

**Оригинальная статья**

УДК 669.187

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ  
КУЗБАССА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛЮСОВ  
ДЛЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ**

© 2024 г. А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, С. А. Полежаев

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** С целью обоснования возможности и целесообразности производства из местного сырья магнийсодержащих флюсов, присаживаемых в конвертерный шлак при использовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров, проведен комплекс исследований. Изучен процесс кислотного выщелачивания оксида магния из отходов обогащения серпентин-магнетитовых руд Абагурской аглофаборики (закономерности влияния вида применяемых кислот, их концентрации, температуры пульпы и гранулометрического состава исходных отходов). Согласно полученным закономерностям степень извлечения оксида магния из серпентина при использовании для выщелачивания соляной, серной и азотной кислот увеличивается при повышении их концентрации с 5 до 20 %, а при дальнейшем росте концентрации указанных кислот – изменяется незначительно и, в ряде случаев, разнонаправленно. При этом абсолютные значения степени выщелачивания оксида магния имеют высокие значения уже при концентрации перечисленных кислот на уровне 5 %. Показано, что повышение температуры пульпы с 30 до 80 °С значительно увеличивает степень извлечения окиси магния из серпентина при прочих равных условиях, а дальнейшее повышение температуры пульпы вплоть до 110 °С уже не оказывает значимого влияния на степень извлечения оксида магния. Установлено влияние повышения степени измельчения серпентина на степень извлечения из него оксида магния вне зависимости от вида применяемой кислоты при прочих равных условиях. Дополнительно проведенными исследованиями кинетики рассматриваемого процесса кислотного выщелачивания подтверждено значимое влияние повышения температуры на увеличение степени извлечения оксида магния из серпентина. Установлено влияние увеличения продолжительности рассматриваемого процесса на его эффективность. На основании проведенных исследований предложен вариант технологических схем комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд, включающий в себя выщелачивание оксида магния из серпентина с последующей нейтрализацией маточного раствора и извлечением из него ценных компонентов.

**Ключевые слова:** магнезиальные флюсы, горячие ремонты футеровки, кислородный конвертер, отходы обогащения руд, кислотное выщелачивание

**Для цитирования:** Уманский А.А., Протопопов Е.В., Полежаев С.А. Перспективы использования минерально-сырьевой базы Кузбасса при производстве магнезиальных флюсов для конвертерной плавки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):110–119. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-110-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119)

**Original article**

**PROSPECTS FOR THE USE OF THE KUZBASS MINERAL RESOURCE BASE IN THE  
PRODUCTION OF MAGNESIA FLUXES FOR CONVERTER MELTING**

© 2024 A. A. Umanskii, E. V. Protopopov, S. A. Polezhaev

**Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

**Abstract.** In order to substantiate the possibility and expediency of producing magnesium-containing fluxes from local raw materials, which are embedded in converter slag using the technology of applying slag garnishing to the lining of oxygen converters, a set of studies has been conducted. The indicators of the process of acidic leaching of magnesium oxide from the waste of the enrichment of serpentine-magnetite hands of the Abagur sintering plant, including the patterns of influence of the type of acids used, their concentration, pulp temperature and granulometric composition of the initial waste, are studied. According to the obtained patterns, the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine when used for leaching hydrochloric, sulfuric and nitric acids increases with an increase in their concentration from 5% to 20%, and with a further increase in the concentration of these acids changes slightly and, in some cases, in different directions. It is shown that an increase in pulp temperature from 30 °C to 80 °C significantly increases the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine, all other things being equal, and a further increase in pulp temperature up to 110 °C no longer has a significant effect on the degree of extraction of magnesium oxide. A significant effect of increasing the degree of grinding of serpentine on the degree of extraction of magnesium oxide from it, regardless of the type of acid used, other things being equal, has been established. Additionally, studies of the kinetics of the acid leaching process under consideration confirmed the significant effect of an increase in temperature on an increase in the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine, and also established the effect of an increase in the duration of the process under consideration on its effectiveness. Based on the conducted research, variants of technological schemes for the complex processing of serpentine-magnetite ores are proposed, including the leaching of magnesium oxide from serpentine, followed by neutralization of the mother liquor and extraction of valuable components from it.

**Keywords:** magnesia fluxes, hot lining repairs, oxygen converter, ore dressing waste, acid leaching

**For citation:** Umanskii A.A., Protopopov E.V., Polezhaev S.A. Prospects for the use of the Kuzbass mineral resource base in the production of magnesia fluxes for converter melting. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):110–119. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-110-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119)

## Введение

В последние десятилетия широкое применение в отечественных и зарубежных кислородно-конвертерных цехах находит технология нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертерных агрегатов [1 – 3]. Применение указанного метода горячих ремонтов футеровки кислородных конвертеров позволяет значительно (до 15 – 20 %) повысить стойкость рабочего слоя футеровки [4 – 6], а, следовательно, и увеличить продолжительность кампании конвертера, повысить производительность кислородно-конвертерных цехов [7 – 9].

Технология нанесения шлакового гарнисажа заключается в раздуве специально подготовленного конечного шлака на стенки конвертера пу-

тем подачи азота через верхнюю фурму. При этом одним из основных требований к применяемому шлаку является повышенное содержание в нем оксида MgO (до 8 – 12 %) [10 – 12]. На практике увеличение содержания MgO в конвертерном шлаке добиваются путем присадки по ходу плавки специальных магнезиальных флюсов [13 – 15]. При этом для быстрого растворения указанных флюсов в формирующихся конвертерных шлаках разработан ряд составов с повышенным содержанием оксидов магния и потерь при прокаливании ( $\Delta m_{\text{прк}}$ ) [16; 17]. Ввод флюсов за счет повышенных потерь при прокаливаемости (табл. 1) приводит к разрыву флюсов, позволяя им быстро усваиваться шлаком [18 – 20].

Т а б л и ц а 1

**Кинетика выщелачивания серпентина 20 %-ым раствором серной кислоты  
(фракция серпентина 0,4 мм)**

**Table 1. Kinetics of serpentine leaching with 20% sulfuric acid solution (0.4 mm serpentine fraction)**

| $t_{\text{пуль}}, ^\circ\text{C}$ | Продолжительность процесса, ч | Степень извлечения компонентов, % |      |      |                                |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------|------|--------------------------------|
|                                   |                               | MgO                               | NiO  | CoO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 80                                | 2                             | 84                                | 92,0 | 94,0 | 58                             |
| 90                                | 4                             | 83                                | 97,0 | 99,0 | 58                             |
|                                   | 6                             | 92                                | 98,0 | 99,4 | 71                             |
| 100                               | 2                             | 95                                | 99,7 | 99,7 | 70                             |

Необходимо отметить, что высокомагнезиальные флюсы имеют достаточно высокую стоимость, что в значительной степени обусловлено удаленностью производителей рассматриваемого вида продукции от основных потребителей, то есть значительными транспортными расходами. Это особенно актуально для АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») в силу географических особенностей месторасположения. Одним из эффективных способов решения этой проблемы является организация производства высокомагнезиальных флюсов в Кузбассе с использованием местных материалов.

Одним из перспективных источников оксида MgO для производства высокомагнезиальных флюсов являются серпентин-магнетитовые руды или хвосты обогащения таких руд. Серпентины предоставляют собой силикатные минералы (магнево-железистые гидросиликаты) [21 – 23]. На сегодняшний день в хвостохранилище Абагурской агломерационно-обогащительной фабрики накоплены значительные запасы серпентина (порядка 4 млн т) в отходах обогащения серпентин-магнетитовых руд Тейского месторождения. Переработка таких отходов с извлечением оксида MgO является перспективным направлением как с точки зрения организации производства высокомагнезиальных флюсов из местного сырья, так и с точки зрения уменьшения экологического ущерба от деятельности горно-металлургических предприятий.

### Методика проведения исследований

С целью обоснования оптимальной технологической схемы извлечения оксида MgO из хвостов обогащения серпентин-магнетитовых руд Тейского месторождения проведены лабораторные исследования по извлечению ценных компонентов из серпентина.

Необходимо отметить, что схема в общем виде включает в себя следующие стадии:

- 1 – выделение серпентина из хвостов обогащения Абагурской фабрики;
- 2 – разложение серпентина минеральными кислотами;
- 3 – фракционное извлечение ценных компонентов из маточных растворов;
- 4 – переработка побочных растворов на удобрения, их рециркуляция и регенерация;
- 5 – переработка и использование кремнеземистого остатка.

В ходе проведения исследований выщелачивание проводили в стеклянном реакторе с обратным холодильником, применение которого

обусловлено необходимостью сохранения постоянного объема пульпы и отношения жидкой и твердой фаз. Выщелачивание серпентина проводили без и с нагреванием пульпы, при этом фактически выщелачивание без нагрева протекало при повышенных (до 30 – 35 °С) температурах. Для регулирования температуры в реакционной зоне применяли ультратермостат. Проводили интенсивное перемешивание реакционной массы механической мешалкой.

При определении количества выщелачивающего реагента, необходимого для полного разложения серпентина, исходили из условия, что все содержащиеся в серпентине оксиды металлов переходят в раствор. По окончании процесса проводили фильтрацию пульпы в горячем состоянии. Полученные кремнеземистые отходы промывали водой до отрицательной реакции на кислотный анион, затем высушивали. Расчеты степени извлечения компонента проводили на основании данных химического анализа отходов и содержания компонентов в исходном серпентине:

$$n = \frac{g}{G} 100 \%,$$

где  $g$  и  $G$  – количество компонента, перешедшего в раствор, и его количество в исходном серпентине.

Для выщелачивания серпентина использовали серную, соляную и азотную кислоты, а также сульфат аммония, являющийся побочным продуктом коксохимического производства. В ходе проведения исследований анализировали влияние на степень выщелачивания оксида MgO из серпентина следующих параметров: концентрация кислоты, температура пульпы, гранулометрический состав (степень измельчения) серпентина.

При рассмотренном методе кислотного выщелачивания серпентина проводится первичное разделение растворимой и нерастворимой частей, которые отделяются друг от друга фильтрацией или декантацией. Полученный маточный раствор содержит смесь солей магния, а также оксиды железа, алюминия, никеля, кобальта, содержащихся в исходном серпентине. Кроме перечисленных компонентов маточные растворы содержат до 50 г/л остаточной свободной кислоты, в результате с точки зрения дальнейшей переработки необходимо провести ее нейтрализацию. С целью обоснования оптимального метода нейтрализации маточного раствора проведены исследования с использованием различных компонентов (нейтрализаторов).

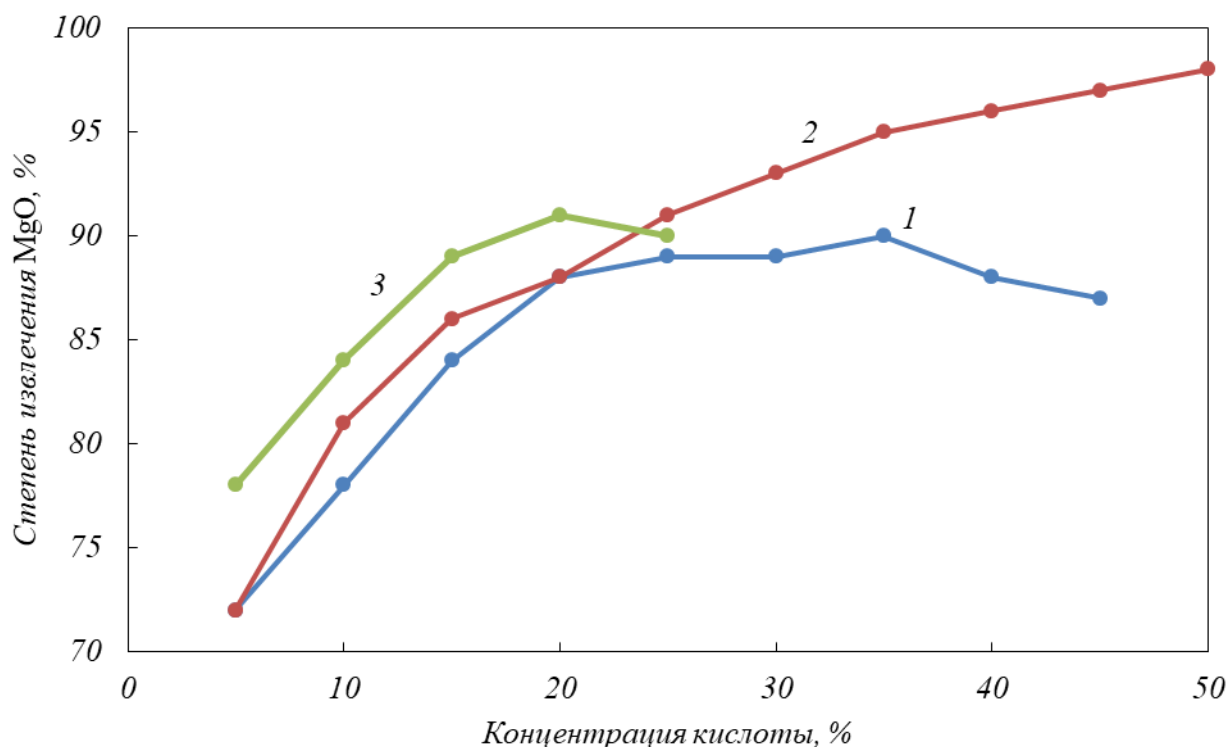


Рис. 1. Влияние концентрации кислот на степень извлечения оксида MgO из серпентина при выщелачивании:  
1 – 3 – серная, азотная, соляная кислоты

Fig. 1. Effect of acid concentration on the degree of extraction of MgO oxide from serpentine during leaching:  
1 – 3 – sulfuric acid, nitric acid, hydrochloric acid

Исследования применения для нейтрализации кислоты обожженного серпентина проводили при нормальной температуре и температуре кипения пульпы. В процессе нейтрализации пульпу подвергали интенсивному перемешиванию. Проведены исследования по нейтрализации свободной кислоты маточного раствора следующими компонентами: газообразный или водный раствор 25 % аммиака и 1n раствор карбоната аммония.

#### Результаты исследований и их обсуждение

По полученным данным (рис. 1) степень извлечения оксида MgO из серпентина для всех видов кислот, используемых при выщелачивании, имеет тенденцию к увеличению при повышении их концентрации с 5 до 20 %, а при дальнейшем росте концентрации указанных кислот степень извлечения возрастает на небольшую величину или несколько снижается. Необходимо отметить, что абсолютные значения степени выщелачивания оксида MgO достаточно высоки уже при концентрации кислот примерно 5 %.

Установлено, что при повышении температуры пульпы  $t_{\text{пуль}}$  в диапазоне от 30 до 80 °C при прочих равных условиях имеет место интенсивное увеличение степени извлечения окиси магния из серпентина вне зависимости от вида используемой кислоты и ее концентрации (рис. 2). Дальнейшее повышение температуры пульпы

вплоть до 110 °C уже не оказывает значимого влияния на степень извлечения оксида MgO.

Определено, что увеличение степени измельчения серпентина обуславливает значительное повышение степени извлечения из него оксида магния вне зависимости от вида применяемой кислоты (рис. 3).

С целью формирования более полного представления о механизмах выщелачивания оксида MgO из серпентина проведены дополнительные исследования кинетики рассматриваемого процесса, в результате чего подтверждено влияние повышения температуры и продолжительности выщелачивания на увеличение степени извлечения оксида MgO из серпентина (табл. 1, 2).

В рамках исследований нейтрализации свободной кислоты в маточном растворе показано (табл. 3), что с увеличением добавленного в раствор количества серпентина концентрация свободной кислоты значительно уменьшается. При этом маточный раствор обогащается магниевыми солями, а также никелем и кобальтом. Кроме того, в раствор переходит кальций, что загрязняет продукт. Определено, что замена сырого серпентина обожженным не приводит к заметному улучшению процесса.

При исследовании нейтрализации свободной кислоты (табл. 4) установлено, что железо во всех случаях полностью выделяется в виде гидроксида, а основная часть никеля и кобальта реаги-

Т а б л и ц а 2

**Кинетика выщелачивания серпентина серной кислотой ( $t_{\text{пул}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )****Table 2. Kinetics of leaching of serpentinite with sulfuric acid ( $t_{\text{пул}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**

| Продолжительность процесса, ч | Концентрация кислоты, % | Степень извлечения компонентов, % |     |     |                                | Степень использования кислоты, % |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|--------------------------------|----------------------------------|
|                               |                         | MgO                               | NiO | CoO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                  |
| 1                             | 10                      | 82                                | 82  | 81  | 59                             | 65                               |
| 2                             |                         | 84                                | 87  | 82  | 64                             | 77                               |
| 3                             |                         | 88                                | 83  | 83  | 71                             | 82                               |
| 1                             | 20                      | 87                                | 86  | 82  | 73                             | 77                               |
| 2                             |                         | 90                                | 88  | 85  | 76                             | 83                               |
| 3                             |                         | 92                                | 88  | 90  | 84                             | 84                               |
| 1                             | 30                      | 87                                | 88  | 91  | 73                             | 84                               |
| 2                             |                         | 89                                | 87  | 93  | 84                             | 86                               |
| 3                             |                         | 93                                | 84  | 93  | 86                             | 88                               |

Т а б л и ц а 3

**Результаты нейтрализации солянокислотного маточного раствора необожженным серпентином****Table 3. Results of neutralization of hydrochloric acid mother liquor with unfired serpentine**

| Концентрация свободной кислоты, г/л |                     | Масса серпентина, г | Состав раствора, % |                                |     |                     |                                |     |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|-----|---------------------|--------------------------------|-----|
|                                     |                     |                     | до нейтрализации   |                                |     | после нейтрализации |                                |     |
| до нейтрализации                    | после нейтрализации |                     | MgO                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO |
| 40                                  | 7                   | 100                 | 98                 | 19                             | 1,0 | 118                 | 16                             | 1,3 |
| 36                                  | 9                   | 50                  | 98                 | 19                             | 0,8 | 112                 | 17                             | 1,2 |
| 40                                  | 20                  | 30                  | 97                 | 19                             | 0,8 | 105                 | 19                             | 1,1 |

Т а б л и ц а 4

**Результаты исследований фракционного осаждения компонентов на первой стадии нейтрализации аммиаком****Table 4. The results of studies of fractional precipitation of components at the first stage of ammonia neutralization**

| Концентрация свободной кислоты, г/л                                                           | рН осаждения | Масса сухого осадка, г | Состав осадка, % |                                |                  |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------|------|
|                                                                                               |              |                        | MgO              | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | NiO  | CoO  |
| Маточный раствор, полученный выщелачиванием серпентина азотной кислотой                       |              |                        |                  |                                |                  |      |      |
| 12                                                                                            | 5,1          | 3,4                    | 0,5              | 68,5                           | 0,05             | 0,5  | 0,13 |
| 15                                                                                            | 4,9          | 5,8                    | 0,4              | 65,3                           | 0,09             | 0,2  | 0,12 |
| 21                                                                                            | 5,4          | 7,6                    | 0,4              | 62,9                           | 0,12             | 0,1  | 0,12 |
| 22                                                                                            | 5,5          | 6,1                    | 0,7              | 63,7                           | 0,22             | 0,2  | 0,11 |
| 23                                                                                            | 5,1          | 6,9                    | 0,7              | 66,1                           | 0,12             | 0,3  | 0,08 |
| 27                                                                                            | 5,6          | 8,6                    | 0,7              | 61,3                           | 0,11             | 0,1  | 0,12 |
| 44                                                                                            | 4,9          | 7,6                    | 0,2              | 66,7                           | 0,06             | 0,2  | 0,11 |
| Маточный раствор, полученный после предварительного выщелачивания серпентина соляной кислотой |              |                        |                  |                                |                  |      |      |
| 4                                                                                             | 7,0          | 5,7                    | 12,0             | 49,3                           | 0,18             | 0,07 | 0,26 |
| 4                                                                                             | 7,2          | 4,1                    | 9,8              | 53,8                           | 0,14             | 0,12 | 0,30 |
| 7                                                                                             | 7,6          | 7,4                    | 7,4              | 51,4                           | 0,04             | 0,06 | 0,10 |
| 9                                                                                             | 7,0          | 9,6                    | 13,6             | 51,4                           | 0,13             | 0,04 | 0,13 |
| 21                                                                                            | 9,8          | 10,2                   | 10,2             | 50,5                           | 0,24             | 0,04 | 0,13 |

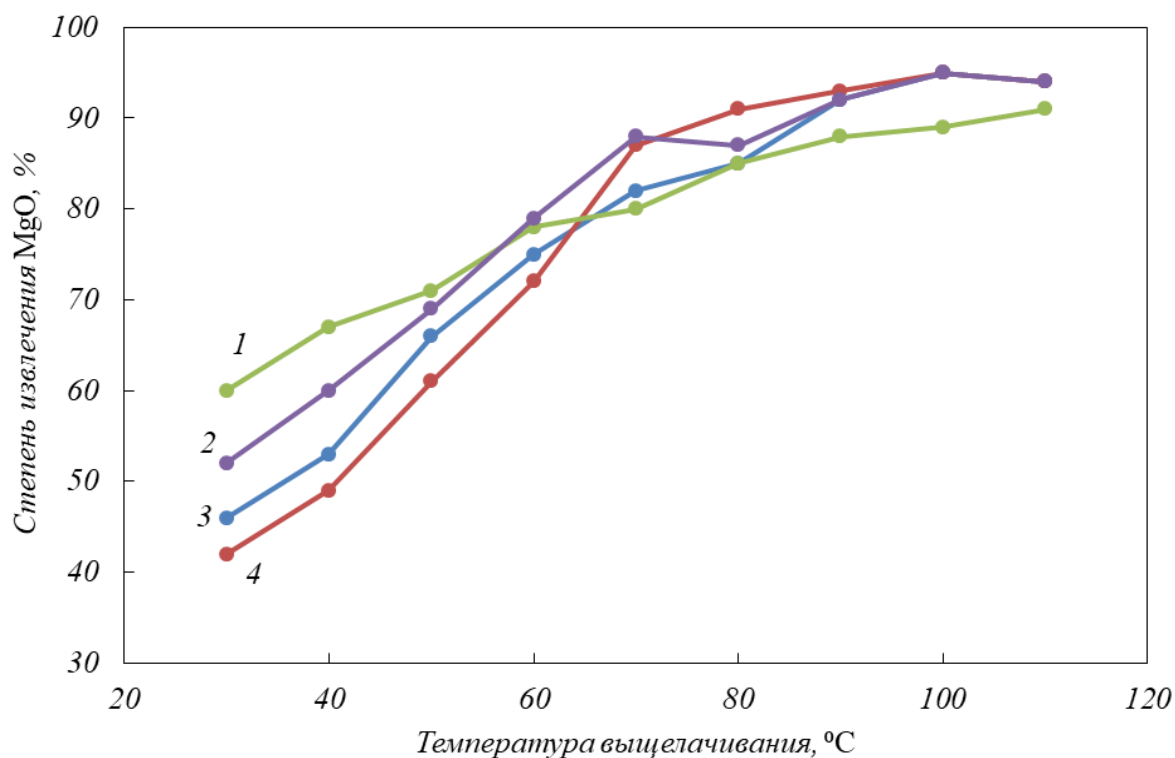


Рис. 2. Влияние температуры выщелачивания на степень извлечения оксида MgO из серпентина в зависимости от вида используемой кислоты:

1 – 20 % соляной кислоты; 2 и 4 – 45 и 25 % азотной кислоты; 3 – 20 % серной кислоты

Fig. 2. Influence of the leaching temperature on the degree of extraction of MgO oxide from serpentine, depending on the type of acid used:

1 – 20 % hydrochloric acid; 2 and 4 – 45 and 25 % nitric acid; 3 – 20 % sulfuric acid

рует с гидратом оксида железа, образуя нерастворимые гидроферриты  $MeO - Fe_2O_3 - nH_2O$ .

На основании результатов проведенных исследований предложена технологическая схема

комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд.

Согласно разработанной технологической схеме (рис. 4) выщелачивание осуществляется

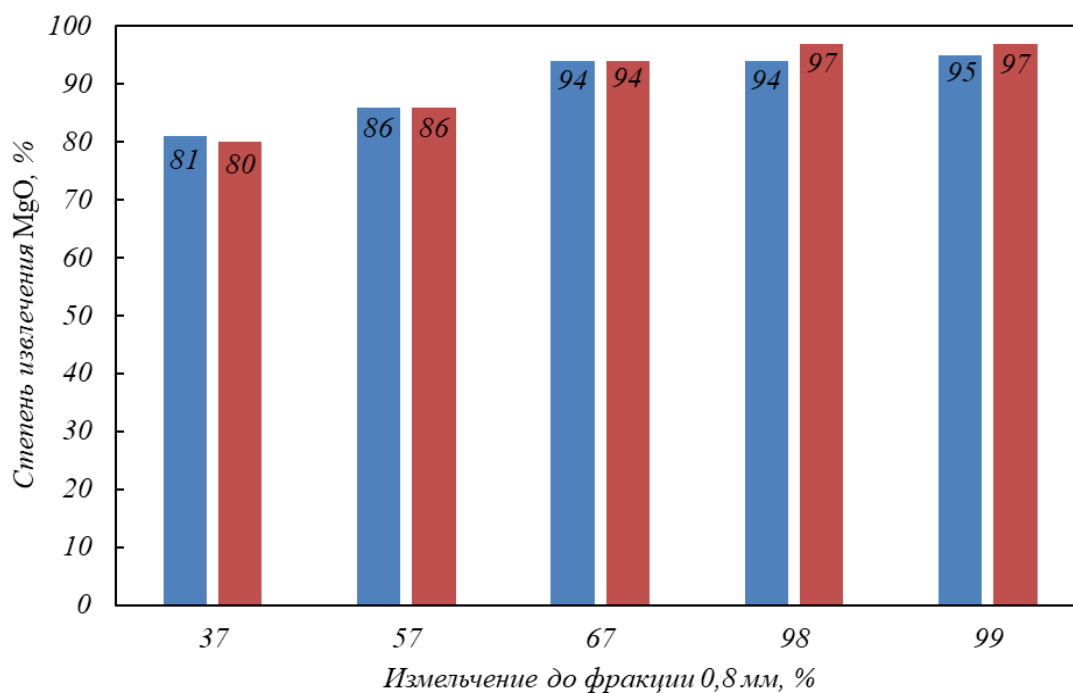


Рис. 3. Влияние степени извлечения исходного серпентина на степень извлечения оксида MgO при выщелачивании

Fig. 3. The effect of the degree of extraction of the initial serpentine on the degree of extraction of MgO oxide during leaching

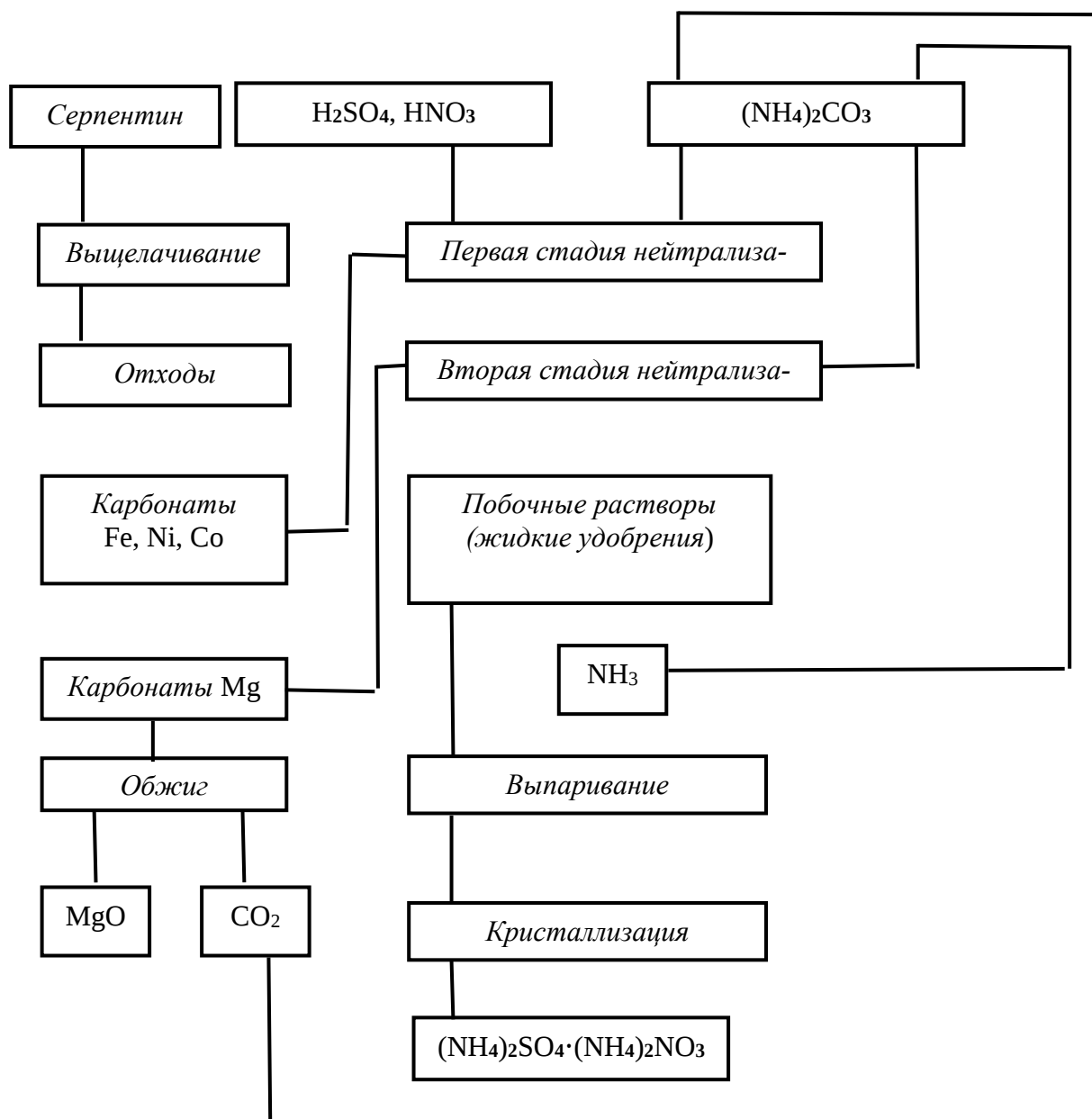


Рис. 4. Технологическая схема переработки серпентина  
Fig. 4. Technological scheme of serpentine processing

серной или азотной кислотами, а в качестве осадителя полезных компонентов из маточного раствора рекомендуется 2н раствор карбоната аммония, изготовленного на водном растворе аммиака и углекислого газа из промышленного дыма. В рассматриваемом варианте из побочных растворов получают после соответствующей переработки удобрения (сульфата или нитрата аммония). Также предусматривается возвращение в цикл переработки аммиака, излишне расходуемого в процессе нейтрализации, что сокращает расход этого компонента. Нейтрализацию маточного раствора предполагается проводить избытком карбоната аммония. При этом из маточного раствора на первой стадии выпадают карбонаты железа, никеля и кобальта, а на второй – карбонат магния в объеме 50 – 70 %,

остальная часть остается в растворе в виде двойных магний-аммонийных солей. В случае избытка карбоната аммония в осадок выпадает до 98 % карбоната магния. Оставшиеся растворы являются высокоэффективным комплексным удобрением с необходимыми микрокомпонентами, которые возможно использовать в жидком виде или после соответствующего выпаривания и кристаллизации (в твердом виде).

## Выводы

В рамках развития направления по обоснованию эффективности производства магнезиальных флюсов для конвертерной плавки из местного сырья проведены исследования показателей процесса кислотного выщелачивания оксида магния из отходов обогащения серпентин-

магнетитовых руд Абагурской аглофаборики. Определены закономерности влияния вида применяемых кислот, их концентрации, температуры пульпы и гранулометрического состава исходных отходов на степень извлечения оксида магния из указанных отходов, что послужило основанием для разработки технологической схемы комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд, включающей в себя выщелачивание оксида магния из серпентина с последующей нейтрализацией маточного раствора и извлечением из него ценных компонентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zou Q., Hu J., Yang Sh., Wang H., Deng Ge. Investigation of the splashing characteristics of lead slag in side-blown bath melting process. *Energies*. 2023;16(2):1007.
2. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В., Чубин К.И., Чубина Е.А. Нетрадиционные технологии и фурменные устройства для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Сталь*. 2017;(6):15–20.
3. Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
4. Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
5. Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянцев В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(12):896–900.
6. Chen L., Diao J., Wang G., Qiao Y., Xie B. Experimental study on slag splashing with modified vanadium slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019;46(2):165–168.
7. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Михайлова Л.Ю. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(7):491–498.
8. Zhang H., Yuan Zh., Mei L., Peng X., Liu K., Zhao H. The behavior of CO<sub>2</sub> supersonic jets in the converter slag-splashing process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(4):1803–1815.
9. Wang R.F., Zhang Bo., Liu Ch.Ju., Jiang M.Fa. Review on monitoring and prevention technologies of splashing induced by inappropriate slag foaming in BOF. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2023;30(9):1661–1674.
10. Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(2):864–879.
11. Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024: 202400289.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202400289>
12. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Сигарев Е.Н. Новые технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(6):7–12.
13. Манашев И.Р., Степанова А.А. Практика применения магнезиальных флюсов в кислородно-конвертерном процессе на предприятиях России. *Теория и технология металлургического производства*. 2017; (4(23)):18–22.
14. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Смирнов А.Л. Особенности формирования и фазово-минералогический состав конвертерных шлаков. *Металлы*. 2015;(2):26–34.
15. Кожухов А.А. Исследование влияния вязкости и температуры плавления конвертерного шлака на его вспенивание. *Сталь*. 2014;(2):15–18.
16. Zhang H., Yuan Zh., Zhao H., Zhao L., Kong D., Lu Yi. Thermodynamic simulation of slag–refractories interactions in innovative slag-splashing processes in converters. *Ironmaking and Steelmaking*. 2024;51(8).  
<https://doi.org/10.1177/03019233241262579>
17. He L., Chen M. Study on slag splashing behavior in a 120 t converter based on physical and mathematical simulation. *Steel Research International*. 2023;94(12):202300227.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300227>
18. Zhang H., Yuan Zh.Fu., Zhao H.X., Xu B.Sh., Liu Ke., Mei Lu., Ma Bo.W. Numerical simulation of co2 used for slag splashing process in converter. *Steel Research International*. 2023;94(10):202300025.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300025>
19. Wang R., Zhang Bo., Hu Ch., Liu Ch., Jiang M. Study on splashing mechanism in basic oxygen furnace based on slag foaming modeling. *Steel Research International*. 2022;

93(1):202100318.

<https://doi.org/10.1002/srin.202100318>

20. Sinelnikov V., Szucki M., Merder T., Pieprzyca J., Kalisz D. Physical and numerical modeling of the slag splashing process. *Materials*. 2021;14(9):2289. <https://doi.org/10.3390/ma14092289>
21. Очур-оол А.П., Манзырыкчы Х.Б., Зырянова В.Н. Кристаллическая структура минералов группы серпентина (хризотил-асбест). *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. 2021;4(86):14–22.
22. Орлов А.А., Аверина Г.Ф., Ульрих Д.В., Черных Т.Н. Исследование возможности получения жаростойких бетонов на основе серпентин-фосфатных композиций. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022;1(45):71–78.
23. Лихачева А.Ю., Горяйнов С.В., Ращенко С.В., Сафонов О.Г. Особенности разложения серпентина в присутствии щелочных хлоридов: КР-исследование при высоком давлении и температуре. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019;83(6):750–752.
1. Zou Q., Hu J., Yang Sh., Wang H., Deng Ge. Investigation of the splashing characteristics of lead slag in side-blown bath melting process. *Energies*. 2023;16(2):1007.
2. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. Non-traditional technologies and tuyere devices for applying slag garnishing to the lining of the converter. *Stal'*. 2017;(6):15–20. (In Russ.).
3. Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
4. Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
5. Kalinogorskii A.N., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Bagryantsev V.I. Investigation of the features of the application of vortex technologies for applying refractory coatings to the lining of converters. Message 2. Characteristics and parameters of movement of slag droplets. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2015;58(12):896–900. (In Russ.).
6. Chen L., Diao J., Wang G., Qiao Y., Xie B. Experimental study on slag splashing with modified vanadium slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019;46(2):165–168.
7. Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Mikhailova L.Yu. Theoretical foundations and technology of smelting steel intermediates in converters and chipboard under magnesia slags. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020;63(7):491–498. (In Russ.).
8. Zhang H., Yuan Zh., Mei L., Peng X., Liu K., Zhao H. The behavior of CO<sub>2</sub> supersonic jets in the converter slag-splashing process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(4):1803–1815.
9. Wang R.F., Zhang Bo., Liu Ch.Ju., Jiang M.Fa. Review on monitoring and prevention technologies of splashing induced by inappropriate slag foaming in BOF. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2023;30(9):1661–1674.
10. Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(2):864–879.
11. Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024: 202400289. <https://doi.org/10.1002/srin.202400289>
12. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. New technologies for applying slag garnishing to the lining of converters. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;57(6):7–12. (In Russ.).
13. Manashev I.R., Stepanova A.A. The practice of using magnesia fluxes in the oxygen converter process at Russian enterprises. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2017;4(23):18–22. (In Russ.).
14. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Smirnov A.L. Features of formation and phase-mineralogical composition of converter slags. *Metally*. 2015;(2):26–34. (In Russ.).
15. Kozhukhov A.A. Investigation of the effect of viscosity and melting point of converter slag on its foaming. *Stal'*. 2014;(2):15–18. (In Russ.).
16. Zhang H., Yuan Zh., Zhao H., Zhao L., Kong D., Lu Yi. Thermodynamic simulation of slag-refractories interactions in innovative slag-splashing processes in converters. *Ironmaking and Steelmaking*. 2024;51(8). <https://doi.org/10.1177/03019233241262579>
17. He L., Chen M. Study on slag splashing behavior in a 120 t converter based on physical and

mathematical simulation. *Steel Research International*. 2023;94(12):202300227.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300227>

18. Zhang H., Yuan Zh.Fu., Zhao H.X., Xu B.Sh., Liu Ke., Mei Lu., Ma Bo.W. Numerical simulation of co2 used for slag splashing process in converter. *Steel Research International*. 2023;94(10):202300025.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300025>
19. Wang R., Zhang Bo., Hu Ch., Liu Ch., Jiang M. Study on splashing mechanism in basic oxygen furnace based on slag foaming modeling. *Steel Research International*. 2022;93(1): 202100318.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202100318>
20. Sinelnikov V., Szucki M., Merder T., Pieprzyca J., Kalisz D. Physical and numerical modeling of the slag splashing process. *Materials*. 2021;14(9):2289.  
<https://doi.org/10.3390/ma14092289>
21. Ochur-ool A.P., Manzyrykchy Kh.B., Zyryanova V.N. Crystal structure of serpentine group minerals (chrysotile asbestos). *Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2021;(4(86)):14–22. (In Russ.).
22. Orlov A.A., Averina G.F., Ul'rikh D.V., Chernykh T.N. Investigation of the possibility of obtaining heat-resistant concretes based on sulfur-pentine phosphate compositions. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2022;(1(45)):71–78. (In Russ.).
23. Likhacheva A.Yu., Goryainov S.V., Rashchenko S.V., Safonov O.G. Features of serpentine decomposition in the presence of alkaline chlorides: a CD study at high pressure and temperature. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2019;83(6):750–752. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**Email:** umanskii@bk.ru

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**SPIN-код:** 2374-4553

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**Email:** protopopov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**SPIN-код:** 9775-0226

**Полежаев Сергей Александрович**, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

#### Information about the authors

**Aleksandr A. Umanskii**, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

**Email:** umanskii@bk.ru

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**SPIN-код:** указать

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

**Email:** protopopov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**SPIN-код:** 9775-0226

**Sergey A. Polezhaev**, undergraduate student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 10.10.2024

После доработки 15.10.2024

Принята к публикации 18.10.2024

Received 10.10.2024

Revised 15.10.2024

Accepted 18.10.2024