



Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата меди в присутствии лигносульфоната натрия

У.Р. Шарипова¹, М.А. Третьяк^{2✉}, К.А. Каримов³, Д.А. Рогожников⁴

¹⁻⁴Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – исследование эффективности введения поверхностно-активного вещества – лигносульфоната натрия – в процесс гидротермальной обработки сульфида цинка растворами сульфата меди. Растворы анализировали оптико-эмиссионным спектральным методом, кеки – на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL ADVANT’X. Обработка полученных данных проводилась с использованием пакетов прикладных программ: MS Excel, OriginPro и Statgraphics. Анализ размера частиц осуществлялся методом лазерной дифракции на приборе Bettersize ST. Изучена эффективность добавления лигносульфоната натрия на гидротермальное извлечение цинка из сфалерита. Установлено, что добавка данного поверхностно-активного вещества улучшает осаждение меди на поверхности сфалерита, что повышает уровень извлечения цинка в раствор. Было изучено влияние следующих параметров: количества лигносульфоната (0–1 г/дм³), температуры (180–220 °С), концентраций серной кислоты (10–30 г/дм³) и меди (6–24 г/дм³); выявлены оптимальные условия для максимального извлечения цинка (55–71%) в продуктивный раствор и осаждения меди (45–83%) на кеке. Показано, что повышение температуры способствует увеличению скорости реакции и растворимости металлов. Выявлено, что изменение концентраций серной кислоты и меди влияет на равновесие реакций и эффективность извлечения цинка в раствор и осаждение меди из раствора. В ходе проведенных экспериментов установлены оптимальные параметры гидротермальной обработки: концентрация лигносульфоната – 0,25 г/дм³, температура – 220 °С, концентрация серной кислоты – 10 г/дм³, начальная концентрация меди – 15 г/дм³. При данных параметрах за 120 мин в раствор извлекается 74% цинка и осаждается 83% меди на кеке. Таким образом, выявлено положительное влияние лигносульфоната натрия на процесс гидротермальной обработки сфалерита: введение данной добавки в количестве не более 0,25 г/дм³ интенсифицировало процесс, ускоряя обработку сфалерита в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: автоклав, гидротермальная обработка, сфалерит, лигносульфонат натрия, медь

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 22-79-10290. Аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке Госзадания РФ по Гранту № 075-03-2021-051/5 (FEUZ-2021-0017).

Для цитирования: Шарипова У.Р., Третьяк М.А., Каримов К.А., Рогожников Д.А. Гидротермальное взаимодействие сфалерита с растворами сульфата меди в присутствии лигносульфоната натрия // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 133–147. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-133-147>. EDN: IQOOPV.

METALLURGY

Original article

Hydrothermal interaction of sphalerite with copper sulfate solutions in the presence of sodium lignosulfonate

Uliana R. Sharipova¹, Maksim A. Tretiak^{2✉}, Kirill A. Karimov³,
Denis A. Rogozhnikov⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The present paper aims to study the efficiency of using sodium lignosulfonate surfactant for hydrothermal treatment of zinc sulfide with copper sulfate solutions. The solutions were analyzed by the optical emission spectral method; an ARL ADVANT’X wave X-ray fluorescence spectrometer was used to study cakes. MS Excel, OriginPro, and Statgraphics software packages were used for data processing. Particle size was determined using a Bettersize ST laser diffraction particle size analyzer. We have studied the effect of sodium lignosulfonate on the hydrothermal extraction of zinc from sphalerite. The addition of this surfactant enhances the precipitation of copper on the sphalerite surface, thus increasing the degree of zinc extraction into the solution. Effects of temperature (180–

220 °C) and concentration of lignosulfonate (0–1 g/dm³), sulfuric acid (10–30 g/dm³), and copper (6–24 g/dm³) has been studied; optimal conditions for the maximum zinc extraction of 55–71% into the pregnant solution and copper cake precipitation of 45–83% were identified. Elevated temperatures increase the reaction rate and solubility of metals. Changes in the concentrations of sulfuric acid and copper affect the equilibrium of reactions and the efficiency of copper precipitation and zinc extraction into the solution. The performed experiments have resulted in the optimal parameters of hydrothermal treatment: 0.25 g/dm³ lignosulfonate concentration, 220 °C temperature, 10 g/dm³ sulfuric acid concentration, and 15 g/dm³ initial copper concentration. For these parameters, 74% of zinc is extracted into the solution in 120 min and 83% of copper is deposited on the cake. Thus, the effect of sodium lignosulfonate on the hydrothermal treatment of sphalerite can be stated as positive: the concentration of this additive below 0.25 g/dm³ accelerates sphalerite treatment by 1.5–2 times.

Keywords: autoclave, hydrothermal treatment, sphalerite, sodium lignosulfonate, copper

Funding. The study was carried out under the Russian Science Foundation project No. 22-79-10290. Analytical studies were funded by the Grant No. 075-03-2021-051/5 (FEUZ-2021-0017) of the State Assignment of the Russian Federation.

For citation: Sharipova U.R., Tretiak M.A., Karimov K.A., Rogozhnikov D.A. Hydrothermal interaction of sphalerite with copper sulfate solutions in the presence of sodium lignosulfonate. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):133-147. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-133-147>. EDN: IQOOPV.

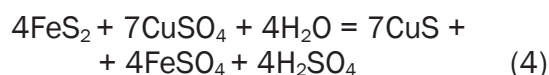
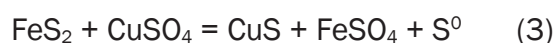
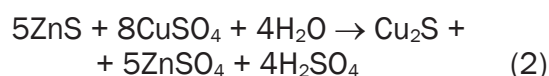
ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии переработки медно-цинковых руд, содержащих минералы халькопирит и сфалерит, представляют собой сложные и многоступенчатые процессы, направленные на селективное извлечение меди, цинка и других ценных компонентов [1]. В последние десятилетия наблюдается значительное усложнение состава добываемого медного и медно-цинкового сырья. Проблемы, возникающие при обогащении таких руд, часто связаны с взаимным вкраплением частиц основных минералов, что затрудняет их разделение. Например, халькопирит и сфалерит находятся в тесной связи, что требует применения более сложных методов разделения. К тому же наличие нежелательных примесей, таких как мышьяк, может значительно ухудшать качество конечного продукта и усложнять технологические процессы [2, 3]. Ученые по всему миру активно трудятся над разработкой новых технологий переработки, направленных на повышение эффективности извлечения металлов из сложных руд. Что включает в себя как усовершенствование традиционных методов флотации и гравитационного обогащения, так и внедрение инновационных подходов, таких как гидрометаллургия и биопереработка.

Пирометаллургические технологии, такие как рудная плавка и обжиг, по-прежнему занимают центральное место в металлургических схемах переработки, являясь основным способом получения металлов. Например, для переработки бедных руд с высоким содержанием примесей усложняется аппаратная схема по причине введения новых операций, требующих значительных капи-

тальных затрат (в частности, очистки пыли и газовыноса от нежелательных элементов – мышьяка, сурьмы и т.д., либо вторичной переработки шлаков), что в итоге может привести к понижению экономической эффективности пирометаллургических процессов [4, 5].

Среди гидрометаллургических технологий переработки медно-цинкового сырья в мировой промышленности одним из распространенных методов является автоклавное выщелачивание [6–9]. Одним из частных случаев автоклавного выщелачивания является гидротермальная обработка (ГТО), которая используется не только для обогащения медных концентратов, но и для удаления нежелательных примесей, таких как цинк, железо и мышьяк. Многие исследования по применению ГТО подтверждают эффективность взаимодействия медных концентратов с растворами сульфата меди [10–14], где преимущественно в раствор извлекаются Fe, Zn и другие металлы, а Cu из раствора осаждается на кек, образуя вторичные сульфиды, тем самым обогащая кек по Cu до 50–60%. В частности, взаимодействие сфалерита (ZnS) и пирита (FeS₂) с растворами CuSO₄ приводит к образованию вторичных сульфидов меди (CuS, Cu₂S) [11–16] по реакциями (1)–(4):



Детальные кинетические исследования этого механизма проведены авторами работы [11], которые доказали двухступенчатое протекание реакций образования вторичных сульфидов меди на поверхности сфалерита с характерными диффузионными затруднениями.

Использование поверхностно-активных веществ в автоклавных процессах позволяет повысить показатели выщелачивания металлов (Cu, Fe, Zn, Ni) из сульфидных минералов (CuFeS_2 , FeS_2 , Fe_7S_8 , ZnS , NiS) [17–20].

Введение в процесс отходов целлюлозно-бумажной промышленности, а именно технического лигносульфоната натрия (ЛСН) в качестве поверхностно-активного вещества, может способствовать интенсификации процесса ГТО как по извлечению цинка из концентрата в раствор в виде сульфата цинка (ZnSO_4), так и образованию вторичных сульфидов меди (CuS , Cu_2S) в кеке.

Целью данной работы является исследование эффективности введения поверхностно-активного вещества – лигносульфоната натрия – в процесс гидротермальной обработки сульфида цинка растворами сульфата меди.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования элементного состава исходного сырья и твердых продуктов гидротермальной обработки проводили на уста-

новке ARL ADVANT'X (Thermo Scientific, США) – метод рентгенофлуоресцентной спектроскопии. Химический состав исходной жидкой фазы и конечных растворов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии на установке АЭС-ИСП, Экспес-6500 (Китай). Распределение частиц по фракциям определяли лазерной дифракцией на установке Bettersize ST, Bettersize Instruments Ltd., Китай.

Объект исследований – минерал сфалерит Учалинского месторождения (Челябинская область, Россия). Минерал предварительно был измельчен до крупности 95% ($-0,075$ мм). Гранулометрический анализ представлен на рис. 1, дифракционное распределение частиц по фракциям приведено в табл. 1. Элементный анализ исходного минерала представлен в табл. 2.

В связи с ограниченной доступностью высокоочищенного минерала сульфида цинка (ZnS) в природных условиях, приоритетным направлением лабораторных исследований стало планирование экспериментов, направленных на оценку эффективности разработанного метода извлечения металлического цинка из рудных материалов и концентратов с применением ЛСН. Основное внимание уделялось оптимизации технологических параметров процесса, включая выбор реагентов, температурных режимов, времени обработки и других факторов, влияющих на степень извлечения целевого металла.

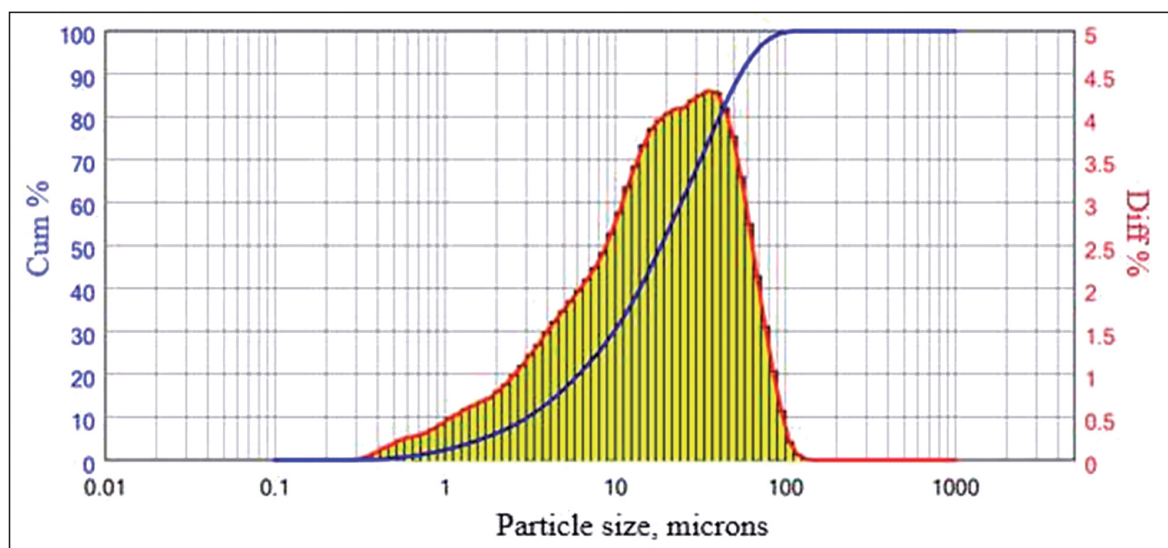


Рис. 1. Гранулометрический анализ пробы сфалерита
Fig. 1. Granulometric analysis of the sphalerite sample

Таблица 1. Дифракционное распределение пробы сфалерита
Table 1. Diffraction distribution of the sphalerite sample

d, мкм	0,00-0,50	0,50-1,00	1,00-2,00	2,00-5,00	5,00-10,00	10,00-20,00	20,00-45,00	45,00-75,00	75,00-100,00	100,00-200,00
%	0,39	1,91	3,88	10,34	13,78	22,25	30,93	13,72	2,52	0,28

Таблица 2. Химический состав пробы сфалерита
Table 2. Chemical composition of the sphalerite sample

Элемент	Zn	Fe	S	Прочее
Содержание, % масс.	56	1	38	5

Учитывая вышеуказанное ограничение имеющегося количества материала (ZnS), была выбрана лабораторная установка, позволяющая провести большее количество опытов для изучения широкого диапазона данных. Установка состоит из двух основных частей: горизонтальной печи и герметичных титановых реакторов. Печь (рис. 2 а) обеспечивает необходимый температурный режим, а реакторы (рис. 2 б) позволяют проводить эксперименты в условиях, исключающих доступ кислорода, что критично для процесса гидротермальной обработки. Реакторы имеют объем 50 см^3 и состоят из стакана с крышкой на резьбе, а также фторопластовой прокладки с корзинкой для материала. Такая конструкция позволяет избежать контакта между материалом и раствором при вертикальной установке стакана в печи, что дает возможность контролировать начало реакции до достижения заданной температуры. Температура в реакторах автоматически регулируется блоком управления с точностью $\pm 2^\circ \text{C}$ и измеряется с помощью термопары.

Навеску минерала массой $0,5 \text{ г}$ помещали во фторопластовую корзинку. Раствор с заданными концентрациями серной кислоты, сульфата меди (II) и лигносульфоната общим объемом 30 мл загружали в реакционный стакан. Перед началом эксперимента титановый реактор устанавливали на вал горизонтальной печи в вертикальном положении, печь нагревали до заданной температуры и после ее достижения запускали вращение вала, тем самым смешивая навеску с раствором и фиксируя начало эксперимента. По завершении эксперимента реактор остужали в объеме холодной воды до комнатной температуры, полученную пульпу фильтровали самотеком. Из полученных продуктов (кека, фильтрата) формировали пробы для химического анализа на содержание цинка, меди.

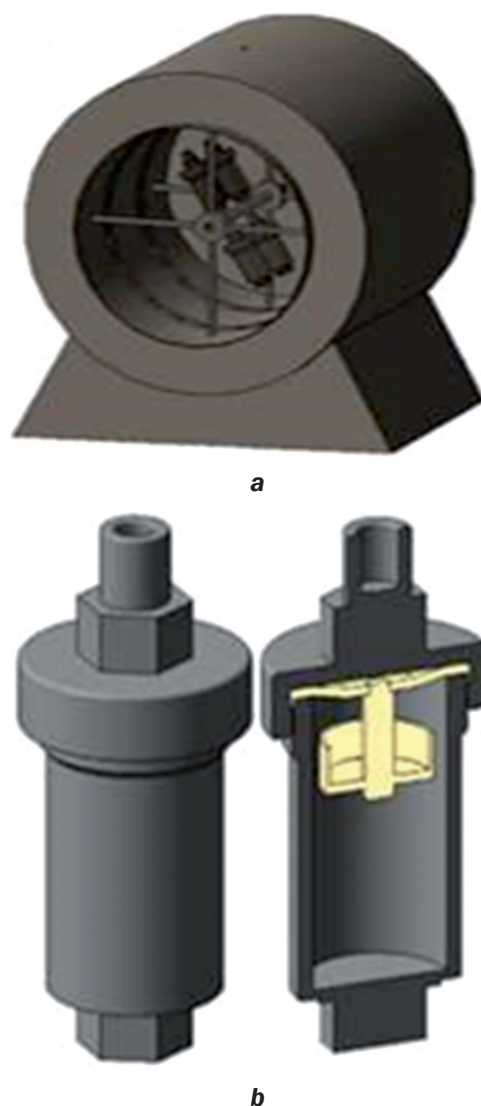


Рис. 2. Лабораторная установка: а – горизонтальная печь; б – титановый реактор (автоклав)

Fig. 2. Laboratory setup: а – horizontal furnace; б – titanium reactor (autoclave)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования были изучены основные параметры, влияющие на выщелачивание цинка из ZnS и осаждение меди в виде вторичных сульфидов меди (CuS , Cu_2S)

на кек. В частности, эксперименты проводились при температуре в диапазоне от 180 до 220 °С, с варьируемой исходной концентрацией серной кислоты от 10 до 30 г/дм³ и свободных ионов меди от 6 до 24 г/дм³. Время реакции также изменялось от 1 до 120 мин.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость извлечения цинка и осаждения меди от продолжительности процесса при различной исходной концентрации ЛСН (0–1 г/дм³) в растворе.

Влияние добавки ЛСН на показатели гидротермальной обработки сфалерита оказывается весьма значительным. Так, наличие

ЛСН в растворе при процессе ГТО существенно ускоряет процесс гидротермальной обработки сфалерита в первые 40 мин благодаря своим поверхностно-активным свойствам. При концентрации лигносульфоната 0,25 г/дм³ извлечение цинка за 120 мин составляет около 64%, а осаждение меди – более 65%. Важно отметить, что добавление ЛСН более 0,25–1 г/дм³ оказывало негативное влияние на извлечение цинка и осаждение меди. Это связано с деструктивными изменениями ЛСН при температурах выше 130 °С, что подтверждается исследованиями других авторов, фиксировавших сниже-

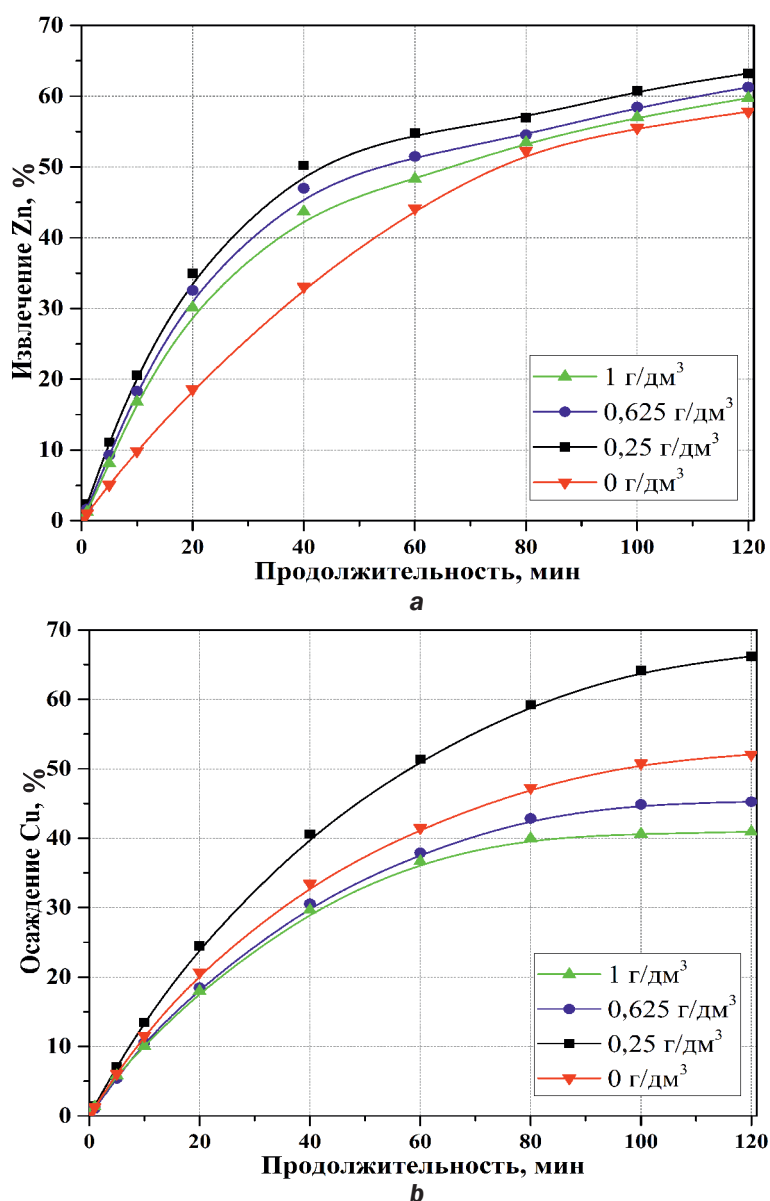


Рис. 3. Зависимость степени извлечения цинка (а) и осаждения меди (б) от продолжительности при разных концентрациях лигносульфоната натрия ($t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_0 = 20\text{ г/дм}^3$, $[\text{Cu}]_0 = 15\text{ г/дм}^3$)

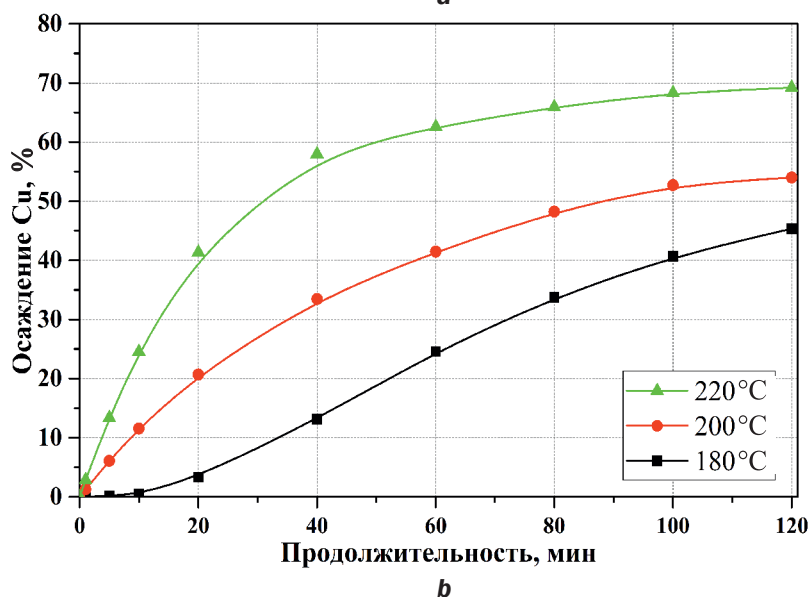
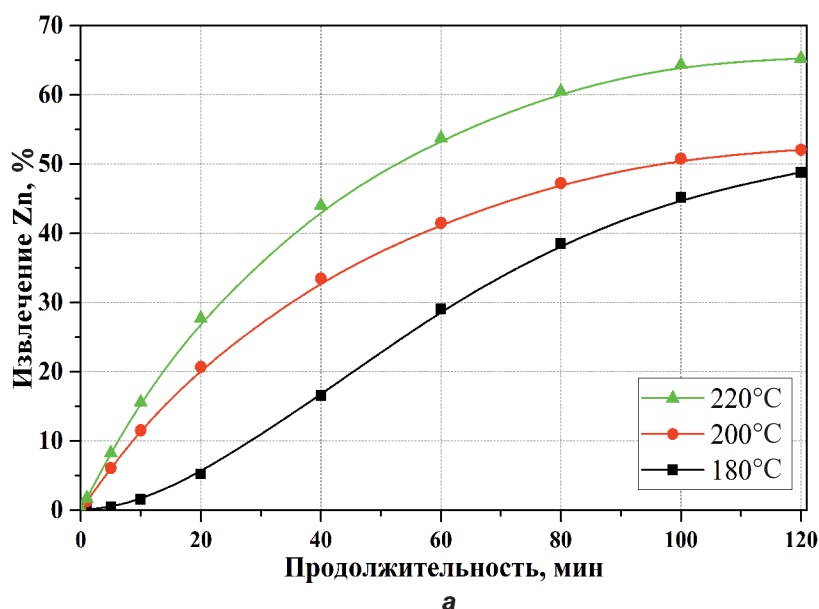
Fig. 3. Degree of zinc recovery (a) and copper precipitation (b) vs experiment duration at different concentrations of sodium lignosulfonate ($t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_0 = 20\text{ g/dm}^3$, $[\text{Cu}]_0 = 15\text{ g/dm}^3$)

ние эффективности ЛСН при повышении его концентрации в условиях среднетемпературного автоклавного выщелачивания [21]. На основании полученных данных, для дальнейших расчетов была выбрана оптимальная концентрация ЛСН – 0,25 г/дм³. Результаты следующих экспериментов демонстрируют зависимость извлечения цинка и осаждения меди от продолжительности при различной температуре (180–220 °С), что представлено на рис. 4.

С увеличением температуры наблюдается рост извлечения цинка (рис. 4 а, с) и осаждения меди (рис. 4 б, с) в первые 60 мин. Это подчеркивает важность температурного контроля в процессе выщелачивания, так как более высокие температуры способствуют активизации реакций и увеличению

скорости извлечения металлов. При температуре 180 °С и использовании ЛСН через 40 мин в раствор удалось извлечь 37,9% Zn. В то же время без добавления ЛСН при той же температуре за тот же интервал времени извлечение Zn составило лишь 16,8%. Более того, при температуре 220 °С за 120 мин с использованием ЛСН наблюдается повышение осаждения до 81% Cu, в отличие от 70% без применения ЛСН.

Несмотря на возможность дальнейшего увеличения показателей извлечения цинка и осаждения меди при еще более высоких температурах, в нашем эксперименте существует риск повреждения лабораторного оборудования при превышении 220 °С. Поэтому для последующих расчетов мы фиксируем температуру на уровне 220 °С.



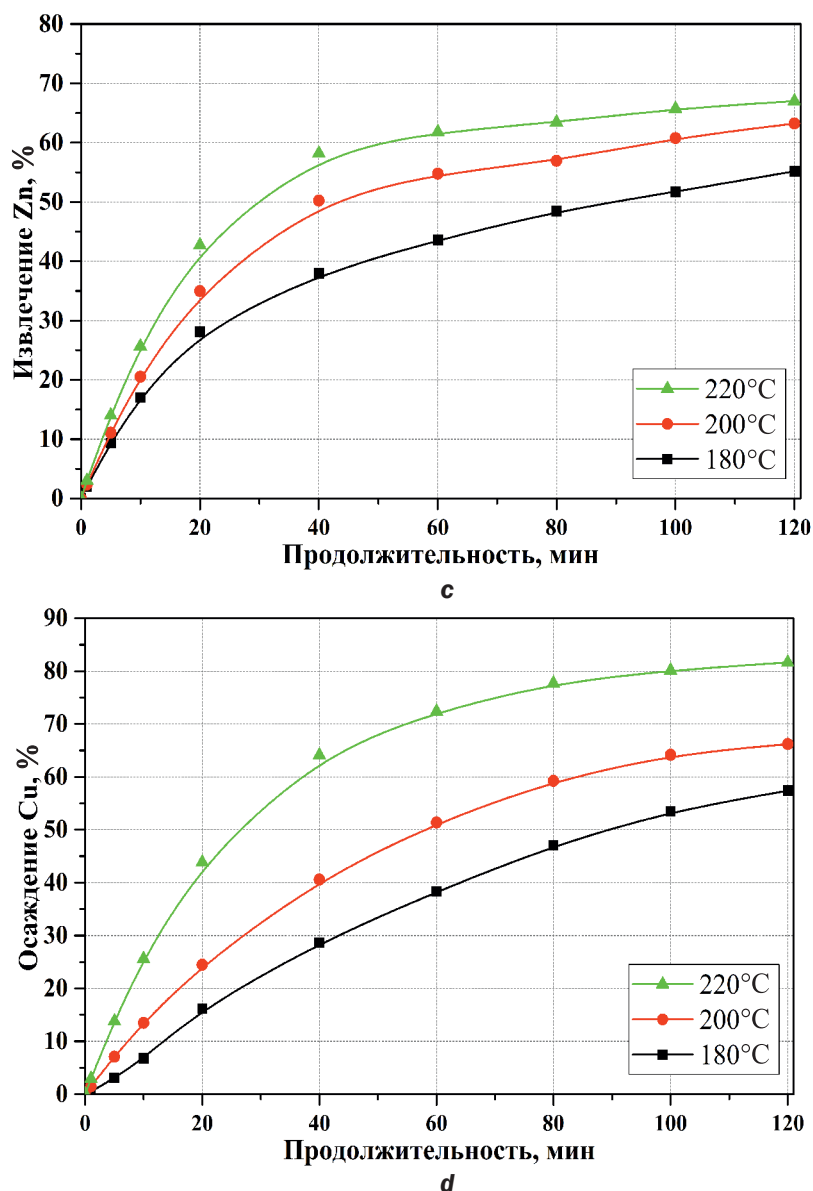
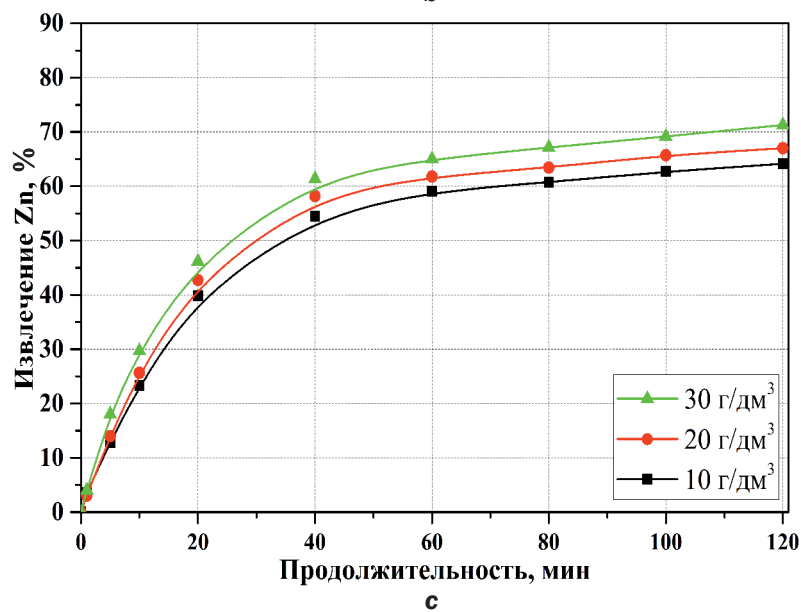
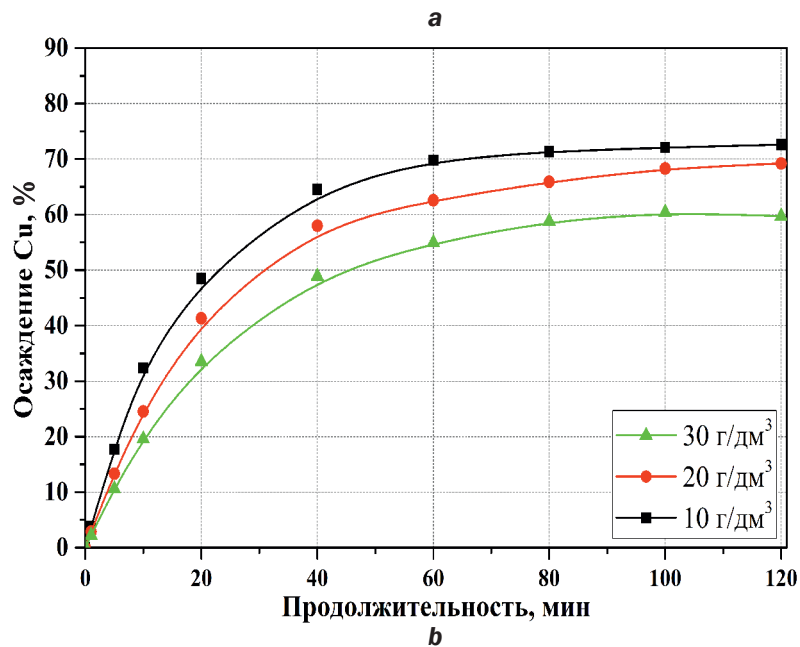
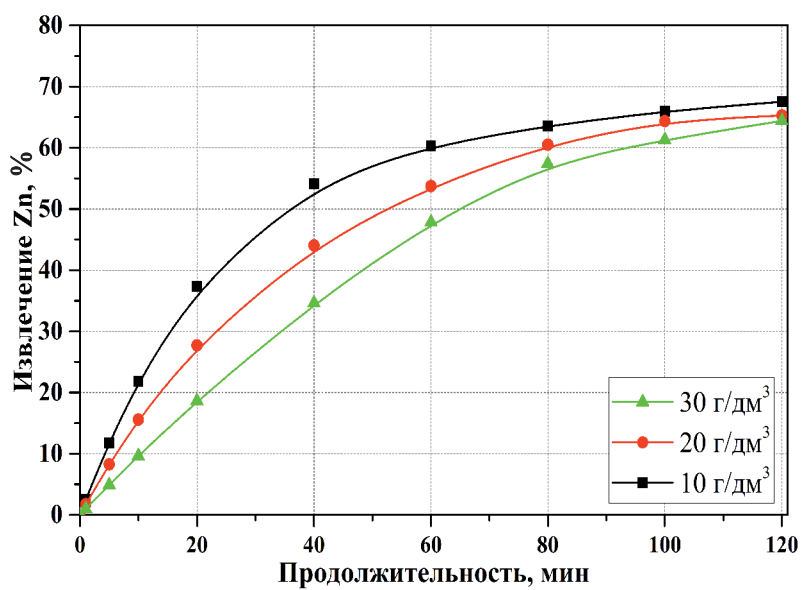


Рис. 4. Влияние продолжительности на извлечение цинка (а, с) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (а, b) и наличии лигносульфоната натрия (с, d) при различной температуре ($[H_2SO_4]_0 = 20 \text{ г/дм}^3$, $[Cu]_0 = 15 \text{ г/дм}^3$, $[ЛСН]_0 = 0,25 \text{ г/дм}^3$)
Fig. 4. Experiment duration vs degree of zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different temperature ($[H_2SO_4]_0 = 20 \text{ g/dm}^3$, $[Cu]_0 = 15 \text{ g/dm}^3$, $[SLS]_0 = 0.25 \text{ g/dm}^3$)

На рис. 5 представлена зависимость извлечения цинка из сфалерита в раствор и осаждения меди на кек от продолжительности эксперимента при различной исходной концентрации серной кислоты (10–30 г/дм³).

Увеличение начальной концентрации серной кислоты оказывает негативное влияние на степень извлечения цинка, а также на осаждение меди в условиях отсутствия лигносульфоната, что соответствует выводам исследователей, представленным в работе [21]. В то же время добавление ЛСН в систему вызывает эффект обратной зависимости влияния серной кислоты

на извлечение металла и осаждение меди на сфалерит. В течение 60 мин гидротермальной обработки сфалерита при концентрациях 10, 20 и 30 г/дм³ извлекаются, соответственно, 62, 66 и 71% цинка. При этом также происходит осаждение меди, достигающее 79, 82 и 86% в тех же условиях. Это свидетельствует о том, что увеличение концентрации кислоты положительно сказывается на извлечении цинка, однако разница в показателях не является значительной. Для дальнейших экспериментов была выбрана начальная концентрация серной кислоты, равная 10 г/дм³, что по-



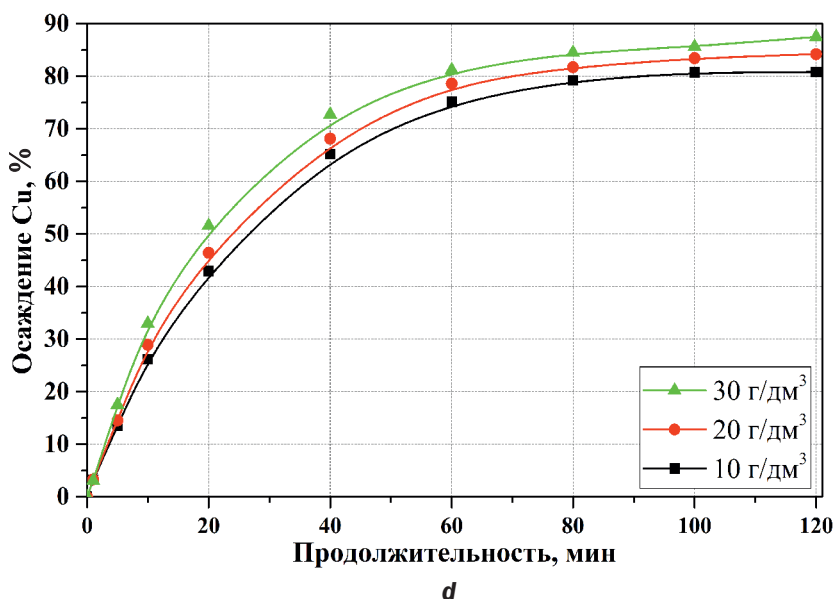


Рис. 5. Влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка (а, с) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (а, b) и наличии лигносульфоната натрия (с, d) при различной исходной концентрации серной кислоты ($t = 220^\circ\text{C}$, $[\text{Cu}]_0 = 15 \text{ г/дм}^3$; $[\text{ЛСН}]_0 = 0,25 \text{ г/дм}^3$)

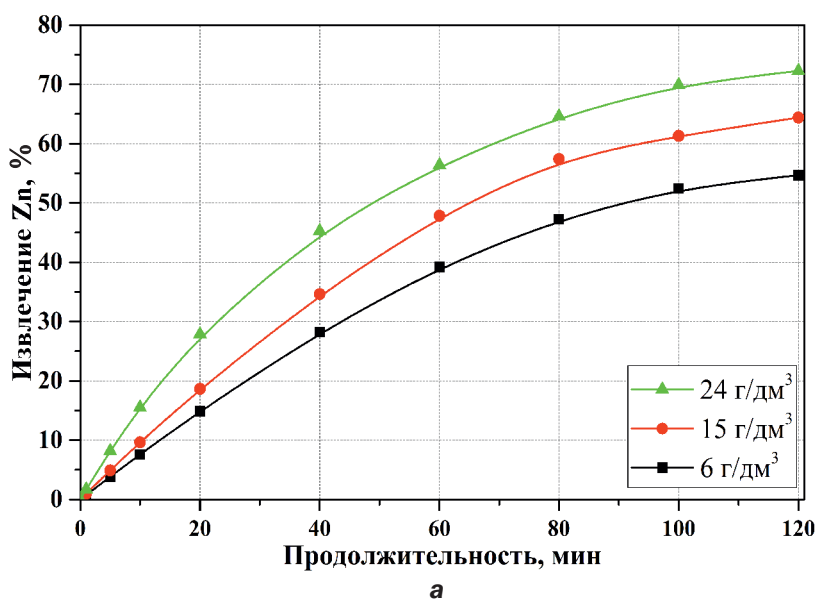
Fig. 5. Experiment duration vs zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different initial concentration of sulfuric acid ($t = 220^\circ\text{C}$, $[\text{Cu}]_0 = 15 \text{ g/dm}^3$; $[\text{SLS}]_0 = 0.25 \text{ g/dm}^3$)

звояет более точно оценить влияние других факторов на процесс.

На графике, представленном на рис. 6, отображено влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка из сфалерита, а также на степень осаждения меди на кеке при различной исходной концентрации меди (6–24 г/дм³).

Интересен тот факт, что увеличение концентрации ионов меди не приводит к значительному изменению скорости и степени извлечения цинка, как в условиях отсут-

ствия, так и в присутствии ЛСН. Однако стоит отметить, что добавление ПАВ в систему значительно улучшает извлечение цинка. Например, при концентрации меди 24 г/дм³ и времени реакции 60 мин извлечение цинка достигает 72% в присутствии ПАВ, в то время как в отсутствие ПАВ этот показатель составляет всего 57%. Это подчеркивает важность использования ПАВ для ускорения извлечения металлов из минералов. Более того, в условиях присутствия ПАВ процесс извлечения цинка достигает стабильного уровня уже



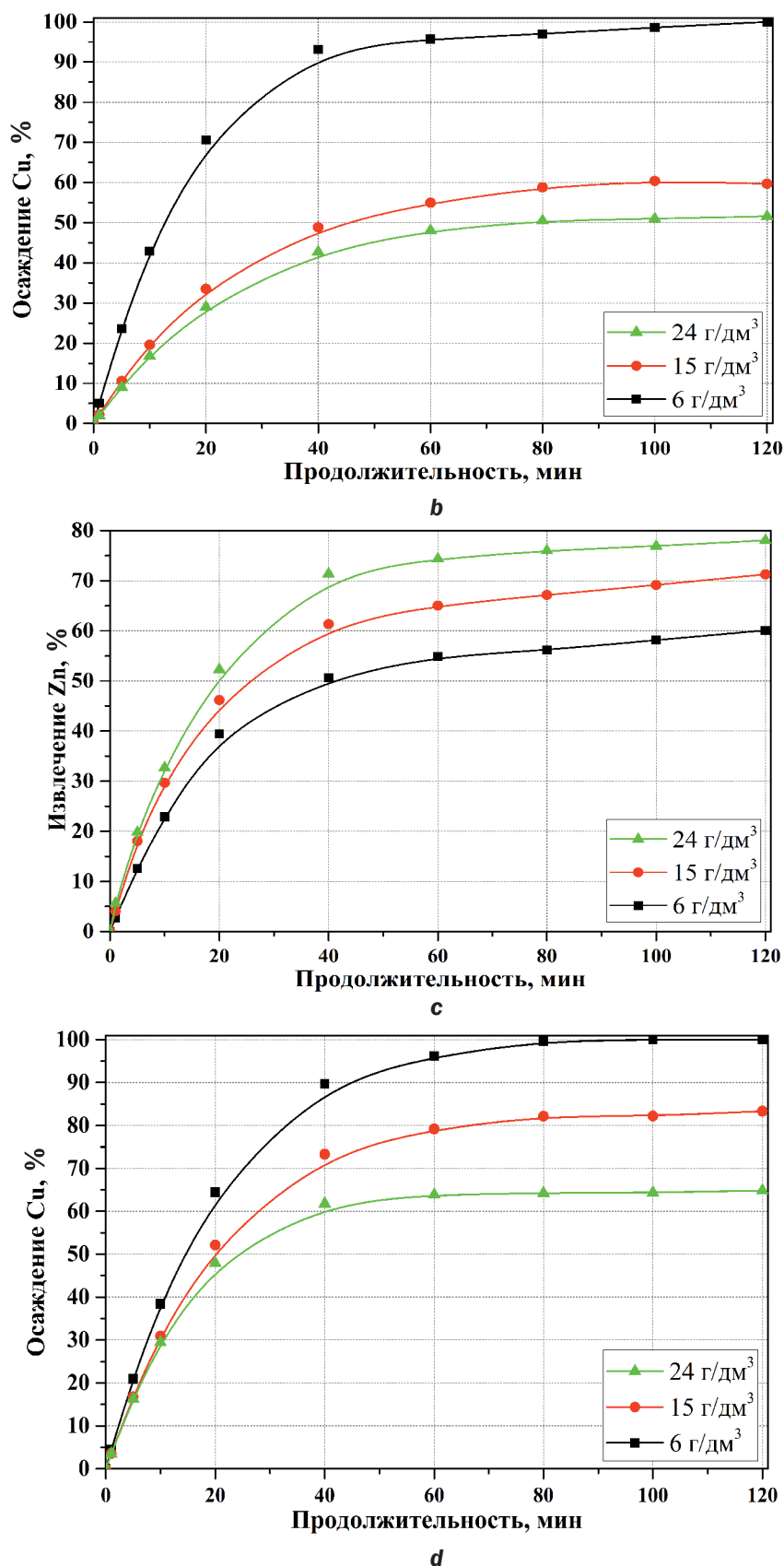


Рис. 6. Влияние продолжительности эксперимента на извлечение цинка (а, с) и осаждение меди (b, d) при отсутствии (а, b) и наличии лигносульфоната натрия (с, d) при различной исходной концентрации меди ($[H_2SO_4]_0 = 10 \text{ г/дм}^3$; $t = 220^\circ\text{C}$; $[LCH]_0 = 0,25 \text{ г/дм}^3$)

Fig. 6. Experiment duration vs zinc recovery (a, c) and copper precipitation (b, d) in the absence (a, b) and presence of sodium lignosulfonate (c, d) at different initial copper concentration ($[H_2SO_4]_0 = 10 \text{ g/dm}^3$; $t = 220^\circ\text{C}$; $[SLS]_0 = 0.25 \text{ g/dm}^3$)

через 40 мин, тогда как в отсутствие ПАВ это значение достигается только после 120 мин обработки. Данные результаты подтверждают гипотезу о том, что ПАВ способствуют интенсификации извлечения металлов, вероятно, за счет снижения поверхностного натяжения и улучшения взаимодействия между реагентами. Что касается осаждения меди, то здесь влияние ПАВ не столь заметно при низкой начальной концентрации меди в 6 г/дм³. Это может указывать на то, что при более низких концентрациях меди другие факторы, такие как температура и, как следствие, давление паров воды, могут оказывать более значительное влияние на процесс осаждения. Однако, если рассмотреть результаты осаждения Си при 24 г/дм³ исходной концентрации ионов меди (II), то в условиях присутствия ЛСН за 120 мин показатель осаждения составляет 64%, что значительно выше, чем 51% при отсутствии ЛСН. Это может быть связано с тем, что наличие ЛСН в растворе способствует, вероятно, образованию более стабильных комплексов с медью, что в свою очередь облегчает процесс осаждения. Таким образом, можно сделать вывод, что использование ЛСН не только способствует повышению степени извлечения цинка, но и влияет на эффективность осаждения меди. Также стоит отметить, что гидротермальная обработка сфалерита является сложным процессом, в котором выбор подходящих реагентов и условий оптимизации процессов могут влиять друг на друга. Например, температура процесса и давление паров воды, а также время реакции могут существенно изменять эффективность извлечения. Важно учитывать, что каждая из этих переменных может быть оптимизирована для достижения наилучших результатов.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к более эффективным технологиям переработки цинковых и медно-цинковых концентратов, что будет способствовать более широкому использованию сложных по составу минерально-сырьевых ресурсов в металлургической промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что добавление 0,25 г/дм³ лигносульфоната натрия значительно улучшает эффективность гидротермальной обработки сфалерита, уменьшая продолжительность процесса примерно в 1,5–2 раза. Этот способ имеет важное значение для горной и металлургической отраслей, поскольку позволяет более эффективно извлекать ценные металлы из руд. Однако стоит отметить, что при дальнейшем увеличении концентрации поверхностно-активного вещества в процессе ГТО сульфида цинка показатели выщелачивания цинка из этого соединения – основы сфалерита – начинают снижаться. Это может быть связано с тем, что высокие концентрации добавки могут вызывать нежелательные эффекты, такие как агрегация частиц или изменение свойств раствора, что, в свою очередь, негативно сказывается на процессе извлечения цинка. Также были установлены оптимальные параметры для гидротермальной обработки сфалерита с использованием растворов сульфата меди в присутствии ЛСН. В ходе экспериментов было определено, что при концентрации серной кислоты, равной 10 г/дм³, температуре 220 °С и начальной концентрации меди, равной 15 г/дм³, при добавлении 0,25 г/дм³ ЛСН можно достичь максимального извлечения цинка – до 74% за 120 мин обработки. В то же время в процессе осаждается 83% меди, что также является высоким результатом. Таким образом, результаты исследований открывают новые горизонты для повышения эффективности извлечения металлов из сульфидных руд и концентратов, что может привести к более устойчивым и экономически выгодным технологиям в металлургической промышленности. Важно продолжать изучение влияния использования различных поверхностно-активных добавок на показатели автоклавных процессов, в частности ГТО, и изменяющихся условий на процессы выщелачивания, чтобы выявить оптимальные параметры данной обработки сульфатом меди при разработке технологии переработки сфалерит- и пиритсодержащих руд и концентратов.

Список источников

1. Шумская Е.Н., Поперечникова О.Ю., Тихонов Н.О. Разработка технологии обогащения труднообогатимой колчеданной полиметаллической руды Корбалихинского месторождения // Горный журнал. 2014. № 11. С. 78–83. <http://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08>. EDN: SZEWFP.

2. Абишев Д., Еремин Ю. Обогащение тонковкрапленных руд – приоритетное направление горно-металлургического комплекса // Промышленность Казахстана. 2000. № 10. С. 96–99.
3. Чантурия В.А. Инновационные технологии комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения): матер. Междунар. конф. (г. Апатиты, 21–26 сентября 2020 г.). Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2020. С. 3–4. EDN: MABCBV.
4. Орлов А.К., Коновалов Г.В., Бодуэн А.Я. Пирометаллургическая селекция медно-цинковых материалов // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 65–68. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>. EDN: ROWETD.
5. Булатов К.В., Жуков В.П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>. EDN: OUSGWL.
6. Шнеерсон Я.М., Набойченко С.С. Тенденции развития автоклавной гидрометаллургии цветных металлов // Цветные металлы. 2011. № 3. С. 15–20. EDN: NFAQJB.
7. Лапин А.Ю., Шнеерсон Я.М. История создания и освоения автоклавно-гидрометаллургической технологии по переработке никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2020. № 9. С. 57–64. EDN: QAWUXI.
8. Кочин В.А., Набойченко С.С., Лебедь А.Б., Мальцев Г.И. Автоклавно-флотационная схема переработки Cu – Pb – Zn-концентратов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 196. EDN: RXUOZP.
9. Kritskii A., Karimov K., Naboichenko S. Pressure leaching of chalcopryrite concentrate: iron removal from leaching residues // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 299. P. 1052–1057. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1052>. EDN: TRLLKB.
10. Kritskii A.A., Naboichenko S.S., Karimov K.A., Vivek A., Lundström M. Hydrothermal pretreatment of chalcopryrite concentrate with copper sulfate solution // Hydrometallurgy. 2020. Vol. 195. P. 105478. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105359>. EDN: JBCCPP.
11. Kritskii A., Celep O., Yazici E., Deveci H., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of sphalerite and pyrite particles with CuSO₄ solution // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. P. 107507. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107507>.
12. Kritskii A., Fuentes G., Deveci H. A critical review of hydrothermal treatment of sulfide minerals with Cu(II) solution in H₂SO₄ media // Hydrometallurgy. 2024. Vol. 231. Iss. 12. P. 106413. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106413>.
13. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Shneerson Y.M., Ospanov E.A., Shakalov A.A., Naboichenko S.S. Low-grade copper concentrate purification and enrichment by complex pressure oxidation-hydrothermal alteration technology // 10th Conference proceedings of COM + COPPER (Vancouver, 18–21 August 2019). Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. 13 p. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/347949233_LOW-GRADE_COPPER_CONCENTRATE_PURIFICATION_AND_ENRICHMENT_BY_COMPLEX_PRESSURE_OXIDATION-HYDROTHERMAL_ALTERATION_TECHNOLOGY (дата обращения: 28.09.2024).
14. Ковязин А.А., Тимофеев К.А., Мальцев Г.И., Краюхин С.А. Гидротермальное осаждение меди из растворов выщелачивания металлургических пылей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 547–561. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-547-561>. EDN: UYMDXG.
15. Kritskii A., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of arsenopyrite particles with CuSO₄ Solution // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 23. P. 7472. <http://doi.org/10.3390/MA14237472>. EDN: ORSDOU.
16. Viñals J., Fuentes G., Hernández M.C., Herreros O. Transformation of sphalerite particles into copper sulfide particles by hydrothermal treatment with Cu(II) ions // Hydrometallurgy. 2004. Vol. 75. Iss. 1-4. P. 177–187. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.07.005>.
17. Луговицкая Т.Н., Колмачихина Э.Б., Набойченко С.С. К вопросу о применении поверхностно-активных веществ для интенсификации процессов высокотемпературного автоклавного выщелачивания сульфидных минералов // Современные технологии производства цветных металлов: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 59–64. EDN: UXXVLK.
18. Нафталъ М.Н. Применение комбинированного поверхностно-активного вещества – перспективное направление совершенствования технологии автоклавно-окислительного выщелачивания никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2011. № 10. С. 47–53. EDN: OIIZQH.
19. Нафталъ М.Н., Выдыш А.В., Сухобаевский И.Ю., Бельский А.Н., Асанова И.И. Воздействие лигносульфонатов на поведение элементной серы при автоклавном выщелачивании никель-пирротиновых концентратов // Цветные металлы. 2009. № 1. С. 25–33. EDN: JVXGCG.
20. Хазиева Э.Б., Свиридов В.В., Набойченко С.С., Меньщиков В.А. Влияние поверхностно-активных веществ на состояние серы при автоклавном выщелачивании цинковых концентратов // Цветные металлы. 2017. № 2. С. 46–50. <http://doi.org/10.17580/tsm.2017.02.07>. EDN: YGSDNZ.
21. Колмачихина Э.Б., Луговицкая Т.Н., Третьяк М.А., Наумов К.Д. Кинетические исследования влияния поверхностно-активных веществ на показатели автоклавного выщелачивания сульфидных цинковых концентратов // VIII Информационная школа молодого ученого: докл. Всерос. междисциплинарной молодеж. науч. конф. с между-

нар. участием (г. Екатеринбург, 21–24 сентября 2020 г.). Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2020. С. 32–41. <http://doi.org/10.32460/ishmu-2020-8-0004>. EDN: RGPSRN.

References

1. Shumskaya E.N., Poperechnikova O.Yu., Tikhonov N.O. Development of technology of concentration of complex pyrite polymetallic ore of Korbalkhinskoe deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2014;11:78-83. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08>. EDN: SZEWFP.
2. Abishev D., Eremin Yu. Concentration of finely disseminated ores as a priority direction of the mining and metallurgical complex. *Industry of Kazakhstan*. 2000;10:96-99. (In Russ.).
3. Chanturiya V.A. Innovative technologies for complex and deep processing of mineral raw materials with complex material composition. In: *Innovacionnye processy kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya) = Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin readings): Proceedings of the International Conference 21–26 September 2020, Apatity*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 3-4. (In Russ.). EDN: MABCBV.
4. Orlov A.K., Konovalov G.V., Boduen A.J. Pyrometallurgical selection of copper-zinc materials. *Journal of Mining Institute*. 2011;192:65-68. (In Russ.). <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>. EDN: ROWETD.
5. Bulatov K.V., Zhukov V.P. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421-433. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>. EDN: OUSGWL.
6. Shneerson Ya.M., Naboichenko S.S. Tendencies of non-ferrous metals autoclave hydrometallurgy development. *Tsvetnye metally*. 2011;3:15-20. (In Russ.). EDN: NFAQJB.
7. Lapin A.Yu., Shneerson Ya.M. Creation and development history of autoclave-hydrometallurgical technology for processing nickel-pyrrhotite concentrates. *Tsvetnye metally*. 2020;9:57-64. (In Russ.). EDN: QAWUXI.
8. Kochin V.A., Naboichenko S.S., Lebed A.B., Maltsev G.I. Pressure leaching–flotation method processing Cu – Pb – Zn concentrates. *Modern problems of science and education*. 2013;2:196. (In Russ.). EDN: RXUOZP.
9. Kritskii A., Karimov K., Naboichenko S. Pressure leaching of chalcopyrite concentrate: iron removal from leaching residues. *Solid State Phenomena*. 2020;299:1052-1057. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1052>. EDN: TRLLKB.
10. Kritskii A.A., Naboichenko S.S., Karimov K.A., Vivek A., Lundström M. Hydrothermal pretreatment of chalcopyrite concentrate with copper sulfate solution. *Hydrometallurgy*. 2020;195:105478. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105359>. EDN: JBCCPP.
11. Kritskii A., Celep O., Yazici E., Deveci H., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of sphalerite and pyrite particles with CuSO₄ solution. *Minerals Engineering*. 2022;180:107507. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107507>.
12. Kritskii A., Fuentes G., Deveci H. A critical review of hydrothermal treatment of sulfide minerals with Cu(II) solution in H₂SO₄ media. *Hydrometallurgy*. 2024;231:106413. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106413>.
13. Fomenko I.V., Pleshkov M.A., Shneerson Y.M., Ospanov E.A., Shakalov A.A., Naboichenko S.S. Low-grade copper concentrate purification and enrichment by complex pressure oxidation-hydrothermal alteration technology. In: *10th Conference proceedings of COM + COPPER*. 18–21 August 2019, Vancouver. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2019, 13 p. Available from: https://www.researchgate.net/publication/347949233_LOW-GRADE_COPPER_CONCENTRATE_PURIFICATION_AND_ENRICHMENT_BY_COMPLEX_PRESSURE_OXIDATION-HYDROTHERMAL_ALTERATION_TECHNOLOGY [Accessed 28th September 2024].
14. Kovyazin A.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Krayukhin S.A. Hydrothermal precipitation of copper from leaching solutions of metallurgical dusts. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):547-561. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-547-561>. EDN: UYMDXG.
15. Kritskii A., Naboichenko S. Hydrothermal treatment of arsenopyrite particles with CuSO₄ Solution. *Materials*. 2021;14(23):7472. <http://doi.org/10.3390/MA14237472>. EDN: ORSDOU.
16. Viñals J., Fuentes G., Hernández M.C., Herreros O. Transformation of sphalerite particles into copper sulfide particles by hydrothermal treatment with Cu(II) ions. *Hydrometallurgy*. 2004;75(1-4):177-187. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.07.005>.
17. Lugovitskaya T.N., Kolmachikhina E.B., Naboichenko S.S. On surfactant application to intensify high-temperature pressure leaching of sulfide minerals. In: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnykh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S.S. Naboichenko = Modern production technologies of non-ferrous metals: Proceedings of International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S.S. Naboichenko*. 24–25 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 59-64. (In Russ.). EDN: UXXVLK.
18. Naftal M.N. Usage of combined surface-active materials is prospective direction for improvement of technology of autoclave-oxidation leaching of nickel-pyrrhotite concentrates. *Tsvetnye metally*. 2011;10:47-53. (In Russ.). EDN: OIIZQX.
19. Naftal M.N., Vidysh A.V., Sukhobaevsky I.Yu., Belsky A.N., Asanova I.I. Effect of lignosulphonates on behavior of elemental sulphur in the technology of autoclave hydrometallurgy of nickel-pyrrhotite concentrates. *Tsvetnye metally*. 2009;1:25-33. (In Russ.). EDN: JVXGCG.

20. Khazieva E.B., Sviridov V.V., Naboichenko S.S., Menshchikov V.A. Influence of surface-active substances on sulfur state during the autoclave leaching of zinc concentrates. *Tsvetnye metally*. 2017;2:46-50. <http://doi.org/10.17580/tsm.2017.02.07>. (In Russ.). EDN: YGSDNZ.
21. Kolmachikhina E.B., Lugovitskaya T.N., Tretiak M.A., Naumov K.D. Kinetic studies of surfactant influence on zinc sulfide concentrate pressure leaching performance. In: *VIII Informatsionnaya shkola molodogo uchenogo: doklady Vserossiiskoi mezhdisciplinarnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = 8th Information School of Young Scientists: reports of All-Russian interdisciplinary youth scientific conference with international participation*. 21–24 September 2020, Ekaterinburg. Ekaterinburg: UMC UPI; 2020, p. 32-41. (In Russ.). <http://doi.org/10.32460/ishmu-2020-8-0004>. EDN: RGPSRN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Шарипова Ульяна Рамильевна,**

инженер-исследователь
научной лаборатории перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
ursharipova@urfu.ru

Третьяк Максим Алексеевич,

к.т.н.,
младший научный сотрудник
научной лабораторией перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
✉ m.a.tretiak@urfu.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8405-8100>

Каримов Кирилл Ахтямович,

к.т.н.,
старший научный сотрудник
научной лаборатории перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
kirill_karimov07@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1415-4484>

Рогожников Денис Александрович,

д.т.н., доцент,
заведующий научной лабораторией
перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
darogozhnikov@urfu.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Uliana R. Sharipova,**

Research Engineer,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing of Mineral and Technogenic
Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
ursharipova@urfu.ru

Maksim A. Tretiak,

Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing of Mineral and Technogenic
Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ m.a.tretiak@urfu.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8405-8100>

Kirill A. Karimov,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing of Mineral and Technogenic
Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
kirill_karimov07@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1415-4484>

Denis A. Rogozhnikov,

Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing of Mineral and Technogenic
Raw Materials of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after
the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
darogozhnikov@urfu.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 12.01.2025 г.; принята к публикации 30.01.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 06.12.2024; approved after reviewing 12.01.2025; accepted for publication 30.01.2025.