

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАВЛЕНИЯ БИОДЕГРАДАЦИИ РАСТВОРОВ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО НИКЕЛИРОВАНИЯ

Е.Г. Винокуров<sup>1,2,3</sup>

А.С. Скичко<sup>1</sup>

Г.М. Мухаметова<sup>1</sup>

О.Ю. Кожухарь<sup>1</sup>

Т.Ф. Бурухина<sup>1</sup>

В.П. Мешалкин<sup>1,4,5</sup>

vin-62@mail.ru; vin@muctr.ru

olf\_l@list.ru

marinesko-2@mail.ru

olesyakozhukhar@yandex.ru

burukhina@bk.ru

vpmeshalkin@gmail.com

<sup>1</sup> РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ИФХЭ РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> ВИНТИ РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> ИОНХ РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>5</sup> БашГУ, Уфа, Российская Федерация

---

### Аннотация

Исследовано развитие мицелиальных грибов в растворах химического никелирования. Установлено, что развитие таких грибов приводит к уменьшению скорости осаждения покрытий и разложению технологических растворов. Разработана математическая модель подавления роста мицелиальных грибов в растворах для химического никелирования в присутствии различных ингибиторов. Модель позволяет прогнозировать скорость роста микроорганизмов при заданных условиях. На основе экспериментальных данных и математического моделирования исследован процесс биодegradации технологических растворов для химического никелирования. Применение метода математического моделирования позволило показать возможность описания кинетики роста колоний мицелиальных грибов уравнением Ферхюльста, определить кинетические параметры этого процесса, прогнозировать стабильность электролитов и осуществлять выбор эффективных ингибиторов. Обоснован выбор веществ — ингибиторов (сульфат меди, тетраборат натрия, молочная кислота, пропионат натрия, хлороформ) — оказывающих фунгистатическое или фунгицидное действие на рост биообъектов. Раз-

### Ключевые слова

*Биодegradация растворов, гальванотехника, ингибирование роста, кинетические параметры, мицелиальные грибы, моделирование, уравнение Ферхюльста, фунгициды, химическое никелирование*

работана математическая модель процесса подавления биодegradации технологических растворов для химического никелирования различными веществами. Обоснована неоднозначность выбора начального условия для постановки задачи Коши при математическом описании процесса. Представлены и проанализированы результаты математического моделирования рассматриваемого процесса. Установлено, что наиболее эффективным ингибитором роста биообъектов является тетраборат натрия, так как при увеличении его концентрации до 50 ммоль/л качество покрытий не ухудшается, скорость нанесения покрытий увеличивается и достигается необходимый фунгицидный эффект

Поступила 20.02.2020

Принята 19.03.2020

© Автор(ы), 2020

---

*Работа выполнена в рамках государственного задания 10.4556.2017/6.7  
Минобрнауки России*

**Введение.** Стабильность эксплуатации технологических растворов для нанесения покрытий является важным показателем ресурсоэффективности гальванических производств. Одним из факторов, определяющих срок эксплуатации технологических растворов, используемых в промышленности, является уровень их биодegradации [1]. Так, обрастание мицелиальными грибами вызывает разложение электролитов, снижает скорость нанесения и качество покрытий в гальванотехнике. Скорость нарастания биомассы колеблется в зависимости от ряда условий [2]. Например, в [3] установлено, что при длительном хранении растворы, используемые для химического никелирования поверхностей, подвергаются обрастанию мицелиальными грибами родов *Penicillium* и *Aspergillus*, причем появление первых признаков и интенсивность развития грибов зависят от состава технологических растворов. Проведена первичная оценка влияния различных соединений на рост грибов и показана возможность использования ингибиторов [3].

Ионы тяжелых металлов в технологических растворах способны влиять на жизнеспособность живых микроорганизмов и изменять их метаболический статус. Несмотря на это, большое число микроорганизмов может быть устойчивым к токсическому действию ионов тяжелых металлов [4–6], а грибы способны накапливать их в клеточных стенках и внутри клетки [7].

При исследовании влияния ионов никеля, кадмия, свинца, хрома на рост различных грибов установлено, что наибольшую резистентность

к смеси ионов металлов имел *Aspergillus niger*; определено отношение штаммов *Aspergillus niger*, *Aspergillus foetidus* и *Penicillium simplicissimum* к ионам никеля, кобальта, ванадия, марганца, железа, вольфрама и цинка [9]. Наибольшую толерантность перечисленные грибы проявили к ионам марганца и ванадия, наименьшую — к ионам никеля и кобальта. Аналогичные результаты получены при исследовании роста грибов *Eupenicillium sp.*, *Penicillium oxalicum*, *Paecilomyces lilacinus* и *Aspergillus niger* [10].

При исследовании сорбции ионов меди и цинка штаммами грибов *Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*, *F. Verticillioides* (*Gibberella fujikuroi* strain), *Rhizoctonia solani* и *Aquathanatephorus pendulus* установлено, что при концентрации  $\text{CuSO}_4$  0,5 ммоль/л происходит рост всех изучаемых грибов за исключением *Rhizoctonia solani* [11], а изменения в морфологии клеток — у всех грибов, кроме *Aspergillus niger*.

При исследовании устойчивости бактерий и грибов к ионам серебра установлено, что рост микроорганизмов прекращался при концентрации  $\text{Ag(I)}$  1 г/л [12].

На устойчивость к мышьяку изучен гриб *Cladosporium herbarum*; указанный вид рос в среде с концентрацией мышьяка 0,2 г/л, а исследованные в работе грибы росли при концентрации меди 0,5 г/л [13].

При исследовании влияния  $\text{Cd(II)}$  в диапазоне значений концентрации 1,5...10,0 ммоль/л на *Penicillium chrysogenum* [14] оказалось, что ингибирование роста биомассы достигало 60 %.

При исследовании влияния ионов  $\text{Au(III)}$  на *Rhizopus oryzae* [15] обнаружено, что при концентрациях золота менее 0,13 ммоль/л происходит увеличение роста мицелия, а более 0,13 ммоль/л рост *Rhizopus oryzae* уменьшался, наблюдалось повреждение клеточной структуры гриба.

Исследована устойчивость штаммов *Aspergillus*, *Pythium sp.*, *Acrimonium sp.* и *Curvularia monata* к различным концентрациям  $\text{Cd(II)}$ ,  $\text{Cu(II)}$ ,  $\text{Ni(II)}$  [16]. При концентрации ионов меди 1,78 г/л рост грибов не происходил, минимальный рост наблюдался у *Aspergillus niger* при концентрации  $\text{Cu(II)}$  1,72 г/л. Остальные виды росли при концентрациях  $\text{Cu(II)}$  0,5...0,7 г/л. При концентрации  $\text{Ni(II)}$  1,6 г/л небольшой рост наблюдался у *Aspergillus flavus*, другие виды росли при концентрации  $\text{Ni(II)}$  0,25...0,40 г/л.

Приведенный краткий аналитический обзор опубликованных результатов указывает на возможность существования грибов в средах, содержащих ионы кадмия, никеля, свинца, кобальта и др. Способность грибов развиваться в средах, содержащих соединения тяжелых металлов, приво-

дит к тому, что их рост может наблюдаться не только на металлоконструкциях [17, 18], но и в технологических растворах, например, на основе комплексов меди, цинка [19] или никеля [20, 21]. Развитие биообъектов в технологических средах, содержащих, кроме ионов тяжелых металлов, лиганды (аминокислоты, оксикарбоновые кислоты) и другие компоненты (соединения фосфора), участвующие в метаболических процессах живых организмов, способно приводить к нарушению оптимального соотношения этих компонентов в технологических растворах и их разложению [3, 19]. Эти биообъекты живут в различных местах гальванических цехов (фильтры, шламы, аэрозоли, продукты коррозии, биопленки) [22]. Развитие биообъектов на поверхности раствора в технологической ванне также может вызывать дефекты при нанесении покрытий (вследствие «прилипания» колоний при погружении и извлечении изделий), а также загрязнять рабочую зону цеха, негативно сказываясь на здоровье персонала и в некоторых случаях вызывая болезнь легионеров [22].

На основании изложенного выше актуальной научно-технологической задачей является исследование процесса биodeградации технологических растворов на основе биохимических экспериментов с применением методов математического моделирования. Это позволяет прогнозировать стабильность электролитов [23–25] и осуществлять выбор эффективных ингибиторов. Для ингибирования роста грибов в промышленности и в сельском хозяйстве применяют фунгициды, влияющие на компоненты клеток. Например, соединения меди и ртути способны образовывать комплексы с ферментами [26], что препятствует метаболизму в клетке.

*Цель работы* — исследование биodeградации технологических растворов на основе соединений тяжелых металлов (на примере раствора химического никелирования), выбор математической модели для описания и определения кинетических параметров роста биообъектов при отсутствии и наличии ингибиторов или эффекторов различной природы (механизма действия), что позволит прогнозировать скорость роста микроорганизмов при заданных условиях и выбирать оптимальные концентрации, обеспечивающие фунгицидное действие.

**Методика эксперимента.** В качестве объекта исследования использовали технологические растворы для химического никелирования, состав которых приведен в табл. 1.

Процесс осаждения проводили при температуре 80 °С. Необходимое значение рН растворов устанавливали с помощью корректировки раствором NaOH или H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Удельная площадь загрузки составляла 2,5 дм<sup>2</sup>/л.

**Состав и технологические характеристики растворов  
для химического никелирования**

Компонент раствора	Концентрация, моль/л, компонентов и технологические характеристики растворов		
	А	Б	В
NiSO <sub>4</sub>	0,12		
NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH	0,13	0,39	0,39
NaH <sub>2</sub> PO <sub>2</sub>	0,37		
Pb(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>	0,00001		
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	–	–	0,1
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	–	–	0,1
CH <sub>2</sub> (COOH) <sub>2</sub>	0,18	–	–
Ингибитор биодegradации*	0–0,22		
Технологические параметры (рН, <i>t</i> ) и показатели ( <i>V</i> <sub>80</sub> ) процесса осаждения покрытий			
рН	6,5	8,0	8,0
Температура при осаждении покрытий, °С	80		
<i>V</i> <sub>80</sub> , мкм/ч	19,1	28,9	22,0
* Сульфат меди, тетраборат натрия, хлороформ, пропионат натрия, лактат натрия.			

Стальные пластины протирали тканью, смоченной керосином, для удаления следов смазки, обезжиривали венской известью, промывали проточной водой, а затем дистиллированной водой и сушили на воздухе. Перед началом эксперимента стальную пластину погружали в раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10 масс. %) для активирования на 10 с, после промывали дистиллированной водой.

Скорость осаждения *V*, мкм/ч, определяли, учитывая время осаждения *t*, ч, и площадь покрытия *S*, см<sup>2</sup>:

$$V = 10^4 m / (\rho S t),$$

где *m* — масса покрытия, мг;  $\rho$  — плотность покрытия, г/см<sup>3</sup>.

Для исследования роста биообъектов технологические растворы (после приготовления и без стерилизации) объемом 25 мл помещали в чашки Петри (диаметр 100 мм, высота слоя раствора 4...5 мм) и оставляли для инокуляции при комнатной температуре открытыми на 1 сут. Затем чашки

закрывали крышкой и выдерживали в этих условиях до 50 сут. Появление мицелия и его рост наблюдали визуально по образованию и размеру колоний на поверхности раствора. В качестве единицы измерения биомассы  $x$  принята доля заполнения поверхности технологического раствора биообъектами, измеряемая в трех параллельных экспериментах, что обеспечивало относительную погрешность 12 %.

Доля занятой колониями поверхности:

$$x = \frac{\sum d_{\text{кол}}^2}{d_{\text{П}}^2}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{кол}}$  — диаметр колоний, мм;  $d_{\text{П}}$  — диаметр чашки Петри, мм.

По экспериментальной зависимости  $x$  от времени определили емкость среды  $k$ , равную предельной доле поверхности, занятой микроорганизмами, и достигаемой в стационарной фазе на кривой роста, что характеризует численность, которую может достичь популяция в условиях ограниченности ресурсов.

Для математического описания роста биообъектов использовано уравнение Ферхюльста:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left( 1 - \frac{x}{k} \right), \quad (2)$$

где  $x$  — доля занятой микроорганизмами поверхности;  $t$  — время, сут;  $r$  — удельная скорость роста популяции, 1/сут;  $k$  — емкость среды, равная предельной численности, которую может достичь популяция в условиях ограниченности ресурсов. Величина  $k$  (измеряемая в тех же единицах, что и  $x$ ) получается равной максимальной доли заполнения поверхности, достигаемой в стационарной фазе на кривой роста.

Для численного решения уравнения (2) использован метод Рунге-Кутты 2-го порядка. Для реализации метода покоординатного спуска при решении описанных ниже оптимизационных подзадач, выделенных для каждой кривой роста на начальном этапе, и глобальной оптимизационной задачи, на завершающем этапе подбора параметров были написаны программы на языке C#. Для получения уравнений оврага  $r_i = f_i(x_0)$  при исследовании поверхностей отклика  $R_i(r_i, x_0)$  применен метод наименьших квадратов. Для визуализации полученных результатов на графиках использован *Excel*.

**Результаты и их обсуждение.** В качестве одного из критериев склонности растворов к биодegradации использовано время до появления первой видимой колонии, которое соответствует началу активного роста био-

объектов и резкому возрастанию зависимости доли занятой биообъектами поверхности от времени. Сведения о подверженности технологических растворов биодegradации приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Характеристика подверженности биодegradации технологических растворов химического никелирования**

Параметр биодegradации	Условное обозначение раствора		
	А	Б	В
Подверженность биодegradации	+	+	+
Время до видимого появления колоний биообъектов, сут	19	7	7
Максимальная доля занятой поверхности	0,07	0,17	0,11
Массовая доля никеля, %:			
$w_{Ni}$ в сухом остатке биообъекта	32	2,6	4,5
$w_{Ni}^*$ в озолонном остатке биообъекта	44	5,7	6,5

Высокой скоростью осаждения покрытий характеризуются растворы, в состав которых входит аминокислота. Однако в растворе А время появления первой видимой колонии составило 19 сут, а в растворах Б и В — 7 сут (см. табл. 2). Максимальная доля занятой биообъектами поверхности в этих растворах 0,07–0,17, содержание никеля в высушенных биообъектах 2,6...32 масс. %, после их озолонения 6,5...44 масс. %. Накопление никеля в биообъектах приводит к снижению концентрации  $Ni^{2+}$  в растворе и изменению его технологических характеристик [20]: уменьшается скорость осаждения покрытий или наблюдается разложение раствора, увеличивается рН раствора при его хранении.

Выбор ингибиторов для исследований обусловлен различным механизмом действия каждого из них [27]. Хлороформ взаимодействует с липидами клеточной стенки, меняя ее проницаемость. Катионы меди (сульфат меди) участвуют в комплексообразовании с ферментами клетки, блокируя их действие. Тетраборат натрия коагулирует белковые соединения клеточной оболочки.

Добавление хлороформа (~ 12 ммоль/л) не привело к значительному уменьшению доли занятой поверхности в растворах Б и В, что может быть связано с его ограниченной растворимостью в водных средах. Доля занятой поверхности в растворе Б за 40 сут составила 0,17, при добавлении хлороформа — 0,1. В растворе В при добавлении хлороформа доля занятой колониями поверхности равна 0,1, при контроле — 0,11. Вероятно, данная концентрация хлороформа лишь замедляет развитие гриба.

При добавлении сульфата меди в концентрации 1,6...5,0 ммоль/л в раствор Б время появления колоний составило 9 сут, в контрольном эксперименте без сульфата меди — 7 сут. С увеличением концентрации сульфата меди от 1,6 до 5,0 ммоль/л доля занятой поверхности в растворе Б уменьшалась от 0,09 до 0,05 за 41 сут. При добавлении сульфата меди в раствор В в концентрации 1,6 и 3,2 ммоль/л время появления колоний составило 6 сут, при контрольном эксперименте без сульфата меди — 7 сут. При концентрации сульфата меди 5 ммоль/л время видимого появления колоний 8 сут. Несмотря на незначительное изменение времени появления колоний при увеличении концентрации сульфата меди в пределах 1,6...5,0 ммоль/л, доля занятой колониями поверхности уменьшилась от 0,1 до 0,06 за 41 сут.

При добавлении в раствор Б тетрабората натрия в концентрации 10 ммоль/л время появления колоний составило 9 сут, при контрольном эксперименте без тетрабората — 7 сут. При концентрации добавки 30 ммоль/л время видимого появления колоний увеличилось и составило 13 сут. При концентрации добавки 50 ммоль/л появление колоний визуально не наблюдалось.

При добавлении в раствор В тетрабората натрия в концентрации 10 ммоль/л время появления колоний составило 22 сут. При контрольном эксперименте без присутствия тетрабората время видимого появления колоний составило 7 сут, при концентрации добавки 30 ммоль/л время видимого появления колоний — 28 сут. При концентрации добавки 50 ммоль/л появление колоний визуально не наблюдалось.

Далее для объективного формализованного представления о качестве ингибирования и перспективах использования конкретного вещества для достижения требуемой эффективности подавления роста биообъектов определяли параметры математической модели на основе уравнения Ферхюльста (2).

Уравнение (2) предполагает определение кинетических параметров  $r$  и  $k$  для каждой экспериментальной кривой. Модель напрямую не отражает зависимость характеристик роста популяции грибов от вида и концентрации  $c$  используемого ингибитора. Результатом анализа математической модели (2) будет получение зависимостей  $r(c)$  и  $k(c)$  для конкретного ингибитора с использованием методов аппроксимации. Результаты анализа этих зависимостей позволят сделать выводы о ингибирующем эффекте каждого ингибитора. Поскольку величина  $k$  однозначно определяется непосредственно из экспериментальной кривой роста, единственным неизвестным параметром уравнения (2) является  $r$ .



Согласно классической постановке задачи Коши, для численного решения уравнение (2) должно быть дополнено начальным условием:

$$x(t=0) = x_0. \quad (3)$$

Однако уравнение (3) является достаточно условным допущением, поскольку констатирует, что споры грибов мгновенно попадают из окружающей среды на поверхность технологического раствора и сразу начинают прорастать. Другими словами, уже с самого начала контакта раствора с воздухом некоторая мизерная доля его поверхности  $x_0$  заполнена биоматериалом. При этом величина  $x_0$  не может быть известна, поскольку речь идет о математическом описании неконтролируемого природного процесса.

Отметим, что более правдоподобно начальное условие выглядело бы в следующем виде:

$$x(t=t_0) = x_0, \quad (4)$$

где  $t_0$  — время, отсчитываемое от начала контакта раствора с воздухом (т. е. от начала замера количества биоматериала) до момента заполнения доли поверхности  $x_0$ . К тому же параметр  $t_0$  не может быть однозначно ассоциирован с описанным выше периодом до появления видимых колоний грибов, так как активному росту любого биообъекта всегда предшествует лаг-фаза, т. е. фаза адаптации к среде, и использование уравнения (4) исключило бы ее из расчета. Учитывая открытость системы и невозможность контроля постоянства микробиологического состава внешней среды, параметр  $t_0$  носит случайный характер и введение его в модель может исказить понимание результатов. Поэтому принято решение остановиться на начальном условии (3).

Для того чтобы избежать влияния случайного фактора (значения  $x_0$ ) на вид зависимостей  $r(c)$  и  $k(c)$ , предположили, что величина  $x_0$  одинакова для всех концентраций одного и того же ингибитора. Таким образом, поставленная оптимизационная задача имеет следующее математическое описание:

$$R(r_i, x_0) = \sum_i \sum_j |x_{ij}^{\text{э}} - x_{ij}^{\text{п}}(r_i, x_0)| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $R$  — критерий рассогласования; индекс « $j$ » соответствует номеру экспериментальной точки на  $i$ -й экспериментальной кривой. Обозначение  $(r_i, x_0)$  указывает на то, что значение параметра  $r$  определяется для каждой кривой роста, в то время как значение параметра  $x_0$  постоянно.

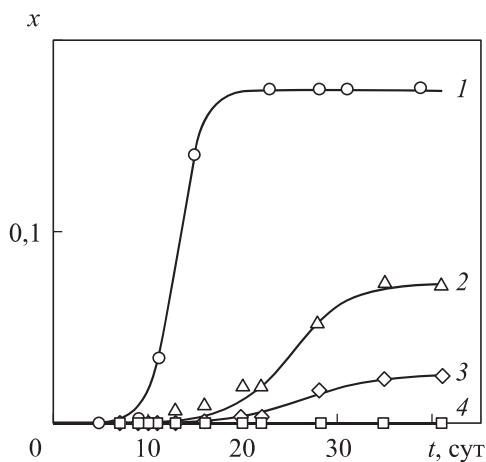
Оптимизационная задача (5) декомпозирована на подзадачи, выделенные для каждой кривой роста:

$$R_i(r_i, x_0) = \sum_j \left| x_{ij}^a - x_{ij}^p(r_i, x_0) \right| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Подзадачи (6) на начальном этапе решались с помощью метода покоординатного спуска, показавшего (с учетом повторов от разных начальных приближений) наличие достаточно протяженного прямолинейного оврага на всех поверхностях отклика  $R_i(r_i, x_0)$ . Далее с помощью методов аппроксимации каждый овраг был описан линейной зависимостью  $r_i = f_i(x_0)$ , что позволило свести оптимизационную задачу (5) к одномерной:

$$R(f_i(x_0), x_0) = \sum_i \sum_j \left| x_{ij}^a - x_{ij}^p(f_i(x_0), x_0) \right| \rightarrow \min. \quad (7)$$

Результаты решения оптимизационной задачи (7) для случая использования тетрабората натрия в качестве ингибитора роста мицелиальных грибов (с учетом определенных ранее значений параметра  $k$ ) представлены на рис. 1.

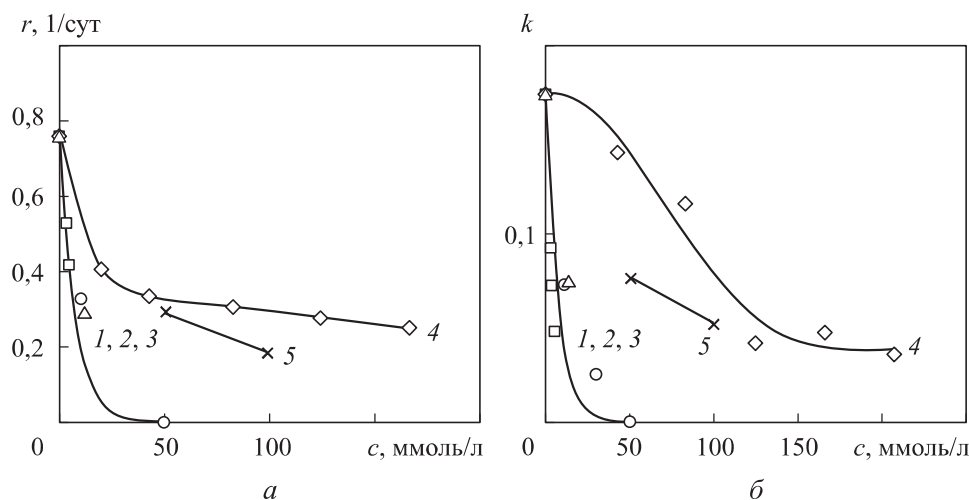


**Рис. 1.** Динамика доли поверхности раствора В (рН = 8,0), занятой колониями грибов, при концентрации Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 0 (1), 10 (2), 30 (3) и 50 ммоль/л (4) (точки — экспериментальные данные; сплошные линии — результаты вычислительного эксперимента после нахождения параметров математической модели)

Данные, приведенные на рис. 1, демонстрируют оправданность выбора уравнения Ферхюльста в качестве основы для разрабатываемой модели, поскольку динамика роста на кривых 1–3 полностью подчиняется классической S-образной кривой роста популяций микроорганизмов.

Аналогичные экспериментальные зависимости кинетики роста биообъектов характерны и в присутствии таких ингибиторов, как сульфат меди, хлороформ и пропионат-ион. Для всех рассматриваемых ингибиторов при построении модели найдено, что величина  $x_0$  находится в диапазоне значений  $10^{-4,1} - 10^{-5,2}$ . Полученный разброс значений может быть вызван различным периодом проведения экспериментов и не оказывает существенного влияния на определение кинетических параметров модели.

Концентрационные зависимости основных параметров ( $r$ ,  $k$ ) уравнения Ферхюльста в присутствии ингибиторов различной природы (механизма действия) приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Концентрационные зависимости удельной скорости роста популяции (*a*) и емкости среды (*б*) в технологическом растворе В при использовании в качестве ингибиторов сульфата меди (1), тетрабората натрия (2), хлороформа (3), пропионата натрия (4) и лактата натрия (5)

Согласно представленным данным, концентрационные зависимости  $r$  и  $k$  характеризуют однозначную тенденцию усиления ингибирования с ростом концентрации различных ингибиторов. При повышении концентрации ингибитора уменьшается не только емкость среды  $k$ , но и удельная скорость роста грибов  $r$ , т. е. ингибирование начинает сказываться на ходе процесса роста мицелия, что соответствует уменьшению угла наклона кривых в экспоненциальной фазе роста (см. рис. 1).

Несмотря на различный механизм действия таких ингибиторов, как хлороформ (взаимодействие с липидами клеточной стенки и изменение ее проницаемости), сульфат меди (комплексобразование с ферментами клетки и блокирование их действия), тетраборат натрия (коагуляция белковых соединений клеточной оболочки), найденные параметры математической модели можно описать одним видом аппроксимационной зависимости (кривые 1–3, см. рис. 2). Для этой группы ингибиторов при концентрации около 50 ммоль/л и более рост биообъектов прекращается, что свидетельствует об их фунгицидном действии.

Иная картина наблюдается в присутствии пропионат-ионов: при увеличении концентрации ингибитора до 50 ммоль/л наблюдается резкое

уменьшение параметров  $r$  и  $k$ ; далее эти параметры стабилизируются (кривая 4, см. рис. 2), но остаются на довольно высоком уровне, что свидетельствует о фунгистатическом действии пропионат-ионов. Аналогичная зависимость наблюдалась и при использовании солей молочной кислоты (кривая 5, см. рис. 2). Данный вывод также коррелирует с тем фактом, что величина  $x_0$  для пропионат- и лактат-ионов получилась на 1–2 порядка больше, чем для остальных ингибиторов. Учитывая условность начального условия  $x_0$ , которое рассмотрено выше, это может свидетельствовать о том, что среды с данными ингибиторами более удобны для прорастания грибов, а сами ингибиторы обладают меньшей эффективностью.

Следовательно, представленные данные свидетельствуют о том, что соли пропионовой и молочной кислот проявляют только фунгистатическое действие и их использование в дальнейших экспериментах нецелесообразно. Хлороформ имеет ограниченную растворимость в водных растворах, что также не позволяет достичь фунгицидного эффекта. Сульфат меди и тетраборат натрия с увеличением концентрации не только замедляют развитие грибов, но и практически полностью подавляют их рост. Эти два ингибитора использованы в следующих экспериментах для выявления их влияния на технологические характеристики процесса осаждения покрытий.

Установлено, что при добавлении в технологические растворы химического никелирования сульфата меди (до 5 ммоль/л) или тетрабората натрия (до 50 ммоль/л) скорость осаждения покрытия возрастает с повышением концентрации ингибиторов (табл. 3). Однако при добавлении сульфата меди более 5 ммоль/л покрытия имеют неудовлетворительное качество и скорость их осаждения резко уменьшается, а фунгицидный эффект не достигается, так как для этого требуется концентрация не менее 50 ммоль/л. Очевидно, лучшим ингибитором роста грибов в технологическом растворе химического никелирования является тетраборат натрия, который не ухудшая качество покрытий, позволяет также увеличить их скорость осаждения на 9...10 %.

Таблица 3

**Влияние концентраций сульфата меди и тетрабората натрия на скорость осаждения покрытия в растворе В**

Ингибитор	Скорость осаждения покрытий ( $\pm 1$ мкм/ч) при различных концентрациях (ммоль/л) ингибитора							
	0	1,6	3,2	4,8	10	10	30	50
Сульфат меди	22	27	29	31	14	–	–	–
Тетраборат натрия	22	–	–	–	–	22	22	24

**Заключение.** Показано, что процесс биодegradации технологических растворов, например, для химического никелирования, может быть описан математической моделью на основе уравнения Ферхюльста. Преимущество предложенной математической модели заключается, прежде всего, в ее простоте и небольшом числе определяемых параметров, необходимых для полноценного отражения рассматриваемого процесса биодegradации технологического раствора. Параметры модели (удельная скорость роста популяции и емкость среды) для конкретного ингибитора дают объективное представление о степени ингибирования и перспективах использования данного вещества для достижения требуемой эффективности подавления роста биообъектов, а также позволяют прогнозировать концентрацию ингибитора, при которой наблюдается фунгицидное действие.

С использованием результатов анализа кинетических параметров математической модели установлено, что соли молочной и пропионовой кислот обладают фунгистатическим действием, а наиболее эффективным ингибитором роста биообъектов являются сульфат меди и тетраборат натрия, проявляющие фунгицидное действие. Показано, что для практического применения в технологических растворах химического никелирования целесообразно использовать тетраборат натрия, так как при увеличении его концентрации до 50 ммоль/л сохраняется качество покрытий, скорость их осаждения увеличивается и достигается необходимый фунгицидный эффект.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Миндубаев А.З., Волошина А.Д., Бабынин Э.В. и др. Микробиологическая дegradация белого фосфора. *Экология и промышленность России*, 2018, т. 22, № 1, с. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-1-33-37>
- [2] Скичко А.С., Кольцова Э.М. Математическая модель для описания колебаний биомассы бактерий. *Теоретические основы химической технологии*, 2006, т. 40, № 5, с. 540–550.
- [3] Мухаметова Г.М., Винокуров Е.Г., Бабусенко Е.С. и др. Биодegradация растворов для химического никелирования. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*, 2018, т. 61, № 9-10, с. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186109-10.5792>
- [4] Sizontsov A.N., Kvan O.V., Vishnyakov A.I., et al. The use of probiotic preparations on basis of bacteria of a genus bacillus during intoxication of lead and zinc. *Life Sci. J.*, 2014, vol. 11, no. 10, pp. 18–20.
- [5] Пешков С.А., Сизенцов А.Н., Никиян А.Н. и др. Исследование биоаккумуляции тяжелых металлов бактериями рода *Bacillus* с использованием рентгено-

флуоресцентного анализа и атомно-силовой спектроскопии. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 4.

URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21079>

[6] Бузолёва Л.С., Кривошеева А.М. Влияние тяжелых металлов на размножение патогенных бактерий. *Успехи современного естествознания*, 2013, № 7, с. 30–33.

[7] Куимова Н.Г., Моисеенко В.Г. Биогенная минерализация золота в природе и эксперименте. *Литосфера*, 2006, № 3, с. 83–95.

[8] Joshi P.K., Swarup A., Maheshwari S., et al. Bioremediation of heavy metals in liquid media through fungi isolated from contaminated sources. *Indian J. Microbiol.*, 2011, vol. 51, no. 4, pp. 482–497. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0110-9>

[9] Anahid S., Yaghmaei S., Ghobadinejad Z. Heavy metal tolerance of fungi. *Sci. Iran.*, 2011, vol. 18, iss. 3, pp. 502–508.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.015>

[10] Levinskaitė L., Smirnov A., Lukšienė B., et al. Pu(IV) and Fe(III) accumulation ability of heavy metal-tolerant soil fungi. *Nukleonika*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 285–290.

[11] Price M.S., Classen J.J., Payne G.A. *Aspergillus niger* absorbs copper and zinc from swine wastewater. *Bioresour. Technol.*, 2001, vol. 77, iss. 1, pp. 41–49.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00135-8)

[12] Pümpel T., Schinner F. Silver tolerance and silver accumulation of microorganisms from soil materials of a silver mine. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1986, vol. 24, no. 3, pp. 244–247. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00261545>

[13] Binsadiq A.R.H. Fungal absorption and tolerance of heavy metals. *JAST*, 2015, vol. 5, pp. 77–80.

[14] Xu X., Xia L., Zhu W., et al. Role of *Penicillium chrysogenum* XJ-1 in the detoxification and bioremediation of cadmium. *Front. Microbiol.*, 2015, vol. 6, art. 1422. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01422>

[15] Sujoy K. Das, Liang J., Schmidt M., et al. Biomineralization mechanism of gold by Zygomycete Fungi *Rhizopus oryzae*. *ACS Nano*, 2012, vol. 6, no. 7, pp. 6165–6173. DOI: <https://doi.org/10.1021/nn301502s>

[16] Akhtar S., Mahmood-ul-Hassan M., Ahmad R., et al. Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil Environ.*, 2013, vol. 32, no. 1, pp. 56–62.

[17] Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Харченко У.В. и др. Влияние микрообрастания на морскую коррозию металлов и разрушение защитных покрытий. *Коррозия: материалы, защита*, 2011, № 3, с. 11–18.

[18] Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Карпов В.А. Развитие сообщества макрообрастания и динамика коррозии нержавеющей стали 12Х18Н10Т в тропических водах. *Вода: химия и экология*, 2011, № 10, с. 93–98.

- [19] Ваграмян Т.А., Невмятуллина Х.А., Темкин С.М. Электроосаждение сплава медь–цинк из цитратных растворов. *Защита металлов*, 1991, т. 27, № 1, с. 146–147.
- [20] Винокуров Е.Г., Жигунов Ф.Н., Моргунов А.В. и др. Осаждение химических покрытий никель–фосфор и никель–фосфор–медь из глицинатных растворов. *Гальванотехника и обработка поверхности*, 2015, т. 23, № 3, с. 40–46.
- [21] Скопинцев В.Д., Моргунов А.В., Винокуров Е.Г. и др. Повышение производительности процесса химического никелирования. *Гальванотехника и обработка поверхности*, 2016, т. 24, № 3, с. 26–31.
- [22] Galvano- und Oberflächentechnik-treff: im Fokus. *Galvanotechnik*, 2016, vol. 107, no. 1, pp. 120–122.
- [23] Фаина С.В., Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф. и др. Оценка потенциала ресурсосбережения при электроосаждении металлических покрытий по показателю устойчивости состава растворов. *Теоретические основы химической технологии*, 2014, т. 48, № 6, с. 695–700.
- [24] Фаина С.В., Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф. и др. Суммарная концентрация основных компонентов растворов для электроосаждения металлических покрытий как критерий классификации и выбора ресурсосберегающих составов растворов. *Теоретические основы химической технологии*, 2013, т. 47, № 5, с. 573–579.
- [25] Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Каранаева М.Н. и др. Прогнозирование предпочтительной области общих концентраций ионов металлов в растворах для электроосаждения сплавов. *Теоретические основы химической технологии*, 2008, т. 42, № 6, с. 671–675.
- [26] Matolcsy G., Nádasz M., Andriská V. (eds.). Fungicides. *Stud. Environ. Sci.*, 1988, vol. 32, pp. 272–486. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71130-0](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71130-0)
- [27] Никитин М.К., Мельникова Е.П. Химия в реставрации. Л., Химия, 1990.

**Винокуров Евгений Геннадьевич** — д-р хим. наук, профессор кафедры аналитической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); сотрудник ИФХЭ РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 14); сотрудник ВИНТИ РАН (Российская Федерация, 125190, Москва, А-190, ул. Усиевича, д. 20).

**Скичко Алексей Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры кибернетики химико-технологических процессов РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Мухаметова Гульназ Мунировна** — аспирантка кафедры аналитической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Кожухарь Олеся Юрьевна** — студентка кафедры кибернетики химико-технологических процессов РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Бурухина Татьяна Федоровна** — канд. пед. наук, доцент кафедры высшей математики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

**Мешалкин Валерий Павлович** — д-р техн. наук, академик РАН, профессор, заведующий кафедрой логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9); сотрудник ИОНХ РАН (Российская Федерация, 119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, стр. 1); сотрудник БашГУ (Российская Федерация, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Винокуров Е.Г., Скичко А.С., Мухаметова Г.М. и др. Исследование и моделирование процесса подавления биодegradации растворов для химического никелирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 4 (91), с. 103–122. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-103-122>

## INVESTIGATION AND SIMULATION OF BIODEGRADATION SUPPRESSION IN ELECTROLESS NICKEL PLATING BATHS

**E.G. Vinokurov**<sup>1,2,3</sup>

vin-62@mail.ru; vin@muctr.ru

**A.S. Skichko**<sup>1</sup>

olf\_l@list.ru

**G.M. Mukhametova**<sup>1</sup>

marinesko-2@mail.ru

**O.Yu. Kozhukhar**<sup>1</sup>

olesyakozhukhar@yandex.ru

**T.F. Burukhina**<sup>1</sup>

burukhina@bk.ru

**V.P. Meshalkin**<sup>1,4,5</sup>

vpmeshalkin@gmail.com

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Russian Institute for Scientific and Technical Information, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup> Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>5</sup> Bashkir State University, Ufa, Russian Federation



## Abstract

The paper considers proliferation of filamentous fungi in electroless nickel plating baths. We determined that it leads to decomposition of processing media and decreased coating deposition rates. We developed a mathematical model for suppressing filamentous fungi growth in electroless nickel plating solutions in the presence of various inhibitors. The model allows us to predict micro-organism proliferation rate under the conditions specified. We used experimental data and mathematical simulation as the basis for investigating processing media biodegradation in electroless nickel plating. Our mathematical simulation showed that it is possible to use the Verhulst model to describe the growth kinetics of filamentous fungi colonies. It also allowed us to determine the parameters of the process kinetics, to predict bath electrolyte stability and select efficient inhibitors. We validate our selection of inhibitor substances (copper sulphate, sodium tetraborate, lactic acid, sodium propionate, chloroform) that have a fungistatic or fungicidal effect on biological object proliferation. We developed a mathematical model for the process of inhibiting processing media biodegradation in electroless nickel plating by means of various substances. We substantiate the ambiguity of selecting the initial condition for stating the Cauchy problem in the mathematical description of the process. We present and analyse the results of mathematically simulating the process under consideration. We found sodium tetraborate to be the most efficient biological object proliferation inhibitor, since, as its concentration increases to 50 mmol/l, there is no deterioration in the coating quality; at the same time, the coating deposition rate increases and the necessary fungicidal effect is ensured

## Keywords

*Bath biodegradation, electroplating, growth inhibition, kinetic parameters, filamentous fungi, simulation, Verhulst model, fungicides, electroless nickel plating*

Received 20.02.2020

Accepted 19.03.2020

© Author(s), 2020

---

*The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the government assignment 10.4556.2017/6.7*

## REFERENCES

- [1] Mindubaev A.Z., Voloshina A.D., Babynin E.V., et al. Microbiological degradation of white phosphorus. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2018, vol. 22, no. 1, pp. 33–37 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-1-33-37>

- [2] Skichko A.S., Kol'tsova E.M. Mathematical model for describing oscillations of bacterial biomass. *Theor. Found Chem. Eng.*, 2006, vol. 40, no. 5, pp. 503–513.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579506050071>
- [3] Mukhametova G.M., Vinokurov E.G., Babusenko E.S., et al. Biodegradation of solutions for chemical nickelation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2018, vol. 61, no. 9-10, pp. 89–97 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20186109-10.5792>
- [4] Sizentsov A.N., Kvan O.V., Vishnyakov A.I., et al. The use of probiotic preparations on basis of bacteria of a genus bacillus during intoxication of lead and zinc. *Life Sci. J.*, 2014, vol. 11, no. 10, pp. 18–20.
- [5] Peshkov S.A., Sizentsov A.N., Nikiyan A.N., et al. Estimation of bioaccumulative ability of heavy metals by *Bacillus* bacteria with the use of roentgen-fluorescent analysis and atomic force microscopy. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2015, no. 4 (in Russ.). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21079>
- [6] Buzoleva L.S., Krivosheeva A.M. Effects of heavy metals on pathogens bacteria. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2013, no. 7, pp. 30–33 (in Russ.).
- [7] Kuimova N.G., Moiseenko V.G. Biogenic gold mineralization in nature and in experiment. *Litosfera* [Lithosphere], 2006, no. 3, pp. 83–95 (in Russ.).
- [8] Joshi P.K., Swarup A., Maheshwari S., et al. Bioremediation of heavy metals in liquid media through fungi isolated from contaminated sources. *Indian J. Microbiol.*, 2011, vol. 51, no. 4, pp. 482–497. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0110-9>
- [9] Anahid S., Yaghmaei S., Ghobadinejad Z. Heavy metal tolerance of fungi. *Sci. Iran.*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 502–508.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.015>
- [10] Levinskaitė L., Smirnov A., Lukšienė B., et al. Pu(IV) and Fe(III) accumulation ability of heavy metal-tolerant soil fungi. *Nukleonika*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 285–290.
- [11] Price M.S., Classen J.J., Payne G.A. *Aspergillus niger* absorbs copper and zinc from swine wastewater. *Bioresour. Technol.*, 2001, vol. 77, no. 1, pp. 41–49.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00135-8)
- [12] Pümpel T., Schinner F. Silver tolerance and silver accumulation of microorganisms from soil materials of a silver mine. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 1986, vol. 24, no. 3, pp. 244–247. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00261545>
- [13] Binsadiq A.R.H. Fungal absorption and tolerance of heavy metals. *JAST*, 2015, vol. 5, pp. 77–80.
- [14] Xu X., Xia L., Zhu W., et al. Role of *Penicillium chrysogenum* XJ-1 in the detoxification and bioremediation of cadmium. *Front. Microbiol.*, 2015, vol. 6, art. 1422.  
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01422>

- [15] Sujoy K. Das, Liang J., Schmidt M., et al. Biomineralization mechanism of gold by Zygomycete Fungi *Rhizopus oryzae*. *ACS Nano*, 2012, vol. 6, no. 7, pp. 6165–6173. DOI: <https://doi.org/10.1021/nn301502s>
- [16] Akhtar S., Mahmood-ul-Hassan M., Ahmad R., et al. Metal tolerance potential of filamentous fungi isolated from soils irrigated with untreated municipal effluent. *Soil Environ.*, 2013, vol. 32, no. 1, pp. 56–62.
- [17] Karpov V.A., Koval'chuk Yu.L., Kharchenko U.V., et al. Influence of microfouling on sea corrosion and destruction of protective coating. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: Materials, Protection], 2011, no. 3, pp. 11–18 (in Russ.).
- [18] Koval'chuk Yu.L., Poltarukha O.P., Karpov V.A. The macrofouling community development and corrosion dynamics on 12X18H10T stainless steel in tropical waters. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology], 2011, no. 10, pp. 93–98 (in Russ.).
- [19] Vagramyan T.A., Nevmyatullina Kh.A., Temkin S.M. Electrodeposition of copper–zinc alloy from citrate solutions. *Zashchita metallov*, 1991, vol. 27, no. 1, pp. 146–147 (in Russ.).
- [20] Vinokurov E.G., Zhigunov F.N., Morgunov A.V., et al. Effect of temperature on the kinetics of electroless nickel plating from glycinate solutions. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 2015, vol. 23, no. 3, pp. 40–46 (in Russ.).
- [21] Skopintsev V.D., Morgunov A.V., Vinokurov E.G., et al. How to increase the productivity of electroless nickel plating process. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 2016, vol. 24, no. 3, pp. 26–31 (in Russ.).
- [22] Galvano- und Oberflächentechnik-treff: im Fokus. *Galvanotechnik*, 2016, vol. 107, no. 1, pp. 120–122.
- [23] Fadina S.V., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., et al. Estimating the potential of resource conservation in metal electroplating based on the stability index for the composition of solutions. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2014, vol. 48, no. 6, pp. 842–847. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579514060037>
- [24] Fadina S.V., Vinokurov E.G., Burukhina T.F., et al. Total concentration of main components in solutions for metal electroplating as a criterion for classifying and choosing resource-saving compositions of solutions. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2013, vol. 47, no. 5, pp. 593–599. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579513040222>
- [25] Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Karanaeva M.N., et al. Predicting the preferable range of the total concentrations of metal ions in solutions for alloy electrodeposition. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 868–872. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579508060080>
- [26] Matolcsy G., Nádasy M., Andriská V. (eds.) Fungicides. *Stud. Environ. Sci.*, 1988, vol. 32, pp. 272–486. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71130-0](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71130-0)
- [27] Nikitin M.K., Mel'nikova E.P. *Khimiya v restavratsii* [Chemistry in restoration]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990.

**Vinokurov E.G.** — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of Analytical Chemistry, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); member of Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (Leninskiy prospekt 14, Moscow, 119991 Russian Federation); member of Russian Institute for Scientific and Technical Information, Russian Academy of Sciences (Usievicha ul. 20, Moscow, A-190, 125190 Russian Federation).

**Skichko A.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Cybernetics of Chemical Technology Processes, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Mukhametova G.M.** — Post-Graduate Student, Department of Analytical Chemistry, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Kozhukhar O.Yu.** — Student, Department of Cybernetics of Chemical Technology Processes, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Burukhina T.F.** — Cand. Sc. (Ped.), Assoc. Professor, Department of Higher Mathematics, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

**Meshalkin V.P.** — Academician, Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Logistics and Business Informatics, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation); member of Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences (Leninskiy prospekt 31, str. 1, Moscow, 119071 Russian Federation); member of Bashkir State University (Zaki Validi ul. 32, Ufa, 450076 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Vinokurov E.G., Skichko A.S., Mukhametova G.M., et al. Investigation and simulation of biodegradation suppression in electroless nickel plating baths. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 4 (91), pp. 103–122 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-4-103-122>