

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НИЗКОСОРТНОЙ НИКЕЛЕВОЙ ЛАТЕРИТНОЙ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРОСОДЕРЖАЩЕГО УГЛЯ

Т.Т. Фунг¹, Ч.Т. Чан¹, В.Л. Фам¹, Д.В. Зиновеев², Х. Нгуен³, В.М. Нгуен³

¹ Ханойский университет горного дела и геологии, Ханой, Вьетнам

² НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³ Технологический институт, Ханой, Вьетнам, e-mail: chihnhan88@gmail.com

Аннотация: Процесс восстановления с последующим магнитным обогащением в настоящее время рассматривается как эффективный метод извлечения никеля из никелевой латеритной руды. При этом восстановление играет роль стадии предварительной подготовки перед магнитной сепарацией. Представлены результаты исследований по восстановлению низкосортной никелевой латеритной руды с использованием серосодержащего угля из месторождения На Зьонг (Вьетнам) – дешевого угля с высоким содержанием серы. Несмотря на экологические ограничения, связанные с применением угля с высоким содержанием серы в металлургии, установлено, что сера способствует образованию слабомагнитных сульфидов железа, что снижает содержание железа в магнитных продуктах и значительно повышает эффективность извлечения никеля. Эксперименты проводились с варьированием температуры (900–1200 °С) и соотношения угля (5–12,5%) при фиксированном времени восстановления (90 мин). Изучено влияние добавки Na_2SO_4 (3%), которая усиливала процесс восстановления, увеличивая содержание никеля в концентрате до 3,66% и степень извлечения до 77%. Полученные данные подчеркивают экономический потенциал использования дешевого серосодержащего угля в качестве восстановителя для переработки низкосортных латеритных руд. Результаты открывают перспективы для оптимизации технологии и дальнейших исследований параметров процесса.

Ключевые слова: низкосортная руда, никелевая латеритная руда, серосодержащий уголь, восстановление, магнитная сепарация, извлечение никеля, сульфид железа, Na_2SO_4 .

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной в рамках научно-исследовательского проекта базового уровня Университета Горного дела и Геологии, номер проекта: T22-37.

Для цитирования: Фунг Т. Т., Чан Ч. Т., Фам В. Л., Зиновеев Д. В., Нгуен Х., Нгуен В. М. Восстановление низкосортной никелевой латеритной руды с использованием серосодержащего угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9-1. – С. 168–183. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_168.

Reduction of low-grade nickel laterite ore using sulfur-containing coal

T.T. Phung¹, T.T. Tran¹, V.L. Pham¹, D.V. Zinoveev², H. Nguyen³, V.M. Nguyen³

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² NUST MISIS, Moscow, Russia

³ Institute of Technology, Hanoi, Vietnam, e-mail: chihnhan88@gmail.com

Abstract: The process of reduction followed by magnetic enrichment is currently considered as an effective method for nickel extraction from nickel laterite ore. In this case, reduction plays the role of a preliminary preparation stage before magnetic separation. The article presents the results of studies on the reduction of low-grade nickel laterite ore using sulfur-containing coal from the Na Duong deposit (Vietnam), a cheap coal with a high sulfur content. Despite the environmental restrictions associated with the use of high-sulfur coal in metallurgy, it was found that sulfur promotes the formation of weakly magnetic iron sulfides, which reduces the iron content in magnetic products and significantly improves the efficiency of nickel extraction. Experiments were carried out with varying temperature (900–1200 °C) and coal ratio (5–12.5%) at a fixed reduction time (90 minutes). The effect of Na_2SO_4 (3%) additive was studied, which enhanced the reduction process, increasing the nickel content in the concentrate to 3.66% and the recovery rate to 77%. The obtained data highlight the economic potential of using cheap sulfur-containing coal as a reducing agent for processing low-grade laterite ores. The results open up prospects for technology optimization and further research of the process parameters.

Key words: low-grade ore, nickel laterite ore, sulfur-containing coal, reduction, magnetic separation, nickel recovery, iron sulfide, Na_2SO_4 .

Acknowledgements: The work was carried out with financial support provided within the framework of the basic level research project of the University of Mining and Geology, project number: T22-37.

For citation: Phung T. T., Tran T. T., Pham V. L., Zinoveev D. V., Nguyen H., Nguyen V. M. Reduction of low-grade nickel laterite ore using sulfur-containing coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(9-1):168-183. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_168.

Введение

Никель является одним из ключевых металлов в современной промышленности благодаря своим уникальным свойствам, таким как коррозионная стойкость и высокая прочность. Основные источники никеля — сульфидные и латеритные руды, причем латеритные руды составляют около 70% мировых запасов никеля [1, 2]. Латеритные руды, преимущественно встречающиеся в тропических регионах, таких как Юго-Восточная Азия, Австралия и Африка, характеризуются низким содержанием никеля (0,8–2%) и высоким содержанием железа и других примесей, что усложняет их переработку. В условиях истощения высокосортных сульфидных месторождений разработка эффективных технологий для переработки низ-

косортных латеритных руд становится приоритетной задачей [1, 3–7].

Никель играет важную роль в различных отраслях техники и технологий. Основное применение никеля — производство нержавеющей стали и специальных сплавов, используемых в аэрокосмической, химической и энергетической промышленности. В последние годы спрос на никель значительно возрос в связи с развитием производства литий-ионных аккумуляторов для электромобилей и систем хранения возобновляемой энергии [8–11]. Увеличение потребности в никеле подчеркивает необходимость разработки экономически эффективных методов переработки латеритных руд, которые могут обеспечить устойчивое снабжение этим металлом.

Серосодержащий уголь редко используется в металлургической промышленности из-за экологических соображений и, что более важно, отрицательного влияния серы на качество продукции. Однако недавние исследования процессов восстановления и магнитной сепарации для извлечения никеля из низкосортной латеритной руды показали, что сера и ее соединения могут способствовать образованию слабомангнитных сульфидов железа в процессе восстановления. Это, в свою очередь, ограничивает включение железа в магнитные продукты (никельсодержащие концентраты) [1, 3, 12, 13]. Таким образом, использование угля с высоким содержанием серы может значительно снизить затраты на переработку, поскольку такой уголь существенно дешевле традиционного антрацита. Кроме того, сера в составе угля оказывает положительное влияние на процесс восстановления, повышая эффективность извлечения никеля.

Материалы и методика эксперимента

В данной работе представлены результаты экспериментов по восстановлению низкосортной никелевой латеритной руды с использованием угля из месторождения На Зыонг (Вьетнам), относящегося к серосодержащим углям. Исследования проводились на хвостах обогащения хромитовой руды из района Маулам, провинции Тханьхоа, Вьетнам. Эти хвосты, являющиеся побочным продуктом процесса обогащения хромитовой руды, содержат никелевую латеритную руду [14–16].

Согласно технологической схеме переработки хромитовой руды, в настоящее время на хвостохранилище района Маулам выделяются три типа шламов в зависимости от гранулометрического состава, которые складываются отдельно в трех отсеках. При этом мелкодис-

персные шламы (фракция $-0,074$ мм) с низким содержанием никеля (менее $0,2\%$ Ni) не рассматриваются для дальнейшего использования. Два остальных типа шламов, содержащих никель и кобальт в более высоких и экономически ценных концентрациях, были отобраны для исследования, а именно:

- Первый тип — это грубозернистый материал со средним размером частиц более $1,0$ мм, который складывается на поверхности карьера. По литературным данным, объем этих отходов составляет около $20–25\%$ от общего объема шламов. Содержание никеля и кобальта в этих образцах достаточно высокое и варьируется в пределах $0,8–2,0\%$ Ni и $0,1–0,6\%$ Co.
- Второй тип — это шлам, образовавшийся в процессе обогащения хромитовой руды с размером частиц $+0,074–2$ мм. Эти отходы составляют около $45–50\%$ от общего объема шламов. Содержание никеля и кобальта здесь ниже — в среднем около $0,5–0,7\%$ Ni и $0,05–0,08\%$ Co.

Для получения представительного образца шлама для исследования были отобраны пробы из первого и второго типов отходов в соотношении $30:70$ по массе. Общая масса комплексной пробы составила около 200 кг. Образец был высушен на месте, затем доставлен в лабораторию обогащения полезных ископаемых Кафедры обогащения полезных ископаемых (Университета горного дела и геологии, Вьетнам), где он был переработан, перемешан и квартован для подготовки проб для ситового анализа, химического анализа, определения минерального состава, а также для проведения лабораторных экспериментов в соответствии с технологической схемой, представленной на рис. 1.

После тщательной обработки и перемешивания, из шлама была отобрана представительная проба для анализа

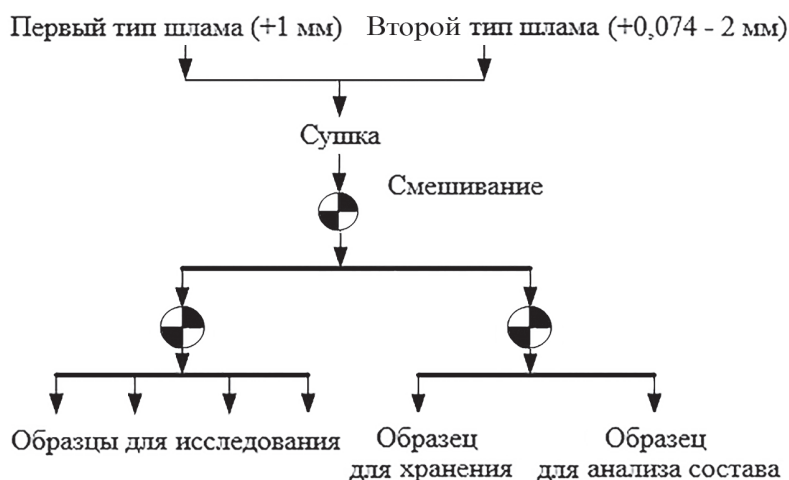


Рис. 1. Схема подготовки образцов шламов для анализа и исследований

Fig. 1. Scheme for the preparation of sludge samples for analysis and investigation

химического и минерального состава. Химический состав определяли методом индуктивно связанной плазменной эмиссионной спектроскопии (ICP-OES) с использованием спектрометра IRIS-INTREPID. Результаты анализа химиче-

ского состава образца шлама приведены в табл. 1. Показано, что содержание никеля в шламе составляло 1,18% Ni.

Минералогический состав определяли методом рентгеновской дифракции (XRD) в аналитическом центре геоло-

Таблица 1

Результат анализа химического состава образца шлама

Results of the chemical composition analysis of the sludge sample

Состав	Fe ₂ O ₃	Ni	Al ₂ O ₃	CaO	Co	Cr	MgO	MnO	остальные
Содержание (%)	29,17	1,18	5,19	1,26	0,26	2,06	11,02	6,81	43,05

Таблица 2

Результат анализа минерального состава образца шлама

Results of the mineral composition analysis of the sludge sample

№	Минералы	Содержание (%)
1	Amphibon	2 – 4
2	Monmorillonit (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	21 – 23
3	Chlorit: Ni ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	8 – 10
4	Gotit: Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	33 – 35
5	Todorokite: (Na,Ca,K,Ba,Sr) _{1-x} (Mn,Mg,Al) ₆ O ₁₂ ·3-4H ₂ O	10 – 12
6	Antigorit: 3MgO·2SiO ₂ ·2H ₂ O	22 – 24
7	Illit: KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	7 – 9
8	Quartz: SiO ₂	10 – 12
10	Felspat: K _{0,5} Na _{0,5} AlSi ₃ O ₈	2 – 4

гических исследований, входящем в состав Департамента геологии и полезных ископаемых Вьетнама (табл. 2).

Результаты анализа минерального состава образца показали, что металлы присутствуют в виде гидроокисдов и силикатов. Тип руды — никелевая латеритная руда, в которой минералом, содержащим никель, является хлорит. Кроме того, согласно исследованиям автора Т.З. Ле и научной группы Центра внедрения технологий полезных ископаемых, Университета горного дела и геологии (Вьетнам), в шламе были обнаружены железо-марганцевые конкреции (Fe-Mn нодули), которые также являются средой для адсорбции никеля в процессе формирования [17]. Это соответствует и результатам анализа, согласно которым содержание Fe и Mn в образце относительно высокое.

Что касается содержания никеля, в образце шлама оно составляет 1,18% Ni. Кроме того, в образце присутствует кобальт в количестве 0,26%, который по своим свойствам близок к никелю. Согласно результатам исследований, кобальт также переходит в никельсодержа-

щий продукт. Образцы для последующего исследования на обогащение предварительно сушили при 105 °С, в течение 2 ч до достижения постоянной массы и измельчали до крупности $-0,074$ мм (свыше 80% частиц проходили через сито 0,074 мм), тщательно перемешивали и разделяли на порции по 50 г. Уголь также высушивали и измельчали до крупности менее 0,1 мм. Образцы шлама и уголь перемешивали и загружали в муфельную печь, выдерживали при температурах 900–1200 °С в течение 90 мин с добавкой угля 8%. Влияние соотношения угля на степень восстановления и содержания Ni в концентрате изучалось при температуре 1100 °С в диапазоне от 5 до 12,5%, время выдержки составлялось такое же 90 мин. После опыта образцы охлаждали до комнатной температуры, выгружали из печи.

Восстановленные образцы измельчались до требуемой крупности (до $-0,074$ мм) и обогащались методом мокрой магнитной сепарации для получения никельсодержащего концентрата при индукции магнитного поля 0,32 Тл. При такой индукции магнитного поля



Рис. 2. Блок-схема экспериментальной процедуры

Fig. 2. Flowchart of the experimental procedure

Таблица 3

Состав углей месторождений На Зыонг и Ванг Дань
Composition of coals from Na Duong and Vang Danh deposits

Состав	Сернистый уголь (На Зыонг)	Антрацитовый уголь (Ванг Дань)
Зольность (Ak), %	27,56	12
Летучие вещества, %	33,66	7,5
Сера, %	7,66	< 0,5

удается эффективно ограничить попадание большого количества примесей с низкой магнитной восприимчивостью в магнитный продукт, что обеспечивает получение концентрата с высоким содержанием никеля. Подробная схема эксперимента приведена на рис. 2.

Магнитный продукт после магнитной сепарации подвергался сушке, затем взвешивался и анализировался на содержание никеля для расчета степени извлечения (восстановления). Степень извлечения металла характеризуется его содержанием в магнитном продукте и рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_i = \frac{M_t \cdot \%i_t}{M_0 \cdot \%i_0} \cdot 100 = \gamma_t \cdot \frac{\%i_t}{\%i_0}, \% \quad (1)$$

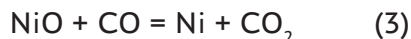
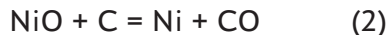
где η_i — степень извлечения металла i , %; M_0 — масса исходного образца шлама, г; M_t — масса магнитного концентрата, г; $\%i_0$ — содержание металла i в исходном образце, %; $\%i_t$ — содержание металла i в магнитном концентрате, %; γ_t — выход магнитного продукта, %.

Для получения сравнительных результатов при тех же условиях между антрацитом и сернистым углем, были использованы два типа угля из различных угольных месторождений Вьетнама, а именно: образец серосодержащего угля из месторождения На Зыонг (сернистый уголь) и антрацит из месторождения Ванг Дань (антрацитовый уголь). Химический состав этих двух типов угля, использованных в эксперименте, представлен в табл. 3. Образец сернистого угля содержит 7,66% серы.

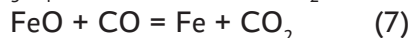
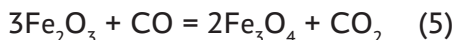
Результаты и обсуждение

Влияние температуры на процесс восстановления

Целью восстановительного обжига является перевод железосодержащих минералов, обладающих низкой магнитной восприимчивостью, в фазу металлического железа (а также возможное образование магнетита). Оксид никеля также восстанавливается до металлического никеля. Восстановительные реакции могут происходить напрямую с углеродом (реакция 2) или косвенно — с участием CO, образующегося по реакции Будуара (см. реакции 3 и 4):



Для железа восстановительные процессы происходят аналогично, но могут идти ступенчато по степеням окисления (см. реакции 5–7):



Образование ферро- и никельсодержащих металлических фаз с сильными магнитными свойствами способствует дальнейшему магнитному обогащению с отделением никеля от немагнитных минералов-примесей. При температуре выше 1000 °С происходит диффузия железа и никеля с образованием более крупных частиц ферроникеля, что благоприятно сказывается на извлечении при магнитной сепарации.

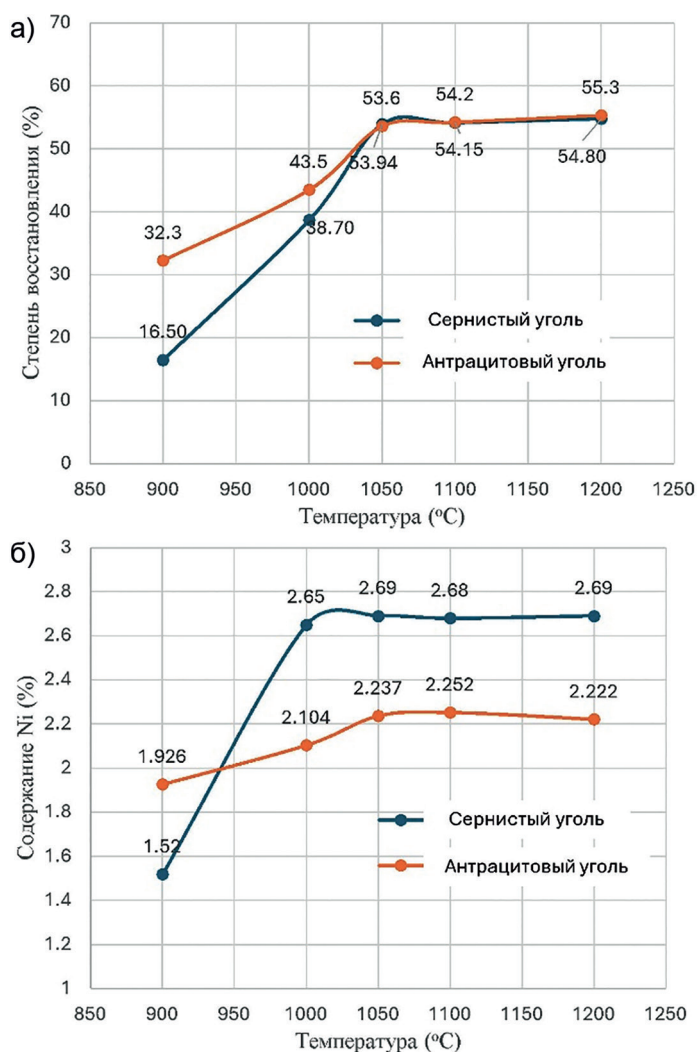


Рис. 3. Влияние температуры на (а) степень извлечения (восстановления) Ni и (б) содержание Ni в магнитном концентрате

Fig. 3. Influence of temperature on (a) the degree of Ni extraction (reduction) and (b) the Ni content in the magnetic concentrate

Дополнительно следует отметить участие серы в процессе восстановления. Как уже упоминалось ранее, сера может взаимодействовать с железом с образованием немагнитного FeS, что уменьшает количество железа, переходящего в магнитный продукт при сепарации. В результате получается никельсодержащий концентрат с более высокой концентрацией Ni.

Эксперименты проводились при различных температурах и соотношениях угля, при фиксированном времени восстановления 90 мин. Температура восстановления варьировалась от 900 до 1200 °C при массовой доле угля 8%.

Результаты экспериментов представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Как видно из представленных графиков степень восстановления никеля

Таблица 4

Результаты исследования влияния типа угля и температуры восстановления на содержание и степень извлечения никеля

Results of the study on the influence of coal type and reduction temperature on the nickel content and extraction degree

Тип угля	T, °C	Содержание Ni в концентрате, %	Степень восстановления Ni, %
Антрацитовый уголь	900	1,93	32,3
	1000	2,10	43,5
	1050	2,24	53,6
	1100	2,25	54,2
	1200	2,22	55,3
Сернистый уголь	900	1,52	16,50
	1000	2,65	38,70
	1050	2,69	53,94
	1100	2,68	54,15
	1200	2,69	54,80

растет с повышением температуры от 900 до 1050 °C. Дальнейшее повышение температуры фактически не приводит к повышению степени восстановления и содержания никеля в продукте.

Показано, что выход никеля и его содержание в магнитных концентратах при использовании сернистого угля были выше, чем при использовании антрацита. Стоит отметить, что при температурах ниже 1050°C восстановление при добавке антрацита угля является более эффективным (см. рис. 3, а). При этом содержание Ni в концентрате, полученном с использованием сернистого угля в качестве восстановителя, в среднем в 1,2 раза выше по сравнению со случаем применения антрацитового угля (см. рис. 3, б). Эти различия свидетельствуют о том, что содержание серы в угле способствовало образованию сульфидных соединений железа с низкой магнитной восприимчивостью, что ограничивало их переход в магнитный продукт (см. табл. 4).

Кроме того, было отмечено, что при температуре 1100 °C в образцах наблю-

далось значительное оплавление, что создавало трудности на этапе дробления после восстановления.

Результаты исследования также показали, что при температуре восстановления 1050 °C содержание и степень извлечения никеля лишь незначительно отличались от показателей при 1100 °C.

Влияние соотношения угля

Уголь является основным источником углерода для восстановительных реакций. Кроме того, в сернистом угле содержится сера, поэтому изменение количества подаваемого угля также сопровождается изменением количества вводимой серы, что позволяет ограничить восстановление железа.

Исследование по влиянию соотношения угля изучалось при температуре 1100 °C с изменением содержания угля в диапазоне от 5 до 12,5%. Время восстановления было 90 мин. После восстановления образец подвергали магнитной сепарации при индукции магнитного поля 0,32 Тл. Результаты представлены на рис. 4 и табл. 5.

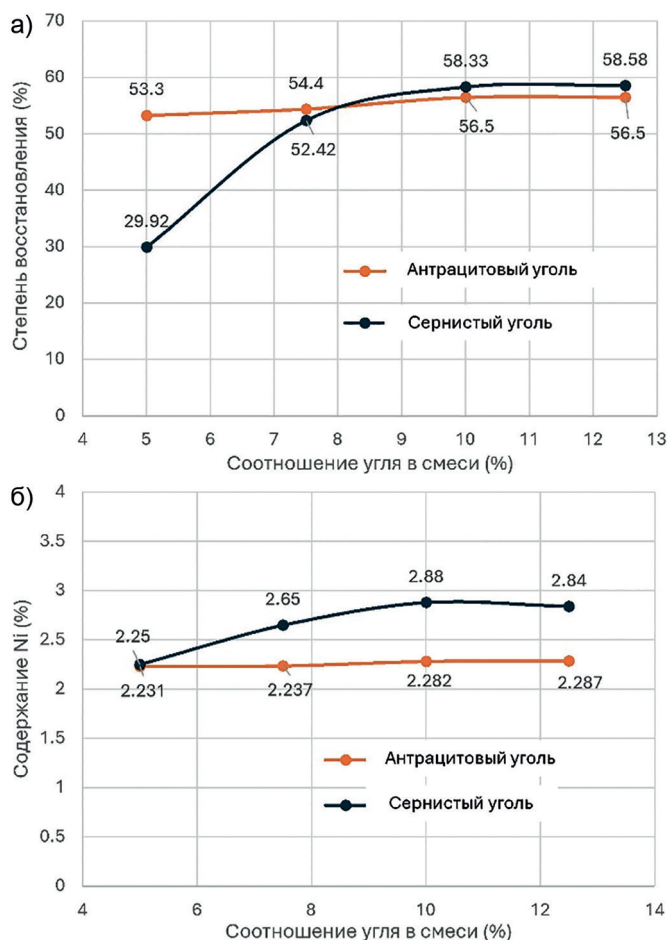


Рис. 4. Влияние соотношения угля на (а) степень извлечения (восстановления) Ni и (б) содержание Ni в магнитном концентрате

Fig. 4. Influence of coal content on (a) the degree of Ni extraction (reduction) and (b) the Ni content in the magnetic concentrate

Результаты исследований, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что в обоих случаях — при использовании антрацитового и сернистого угля — увеличение содержания угля в смеси с 5 до 10% приводит к монотонному росту степени восстановления никеля, что, в свою очередь, способствует повышению его извлечения в магнитный концентрат после магнитной сепарации. Однако при дальнейшем увеличении содержания угля до 12,5% степень восстановления металла достигает

максимального значения, а содержание никеля в полученном магнитном концентрате практически не изменяется. Таким образом, результаты исследования влияния соотношения угля в смеси на степень восстановления и содержание Ni показали, что оптимальное соотношение угля в смеси составляет 10%, при котором содержание никеля в обогащенном образце достигает 2,88%, что примерно в 2,5 раза превышает его содержание в исходном шламе. Также следует отметить, что использование сер-

Таблица 5

Результаты исследования влияния содержания угля на степень восстановления и содержание никеля в магнитном концентрате

Results of the study on the influence of coal content on the extraction degree and nickel content in the magnetic concentrate

Тип угля	Соотношение угля в смеси (%)	Содержание Ni в концентрате, %	Степень восстановления Ni, %
Антрацитовый уголь	5	2,23	53,3
	7,5	2,24	54,4
	10	2,28	56,5
	12,5	2,29	56,5
Сернистый уголь	5	2,25	29,92
	7,5	2,65	52,42
	10	2,88	58,33
	12,5	2,84	58,58

нистого угля способствует повышению содержания Ni в конечном продукте по сравнению со случаем применения антрацитового угля.

Аналогично предыдущему случаю, содержание никеля в магнитном концентрате при использовании сернистого угля выше, чем при использовании антрацитового угля.

Помимо извлечения никеля, в ходе проведенных экспериментов также была зафиксирована значительная концентрация кобальта в магнитном концентрате, степень его обогащения оказалась сопоставимой с показателями для никеля.

Согласно полученным данным, содержание Co увеличивается с 0,26% (в исходном образце шлама) до 0,62% (в конечном магнитном концентрате), что соответствует увеличению примерно в 2,5 раза, аналогично результатам для никеля. При этом степень восстановления Co превышает 57% при использовании 10% угля в восстановительной смеси.

Образование сульфида железа в продукте после восстановления

Согласно литературным данным [18] повышение эффективности извлечения

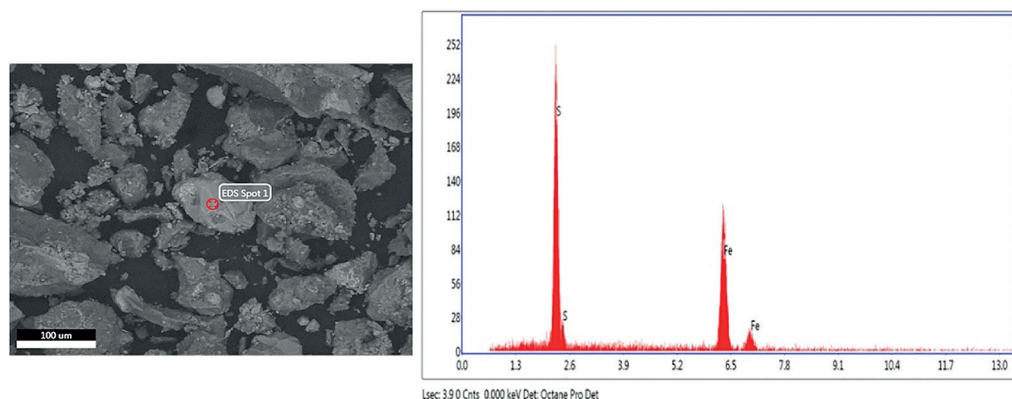


Рис. 5. Результаты анализа концентрата методом SEM-EDS после восстановления при 1100 °C

Fig. 5. SEM-EDS analysis results of the concentrate after reduction at 1100 °C

никеля в концентрат связано с образованием сульфидов железа. Для изучения образования сульфида железа в восстановленном продукте использовали метод SEM-EDS в образцах, восстановленных при 1100°C, добавке 10% угля и времени 90 мин. Результаты, представленные на рис. 5, показывают наличие частиц, в основном состоящих из Fe и S. Это свидетельствует о том, что сера из угля способствует образованию сульфида железа.

Образование сульфида железа положительно влияет на ограничение содержания железа в концентрате [18–21]. Однако количество таких частиц оказалось невысоким, что можно объяснить низким содержанием серы в смеси для восстановления — всего 0,77% (при содержании серы в угле 7,66%, а доля угля в смеси — 10%). Это значение существенно ниже по сравнению с содержанием железа в руде (29% Fe₂O₃).

Восстановление при добавке Na₂SO₄

На основании вышеописанных результатов исследований можно сделать вывод, что процесс восстановительного обжига с последующей магнитной сепарацией позволяет повысить содержание Ni в концентрате. Однако степень извлечения никеля остаются на относительно низком уровне. Предыдущие исследования показали, что улучшить качество концентрата можно за счет использования серосодержащих добавок, поскольку они способствуют образова-

нию сульфидов железа и тем самым ограничивают его попадание в магнитный продукт. Кроме того, добавки используются с целью интенсификации процесса, понижения температуры плавления шлаковой системы, повышения текучести компонентов в процессе восстановления, что способствует концентрированию восстановленных металлов никеля и кобальта в фазе металлического железа (железо выполняет роль носителя). Это, в свою очередь, повышает эффективность извлечения никеля и кобальта в магнитный концентрат при магнитной сепарации [18–21].

Одной из наиболее эффективных добавок при восстановлении никелевых латеритов является сульфат натрия [16, 18]. Поэтому в работе также исследовали влияние Na₂SO₄ на эффективность процессов восстановления и извлечения никеля. Экспериментальные условия при использовании добавок сульфата натрия были следующими: добавка Na₂SO₄ — 3%, количество — угля 10%, температура — 1100 °C и продолжительность опыта 90 мин. На рис. 6 представлены образцы после восстановления, а в табл. 6 — результаты восстановления.

Изучение морфологии образцов после восстановления (см. рис. 6) показывает, что образцы без добавок имеют пористую структуру, в то время как образцы с Na₂SO₄ — более плотную. Это свидетельствует о том, что добавка способствует формированию шлаковой фазы с более низкой температурой плавления и меньшей вязкостью. Такое изменение

Таблица 6

Результаты восстановления образцов латеритной руды с добавкой Na₂SO₄
Results of reduction of laterite ore samples with Na₂SO₄ additive

Тип угля	Исходный образец		Магнитный продукт		Извлечение, %
	масса, г	% Ni	масса, г	% Ni	
Сернистый уголь (На Зыонг)	50	1,18	12,29	3,66	76,3
Антрацитовый уголь (Ванг Дань)	50	1,18	12,92	3,55	76,8

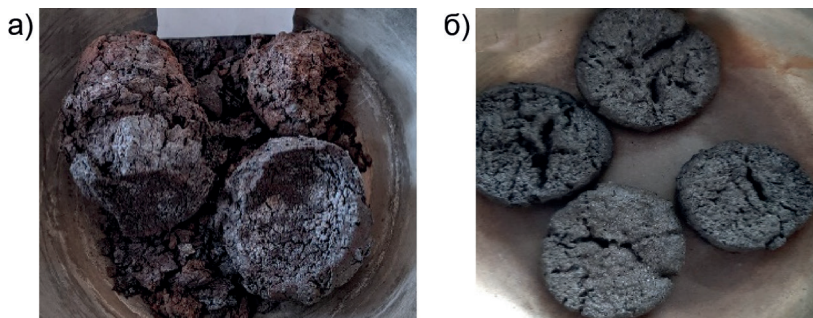


Рис. 6. Изображения образцов после восстановления при 1100 °С: без добавок (а) и с добавлением Na_2SO_4 (б)

Fig. 6. Images of samples after reduction at 1100 °C: without additives (a) and with Na_2SO_4 additive (b)

свойств шлака создает благоприятные условия для диффузии никеля и железа, что, в свою очередь, способствует концентрированию никеля и формированию ферроникелевых частиц с высокой магнитной проницаемостью и увеличенными размерами.

Результаты в табл. 6 показывают, что концентраты с добавкой Na_2SO_4 имеют более высокое содержание и извлечение никеля по сравнению с образцами без добавок (см. табл. 4 и 5). Введение Na_2SO_4 существенно улучшает восстановительный процесс: добавление 3% Na_2SO_4 позволило увеличить содержание никеля в концентрате с 2,88% до 3,66%, а степень извлечения — до 77%.

Несмотря на то, что использование добавки Na_2SO_4 в количестве 3% позволяет повысить эффективность процесса восстановления и степень извлечения никеля, следует отметить, что такая добавка способствует образованию плотных спекшихся агломератов концентрата. Такое спекание затрудняет последующее дробление образцов после восстановления. Кроме того, чрезмерное образование сульфидов железа, окружающих частицы руды, может оказать обратный эффект — оно препятствует восстановлению как железа, так и никеля. Никель, находящийся в составе сульфидов железа, не будет извлекаться в магнитный

концентрат при магнитной сепарации. Таким образом, в дальнейших исследованиях необходимо более тщательно изучить оптимальное содержание данной добавки.

Выводы

Проведенные исследования показали, что используемый в эксперименте уголь из месторождения На Зыонг (сернистый уголь) содержит до 7,66% серы. Такое количество серы оказывает положительное влияние на процесс восстановления. Эксперименты показали, что в образцах после восстановления присутствуют частицы основными компонентами которых являются Fe и S. Несмотря на отсутствие детального анализа формы их существования, можно с уверенностью утверждать, что сера, содержащаяся в угле, приняла участие в образовании сульфидов железа.

Показано, что оптимальная температура для восстановления образцов руды была 1050–1100 °С, а оптимальное соотношение угля в смеси составляет 10%, при котором содержание никеля в обогащенном образце достигает 2,88%, что примерно в 2,5 раза превышает его содержание в исходном шламе.

Установлено, что по сравнению с антрацитом, применение серосодержащего угля позволяет при меньших затратах

получить концентраты с сопоставимой степенью извлечения никеля, но с более высоким его содержанием.

Добавка Na_2SO_4 значительно улучшила процесс восстановления. По сравнению с использованием только угля, добавление Na_2SO_4 в процессе восстановления привело к увеличению содержания никеля в концентрате. При добавлении 3% Na_2SO_4 содержание Ni увеличилось с 2,88% до более чем 3,66%, а степень извлечения достигла 77%.

Помимо извлечения никеля, в ходе проведенных экспериментов также была зафиксирована значительная концентрация кобальта в магнитном концентрате, степень его обогащения оказалась сопоставимой с показателями для никеля.

Проведенное исследование подчеркивает потенциал использования угля с высоким содержанием серы в качестве восстановителя в процессе восстановления и магнитной сепарации для изв-

лечения никеля из низкосортных латеритных руд. Однако необходимы дальнейшие исследования для оптимизации других технологических параметров, таких как время восстановления, пропорции добавок и степень измельчения, с целью разработки комплексной технологической схемы для практического применения.

Авторы выражают благодарность коллегам кафедры «Обогащения руд» Ханойского университета горного дела и геологии за техническую поддержку, оказанную при выполнении данной работы.

В заключение, авторский коллектив выражает искреннюю благодарность за финансовую поддержку, оказанную в рамках научно-исследовательского проекта базового уровня Университета Горного дела и Геологии, номер проекта: T22-37.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stanković S., Kamberović Ž, Friedrich B., Stopić S. R., Sokić M., Marković B., Schippers A. Options for hydrometallurgical treatment of Ni-Co lateritic ores for sustainable supply of nickel and cobalt for European battery industry from South-Eastern Europe and Turkey // *Metals*. 2022, vol. 12, no. 5, pp. 807 – 821. DOI: 10.3390/met12050807.
2. Mamyrbayeva K. K., Kuandykova A. N., Chepushtanova T. A., Merkiybayev Y. S. Review on hydrometallurgical processing technology of lateritic nickel ore for the last 20 years in the world // *Non-ferrous Metals*. 2024, no. 1, pp. 13 – 21. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.03.
3. Pandey N., Tripathy S. K. Recent progress in hydrometallurgical processing of nickel lateritic ore // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023, vol. 76, no. 1, pp. 11 – 30.
4. Шипилова Е. С., Боева Н. М. Ферриплантиты – уникальные образования нижнего железистого горизонта латеритов на примере провинции Фута Джаллон-Мандинго (Западная Африка) / Новое в познании процессов рудообразования. Сборник материалов 11-ой Российской молодежной научно-практической Школы. – М.: ИГЕМ РАН, 2022. – С. 331 – 334.
5. Кондина Е. Ю., Кудрин К. Ю. Латериты в разрезе доюрского основания западной части западно-сибирской плиты // *Уральская минералогическая школа*. – 2024. – № 30. – С. 97 – 99.
6. Авчар А., Чоудхари Б. С. Прогнозирование производительности рыхлителя при добыче латерита на железорудных месторождениях // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2021. – № 1. – С. 73 – 84.
7. Zhen-fang Zhang, Wei-bo Zhang, Zhen-guo Zhang, Xiu-fa Chen Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost // *China Geology*. 2025, vol. 8, no. 1, pp. 187 – 213. DOI: 10.31035/cg2024124.
8. Нгуен В. М., Нгуен Т. Х. Исследование процесса получения наноразмерного порошка никеля водородным восстановлением в неізотермических условиях // *Металлург*. – 2021. – № 2. – С. 69 – 74.

9. Dilshara P., Abeyasinghe B., Premasiri R., Dushyantha N., Ratnayake N., Senarath S., Ratnayake A. S., Batapola N. The role of nickel (Ni) as a critical metal in clean energy transition: applications, global distribution and occurrences, production-demand and phytomining // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024, vol. 259, article 105912. DOI: 10.1016/j.jseaes.2023.105912.

10. Jiale Sun, Hunan University, Haihui Zhou, Zhongyuan Huang The future nickel metal supply for lithium-ion batteries // *Green Chemistry*. 2024, vol. 26, pp. 6926 – 6943.

11. Mohrbacher H., Kern A. Nickel alloying in carbon steel: Fundamentals and applications // *Alloys*. 2023, vol. 2, no. 1, pp. 1 – 28.

12. Vahed A., Mackey P. J. Around the nickel world in eighty days / A virtual tour of world Nickel sulphide and laterite operations and technologies. Materials of the 5th International Symposium on Nickel and Cobalt. Springer Cham. 2021, pp. 3 – 40.

13. Шипилова Е. С., Мамедов В. И. Минералого-петрографические особенности нижнего горизонта железистых латеритов и ферриплантитов провинции Фута Джаллон-Мандинго (Гвинея, Западная Африка) // *Геология рудных месторождений*. — 2022. — Т. 64. — № 5. — С. 595 – 614.

14. Nurjaman F., Suharno B. Study of low-grade nickel laterite processing using palm shell charcoal as reductant // *Materials Science Forum*. 2020, vol. 1000, pp. 436 – 446.

15. Wang W., Hu S. Preparation of nickel-iron concentrate from low-grade laterite nickel ore by solid-state metalized reduction and magnetic separation // *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 9, pp. 926 – 940. DOI: 10.3390/min14090926.

16. Phung T. T. Nickel recovery in tailing from the chromite beneficiation process in Mau Lam, Thanh Hoa by the reduction roasting-magnetic separation process // *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2024, vol. 65, no. 3, pp. 44 – 50.

17. Dung L.T. Characteristics of nickel- and cobalt-bearing iron-manganese nodules in chromite placer deposits in the Co Dinh area, Thanh Hoa Province // *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2023, vol. 65, no. 11, pp. 23 – 31.

18. Fakhreza Abdul, Ramadhewi Tara Nur Kusmayadi, Fahny Ardian, Yuli Setiyorini, Muhammad Bagas Ananda, Sungging Pintowantoro Selective reduction of nickel from lateritic ore using Na_2SO_4 in an NH_3 atmosphere // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024, vol. 10, article 100989. DOI: 10.1016/j.csee.2024.100989.

19. Zappala L., McDonald R. Nickel laterite beneficiation and potential for upgrading using high temperature methods: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023, vol. 45, no. 7, pp. 767 – 789.

20. Fajar Nurjaman, Yuliana Sari, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, Ulin Herlina, Muhammad Miftahurrahman, Dedi Priadi, Deni Ferdian, Bambang Suharno Effect of sulfur in the reductants on sulfidation mechanism of nickel laterite // *Indonesian Mining Journal*. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 93 – 103.

21. Suharno B., Nurjaman F., Ramadini C., Shofi A. Additives in selective reduction of lateritic nickel ores: Sodium sulfate, sodium carbonate, and sodium chloride // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 2145 – 2159. **WAS**

REFERENCES

1. Stanković S., Kamberović Ž, Friedrich B., Stopić S. R., Sokić M., Marković B., Schippers A. Options for hydrometallurgical treatment of Ni-Co lateritic ores for sustainable supply of nickel and cobalt for European battery industry from South-Eastern Europe and Turkey. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 5, pp. 807 – 821. DOI: 10.3390/met12050807.

2. Mamyrbayeva K. K., Kuandykova A. N., Chepushtanova T. A., Merkiybayev Y. S. Review on hydrometallurgical processing technology of lateritic nickel ore for the last 20 years in the world. *Non-ferrous Metals*. 2024, no. 1, pp. 13 – 21. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.03.

3. Pandey N., Tripathy S. K. Recent progress in hydrometallurgical processing of nickel lateritic ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023, vol. 76, no. 1, pp. 11 – 30.

4. Shipilova E. S., Boeva N. M. Ferriplantites – unique formations of the lower iron horizon of laterites: A case study of the Futa Jallon-Mandingo province (West Africa). *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya. Sbornik materialov 11-oy Rossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy Shkoly* [Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya, Materials of the 11th Russian Youth Scientific and Practical School], Moscow, IGEM RAN, 2022, pp. 331 – 334. [In Russ].

5. Kondina E. Yu., Kudrin K. Yu. Laterites in the section of the pre-Jurassic basement of the western part of the West Siberian Plate. *Uralskaya mineralogicheskaya shkola*. 2024, no. 30, pp. 97 – 99. [In Russ].
6. Avchar A., Choudhary B. S. Prediction of ripper performance in laterite mining at iron ore deposits. *Journal of Mining Sciences*. 2021, no. 1, pp. 73 – 84. [In Russ].
7. Zhen-fang Zhang, Wei-bo Zhang, Zhen-guo Zhang, Xiu-fa Chen Nickel extraction from nickel laterites: Processes, resources, environment and cost. *China Geology*. 2025, vol. 8, no. 1, pp. 187 – 213. DOI: 10.31035/cg2024124.
8. Nguyen V. M., Nguyen T. Kh. Investigation of the process of obtaining nanoscale nickel powder by hydrogen reduction under non-isothermal conditions. *Metallurg*. 2021, no. 2, pp. 69 – 74. [In Russ].
9. Dilshara P., Abeyasinghe B., Premasiri R., Dushyantha N., Ratnayake N., Senarath S., Ratnayake A. S., Batapola N. The role of nickel (Ni) as a critical metal in clean energy transition: applications, global distribution and occurrences, production-demand and phytomining. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024, vol. 259, article 105912. DOI: 10.1016/j.jseaes.2023.105912.
10. Jiale Sun, Hunan University, Haihui Zhou, Zhongyuan Huang The future nickel metal supply for lithium-ion batteries. *Green Chemistry*. 2024, vol. 26, pp. 6926 – 6943.
11. Mohrbacher H., Kern A. Nickel alloying in carbon steel: Fundamentals and applications. *Alloys*. 2023, vol. 2, no. 1, pp. 1 – 28.
12. Vahed A., Mackey P. J. Around the nickel world in eighty days. *A virtual tour of world Nickel sulphide and laterite operations and technologies. Materials of the 5th International Symposium on Nickel and Cobalt*. Springer Cham. 2021, pp. 3 – 40.
13. Shipilova E. S., Mamedov V. I. Mineralogical and petrographic features of the lower horizon of iron laterites and ferriplantites in the Futa Jallon-Mandingo province (Guinea, West Africa). *Geology of Ore Deposits*. 2022, vol. 64, no. 5, pp. 595 – 614. [In Russ].
14. Nurjaman F., Suharno B. Study of low-grade nickel laterite processing using palm shell charcoal as reductant. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 1000, pp. 436 – 446.
15. Wang W., Hu S. Preparation of nickel-iron concentrate from low-grade laterite nickel ore by solid-state metalized reduction and magnetic separation. *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 9, pp. 926 – 940. DOI: 10.3390/min14090926.
16. Phung T. T. Nickel recovery in tailing from the chromite beneficiation process in Mau Lam, Thanh Hoa by the reduction roasting-magnetic separation process. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2024, vol. 65, no. 3, pp. 44 – 50.
17. Dung L.T. Characteristics of nickel- and cobalt-bearing iron-manganese nodules in chromite placer deposits in the Co Dinh area, Thanh Hoa Province. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2023, vol. 65, no. 11, pp. 23 – 31.
18. Fakhreza Abdul, Ramadhewi Tara Nur Kusmayadi, Fahny Ardian, Yuli Setiyorini, Muhammad Bagas Ananda, Sungging Pintowantoro Selective reduction of nickel from lateritic ore using Na_2SO_4 in an NH_3 atmosphere. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024, vol. 10, article 100989. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100989.
19. Zappala L., McDonald R. Nickel laterite beneficiation and potential for upgrading using high temperature methods: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2023, vol. 45, no. 7, pp. 767 – 789.
20. Fajar Nurjaman, Yuliana Sari, Anton Sapto Handoko, Fathan Bahfie, Ulin Herlina, Muhammad Miftahurrahman, Dedi Priadi, Deni Ferdian, Bambang Suharno Effect of sulfur in the reductants on sulfidation mechanism of nickel laterite. *Indonesian Mining Journal*. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 93 – 103.
21. Suharno B., Nurjaman F., Ramadini C., Shofi A. Additives in selective reduction of lateritic nickel ores: Sodium sulfate, sodium carbonate, and sodium chloride. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 2145 – 2159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фунг Тиен Тхуат¹ — магистр, старший преподаватель,

e-mail: phungtienthuat@hmg.edu.vn,

Чан Чунг Той¹ — канд. техн. наук, старший преподаватель,

e-mail: trantrungtoi@hmg.edu.vn,

*Фам Ван Луан*¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: phamvanluan@humg.edu.vn,
Зиновеев Дмитрий Викторович — канд. техн. наук,
доцент, НИТУ МИСИС,
e-mail: zinoveev.dv@misis.ru,
*Нгуен Хуинь*² — канд. техн. наук,
e-mail: Nguyenhuynh1586@gmail.com,
*Нгуен Ван Минь*² — канд. техн. наук,
e-mail: chinhnhan88@gmail.com,

¹ Ханойский университет горного дела и геологии,
Ханой, Вьетнам,

² Технологический институт, Ханой, Вьетнам.

Для контактов: Нгуен Ван Минь, e-mail: chinhnhan88@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Phung Tien Thuat*¹, Master, Senior Lecturer,
e-mail: phungtienthuat@humg.edu.vn,
*Tran Trung Toi*¹, Ph.D. in Technical Sciences,
Senior Lecturer, e-mail: trantrungtoi@humg.edu.vn,
*Pham Van Luan*¹, Ph.D. in Technical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: phamvanluan@humg.edu.vn,
D. V. Zinoveev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
e-mail: zinoveev.dv@misis.ru,
*Nguyen Huynh*², Ph.D. in Technical Sciences,
e-mail: Nguyenhuynh1586@gmail.com,
*Nguyen Van Minh*², Ph.D. in Technical Sciences,
e-mail: chinhnhan88@gmail.com,

¹ Hanoi University of Mining and Geology,
Hanoi 100000, Vietnam,

² Institute of Technology, Hanoi 100000, Vietnam.

Corresponding author: Nguyen Van Minh, e-mail: chinhnhan88@gmail.com.

Получена редакцией 03.06.2025; получена после рецензии 27.07.2025; принята к печати 10.08.2025.

Received by the editors 03.06.2025; received after the review 27.07.2025; accepted for printing 10.08.2025.

