technology for the regeneration utilization of spent solutions of chemical nickel plating (SCNPS).

The object of the study was the spent solution of chemical nickel plating of one of the industrial enterprises of Izhevsk. The experiment was carried out in the temperature range 293–333 K at various concentrations of sodium hydroxide (1.25–2.60 M) and nickel sulfate (0.037–0.06 M).

To determine the order of the reaction, we plot graphs in the coordinates $\lg w - \lg C(\text{Ni})$ using the experimental data, where w is the reaction rate. The tangent of the slope of the obtained linear dependences with a high degree of approximation ($R^2 = 0.98$) is close to 2, therefore, the order of the reaction of the deposition of SCNPS with sodium hydroxide is second.

With a graphical method for determining the rate constant of a second-order reaction for the dependence $1/C = f(t)$, the tangent of the slope of the straight line corresponds to the calculated parameter. In the investigated temperature range the rate constant takes values from $5 \cdot 10^{-4}$ to $9 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

The activation energy of the precipitation reaction, determined by the Arrhenius equation by graphic and calculation methods, is $16.57 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ and $16.44 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, respectively. The low values of E_a indicate a weak dependence of the reaction rate on temperature. Consequently, the introduction of the technology for the regeneration utilization of SCNPS will not entail large expenditures of energy resources for heating the reaction masses.

Keywords: spent chemical nickel plating solution, sodium hydroxide, reaction order, reaction rate constant, activation energy.

Многочисленными исследованиями установлено, что широко используемые гальванические производства занимают одно из первых мест по степени отрицательного воздействия на окружающую среду [1–4], одновременно с этим происходит истощение запасов природных ресурсов. Наиболее оптимальным решением данной проблемы является внедрение технологии регенерационной утилизации отработанных гальванических растворов [5–7] и, в частности, растворов химического никелирования [8–12], что позволяет получить рабочие растворы никелирования с минимизацией экологического ущерба и экономических затрат. На стадии химических превращений для определения оптимальных условий проведения и аппаратурного оформления процесса необходимо исследовать совокупность кинетических характеристик реакции [13–16], лежащей в основе предлагаемой технологии. Так, для снижения содержания солей никеля в сточных водах гальванического производства на предприятии Suzuki Indomobil Motor Plant (SIMP) [13] проводилось сравнение эффективности работы с использованием усовершенствованного окислительного процесса (УОП) и электрокоагуляции (ЭК). Было установлено, что оптимальными условиями УОП реактора являются: рН 10, скорость потока озона 2 л/мин, время контакта 60 мин, при этом извлекается 99,75% никеля; для ЭК-реактора оптимальные условия, при которых удаляется 99,75% никеля, таковы: рН 6,5, плотность тока 20 мА/см², время контакта 50 мин. Проведённые исследования по кинетике удаления ионов никеля показали, что реакция относится к реакциям второго порядка со значением константы скорости реакции 0,1783 л/мг/мин ($R^2 = 0,9687$). Авторами показано [14], что в технологическом процессе гетерогенной химической реакции выщелачивания оксида никеля существенное влияние оказывают размеры частиц, температура и время протекания реакции, концентрация раствора кислоты и соотношение твёрдое вещество / жидкость. Вычисленная величина энергии активации 41,1 кДж/моль свидетельствует о том, что реакция является поверхностным химически контролируемым процессом. На основе проведённых экспериментальных исследований [15] по разрушению аммиачных комплексов никеля в отработанных гальванических растворах было установлено, что оптимальным реагентом-осадителем является 30%-ный раствор NaOH и температура 323 К; процесс

протекает в диффузной области и имеет первый порядок реакции. Проведено определение кинетических характеристик процесса осаждения никеля из раствора карбамидом, которое позволило установить влияние отдельных параметров на скорость реакции и оптимизировать процесс осаждения, а также получить математическую модель кинетики процесса, используемую для расчётов промышленных реакторов [16]. Полученные кинетические характеристики показали, что в процессе осаждения имеется индукционный период, продолжительность которого связана с исходной концентрацией раствора соединений металла и температурой процесса; также на процесс осаждения влияет величина рН раствора, обуславливающая химический состав образующихся осадков. Установлено, что реакция относится к реакциям первого порядка, а величина энергии активации $E_{\text{акт}} = 104,13$ кДж/моль указывает на протекание процесса в кинетической области.

Целью представленной работы является определение кинетических характеристик реакции осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия для разработки технологии регенерационной утилизации отработанных растворов химического никелирования (ОРХН).

Материалы и методика исследования

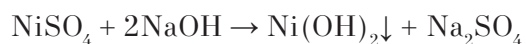
Объектом исследования являлся отработанный раствор химического никелирования одного из промышленных предприятий г. Ижевска, содержащий в своём составе сернокислый никель в пересчёте на чистый металл в количестве 3,58 г/дм³, а также гипофосфит натрия, уксусную кислоту и ацетат натрия и, в следовых количествах, тиомочевину.

Кинетику взаимодействия ОРХН с раствором гидроксида натрия квалификации «ч.д.а.» изучали в термостатируемом реакторе Thermostat U-10 со встроенной мешалкой в течение выбранного времени. Эксперимент проводили в температурном диапазоне 293–333 К при различных концентрациях гидроксида натрия (1,25–2,60 М) и сульфата никеля (0,037–0,06 М). Для практически полного осаждения ионов металла соотношение реагентов в растворе, определённое экспериментальным методом, составляло $\text{NiSO}_4 : \text{NaOH} = 1 : 21$ в молях [17]. Через фиксированные промежутки времени проводили отбор проб раствора, его фильтрование и определение содержания никеля в фильтрате титриметрическим методом с использованием трилона Б в присутствии мурексида (ОСТ 107.460092.001-86). Концентрацию

щёлочи также определяли титриметрически с помощью серной кислоты в присутствии метилового оранжевого [18]. Относительная средняя квадратичная ошибка результатов анализа титриметрическим методом составляла 0,3–0,5%.

Результаты и обсуждение

Реакцию осаждения солей никеля в ОРХН раствором гидроксида натрия можно записать в следующем виде:



Первым этапом при изучении кинетики химической реакции является определение порядка реакции и константы скорости. Во всех методах определения порядка полагается, что для реакции выполняется основной посту-

лат химической кинетики, представленный в математической форме [19]:

$$w = kC^n \quad (1)$$

где w – скорость реакции, C – концентрация исходного вещества, n – порядок реакции по данному веществу или общий порядок реакции, k – истинная или эффективная константа скорости реакции.

Экспериментальные данные по содержанию ионов никеля в фильтрате в зависимости от времени и температуры представлены в таблице 1.

Для определения порядка исследуемой нами реакции воспользуемся дифференциальным методом, который заключается в изучении зависимости скорости химической реакции от концентрации исходного вещества. Определение скорости реакции в фиксируе-

Таблица 1 / Table 1

Зависимость содержания сульфата никеля в фильтрате от времени и температуры реакции
Dependence of nickel sulfate content in the filtrate on reaction time and temperature

$t, c / t, s$	$C(\text{NiSO}_4), \text{mM} / C(\text{NiSO}_4), \text{mM}$			
	293 K	303 K	313 K	333 K
0	61,04	61,04	61,04	61,04
300	1,26	1,19	1,04	0,345
600	1,05	0,9926	0,94	0,298
900	0,84	0,8666	0,69	0,256
1800	0,63	0,5956	0,52	0,208
3600	0,42	0,3970	0,35	0,168

Таблица 2 / Table 2

Зависимость скорости реакции от времени и начальной концентрации гидроксида натрия (T = 303 K)
The dependence of the reaction rate on time and the initial concentration of sodium hydroxide (T = 303 K)

$C(\text{NaOH}), \%$	$t, c / t, s$	$C(\text{NiSO}_4), \text{mM} / C(\text{NiSO}_4), \text{mM}$	$w, \text{mM}\cdot\text{c}^{-1} / w, \text{mM}\cdot\text{s}^{-1}$	n	R^2
10	300	1,19		1,899	0,982
	600	0,9926	0,00066		
	900	0,8666	0,00042		
	1800	0,5956	0,00022		
	3600	0,3970	0,00011		
15	300	0,5956		1,972	0,934
	600	0,4963	0,00033		
	900	0,397	0,00033		
	1800	0,2978	0,00014		
	3600	0,2185	0,00007		
20	300	0,5956		1,993	0,980
	600	0,4856	0,00030		
	900	0,4169	0,00022		
	1800	0,2978	0,00013		
	3600	0,2295	0,00006		

Примечание: C – концентрация вещества, t – время, w – скорость реакции, n – порядок реакции, R^2 – коэффициент детерминации.

Note: C – substance concentration, t – time, w – speed reaction, n – reaction order, R^2 – coefficient of determination.

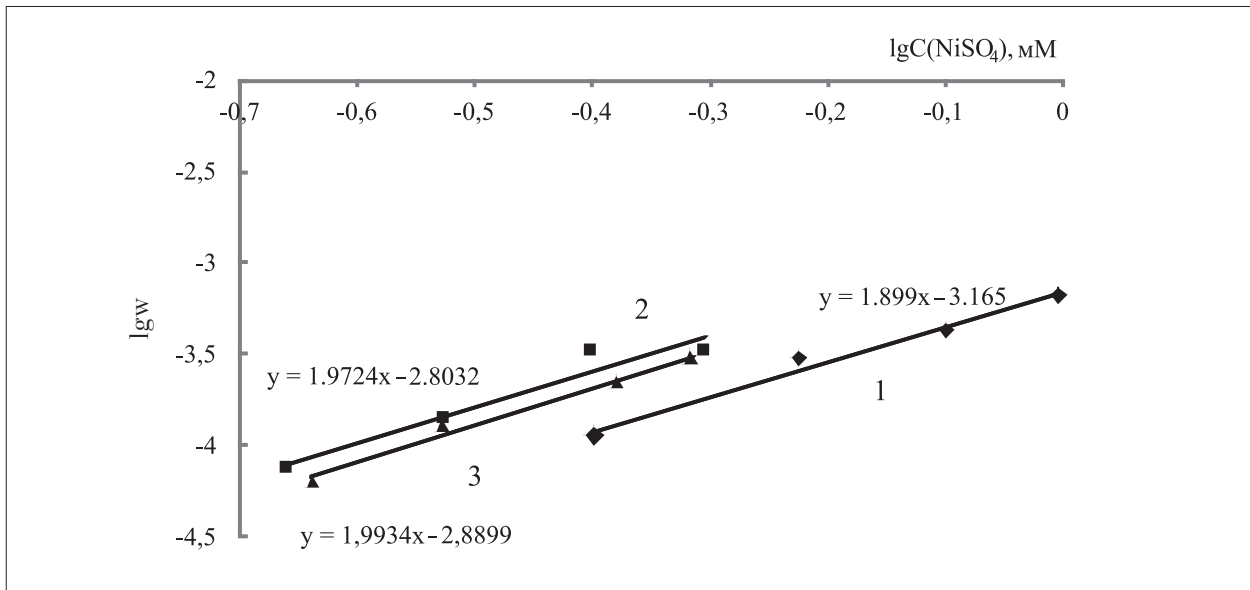


Рис. 1. Зависимость скорости реакции от концентрации сульфата никеля:
 1 – 10% NaOH, 2 – 15% NaOH, 3 – 20% NaOH
Fig. 1. Dependence of the reaction rate on the concentration of nickel sulfate:
 1 – 10% NaOH, 2 – 15% NaOH, 3 – 20% NaOH

мые моменты времени сводится к дифференцированию концентрации сульфата никеля от времени:

$$w = -\frac{d[NiSO_4]}{dt} \quad (2)$$

с использованием формулы численного дифференцирования [19] для функции $y(x)$ методом конечных разностей:

$$y'(x_0) = \frac{y(x_0 + h) - y(x_0)}{h} \quad (3)$$

Результаты аналитического определения концентрации соли никеля и скорости реакции по данному реагенту представлены в таблице 2.

Таким образом, нами получены значения скорости реакции и соответствующие им текущие величины концентрации никеля в растворе, то есть исходные данные для определения порядка реакции дифференциальным методом. При линеаризации уравнения (1) эта зависимость имеет вид [20]:

$$\lg w = \lg k + n \cdot \lg C \quad (4)$$

и график представляет прямую линию, тангенс угла которой равен порядку реакции. Построив графики в координатах $\lg w - \lg C(Ni)$, представленные на рисунке 1, определяем, что тангенс угла наклона полученных линейных зависимостей с высокой степенью аппроксимации (табл. 2) близок к 2, следова-

тельно, порядок реакции осаждения ОРХН гидроксидом натрия второй.

Кинетическое уравнение реакции второго порядка имеет следующий вид:

$$kC^2 = -\frac{dC}{dt} \quad (5)$$

данное уравнение после интегрирования в пределах от C_0 до C принимает линейную форму:

$$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0} \quad (6)$$

и при графическом методе определения константы скорости тангенс угла наклона прямой соответствует вычисляемому параметру. Линейные зависимости, полученные при подстановке экспериментальных данных, представлены на рисунке 2(а–г), и позволили определить константу скорости реакции осаждения ОРХН щёлочью в исследуемом диапазоне температур. Как видно из таблицы 3, вычисленные кинетические параметры характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации (R^2).

Наиболее точно зависимость константы скорости реакции от температуры описывает уравнение Аррениуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

где E_a – аррениусовская или опытная энергия активации, кДж·моль⁻¹; T – абсолютная температура, К; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31441$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹; k_0 – предэкспоненциальный множитель, дм³·моль⁻¹·с⁻¹, практически не зависящий от температуры и пропорциональный числу столкновений молекул с подходящей пространственной ориентацией; физический смысл данной константы заключается в её равенстве константе скорости реакции при температуре, стремящейся к бесконечности.

Уравнение Аррениуса в логарифмической форме [20]:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

используется для графического определения энергии активации (рис. 3). Тангенс

угла наклона прямой соответствует $(-E_a/R)$, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, равен $\ln k_0$. Построение линии линейной регрессии по экспериментальным точкам и вычисление её уравнения, осуществлённого с помощью программного пакета Microsoft Office Excel (рис. 3), установило, что $\text{tg}\alpha = -1994$. Следовательно,

$$-\frac{E_a}{R} = -1994 \text{ и энергия активации реакции}$$

осаждения в растворе сульфата никеля гидроксидом натрия составляет $E_a = 16578$ Дж·моль⁻¹ = 16,58 кДж·моль⁻¹, а величина предэкспоненциального множителя равна $\ln k_0 = -1,0312$ и $k_0 = -0,356$ дм³·моль⁻¹·с⁻¹.

Зная константы скорости реакции при двух температурах T_1 и T_2 , возможно определение энергии активации процесса расчётным методом, используя формулу [20]:

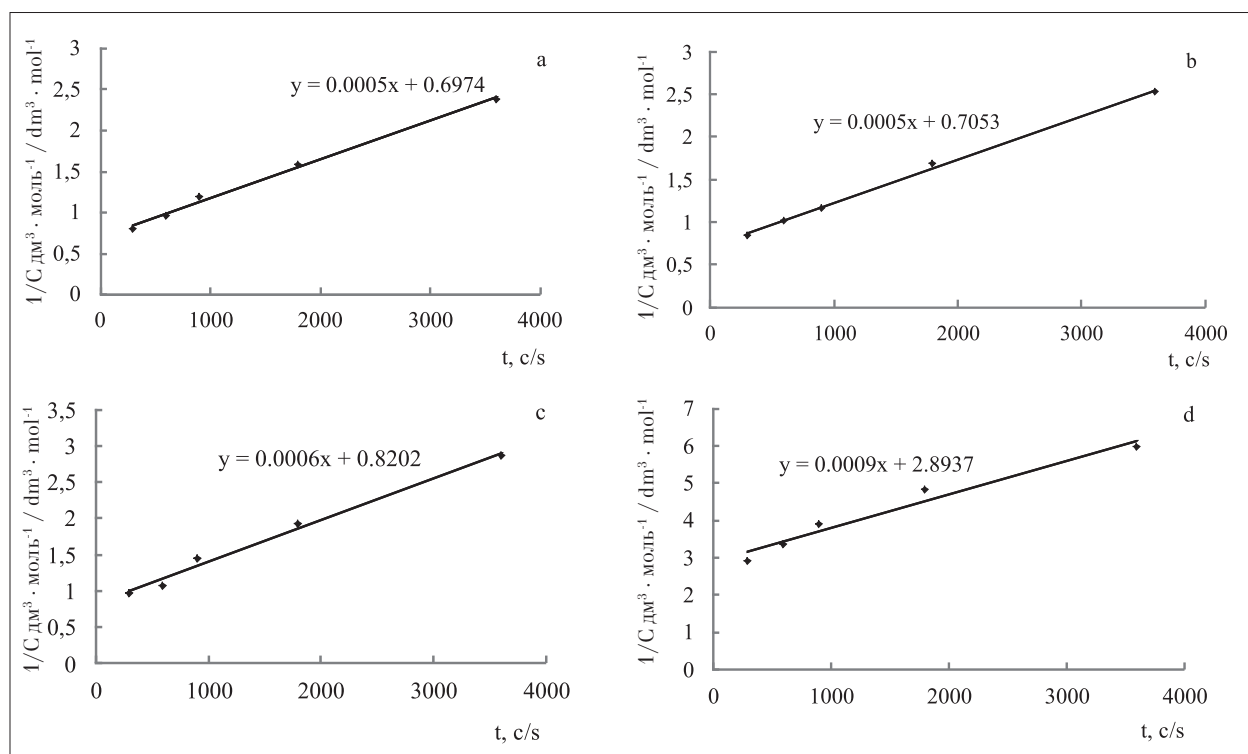


Рис. 2. Зависимость обратной концентрации сульфата никеля от времени при различных температурах: а – 293К, б – 303К, с – 313К, d – 333К
Fig. 2. Dependence of the inverse concentration of nickel sulfate on time at different temperatures: а – 293К, б – 303К, с – 313К, d – 333К

Таблица 3 / Table 3

Значения наблюдаемых констант скорости и коэффициентов детерминации для различных температур / Values of the observed velocity constants and approximation coefficients for different temperatures

T, K	$k, \text{dm}^3 \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{c}^{-1} / k, \text{dm}^3 \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	R^2
293	$5 \cdot 10^{-4}$	0,994
303	$5 \cdot 10^{-4}$	0,998
313	$6 \cdot 10^{-4}$	0,988
333	$9 \cdot 10^{-4}$	0,960

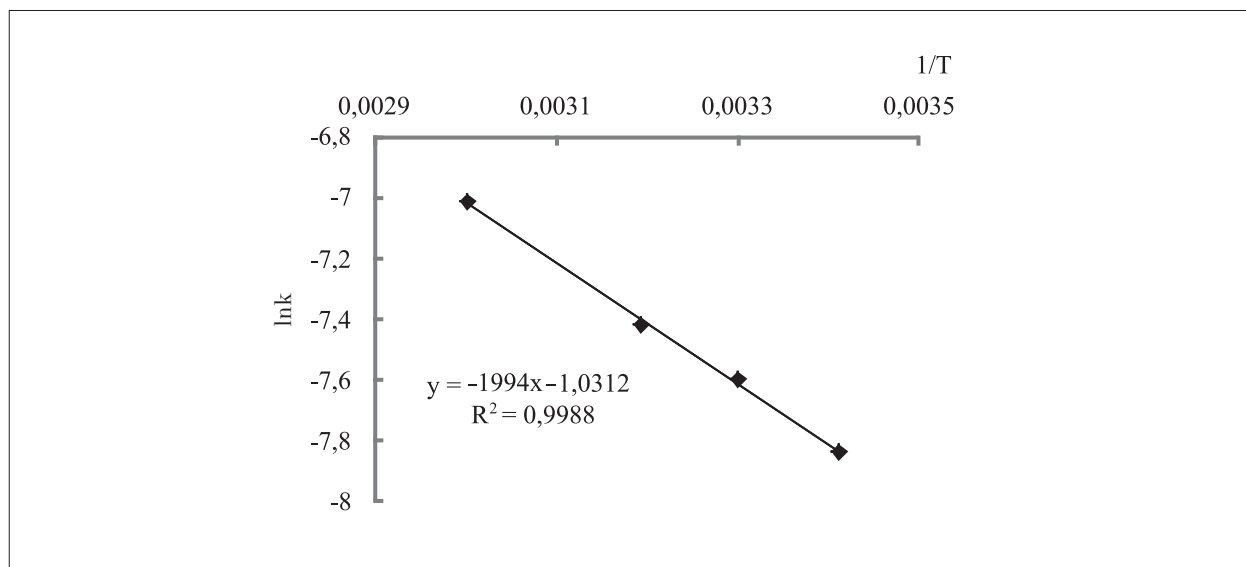


Рис. 3. Зависимость натурального логарифма скорости реакции от обратной температуры
Fig. 3. Dependence of the natural logarithm of the reaction rate on the inverse temperature

$$E_a = \frac{RT_1T_2 \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{T_2 - T_1} \quad (9).$$

При подстановке полученных значений константы скорости реакции при соответствующей температуре и проводя вычисления по формуле (9), получаем $E_a = 16,44$ кДж·моль⁻¹ и $k_0 = 0,346$ дм³·моль⁻¹·с⁻¹. Как видно из полученных констант, кинетические параметры, вычисленные двумя способами, близки по величине, хотя считается, что вычисление по крайним экспериментальным точкам даёт менее точные значения [19].

В результате дифференцирования уравнения Аррениуса (8) по температуре оно принимает следующий вид:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что чем больше величина E_a , тем быстрее происходит увеличение константы скорости с возрастанием температуры. Определённые нами двумя способами невысокие значения E_a свидетельствуют о слабой зависимости скорости реакции от температуры, что находит подтверждение в полученных экспериментальных данных. Реакция осаждения ионов никеля щёлочью протекает практически полностью в течение первых 5 мин даже при комнатной температуре, в дальнейшем временном диапазоне уменьшение концентрации металла в надосадочном растворе происходит незначитель-

но. Следовательно, внедрение технологии регенерационной утилизации ОРХН не повлечёт за собой больших затрат энергоресурсов для нагревания реакционных масс, реакция протекает в полном объёме при комнатной либо нагретой до 30–40 °С температуре реакционной смеси.

Заключение

В рамках разработки технологии регенерационной утилизации отработанных растворов химического никелирования проведено определение кинетических характеристик реакции осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия. Установлено, что порядок исследуемой реакции второй; вычисленные значения наблюдаемых констант скорости реакции лежат в диапазоне от $5 \cdot 10^{-4}$ до $9 \cdot 10^{-4}$ дм³·моль⁻¹·с⁻¹ в зависимости от температуры и характеризуются высокими значениями коэффициентов аппроксимации. Определённые графическим и расчётным методами энергия активации и предэкспоненциальный множитель имеют близкие значения и свидетельствуют о слабой зависимости скорости реакции от температуры, что позволяет проводить реакцию утилизации ОРХН при комнатной или нагретой до 30–40 °С температуре реакционной смеси.

Литература

1. Зингер Е.Ю., Нор П.Е. Воздействие гальвано-производства на окружающую среду // Экологические проблемы региона и пути их разрешения: материалы

XV Международной научно-практической конференции. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. С. 96–98.

2. Петров В.Г., Суксин Н.Е. Утилизация твёрдых отходов гальванического производства по нанесению цинковых покрытий // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 106–110.

3. Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Утилизация отходов гальванического производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1 (8). С. 2085–2088.

4. Nickel plating handbook. Toronto: Publ. house Nickel institute, 2022. 103 p.

5. Петров В.Г., Семакин В.П., Трубочёв А.В. Использование кислотных реагентов при утилизации осадков сточных вод. Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2005. 186 с.

6. Мажуга А.Г., Колесников В.А., Сахаров Д.А., Корольков М.В. Техногенные отходы I–II классов опасности – ресурс для получения вторичных продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 61–67.

7. Платонова А.С., Нафикова Э.В. Утилизация гальванических отходов и применение их при производстве строительных материалов // Экологическая безопасность в техносферном пространстве: материалы III Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых учёных и студентов. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2020. С. 113–117.

8. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Регенерационная утилизация отработанных растворов химического никелирования // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 2. С. 262–270.

9. Tsai T.-H., Chou H.-W., Wu Y.-F. Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of micro-sized nickel hydroxide particles // Separation and Purification Technology. 2020. V. 251. Article No. 117315.

10. Shaikh A., Singh B.K., Purnendu K., Kumari P., Sankar P.R., Mundra G., Bohm S. Utilization of the nickel hydroxide derived from a spent electroless nickel plating bath for energy storage application // RSC Sustainability. 2023. No. 1. P. 294–302.

11. Laokhen P., Ma-Ud N., Yingnakorn T., Patcarawit T., Khumkoa S. Recovery of nickel from spent electroplating solution by hydrometallurgical and electrometallurgical process // Journal of Metals, Materials and Minerals. 2022. V. 32. No. 2. P. 95–100.

12. Laokhen P., Khumkoa S., Buahobura P., Piyawit W., Patcharawit T., Kareram A., Srikhang L. Preliminary study on recovery of nickel from electro-nickel-plating solution by electrowinning // Journal of Materials Sciences & Engineering. 2019. V. 8. No. 5. Article No. 541.

13. Moersidik S.S., Nugroho R., Handayani M., Kamilawati, Pratama M.A. Optimization and reaction kinetics on the removal of nickel and COD from wastewater from electroplating industry using electrocoagulation and advanced

oxidation processes // Heliyon. 2020. V. 6. P. e03319.

14. Abdel-Aal E.A., Rashad M.M. Kinetic study on the leaching of spent nickel oxide catalyst with sulfuric acid // Hydrometallurgy. 2004. V. 74. P. 189–194.

15. Юрченко Г.О. Кинетика процессу осаждения катионів нікелю (II) // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 3/2 (5). С. 35–36.

16. Корчуганова О.М., Танцюра Е.В. Дослідження кінетики осаждения нікелю з розчину // Наукові вісті національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». 2015. № 3 (101). С. 112–117.

17. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Отработанный раствор химического никелирования – ресурс для получения новых продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 131–136.

18. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Количественный анализ. М.: Химия, 1971. Кн. 2. 456 с.

19. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику. М.: МГУ, 2006. 51 с.

20. Гуров А.А., Бадаев Ф.З., Овчаренко Л.П., Шаповал В.Н. Химия: учебник. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 748 с.

References

1. Singer E.Yu., Nor P.E. The impact of electroplating on the environment // Environmental problems of the region and ways to resolve them: Materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk: OmGTU, 2021. P. 96–98 (in Russian).

2. Petrov V.G., Suksin N.E. Disposal of solid waste from electroplating production for applying zinc coatings // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 106–110 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-106-110

3. Selivanova N.V., Trifonova T.A., Shirkin L.A. Disposal of galvanic production waste // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. V. 13. No. 1 (8). P. 2085–2088 (in Russian).

4. Nickel plating handbook. Toronto: Nickel institute, 2022. 103 p.

5. Petrov V.G., Semakin V.P., Trubachev A.V. The use of acid reagents in the disposal of sewage sludge. Izhevsk: IPM UrO RAN, 2005. 186 p. (in Russian).

6. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Sakharov D.A., Korolkov M.V. Technogenic waste of hazard classes I–II – a resource for obtaining secondary products // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 61–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067

7. Platonova A.S., Nafikova E.V. Utilization of galvanic waste and their use in the production of building materials // Environmental safety in the technosphere: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, molodyh uchyonyh i studentov. Ekaterinburg: RGPPIU, 2020. P. 113–117 (in Russian).

8. Shumilova M.A., Suksin N.E. Regenerative disposal waste solutions of chemical nickel plating // *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2023. V. 25. No. 2. P. 262–270 (in Russian). doi: 10.15350/17270529.2023.2.24
9. Tsai T.-H., Chou H.-W., Wu Y.-F. Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of microsized nickel hydroxide particles // *Separation and Purification Technology*. 2020. V. 251. Article No. 117315. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117315
10. Shaikh A., Singh B.K., Purnendu K., Kumari P., Sankar P.R., Mundra G., Bohm S. Utilization of the nickel hydroxide derived from a spent electroless nickel plating bath for energy storage application // *RSC Sustainability*. 2023. No. 1. P. 294–302. doi: 10.1039/d2su00036a
11. Laokhen P., Ma-Ud N., Yingnakorn T., Patcarawit T., Khumkoa S. Recovery of nickel from spent electroplating solution by hydrometallurgical and electrometallurgical process // *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2022. V. 32. No. 2. P. 95–100. doi: 10.55713/jmmm.v32i2.1253
12. Laokhen P., Khumkoa S., Buahobura P., Piyawit W., Patcharawit T., Kareram A., Srikhang L. Preliminary study on recovery of nickel from electro-nickel-plating solution by electrowinning // *Journal of Materials Sciences & Engineering*. 2019. V. 8. No. 5. Article No. 541.
13. Moersidik S.S., Nugroho R., Handayani M., Kamilawati, Pratama M.A. Optimization and reaction kinetics on the removal of nickel and COD from wastewater from electroplating industry using electrocoagulation and advanced oxidation processes // *Heliyon*. 2020. V. 6. P. e03319. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03319
14. Abdel-Aal E.A., Rashad M.M. Kinetic study on the leaching of spent nickel oxide catalyst with sulfuric acid // *Hydrometallurgy*. 2004. V. 74. P. 189–194.
15. Yurchenko G.O. Kinetics of nickel(II) cation deposition process // *Ekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. 2012. No. 3/2 (5). P. 35–36 (in Ukrainian).
16. Korchuganova O.M., Tancyura E.V. Investigation of the kinetics of nickel deposition from solution // *Naukovi visti natsionalnoho tekhnichnoho universytetu “Kyivskiy politekhnichnyi instytut”*. 2015. No. 3 (101). P. 112–117 (in Ukrainian).
17. Shumilova M.A., Suksin N.E. The spent solution of chemical nickel plating is a resource for obtaining new products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 131–136 (in Russian). doi: 10.25750/10.25750/1995-4301-2022-4-131-136
18. Kreshkov A.P. *Fundamentals of analytical chemistry. Theoretical foundations. Quantitative analysis*. Moskva: Himiya, 1971. Book 2. 456 p. (in Russian).
19. Levanov A.V., Antipenko E.E. *Introduction to chemical kinetics*. Moskva: MGU, 2006. 51 p. (in Russian).
20. Gurov A.A., Badaev F.Z., Ovcharenko L.P., Shapoval V.N. *Chemistry: textbook*. Moskva: MGU im. N.E. Baubana, 2004. 748 p. (in Russian).