

УДК 66.082

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-74-84>

Научная статья

Research article



Изучение поведения дихлоризоцианурата натрия в водных растворах

Р.Э. Хабибулина, Э.Б. Колмачихина, В.Г. Лобанов, О.Б. Колмачихина

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

✉ Раиса Энверовна Хабибулина (raisa.khabibulina@urfu.ru)

Аннотация: В последние десятилетия мировое потребление золота стабильно повышается, что обусловлено его возрастающей ролью как промышленного металла и стремлением накопления многими странами золотых резервов. Одновременно с этим наблюдается истощение золотосодержащих месторождений, что ведет к вовлечению в переработку бедных и упорных руд. Такое изменение сырьевой базы и усиление экологических требований к металлургическому производству делает очень актуальной задачей поиск новых реагентов для выщелачивания золота. Традиционно используемые для этой цели цианистые растворы имеют высокую токсичность и низкую эффективность при выщелачивании золота из упорных и сульфидных руд. Прочие растворители — тиосульфатные и аммиачно-тиосульфатные растворы, тиомочевина, бромиды и йодиды, используются гораздо реже, так как имеют целый ряд существенных недостатков. Вариантом эффективного альтернативного реагента для выщелачивания золота из различного сырья могут стать хлоридные растворители, например дихлоризоцианурат натрия (ДЦН). Его использование предполагает кислый характер раствора $\text{pH} < 1,0$ и избыток Cl^- -ионов. Поэтому для практического применения ДЦН при гидрометаллургической переработке золотосодержащих материалов необходимо изучение поведения данного реагента в условиях, соответствующих области существования хлоридного комплекса золота (III). Эксперименты проводили методом вращающегося диска. Исследовали влияние температуры, скорости вращения диска, концентрации соляной кислоты на удельную скорость растворения ДЦН, величину pH и окислительно-восстановительный потенциал растворов. Установлено, что при растворении ДЦН в воде происходит его гидролиз с образованием хлорноватистой кислоты (HClO), которая служит основным источником активного хлора. Сопровождающееся при этом снижение pH связано с образованием слабых кислот — хлорноватистой и циануровой. Введение соляной кислоты в водный раствор ДЦН приводит к образованию молекулярного хлора, который при достижении своей предельной растворимости переходит в газообразное состояние. Проведены экспериментальные исследования по определению скорости растворения золота при различных концентрациях ДЦН и соляной кислоты. Установлено, что при $C_{\text{HCl}} = 14,4 \text{ г/дм}^3$ и $C_{\text{ДЦН}} = 3,0 \text{ г/дм}^3$ достигается максимальная скорость растворения $v_{\text{Au}} = 0,118 \text{ мг/(см}^2 \cdot \text{мин)}$.

Ключевые слова: дихлоризоцианурат натрия (ДЦН), циануровая кислота, соляная кислота, вращающийся диск, растворение, золото.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00787, <https://rscf.ru/project/25-29-00787/>

Для цитирования: Хабибулина Р.Э., Колмачихина Э.Б., Лобанов В.Г., Колмачихина О.Б. Изучение поведения дихлоризоцианурата натрия в водных растворах. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(3):74–84. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-74-84>

Investigation of the behavior of sodium dichloroisocyanurate in aqueous solutions

R.E. Khabibulina, E.B. Kolmachikhina, V.G. Lobanov, O.B. Kolmachikhina

Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russia

✉ Raisa E. Khabibulina (raisa.khabibulina@urfu.ru)

Abstract: Global gold consumption has steadily increased in recent decades, driven by expanding industrial applications and reserve accumulation by many countries. In parallel, depletion of high-grade deposits has shifted processing toward low-grade and

refractory ores. These trends—together with tighter environmental regulations—highlight the need for alternative lixivants for gold extraction. Although cyanide remains the industry standard, it is highly toxic and often ineffective for refractory sulfide ores. Other systems—thiosulfate (including ammoniacal thiosulfate), thiourea, and bromide/iodide lixivants—are used far less frequently due to significant disadvantages. Among acidic chloride lixivants, sodium dichloroisocyanurate (NaDCC) was investigated as a promising candidate. Use of NaDCC requires strongly acidic solutions ($\text{pH} < 1.0$) and an excess of Cl^- , i.e., conditions consistent with the stability domain of the Au(III) chloride complex (AuCl_4^-). Using the rotating-disk technique, we examined the effects of temperature, disk rotation rate, and HCl concentration on the specific dissolution rate of the reagent (NaDCC), as well as on solution pH and redox potential (Eh). NaDCC hydrolyzes in water to form hypochlorous acid (HClO)—the primary source of active chlorine—while the concurrent pH decrease arises from formation of weak acids (hypochlorous and cyanuric). Adding HCl to NaDCC solutions generates molecular chlorine (Cl_2), which evolves once its solubility limit is exceeded. Gold-dissolution tests across NaDCC and HCl concentrations identified an optimum at $[\text{HCl}] = 14.4 \text{ g/dm}^3$ and $[\text{NaDCC}] = 3.0 \text{ g/dm}^3$, yielding a maximum gold dissolution rate of $v_{\text{Au}} = 0.118 \text{ mg/(cm}^2 \cdot \text{min)}$.

Keywords: sodium dichloroisocyanurate (NaDCC), cyanuric acid, hydrochloric acid, rotating-disk, gold leaching, dissolution.

Acknowledgments: This research was supported by the Russian Science Foundation grant, Project No. 25-29-00787, No. 25-29-00787, <https://rscf.ru/project/25-29-00787/>

For citation: Khabibulina R.E., Kolmachikhina E.B., Lobanov V.G., Kolmachikhina O.B. Investigation of the behavior of sodium dichloroisocyanurate in aqueous solutions. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(3):74–84. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-74-84>

Введение

Мировое потребление золота за последние 20 лет возросло с 3500 до почти 5000 т/год [1], что связано с его более широким использованием в электронике и применением в качестве инвестиционного инструмента в условиях экономической нестабильности. Около 90 % золота получают с применением процесса цианирования, который позволяет эффективно и экономично извлекать металл из первичного и вторичного сырья [2]. Однако цианиды характеризуются высокой биологической токсичностью, чрезмерной длительностью выщелачивания и низкой эффективностью в переработке упорных и сульфидных руд. Золотодобывающие предприятия нередко являются виновниками экологических катастроф, связанных с утечкой цианистых растворов в поверхностные воды, например: в России (2014 г., 2019 г.), Канаде (2024 г.), Мексике (2018 г.), Папуа — Новой Гвинее (2000 г.), Кыргызстане (1998 г., 2021 г.). Поэтому поиск альтернативных растворителей золота является важной задачей для минимизации экологических последствий переработки Au-содержащих материалов [3].

Известно, что выщелачивание благородных металлов требует присутствия комплексобразователя и окислителя. Среди безцианидных комплексобразователей золота можно выделить растворы неорганических реагентов: тиосульфатные, аммиачно-тиосульфатные, тиомочевинные, хлоридные, йодидные и бромидные системы [4–6]. В качестве альтернативы для растворения золота предложено большое количество органических соединений:

гуминовые соединения и аминокислоты (глицин, аланин, валин, аспарагиновая кислота, фенилаланин, аспарагин, цистеин и др.), малонитрил, α -гидроксинитрилы, трицианометамин калия, цианамид кальция, дибромдиметилгидантоин, диметилсульфоксид [7–10].

Использовать растворы на основе галогенов, прежде всего хлора, начали еще в средние века [11]. Выщелачивающие системы на основе галогенов сочетают свойства окислителя и комплексобразователя [12]. В табл. 1 представлены скорости выщелачивания золота в растворах галогенидов, а также условия для соответствующих процессов. Хлоридные системы, включающие хлор, хлорноватистую кислоту, гипохлориты, хлориды железа и меди, обладают высокой эффективностью при растворении золота. Термодинамически хлор и хлорноватистая кислота имеют высокие стандартные потенциалы ($E^0 = 1,36 + 1,49 \text{ В}$) по сравнению с йодидами ($E^0 = 0,54 \text{ В}$) и бромидными ($E^0 = 1,1 \text{ В}$). При этом комплекс $[\text{AuCl}_4]^-$ устойчив в присутствии избытка хлорид-ионов.

Хлорсодержащие реагенты, в отличие от брома и йода, являются дешевыми, массово производимыми и менее токсичными при соблюдении стандартных мер безопасности. Бромидные и йодидные системы более требовательны к условиям хранения и обращения и значительно дороже хлоридных, что ограничивает их широкое промышленное применение.

Процесс хлорирования весьма универсален и позволяет извлекать золото из минерального сы-

Таблица 1. Свойства растворителей золота на основе галогенидов

Table 1. Properties of halide-based gold lixiviants

Тип процесса	Скорость растворения золота, мг/(м ² ·с)	Условия	Достоинства	Недостатки	Лит. источник
Гидрохлорирование с OCl^-	36,1	$C_{\text{NaCl}} = 100 \text{ г/дм}^3$ $C_{\text{OCl}^-} = 10 \text{ г/дм}^3$ $\text{pH} = 6$	• Высокая скорость растворения • Подходит для различных материалов • Разнообразие окислителей	• Высокая коррозионная активность • Необходимость поддержания низкого значения pH	[13]
Хлоридное выщелачивание с FeCl_3	143,8	$C_{\text{Fe}^{3+}} = 27,9 \text{ г/дм}^3$ $C_{\text{Cl}^-} = 141,8 \text{ г/дм}^3$ $\text{pH} \approx 1,0$ $t = 95^\circ \text{C}$	• Высокая скорость выщелачивания • Доступность реагентов	• Высокая температура • Возможно образование $\text{Fe}(\text{OH})_3$ • Ограничения по pH	[14]
Бромидное выщелачивание	19,7	$C_{\text{Br}_2} = 2 \text{ г/дм}^3$ $\text{pH} = 4$ $t = 25^\circ \text{C}$	• Высокая скорость растворения • Подходит для различных материалов	• Высокая коррозионная активность • Большой расход реагента • Сложности с выделением золота из растворов • Пассивация поверхности • Сложность управления процессом	[15]
Йодидное выщелачивание	6,6	$C_{\text{NaI}} = 1,5 \text{ г/дм}^3$ $C_{\text{I}_2} = 1,27 \text{ г/дм}^3$ $\text{pH} = 4\div 6$ $t = 23^\circ \text{C}$	• Подходит для сульфидных и упорных руд • Возможность регенерации реагентов • Низкая коррозионная активность	• Высокий расход реагента • Нестабильность йодидов • Сложность управления процессом • Нестабильность растворов • Чувствительность к примесям • Низкая скорость растворения золота	[16]

рья практически любого состава [17]. Важным преимуществом этой технологии является возможность комплексной переработки материалов, в результате которой извлекаются не только золото, но и другие ценные металлы, например дорогостоящие металлы платиновой группы [18–20].

Ключевым условием эффективного хлоридного выщелачивания золота является наличие окислителя. Он должен обладать высокой окислительной способностью и оставаться стабильным в

условиях выщелачивания (pH, температура, состав раствора). Наиболее часто применяемыми окислителями при гидрохлорировании и хлоридном выщелачивании являются газообразный хлор, хлорноватистая кислота (HClO), гипохлориты, железо (III), медь (II) [21–23]. С целью повышения эффективности процесса выщелачивания золота особый интерес представляет использование окислителей, способных выделять активный хлор непосредственно в растворе. Среди таких

реагентов можно отметить хлорсодержащие органические соединения, например трихлоризоциануровую кислоту (ТЦК, $C_3N_3O_3Cl_3$) и дихлоризоцианурат натрия (ДЦН, $C_3Cl_2N_3O_3Na$). Данные вещества являются производными циануровой кислоты и действуют как окислители и источник активного хлора, используемый в санитарной и водоочистной практике.

Работы [24–27], посвященные применению ТЦК при переработке Au-содержащего сырья, подтверждают ее высокую эффективность. Также ДЦН может выступать в качестве контролируемой и экологически безопасной окислительной среды для растворения золота в хлоридных системах. В качестве выщелачивающего агента ДЦН мало исследован, хотя скорость его растворения несколько выше, а рабочий диапазон pH шире, чем у ТЦК [28]. Кроме того, ДЦН, в отличие от ТЦК, в меньшей степени подвержен разложению под действием влаги и высоких температур при длительном хранении, что критично для золотодобывающих предприятий, находящихся в удаленной местности [29].

Предварительно проведенные нами исследования [30; 31] по гидрохлорированию окисленной Au-содержащей руды с добавлением ДЦН показали более высокую скорость растворения и более полное извлечение золота, чем при цианировании в стандартных условиях. Также нами установлены оптимальные параметры процесса, позволяющие извлекать более 90 % золота из гравитационного концентрата [32]. В настоящее время отсутствуют данные о влиянии условий процесса на скорость растворения ДЦН, формы его нахождения в растворах и изменение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП).

Данная работа посвящена изучению влияния температуры, начальной концентрации соляной кислоты и скорости вращения диска на скорость растворения реагента (ДЦН), величину pH и ОВП среды. Также исследовано влияние концентраций соляной кислоты и окислителя (ДЦН) на скорость растворения золота.

Методика эксперимента

В экспериментах использовали таблетки (ООО «Алтайхимия», Россия), содержащие 84 % дихлоризоцианурата натрия и соляную кислоту (ХЧ). Опыты по изучению растворения ДЦН проводили с использованием метода вращающегося диска на установке, представленной на рис. 1.

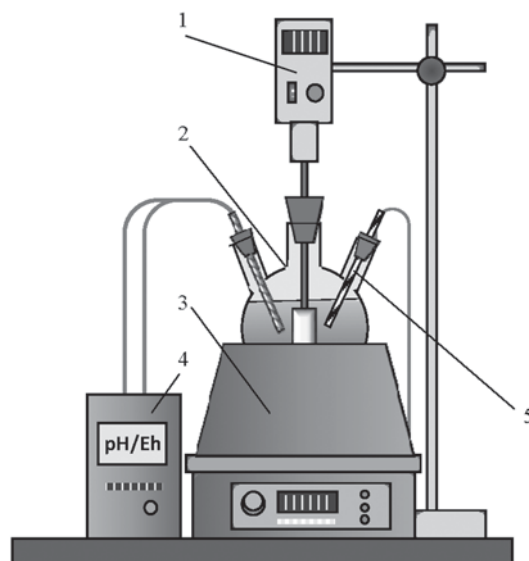


Рис. 1. Установка для изучения растворения ДЦН

1 – верхнеприводная мешалка с диском; 2 – трехгорлая колба с раствором; 3 – колбонагреватель; 4 – pH-метр; 5 – термодатчик

Fig. 1. Experimental setup for studying NaDCC dissolution

1 – top-driven stirrer with disc; 2 – three-neck flask with solution; 3 – heating mantle; 4 – pH meter; 5 – temperature probe

Таблетку диаметром 26 мм закрепляли в обойме из инертного материала и устанавливали в верхнеприводную мешалку. В реактор заливали водные растворы объемом 50 см³, герметизировали и нагревали до заданной температуры с помощью колбонагревателя. Затем в реактор погружали обойму с таблеткой и включали перемешивающее устройство. В ходе эксперимента автоматически поддерживали температуру с точностью ± 2 °С, контролировали значения pH и ОВП раствора с использованием прибора pH-410 (ЗАО НПКФ «Аквилон», Россия). Убыль массы таблетки оценивали взвешиванием до и после эксперимента.

Исследовали влияние температуры ($t = 25 \div +70$ °С), скорости вращения диска ($n = 50 \div +900$ об/мин), начальной концентрации соляной кислоты ($C_{HCl} = 0,1 \div 30$ г/дм³) на удельную скорость растворения ДЦН ($v_{ДЦН}$), pH и ОВП растворов. Также определяли влияние концентрации ДЦН ($C_{ДЦН} = 0,5 \div 10$ г/дм³) на pH и ОВП водных растворов. Массу растворившегося ДЦН ($m_{ДЦН}$) рассчитывали, учитывая его содержание в таблетке. Удельную скорость растворения ДЦН определяли по формуле

$$v_{ДЦН} = \frac{m_{\tau ДЦН}}{\tau S}, \quad (1)$$

где $m_{\tau ДЦН}$ — масса растворившегося ДЦН за вре-

мя τ , мг; τ — продолжительность опыта, мин; $S = 5,31 \text{ см}^2$ — площадь диска.

Растворение золота в растворах ДЦН изучали методом вращающегося диска. Образец металлического золота (99,9 %) диаметром 10 мм устанавливали в обойму из инертного материала. Перед началом каждого эксперимента поверхность диска полировали пастой ГОИ, промывали этанолом и дистиллированной водой, затем сушили на воздухе. Выщелачивание проводили в растворах объемом 50 см^3 при температуре 25°C и скорости вращения диска 300 об/мин. Исследовали влияние $C_{\text{ДЦН}}$ ($1\text{--}5 \text{ г/дм}^3$) и C_{HCl} ($0\text{--}21,6 \text{ г/дм}^3$) на скорость растворения золота. После завершения эксперимента раствор фильтровали и анализировали методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (novAA 300, Analytic Jena, Германия) при длине волны 242,8 нм. Удельную скорость растворения золота оценивали по формуле

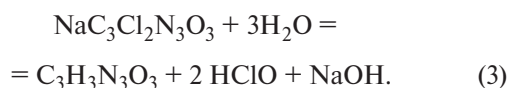
$$v_{\text{Au}} = \frac{C_{\text{Au}}V}{S\tau}, \quad (2)$$

где C_{Au} — концентрация золота в растворе, мг/дм^3 ; V — объем раствора, дм^3 ; S — площадь поверхности диска, см^2 ; τ — продолжительность опыта, мин.

Все эксперименты проводили трижды при одинаковых условиях, отклонения между значениями в параллельных измерениях не превышали 5 %.

Результаты и их обсуждение

Дихлоризоцианурат натрия при взаимодействии с водой подвергается диссоциации и гидролизу, в результате чего образуются циануровая кислота ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_3$), хлорноватистая кислота (HClO) и гидроксид натрия (NaOH). Общую реакцию взаимодействия ДЦН с водой можно описать следующим образом:



В соответствии с реакцией (3) в качестве продукта образуется гидроксид. Наблюдаемое по факту снижение pH раствора (рис. 2, а) объясняется накоплением слабых кислот — хлорноватистой и циануровой, способных частично диссоциировать и увеличивать концентрацию ионов водорода в растворе. Кроме того, хлорноватистая кислота может подвергаться диспропорционированию с образованием H^+ , что дополнительно способствует подкислению среды.

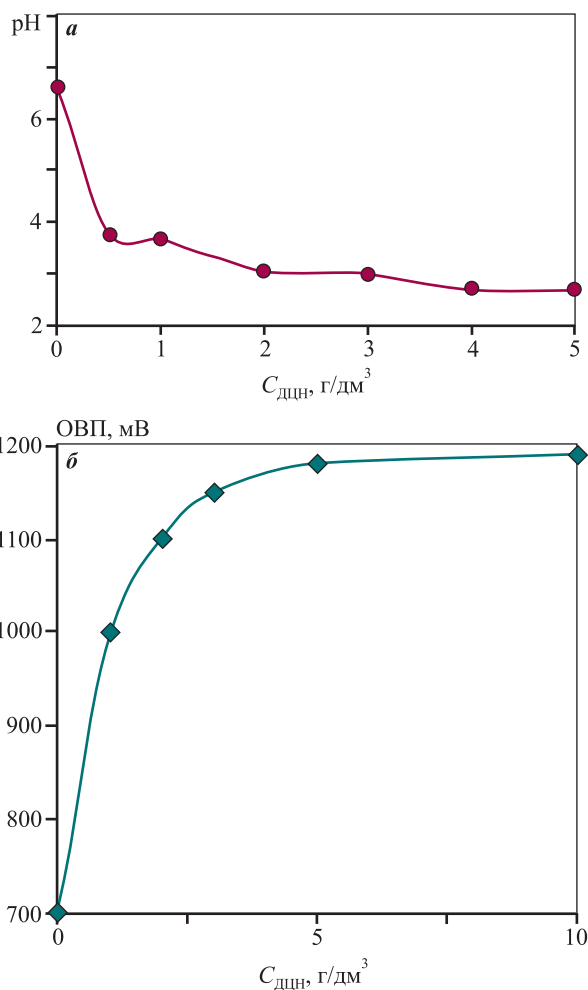


Рис. 2. Влияние концентрации дихлоризоцианурата натрия на pH (а) и ОВП (б) водного раствора

Fig. 2. Effect of sodium dichloroisocyanurate concentration on pH (a) and redox potential (Eh) (b) of aqueous solution

Благодаря высокому окислительно-восстановительному потенциалу выделяющейся хлорноватистой кислоты при растворении ДЦН происходили повышение ОВП раствора до 1000–1180 мВ и снижение pH до 3,7–2,7 (при $C_{\text{ДЦН}} = 1\text{--}10 \text{ г/дм}^3$) (рис. 2). Циануровая кислота не оказывала прямого воздействия на ОВП среды, но стабилизировала Cl-содержащие соединения и выполняла роль буфера среды.

Высокий ОВП водных растворов ДЦН позволяет предположить, что данный реагент может быть использован при растворении золота в хлоридных растворах. Как известно, процесс окисления золота в солянокислых растворах начинается при ОВП среды выше 1000–1200 мВ (рис. 3). В хлорно-хлоридных системах ДЦН может выполнять роль окислителя.

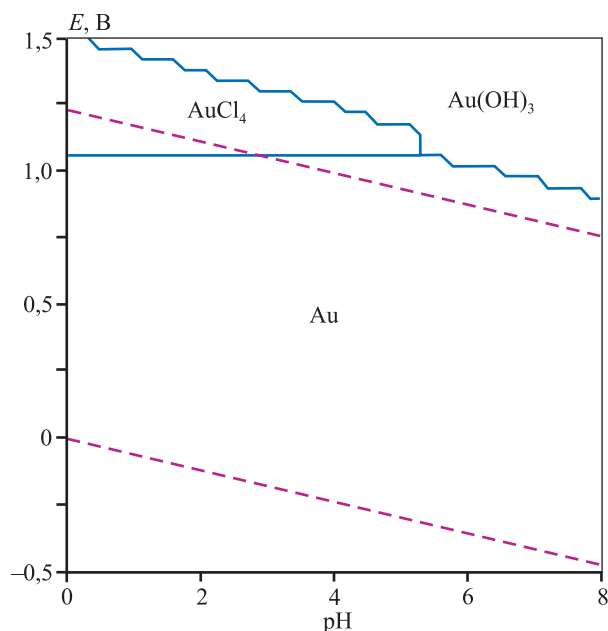
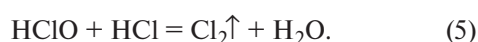
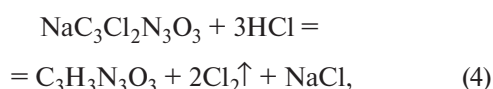


Рис. 3. Диаграмма Пурбе для системы Au–Cl–H₂O
[Cl] = 0,5 M, [Au] = 1 · 10⁻⁵ M, ионная сила раствора – 0,5 M,
t = 25 °C

Диаграмма построена с применением программы Medusa-Hydra

Fig. 3. Pourbaix diagram for the Au–Cl–H₂O system
[Cl] = 0.5 M, [Au] = 1 · 10⁻⁵ M, ionic strength – 0.5 M, t = 25 °C
Diagram generated using the Medusa–Hydra software

Растворение ДЦН с выделением активного хлора в воде и слабокислых растворах протекает замедленно, что хорошо синхронизируется с растворением золота. Хлоридный комплекс золота [AuCl₄]⁻ по сравнению с цианидным [Au(CN)₂]⁻ характеризуется меньшей прочностью: их константы устойчивости (lgβ) составляют 26 и 38,3 соответственно [1]. Для повышения устойчивости хлоридного комплекса золота необходимо поддержание pH < 1,0 и избытка Cl⁻-ионов [1]. Поэтому для практического применения ДЦН при гидрометаллургической переработке Au-содержащих материалов необходимо изучение поведения данного реагента при условиях, соответствующих области существования хлоридного комплекса золота (III). При этом происходят реакции с участием ДЦН и хлорноватистой кислоты, сопровождающиеся выделением газообразного хлора:



Молекулярный хлор хорошо растворяется в вод-

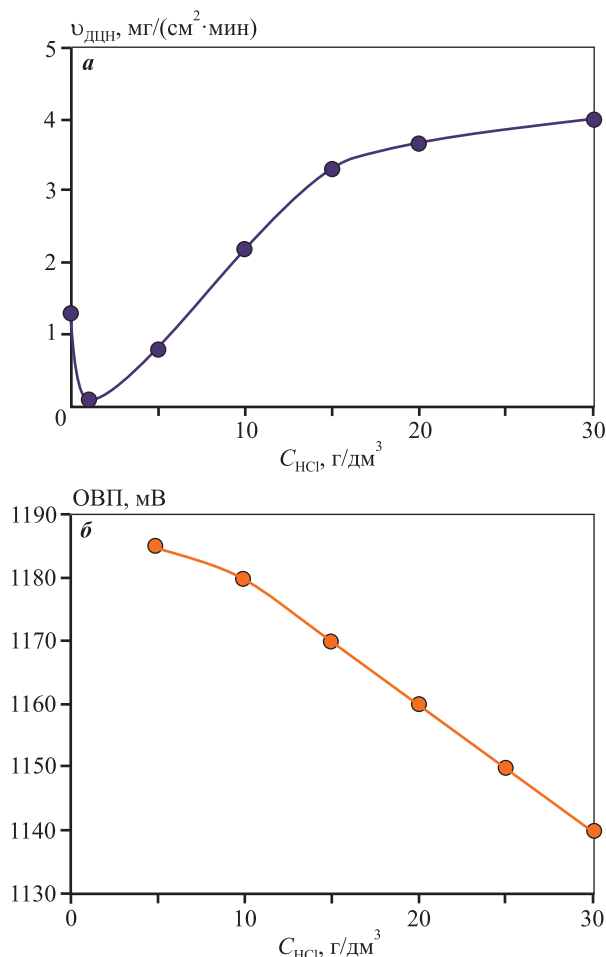


Рис. 4. Влияние концентрации соляной кислоты на скорость растворения ДЦН (а) и величину ОВП водных растворов (б) при C_{ДЦН} = 3 г/дм³, t = 25 °C

Fig. 4. Effect of hydrochloric acid concentration on the dissolution rate of NaDCC (a) and solution redox potential (Eh) (b) at [NaDCC] = 3 g/dm³, t = 25 °C

ных растворах (0,63 г/100 г воды при t = 25 °C [33]). По мере достижения предела растворимости хлор выделяется в атмосферу.

Как следует из полученных данных (рис. 4, а), при добавлении небольшого количества HCl скорость растворения ДЦН сначала уменьшалась, но уже при C_{HCl} = 1 г/дм³ наблюдалось ее повышение. Обращает на себя внимание, что при C_{HCl} = 1÷5 г/дм³ скорость растворения ДЦН была ниже, чем в чистой воде, и составляла 0,1–0,8 мг/(см²·мин), а последующее увеличение C_{HCl} до 30 г/дм³ повышало ее до 4 мг/(см²·мин). Наиболее вероятной причиной выявленной особенности могут быть диффузионные затруднения. В работе [34] установлено, что дихлоризоциануровая кислота обладает низкой растворимостью (0,7 %) и при растворении ДЦН может осажаться

на поверхности растворяемой таблетки и создавать диффузионный барьер. Рост величины $v_{\text{ДЦН}}$ при повышенных значениях C_{HCl} (более 5–10 г/дм³) связан с развитием процесса разложения дихлоризоциануровой кислоты, сопровождающимся интенсивным выделением газообразного хлора и образованием циануровой кислоты.

Важнейшим показателем изучаемой системы для растворения золота является окислительно-восстановительный потенциал. Добавление HCl к водному раствору ДЦН ($C_{\text{ДЦН}} = 3$ г/дм³) приводило к повышению ОВП среды с 1150 мВ при $C_{\text{HCl}} = 0$ до 1185 мВ при $C_{\text{HCl}} = 5$ г/дм³ (рис. 4, б). Во всем исследуемом диапазоне концентрации HCl увеличение содержания кислоты в растворе сопровождалось снижением ОВП среды до 1140 мВ при $C_{\text{HCl}} = 30$ г/дм³. Несмотря на то, что термодинамически повышение концентрации ионов водорода должно способствовать росту ОВП системы HClO/Cl^- , увеличение количества соляной кислоты приводит к разложению ДЦН и хлорноватистой кислоты с образованием молекулярного хлора по реакциям (4) и (5) соответственно, который обладает меньшим ОВП ($E^0_{\text{Cl}_2/\text{Cl}^-} = +1,36$ В), чем хлорноватистая кислота ($E^0_{\text{HClO}/\text{Cl}^-} = +1,49$ В). В совокупности это приводит к снижению концентрации активных окислителей и уменьшению ОВП среды.

Скорость растворения ДЦН при $C_{\text{HCl}} = 15$ г/дм³, $t = 25\text{--}70$ °С повышалась экспоненциально с 2,81 до 13,61 мг/(см²·мин) (рис. 5, а). На графике зависимости $v_{\text{ДЦН}} = f(t)$ можно выделить два участка: 1-й в интервале температур 25–45 °С и 2-й при $t = 45\text{--}70$ °С. При повышении температуры на 1 °С на первом из них скорость растворения увеличивалась на 0,133 мг/(см²·мин), а на втором — на 0,326 мг/(см²·мин). Интенсификация растворения ДЦН при повышенных температурах связана с несколькими факторами:

- ростом скорости разложения хлорноватистой кислоты с образованием Cl_2 и снижением растворимости Cl_2 , что приводит к смещению реакций (4) и (5) вправо;

- увеличением растворимости циануровой кислоты, которая при умеренных температурах пассивирует реакционную поверхность [7].

При увеличении скорости вращения диска с 50 до 900 об/мин скорость растворения ДЦН повышалась с 0,8 до 5,3 мг/(см²·мин) при $C_{\text{HCl}} = 15$ г/дм³ (рис. 5, б). Это может быть связано с ростом скорости массопереноса у реакционной поверхности. Таким образом, растворы ДЦН в

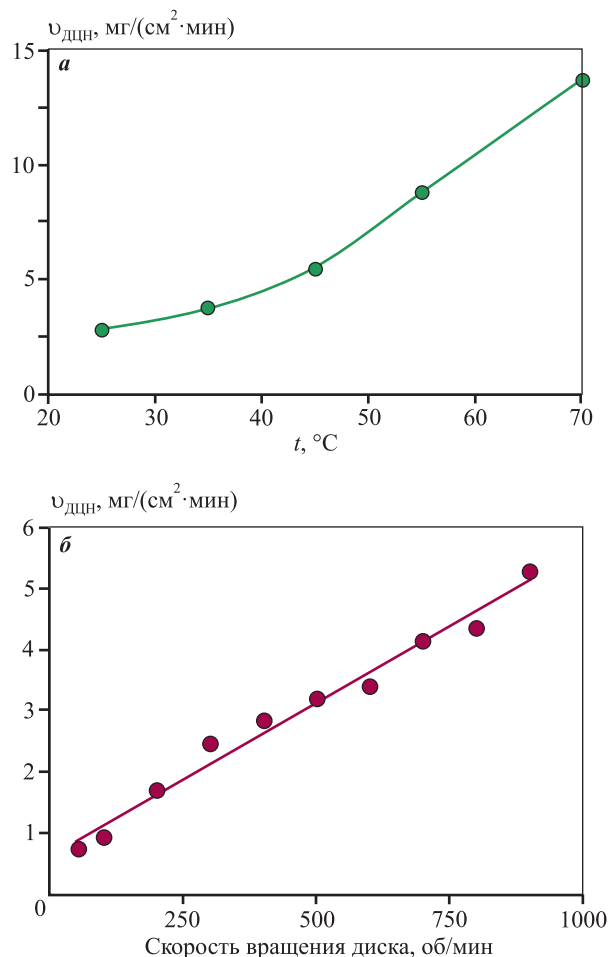


Рис. 5. Влияние температуры (а) и скорости вращения диска (б) на скорость растворения ДЦН в растворах соляной кислоты ($C_{\text{HCl}} = 15$ г/дм³)

Fig. 5. Effect of temperature (а) and disc rotation speed (б) on the dissolution rate of NaDCC in hydrochloric acid solutions ($[\text{HCl}] = 15$ г/дм³)

присутствии соляной кислоты обладают высоким ОВП, что подтверждает их перспективность в качестве альтернативного окислителя для выщелачивания золота.

Далее исследовали влияние C_{HCl} и $C_{\text{ДЦН}}$ на скорость растворения золотого диска (v_{Au}). Результаты приведены в табл. 2. В чистых водных растворах ДЦН наблюдали небольшой переход золота в раствор при $C_{\text{ДЦН}} = 3\text{--}5$ г/дм³, $v_{\text{Au}} = 0,001\text{--}0,051$ мг/(см²·мин). Увеличение C_{HCl} с 1,44 до 14,4 г/дм³ при постоянных значениях $C_{\text{ДЦН}}$ сопровождалось интенсификацией растворения золота. Например, при $C_{\text{HCl}} = 1,44$ г/дм³ значение v_{Au} возрастало с 0,018 до 0,052 мг/(см²·мин) при повышении $C_{\text{ДЦН}}$ с 1 до 5 г/дм³ соответственно. При $C_{\text{HCl}} = 21,6$ г/дм³ наблюдали снижение v_{Au} до 0,05–0,08 мг/(см²·мин). Максимальная ее величина

Таблица 2. Влияние концентраций HCl и ДЦН на скорость растворения золотого диска ($n = 300$ об/мин, $t = 25$ °C, $r = 5$ мм)

Table 2. Effect of HCl and NaDCC concentrations on the gold dissolution rate ($n = 300$ rpm, $t = 25$ °C, $r = 5$ mm)

C_{HCl} , г/дм ³	v_{Au} , мг/(см ² ·мин) при $C_{\text{ДЦН}}$, г/дм ³		
	1	3	5
0	0,000	0,001	0,051
1,44	0,018	0,022	0,052
7,2	0,034	0,062	0,079
14,4	0,108	0,118	0,101
21,6	0,049	0,085	0,083

на была достигнута при $C_{\text{HCl}} = 14,4$ г/дм³ и $C_{\text{ДЦН}} = 3$ г/дм³.

По нашему мнению, интенсификация растворения золота при $C_{\text{HCl}} = 1,44\div 14,4$ г/дм³ связана с ростом концентрации Cl-ионов, играющих роль комплексообразователя. Уменьшение скорости растворения золота при $C_{\text{HCl}} > 14,4$ г/дм³ может свидетельствовать о снижении устойчивости окислителя HClO и его непродуктивного разложения до Cl₂ с выделением в атмосферу, а также о пассивации реакционной поверхности промежуточными соединениями.

Выводы

Таким образом, установлено, что водные растворы ДЦН обладают высоким ОВП благодаря выделяющейся при растворении хлорноватистой кислоте, а добавление соляной кислоты увеличивает скорость растворения ДЦН и способствует выделению газообразного хлора.

1. При $C_{\text{HCl}} = 1\div 5$ г/дм³ в растворе скорость растворения ДЦН ниже, чем в чистой воде, что связано с образованием дихлоризоциануровой кислоты.

2. С ростом содержания в растворе соляной кислоты скорость растворения ДЦН увеличивается и при $C_{\text{HCl}} = 30$ г/дм³ составляет ~4 мг/(см²·мин).

3. Введение HCl в водный раствор ДЦН приводит к повышению ОВП среды с 1150 мВ при $C_{\text{HCl}} = 0$ до 1185 мВ при $C_{\text{HCl}} = 5$ г/дм³, однако при увеличении содержания HCl до 30 г/дм³ значение ОВП среды снижается до 1140 мВ, что связано с разложением ДЦН и хлорноватистой кислоты.

4. Скорость растворения ДЦН при $C_{\text{HCl}} = 15$ г/дм³, $t = 25\div 70$ °C повышалась экспоненциально с 2,81 до 13,61 мг/(см²·мин).

5. При увеличении скорости вращения диска с 50 до 900 об/мин скорость растворения ДЦН увеличивалась линейно, что связано с ростом скорости массопереноса у реакционной поверхности.

6. Максимальная скорость растворения золота наблюдалась при $C_{\text{ДЦН}} = 3$ г/дм³ и $C_{\text{HCl}} = 14,4$ г/дм³ и составляла 0,118 мг/(см²·мин). Однако при дальнейшем увеличении концентрации HCl эффективность растворения снижалась, что требует дополнительных исследований этого явления.

7. Полученные результаты подтверждают перспективность использования дихлоризоцианурата натрия в сочетании с соляной кислотой в качестве экологически безопасной альтернативы цианидным системам при переработке Au-содержащих материалов.

Список литературы/References

1. Филиппов А.П., Нестеров Ю.В. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов. М.: ИД «Руда и Металлы», 2009. 543 с.
2. Barani K., Kogani Y., Nazarian F. Leaching of complex gold ore using a cyanide-glycine solution. *Minerals Engineering*. 2022;180:107475. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107475>
3. Logsdon M.J., Hagelstein K., Mudder, T.I. The Management of cyanide in gold extraction. Ottawa: International Council on Metals and the Environment, 1999. 40 p.
4. Birich A., Stopic S., Friedrich B. Kinetic investigation and dissolution behavior of cyanide alternative gold leaching reagents. *Scientific Reports*. 2019;9(1):7191. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>
5. Hilson G., Monhemius A.J. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*. 2006; 14(12-13):1158—1167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.005>
6. Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Самихов Ш. Р., Джурakuлов Ш.Р., Зарифова М.С. Выщелачивание золота различными растворами, заменители цианида и их перспективы в будущем. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2021;14(4):433—447. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>
Kholov Kh.I., Sharifboev N.T., Samikhov Sh.R., Dzhu-rakulov Sh.R., Zarifova M.S. Gold leaching by various

- solutions, alternative of cyanide and their prospects in the future. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2021;14(4):433–447. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>
7. Merck I., O'Neil, Ann Smith. The Merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals. 13th ed. NJ: Whitehouse Station, 2001. 2564 p.
 8. Vlassopoulos D., Wood S.A., Mucci A. Gold speciation in natural waters: II. The importance of organic complexing—experiments with some simple model ligands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990;54(6):1575–1586.
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90392-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90392-X)
 9. Perea C.G., Restrepo O.J. Use of amino acids for gold dissolution. *Hydrometallurgy*. 2018;177:79–85.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.03.002>
 10. Brown D.H., Smith W.E., Fox P., Sturrock R.D. The reactions of gold (0) with amino acids and the significance of these reactions in the biochemistry of gold. *Inorganica Chimica Acta*. 1982;67:27–30.
[https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)85035-5](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)85035-5)
 11. Marsden J., House I. The chemistry of gold extraction. 2nd ed. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2006. 138 p.
<https://doi.org/10.1007/BF03215543>
 12. Sadiya Ilyas, Jae-chun Lee. Gold metallurgy and the environment. 1st ed. Boca Raton, FL: Environmental Science, Geology, 2018. 232 p.
 13. Nam K.S., Jung B.H., An J.W., Ha T.J., Tran T., Kim M.J. Use of chloride—hypochlorite leachants to recover gold from tailing. *International Journal of Mineral Processing*. 2008;86(1-4):131–140.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.12.003>
 14. Seisko S., Lampinen M., Aromaa J., Laari A., Koiranen T., Lundström M. Kinetics and mechanisms of gold dissolution by ferric chloride leaching. *Minerals Engineering*. 2018;115:131–141.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.017>
 15. Pesic B., Sergeant R.H. A rotating disk study of gold dissolution by bromine. *JOM*. 1991;43(12):35–37.
<https://doi.org/10.1007/BF03223146>
 16. Qi P.H., Hiskey J.B. Dissolution kinetics of gold in iodide solutions. *Hydrometallurgy*. 1991;27(1):47–62.
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(91\)90077-Y](https://doi.org/10.1016/0304-386X(91)90077-Y)
 17. Ojeda M.W., Perino E., Ruiz M.C. Gold extraction by chlorination using a pyrometallurgical process. *Minerals Engineering*. 2009;22(4):409–411.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.002>
 18. Dosmukhamedov N., Kaplan V., Zholdasbay E., Argyn A., Kuldeyev E., Koishina G., Tazhiev Y. Chlorination treatment for gold extraction from refractory gold-copper-arsenic-bearing concentrates. *Sustainability*. 2022;14(17):11019. <https://doi.org/10.3390/su141711019>
 19. Yakoumis I., Panou M., Moschovi A.M., Parias D. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021;3:100112. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100112>
 20. Puvvada G.V.K., Sridhar R., Lakshmanan V.I. Chloride metallurgy: PGM recovery and titanium dioxide production. *JOM*. 2003;55(8):38–41.
<https://doi.org/10.1007/s11837-003-0103-1>
 21. Baghalha M. Leaching of an oxide gold ore with chloride/hypochlorite solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2007;82(4):178–186.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>
 22. Rinne M., Elomaa H., Seisko S., Lundstrom M. Direct cupric chloride leaching of gold from refractory sulfide ore: process simulation and life cycle assessment. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022;43(5):598–609.
<https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1910510>
 23. Karppinen A., Seisko S., Nevatalo L., Wilson B.P., Yliniemi K., Lundström M. Gold recovery from cyanidation residue by chloride leaching and carbon adsorption — preliminary results from CICL process. *Hydrometallurgy*. 2024;226:106304.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106304>
 24. Niu H., Yang H., Tong L. Research on gold leaching of carbonaceous pressure-oxidized gold ore via a highly effective, green and low toxic agent trichloroisocyanuric acid. *Journal of Cleaner Production*. 2023;419:138062.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138062>
 25. Feng F., Sun Y., Rui J., Yu L., Liu J., Zhang N., Zhao M., Wei L., Lu C., Zhao J., Zhang Q., Li X. Study of the “oxidation-complexation” coordination composite ionic liquid system for dissolving precious metals. *Applied Sciences*. 2020;10(10):3625.
<https://doi.org/10.3390/app10103625>
 26. Kenzhaliyev B., Koizhanova A., Surkova T., Fischer D., Azlan M.N., Atanova O., Magomedov D., Yerdenova M., Abdylidayev N. Extraction of gold from gravity-flotation concentrates via surfactant and oxidation reagents. *Discover Applied Sciences*. 2024;6(11):598.
<https://doi.org/10.1007/s42452-024-06281-7>
 27. Kenzhaliyev B.K., Tussupbayev N.K., Abdykirova G.Z., Koizhanova A.K., Fischer D.Y., Baltabekova Z.A.,

- Samenova N.O. Evaluation of the efficiency of using an oxidizer in the leaching process of gold-containing concentrate. *Processes*. 2024;12(5):973.
<https://doi.org/10.3390/pr12050973>
28. Zhang G., Huang Y., Xiong Z., Ge F., Li Y., Tan J., Zha R. Gold recovery from WPCB gold finger using water-soluble organic leaching agent sodium dichloroisocyanurate. *Sustainability*. 2025;17(6):2415.
<https://doi.org/10.3390/su17062415>
29. Wahman D.G., Alexander M.T., Dugan A.G. Chlorinated cyanurates in drinking water: Measurement bias, stability, and disinfectant byproduct formation. *AWWA Water Science*. 2019;1(2):e1133.
<https://doi.org/10.1002/aww2.1133>
30. Лобанов В.Г., Наумов К.Д., Колмачихина О.Б., Маковская О.Ю., Хабибулина Р.Э., Колмачихина Э.Б. Способ извлечения золота из золотосодержащего сырья: Патент 2758915 (РФ). 2021.
31. Лобанов В. Г., Хабибулина Р. Э., Колмачихина О. Б., Маковская О. Ю. Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское». *iPolytech Journal*. 2022; 26(4):688—696.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>
- Lobanov V.G., Khabibulina R.E., Kolmachikhina O.B., Makovskaia O.I. Selection of a leaching system for extraction gold from the Byngovskoe deposits ore. *iPolytech Journal*. 2022; 26(4):688—696. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>
32. Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г. Экологически чистая технология выщелачивания золота из техногенного сырья. В сб: *Актуальные проблемы развития технических наук*. Екатеринбург: Министерство образования и молодежной политики Свердловской обл., 2021. С. 31—35
33. Whitney R.P., Vivian J.E. Solubility of chlorine in Water. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1941;33(6):741—744.
<https://doi.org/10.1021/ie50378a014>
34. Jacqueline I. Kroschwitz Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. 5th ed. Wiley-Interscience, 2004. 896 p.

Информация об авторах

Раиса Энверовна Хабибулина — аспирант кафедры металлургии цветных металлов (МЦМ), Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ).

<https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>

E-mail: raisa.khabibulina@urfu.ru

Эльвира Барыевна Колмачихина — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0002-6007-498X>

E-mail: e.b.khazieva@urfu.ru

Владимир Геннадьевич Лобанов — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Ольга Борисовна Колмачихина — к.т.н., доцент кафедры МЦМ, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0002-7879-8791>

E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru

Information about the authors

Raisa E. Khabibulina — Graduate Student, Department of non-ferrous metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

<https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>

E-mail: raisa.khabibulina@urfu.ru

Elvira B. Kolmachikhina — Cand. Sci. (Eng.), Department of non-ferrous metallurgy, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0002-6007-498X>

E-mail: e.b.khazieva@urfu.ru

Vladimir G. Lobanov — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of non-ferrous metallurgy, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

E-mail: lobanov-vl@yandex.ru

Olga B. Kolmachikhina — Cand. Sci. (Eng.), Department of non-ferrous metallurgy, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0002-7879-8791>

E-mail: o.b.kolmachikhina@urfu.ru

Вклад авторов

Р.Э. Хабибулина — проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов, написание статьи.

Э.Б. Колмачихина — обобщение результатов экспериментов, написание статьи.

В.Г. Лобанов — определение цели работы, обобщение результатов экспериментов, написание статьи.

О.Б. Колмачихина — участие в обсуждении результатов, написание статьи.

Contribution of the authors

R.E. Khabibulina — conducted experiments, participated in the discussion of the results, prepared the manuscript.

E.B. Kolmachikhina — summarized experimental results, prepared the manuscript.

V.G. Lobanov — defined the aim of the work, summarized experimental results, prepared the manuscript.

O.B. Kolmachikhina — participated in the discussion of results, prepared the manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025, доработана 01.05.2025, подписана в печать 12.05.2025

The article was submitted 21.04.2025, revised 01.05.2025, accepted for publication 12.05.2025