

# Обзор международного опыта обоснования технологии плавки медных сульфидсодержащих концентратов с учетом критериев эффективности, экономичности, экологичности

Вал. В. Спириягин<sup>a</sup>, И. Н. Кравченко<sup>b,c,\*</sup>, Ю. А. Кузнецов<sup>d</sup>, Вит. В. Спириягин<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет),  
г. Москва, 125993, Россия

<sup>b</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),  
г. Москва, 101990, Россия

<sup>c</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,  
г. Москва, 127434, Россия

<sup>d</sup>Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина,  
г. Орел, 303019, Россия

<sup>e</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
г. Санкт-Петербург, 199106, Россия  
\*e-mail: [kravchenko-in71@yandex.ru](mailto:kravchenko-in71@yandex.ru)

Поступила в редакцию 14.06.2024

После доработки 05.11.2024

Принята к публикации 12.11.2024

Представлен анализ проблем существующих технологий плавки медных концентратов, основанный на публикациях российских и международных исследователей. Выявлены и рассмотрены три основные проблемы, требующие решения: повышение эффективности плавки медных сульфидсодержащих руд за счет снижения содержания меди в шлаках, полученных в процессе конвертирования; повышение эффективности, в том числе за счет получения дополнительного экономического эффекта от утилизации отходов; снижение вредного воздействия на окружающую среду. Установлено, что тенденции к разработке новых эффективных, экологически чистых и экономичных технологий характерны не только для выбранного объекта исследования, но и ряда других цветных металлов, таких как свинец и цинк.

*Ключевые слова:* электрорафинирование, сульфидсодержащие сплавы, плавка штейна, обработка, медь

УДК 669.3-047.44(100)

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.6.13>

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции к переходу всех областей промышленности на экологичные технологии в условиях интенсификации производства требуют от металлургических предприятий пересмотра существующих тенденций и оптимизации деятельности всех подсистем производственного процесса.

Вопросы, привлекающие наибольшее внимание, в первую очередь связаны с уменьшением вредного воздействия на окружающую среду и одновременным повышением (или не уменьшением) эффективности производства. Еще одним вопросом, требующим детальной проработки и тесно сопрягающимся с экологической безопасностью, является исследование возможности получения экономического эффекта за счет утилизации отходов горного производства.

Эффективность утилизации таких отходов металлургии, как хвосты обогащения, будет складываться за счет уменьшения экологического ущерба от их хранения, стоимости металлов, полученных при переработке, сырья для строительной индустрии и попутной товарной продукции.

Проведенный анализ публикаций российских и международных ученых (авторов) позволил обосновать актуальность исследования, обусловленную общемировым трендом эффективных экологических производств, значимость которого заключается в разработке технологий, позволяющих при не увеличении затрат (тех же затратах) повысить эффективность и экологичность получения меди.

Медь является одним из стратегически важных цветных металлов, обладающих значительными объемом и спектром потребления в Российской Федерации. На долю меди в форми-

ровании стоимостного выражения всей отрасли производства цветных металлов в нашей стране приходится порядка 67%. В настоящее время около 15% разведанных общемировых запасов данного сырья приходится на Россию [1], за счет чего страна занимает шестое место в мире по ее выплавке.

В настоящее время мировые цены на медь показали тенденцию к росту, особенно это заметно после их резкого падения в первой половине 2020 г. [2], в связи с чем стратегией развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. в качестве дополнительного стимулирующего фактора для производителей меди предусмотрены программы в пользу увеличения потребления меди для глобальной зеленой экономики. Если потребление меди на внутреннем рынке не будет наращиваться, экспорт будет являться приоритетным направлением для российских металлургов в целях поддержания сформированных мощностей.

В этой связи исследование по научно-техническому обоснованию плавки на штейн при непрерывном конвертировании в печи Ванюкова, направленное на поиски новой, непрерывной технологии плавки медных концентратов, позволяющей повысить эффективность производства меди при одновременном снижении (не увеличении) ее стоимости, является крайне актуальным и востребованным.

## 1. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПЛАВКИ МЕДНЫХ СУЛЬФИДОСодержаЩИХ КОНЦЕНТРАТОВ

Большинство процессов извлечения меди сопровождается выделением серы, а наиболее распространенной формой выделяющейся серы является газообразный диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), образующийся при плавке и конвертировании [3]. Процесс улавливания и фиксации серы необходим в первую очередь с целью недопущения попадания ее в окружающую среду. Однако необходимо отметить, что в процессе извлечения меди, как и при переработке сульфидного или оксидного сырья при производстве цинка, содержание  $\text{SO}_2$  в отходящих газах может составлять порядка 5% [4], что может дать дополнительный экономический эффект при использовании их для изготовления серной кислоты.

Так, например, холдинг KCM 2000 Group (Пловдив, Болгария), являющийся головным предприятием завода по выплавке цветных металлов, дополнительно производит до 55 тыс. т серной кислоты в год экономически целесообразным и экологически безопасным способом [5].

С целью обоснования технологии плавки медных концентратов, позволяющей эффективно улавливать нестабильную газовую фазу, необходимо сделать обзор существующих способов плавки, а также провести анализ их преимуществ, недостатков, экономической и технологической эффективности.

В исследовании Кристины Александр и соавторов справедливо указано, что большая часть (80%) ежегодного производства первичной меди извлекается с помощью пирометаллургических процессов, а остальная часть – с помощью гидрометаллургических технологий, как правило, связанных с подземным выщелачиванием [6].

Типичными технологическими этапами пирометаллургического производства являются плавка, конвертирование, огневое рафинирование и литье анодов с последующим электро-рафинированием в электролизе до катодной меди.

В современной металлургии для осуществления плавки используют отражательные, электрические и шахтные печи, а также автогенные процессы нескольких разновидностей [7]. По способам, получившим наибольшее распространение на металлургических заводах в России, можно выделить четыре базовых технологии плавки, а именно: шахтная плавка сульфидного медного сырья, отражательная плавка, плавка в печи Ausmelt и плавка в печи Ванюкова.

Плавка сульфидного медного сырья является наиболее распространенным и хорошо изученным процессом получения медного штейна и достаточно подробно описанным в работах С.С. Набойченко, Н.Г. Агеева, Д.А. Диомидовского, Л.М. Шалыгина и других исследователей процессов цветной металлургии [8, 9].

Основной характеристикой процессов плавки является перенос кислорода, необходимого для производства медного штейна, в расплавленную фазу. Кислород может быть перенесен в шлак, как в случае процессов с верхней погружной фурмой, Ванюкова, так и Ausmelt или Noranda.

В исследованиях Марка Шлезингера [10] установлено, что процессы плавки в ванне являются гибкими и позволяют обрабатывать различные материалы: от низкосортной до высокосортной меди. Они могут работать как в средних (35%), так и в очень высоких (90%) условиях обогащения кислородом и, в зависимости от процесса, производить штейн с содержанием меди от 55 до 74%.

Данный раздел посвящен литературному обзору проблемных вопросов таких способов

плавки медного концентрата, как Ausmelt и плавка в печи Ванюкова.

### *Плавка штейна способом Ausmelt*

Плавка Ausmelt основана на технологии, разработанной Содружеством организаций научных и промышленных исследований (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization – CSIRO) в 1970 г. За свою более чем 40-летнюю историю процесс Ausmelt постоянно развивался и совершенствовался, получив широкое коммерческое признание в качестве ведущей технологии обработки сырья, содержащего медь, никель, свинец, олово и цинк. Разработки последних 40 лет были направлены на увеличение производительности плавки в отдельных реакторах с 80 до более 200 тонн в час. Это увеличение было достигнуто технологическими разработками в нескольких аспектах, таких как конструкция реактора, улавливание серы, периферийное оборудование, надежность установки и управление технологическим процессом [11].

Основой технологии является вертикально подвешенная фурма Ausmelt, работающая с наконечником, погруженным в слой шлака ванны расплава (рис. 1).

В рабочем пространстве печи можно выделить следующие зоны:

1) Реакционная зона у конца фурмы. В зависимости от вида дутья она может быть окислительной, восстановительной или нейтральной.

2) Зона плавления, расположенная на поверхности шлака. Процессы плавления в этой зоне могут протекать в окислительной, восстановительной или в нейтральной среде.

3) Зона отстаивания, расположенная на дне печи. Здесь происходит расслаивание и отстаивание металлической (Cu) и сульфидной фаз (матт) перед их выпуском из печи.

4) Зона догорания газа, расположенная над ванной расплава. Здесь происходит догорание углеводородного топлива.

Во время конвертирования в печь подаются известняковые и кварцевые флюсы, а обогащенный кислородом воздух и угольная пыль впрыскиваются в ванну расплава через фурму Ausmelt. Полученный  $SO_2$  в дымовых газах транспортируется в систему производства концентрированной серной кислоты, в то время как пыль, содержащая ценные металлы в отходящих газах, собирается специальной системой. Процесс конвертирования штейна осуществляется в периодическом режиме, при этом этап конвертирования 1 используется для стадии получения (конверсии) шлака, а этап конвертирования 2 используется для конечного

производства черновой меди. Во время конвертирования 1 твердый медный штейн непрерывно подается в печь Ausmelt со скоростью около 60 т/ч при времени загрузки 4 ч. На этом этапе шлак дважды выпускается из печи, в то время как подача штейна продолжается; первый выпуск шлака осуществляется после 100 т штейна, второй выпуск – после подачи 180 тонн штейна. Температуру ванны поддерживают на уровне от 1543 до 1593 К. На стадии конвертирования 2 прекращают подачу штейна и регулируют рабочие параметры для конвертирования ванны с получением черновой меди. По завершении этой стадии шлак второй стадии конвертирования выпускается из печи Ausmelt, затем в конце выпуска шлака из конвертерной печи Ausmelt выпускается черновая медь и направляется в анодную печь для рафинирования меди через черновой желоб [12].

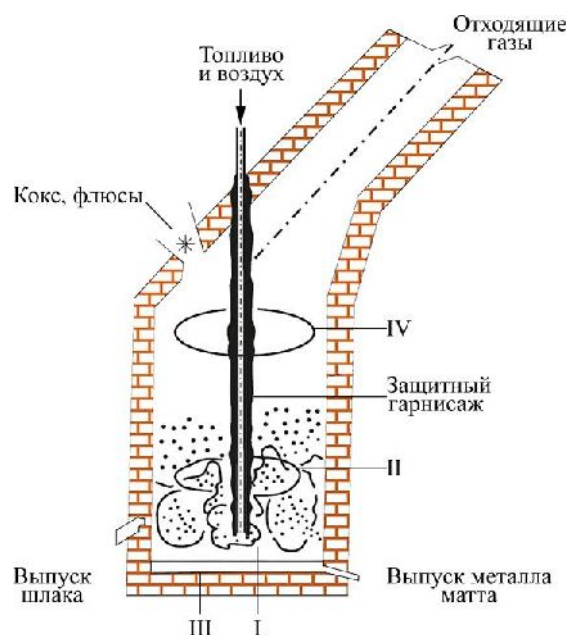
Данная печь отличается своей простой конструкцией, высокой производительностью и низким пылевыносом. Кроме того, ее управление также просто – интенсивность барботажа расплава можно регулировать, изменяя заглубление фурмы в слой шлака. Процесс может быть остановлен путем поднятия фурмы, что позволяет отстаивать металлическую или штейновую фазу перед ее выпуском из печи. Еще одним достоинством является возможность оперативного разогрева, даже если печь находится на горячем холостом ходу или просто остановлена на длительный период.

### *Плавка в печи Ванюкова*

Печь Ванюкова, также известная как процесс Ванюкова или плавка в жидкой ванне (ПЖВ), – это высокоэффективная отечественная разработка автогенной технологии плавки сульфидного сырья. Процесс Ванюкова (ПВ) используется на предприятиях цветной металлургии России и за рубежом. Первый комплекс ПВ был введен в эксплуатацию на Медном заводе Норильского горно-металлургического комбината в 1977 г.

Одним из важнейших преимуществ ПЖВ является возможность производить черновую медь с низким содержанием S и Ni при одновременно низкой потере меди со шлаком [13]. Таким образом, с точки зрения соотношения черновой меди к шлаку этот процесс является одним из лучших.

Еще одно важное преимущество печи Ванюкова – возможность использования более богатого кислородом дутья, в том числе возможность использования чистого технического кислорода. Это позволяет производить газы, богатые  $SO_2$ , и значительно экономить топливо.



**Рис. 1.** Конструкция печи и реакционные зоны Ausmelt [8]: I – зона горения и окисления; II – зона плавления; III – зона отстаивания; IV – зона догорания газов.

С одной стороны, увеличение содержания кислорода в дутье с 45 до 65% приводит к росту стоимости дутья, однако практически полный отказ от дополнительной подачи топлива не только компенсирует эти затраты, но и обеспечивает снижение суммарных затрат, а значит, и себестоимости выплавляемого штейна.

Печь Ванюкова используется для плавки материалов в жидкой ванне и состоит из огнеупорного кирпича и литых медных кессонов. Ее плавильная камера имеет шахтный тип и может достигать размеров 2,5–3 м в ширину, 6–6,5 м в высоту и 10–30 м и более в длину. На боковых стенках камеры расположены два сифона, которые позволяют непрерывно вытягивать штейн и шлак из печи отдельно.

Печь может использоваться для плавки как мелких, так и кусковых материалов, которые загружаются сверху в форме сухой или влажной шихты. Для обеспечения подачи дутья в печь используются фурмы, расположенные в продольных сторонах камеры. В случае необходимости подачи дополнительного топлива его количество зависит от состава шихты и содержания кислорода в дутье. Для этого можно использовать каменный уголь, мазут или природный газ, которые подаются через фурмы вместе с дутьем.

Расплав в печи для плавки разделен на две зоны: надфурменную, где происходит барботажа, и подфурменную, где расплав находится в спокойном состоянии. Высота расплава в надфурменной зоне составляет 0,4–0,5 м в спокойном состоянии, а в подфурменной – 1,5–2 м. В надфурменной зоне при температуре около 1300 °С происходит плавление шихты,

растворение тугоплавких ее составляющих в шлаке, окисление сульфидов и укрупнение мелких капель сульфидов.

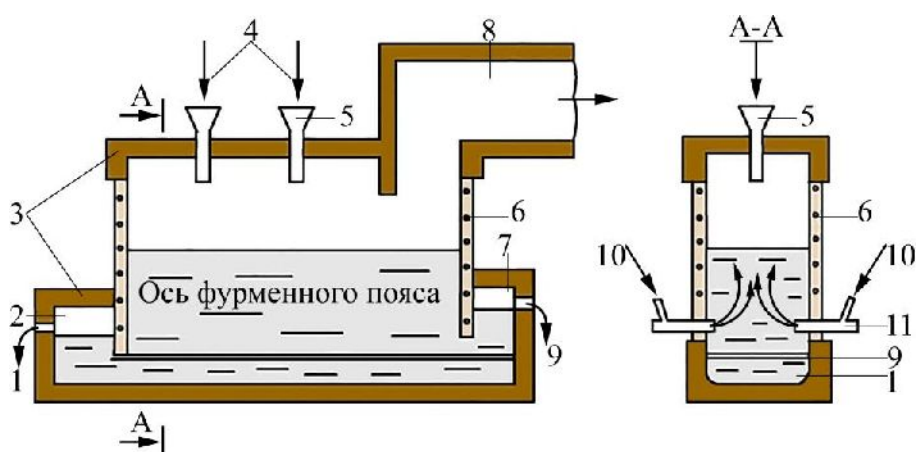
Благодаря более низкому содержанию магнетита в шлаках и более выгодным условиям для разделения штейна и шлака можно получать без дополнительного обеднения шлаки, содержащие 0,5–0,6% меди. Удельный проплав шихты составляет 60–75 т/м<sup>2</sup>·сут, а пылевывос – 1%. Газы, содержащие 20–40% SO<sub>2</sub>, могут быть использованы для производства серной кислоты и получения элементарной серы.

Плавка в жидкой ванне отличается от других процессов плавки тем, что плавление и окисление сульфидов осуществляется в ванне шлака, которая движется в вертикальном направлении. В верхней части плавки происходит плавление шихты, растворение тугоплавких ее составляющих в шлаке, окисление сульфидов и укрупнение мелких сульфидных частиц. Ниже уровня фурм возникает расслоение штейна и шлака, которые затем выпускаются из печи отдельно через сифонное или шпуровое отверстия.

Преимущества процесса выражаются в следующем:

- низкое содержание кислорода в дутье;
- высокая удельная производительность;
- отсутствие жестких требований к шихте;
- высокое содержание серы в отходящих газах;
- высокая автоматизация процесса.

Однако, несмотря на большой ряд преимуществ в процессе плавки, данный способ обладает и недостатками, которые заключаются в:



**Рис. 2.** Схема печи Ванюкова [8]: 1 – штейн; 2 – штейновый сифон; 3 – кладка печи; 4 – шихта; 5 – загрузочная воронка; 6 – медные литые кессоны; 7 – шлаковый сифон; 8 – аптейк; 9 – шлак; 10 – дутье; 11 – фурмы.

– наличии в агрессивном расплаве кессонированных элементов – камер, необходимых для охлаждения;

– высокой температуре отходящих газов;

– получении богатых по меди шлаков;

– высоких капитальных и эксплуатационных затратах;

– невозможности длительной остановки печи без выпуска массы.

Несмотря на то что технология ПЖВ без малого 50 лет успешно применяется на ведущих металлургических заводах, вопросами повышения эффективности данного метода занято большое количество исследователей как в России, так и за рубежом.

Авторский коллектив Е.А. Оспанова в своем исследовании [14] установил, что необходимым условием более полного разделения шлака и штейна, а также предотвращения образования промежуточного слоя является расплавление фаз шлака, независимо от его состава. Авторами была установлена и обоснована зависимость образования промежуточного слоя между шлаком и штейном от температуры и содержания магнетита в шлаке.

Б.К. Кенжалиевым совместно с соавторами с целью обеднения медных шлаков предложены две технологии улучшения самого агрегата (печи Ванюкова): электроподогрев шлакового сифона графитированными электродами и процесс обеднения в двухзонной печи Ванюкова [15]. Применение графитовых электродов для дополнительного подогрева шлака в шлаковом сифоне позволяет снизить энергозатраты в электросмесителе и в то же время сохранить имеющуюся ширину шлакового сифона, а технология плавки сульфидных медных концентратов в двухзонной печи позволяет получать шлаки с содержанием меди 0,7% и менее при минимальных затратах на реконструкцию оборудования.

В другой работе М.А. Дуссебековой и Б.К. Кенжалиевым были определены основные

причины повышенных потерь меди с отвальными шлаками печи Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе. В числе них оказались: низкая температура плавления и, как следствие, снижение качества перерабатываемых медных концентратов и флюсовых материалов; недостаточная флюсоустойчивость силикатной руды, используемой при выплавке шихты, что связано с преимущественным использованием золотосодержащих руд, богатых оксидом алюминия, и требующей для быстрого шлакообразования подачи в печь большого избытка его по сравнению с расчетным для получения относительно однородного расплава [16].

Авторами М.А. Топчу, А. Рюшен, Б. Дериним справедливо отмечено, что получение большого количества конвертерного шлака с высоким содержанием меди позволит предотвратить постоянное сокращение запасов металла и устранить негативное воздействие на окружающую среду [17].

Таким образом, несмотря на мнения ряда исследователей, что гидрометаллургические методы является наиболее предпочтительными и чаще используемыми для извлечения меди из медных шлаков, поскольку решают проблемы флотации и процессов прямой плавки в электрической печи [18, 19], новые усовершенствования в пирометаллургических процессах также считаются полезными и эффективными для снижения потерь меди.

#### *Проблемные вопросы автогенной плавки медного концентрата*

Одним из наиболее важных вопросов, рассмотренных в работах М. Катаржина, Х.Б. Юань и соавторов, является снижение содержания меди в шлаках, полученных в процессе конвертирования, в том числе с применением технологии Ausmelt [12, 20]. Авторами

было установлено, что металлургические шлаки являются источником большого количества металлов, которые не извлекаются во время плавки, и поэтому с ними следует обращаться как с побочными продуктами, а не как с отходами [20].

Авторами В. Сибанда, Э. Сипунга, Г. Данха, Т.А. Мамвуром было определено, что содержание меди в шлаках плавильных заводов в Намибии колеблется от 0,8 до 5 мас.%, что считается слишком высоким для выброса в окружающую среду [21].

Сведения о составе шлаков ряда компаний в Атакаме (Чили), опубликованные О. Павец [22], показывают, что содержание меди колебалось от 14,69% до 19,15% (в среднем 16,92%), а в ряде случаев до 27,41%.

Результаты, опубликованные в исследовании [12], показали, что содержание меди в шлаке можно снизить за счет восстановления  $Fe_3O_4$ ,  $CuFe_2O_4$  и  $Cu_2O$  в шлаке, а уменьшение магнетизма шлака и снижение его вязкости возможно при рабочих температурах процесса. Когда коэффициент воздуха для плавки установлен на уровне 700–750  $Nm^3/t$ , кислородный потенциал ванны может быть снижен; таким образом, небольшое количество  $FeS$  будет препятствовать образованию фазы  $Fe_3O_4$  и уменьшать окисленный  $Cu_2O$ , что эффективно снижает содержание меди в шлаке [12].

В работе Дж. Вуд, Д. Уилсон и С. Хьюз [23] описан ряд улучшений технологии Ausmelt, таких как оптимизация стадий процесса фьюмингования, увеличение обогащения кислородом и снижение влажности сырья, которые, по заявлению авторов, способны снизить затраты на коммунальные услуги и потребление ископаемого топлива по сравнению с другими технологиями. Однако сведения о реальном повышении эффективности в работе не представлены.

Исходя из анализа эмпирических данных таких исследователей, как Т. Нуориваара и Р. Серна-Герреро, с целью повышения эффективности извлечения меди из шлаков пирометаллургической промышленности наиболее оптимальным представляется применение флотационного метода получения меди из плавильных шлаков с использованием амфифильной смеси целлюлозы и поверхностно-активного вещества в качестве пенообразователя [24, 25].

Однако, как отмечают Н. Торо, К. Перес и И.П. Николич, производство меди, в том числе флотационно-плавильным методом, сопровождается большим количеством хвостового сырья [26] и отвального шлака, что приводит к опасности загрязнения воды, почвы и воздуха и влечет за собой значительные экологические

обязательства, такие как устройство дамб хвостохранилищ [27, 28].

Наряду с проблемой повышения эффективности извлечения непосредственно самого медного сырья, встает вопрос повышения экологичности производства. В исследовании [29] Э. Клаффенбаха с соавторами было установлено, что применение шлака часто ограничивается наличием опасных элементов и их поведением при выщелачивании, поэтому они потенциально могут загрязнять почву, поверхностные и подземные воды. Так, авторами приводятся данные о том, что только 15% сульфида меди ( $CuS$ ) во всем мире было использовано в качестве продукта, а остальное было захоронено.

Попытка обоснования безотходного производства меди с упором на восстановление дефицитных сопутствующих элементов была выдвинута в исследовании Л. Рейндерса [30], однако проблематика обработки шлака и поведения  $CuS$  или остатков обработки  $CuS$  в окружающей среде не была освещена.

Таким образом, исходя из проведенного анализа следует, что обоснование технологии плавки медных концентратов необходимо проводить с учетом критериев эффективности, экономичности и экологичности.

## 2. МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

На основе проведенного в разделе 1 анализа выявлен ряд общих проблем автогенной плавки, присущих как технологии Ausmelt, так и ПЖВ в печи Ванюкова. С учетом критериев эффективности, экономичности и экологичности можно выделить следующие решения:

- повышение эффективности автогенной плавки медных концентратов, зависящей от выбора как состава шихты и сорта штейна [31], так и технологии, что в первом приближении возможно при дополнительном подводе топлива [32] или кислорода [33] в процесс, это интенсифицирует режим нагрева и повысит производительность печи;

- повышение экономичности, связанное, во-первых, с увеличением выработки за счет снижения потерь меди в шлаке (что в связи с труднодоступностью экспериментальных исследований может быть решено в том числе с применением численных методов моделирования) [34] и получения экономического эффекта при использовании  $SO_2$  в отходящих газах для изготовления серной кислоты, а во-вторых, со снижением себестоимости автогенной плавки за счет уменьшения удельных затрат на единицу продукта;

– повышение экологичности процессов плавки за счет разработки недорогого, экологически безопасного метода десульфуризации, соответствующего стандарту сверхнизких выбросов [35].

В отечественной и международной практике для повышения эффективности плавки медных сульфидсодержащих концентратов применяются следующие методы:

1. Предварительная обработка концентрата, например флотация, магнитная сепарация и гравитационная обработка. Это позволяет уменьшить содержание примесных компонентов в исходном сырье, таких как железо и сера, что улучшает конверсию меди при плавке, то есть процентное соотношение добытой и полученной в результате плавки к ее общему количеству в исходном сырье. Например, высокое содержание железа может привести к образованию сплавов, которые не перерабатываются при дальнейшей обработке, а также при незначительном растворении в меди к понижению ее коррозионной стойкости. Сера незначительно влияет на электропроводность и теплопроводность меди, но зато сильно понижает ее пластичность.

*Флотация* является основным процессом переработки шлака для валоризации меди и других металлов [36]. Как отмечается в исследованиях [37, 38], для достижения наилучшего извлечения меди и качества концентрата производится оптимизация процессов выделения меди из пустой породы [37], параметров флотации, таких как плотность пульпы, pH, время кондиционирования и флотации, видов и дозировки применяемых при флотации реагентов [38], а также изучение механизмов адсорбции собирателей на поверхности сульфидных минералов, играющих важную роль в процессе флотации [39].

*Магнитная сепарация* может стать ключом к безотходной и устойчивой медной промышленности. Результаты магнитной сепарации, опубликованные в исследовании [40], показали, что в магнитных продуктах концентрация Cu увеличилась на 15–21%. В работе Сюй Бай [41] был предложен новый комбинированный процесс измельчения–флотации–высокоградиентной магнитной сепарации–вторичного измельчения–выщелачивания, по результатам которого общее извлечение меди составило 86,02%.

*Гравитационная обработка* медной руды представляет собой операцию сортировки, основанную на различии пропорций медных минералов и пустой породы.

Исследователи Сяочунь Вэнь, Пинцян Дай, Цзиньян Ван, Лей Гуо, Чжанчэн Гуо путем

супергравитационного разделения, при оптимальных условиях  $G = 600$ ,  $T = 1423$  К и  $t = 5$  мин, получили отфильтрованный многофазный комплекс свинец–серебро–медь и остаточные фазы [42]. Результаты показали, что выход отфильтрованной фазы Pb–Ag–Cu составил около 83%, а эффективность извлечения меди превысила 89%.

В исследовании [43] был предложен новый метод непрерывного извлечения капель меди из шлака плавки медного штейна с помощью супергравитации. Капли меди были направленно отделены от плавильного шлака медного штейна в течение 3–5 мин при 1523–1573 К с помощью супергравитации с высоким коэффициентом извлечения меди 97,98%.

2. Процесс рециркуляции меди, который включает сортировку лома, предшествующую металлургическому извлечению меди [44]. В исследованиях [45, 46] было найдено всего несколько примеров для исследования систем сортировки меди и ее сплавов. Все они пока находятся на ранних стадиях разработки.

3. В современном мире доля тонковкрапленного труднообогатимого сырья все возрастает, что, очевидно, требует разработки новых подходов и технологий обогащения в процессе переработки руд [47–49]. Реализация селективной дезинтеграции позволяет экономичнее и экологичнее извлекать ценные компоненты и тем самым увеличивать рентабельность руд и месторождений [50], однако для этого необходимо углубленное изучение взаимосвязи структурно-фазового и вещественного состава с физическими, физико-химическими и технологическими свойствами минералов.

4. Использование новых технологий и оборудования. Новые технологии, такие как вакуумная дистилляция или применение ультразвука, могут повысить эффективность плавки медного концентрата и уменьшить потери меди [51]. В работе Б. Янь, направленной на применение вакуумной технологии извлечения Pb и переработки драгоценных металлов из вторичных материалов, богатых свинцом, включая сырой свинец [52], и исследовании К. Гуо, описывающем новый метод извлечения металлических Ag и Cu из вторичных ресурсов с высокой добавленной стоимостью путем вакуумной перегонки [53], установлено, что эффективность извлечения Cu с применением технологии вакуумной дистилляции достигала 99,99 и 98,11% соответственно. Также могут применяться новые методы обработки, такие как технологии фазовой инверсии или применение реактивов, которые увеличивают конверсию меди.

5. Контроль качества продукции. Контроль качества продукции на различных этапах плавки позволяет выявлять возможные проблемы и улучшать процесс. Кроме того, определение содержания меди в продукте позволяет оценивать эффективность процесса и вносить необходимые изменения.

В целом повышение эффективности плавки медных сульфидсодержащих концентратов требует комплексного подхода и комбинации различных методов и технологий.

Для решения проблем, связанных с экономичностью, применяются следующие методы:

1) Оптимизация технологических процессов. Настройка технологических параметров и использование новых технологий позволяют снизить затраты на энергию и сырье, увеличить производительность и повысить выход меди.

2) Мониторинг и контроль расходов на электроэнергию, топливо и сырье, позволяющий своевременно выявлять и устранять искажения цен на факторы производства, влияющие на энергоэффективность. В работе М. Сюй и Б. Линь [54] показано, что в металлургической промышленности Китая существует относительное искажение цен среди факторов производства, а цены на рабочую силу и энергию относительно выше, чем на капитал. Устранение ценовых искажений факторов привело бы к росту эффективности использования энергии в металлургической промышленности Китая на 18,8%. В ряде других исследований, посвященных влиянию устранения ценовых искажений на общий фактор производительности [55, 56], было установлено, что цены на ископаемые энергоносители значительно искажены, при этом степень искажения угля (-13,38%) и нефти (-13,70%) выше, чем у природного газа (-12,21%). Авторами было сделано заключение, что общий фактор производительности значительно увеличился бы после смягчения искажения цен не только в Китае, но и в ряде других стран.

3) Утилизация отходов и вторичных ресурсов позволяет компенсировать затраты на сырье и сократить объем отходов, что в свою очередь оказывает положительный эффект на экологические показатели производства. Примером может служить «Серный проект», реализованный на площадке ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», одной из задач которого является получение серной кислоты из улавливаемых серосодержащих газов, а также ее дальнейшая нейтрализация известью с целью получения гипса. Данная программа позволит значительно снизить выбросы диоксида серы в атмосферу.

Кроме того, в исследованиях Т.К. Пири и соавторов [57, 58], так же как у А.И. Мария [59], показано, что извлечение ценных металлов из медного шлака с помощью пирометаллургических процессов, несомненно, является одним из наиболее экономически перспективных вариантов устойчивого управления этим остатком. Однако стоимость рециркуляции может сильно варьировать из-за волатильности цен, а также из-за того, что метод рециркуляции и его эффективность зависят от конкретного места и типа металлургического остатка [59].

Для решения экологических проблем применяются различные методы и технологии. Например, введение более эффективных систем очистки и фильтрации выбросов в совокупности с переходом на малоотходные производственные технологии может снизить негативное влияние на окружающую среду. В свою очередь, как отмечает Г. Изыдорчик [60], следует попытаться повысить эффективность переработки руды, что позволит сократить образование отходов. Этого можно достичь в том числе за счет использования для конструкции плавильных печей и дымоходов стойких материалов, которые значительно уменьшают количество отходов из-за сменных частей установки.

По данным, опубликованным Й. Сугимура [61], в японской медной промышленности в качестве меры противодействия изменению климата наметилась тенденция развития экономики замкнутого цикла (использования вторичного сырья). Движение к глобальной углеродной нейтральности – процесс труднопрогнозируемый и сложнореализуемый [62]. Широкое использование вторичного сырья может увеличить выбросы CO<sub>2</sub> на этапе плавки, в связи с чем оценку путей снижения вредного воздействия на окружающую среду необходимо производить с учетом прогнозирования и всестороннего анализа всех возможных вредных факторов [61].

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило определить ряд общих проблем, присущих методам автогенной плавки, и на основании международного и отечественного опыта решения этих проблем установлены основные критерии, которым должна отвечать эффективная технология плавки медных концентратов.

Одна из главных проблем заключается в необходимости организации предварительной обработки концентрата, такой как флотация, магнитная сепарация и гравитационная обработка, для уменьшения содержания примесных компонентов в исходном сырье и



улучшения конверсии меди при плавке. При реализации процесса плавки необходимо использовать новые технологии, позволяющие снизить затраты на энергию и сырье, увеличить производительность и повысить выход меди, к примеру, применить вакуумную дистилляцию или ультразвук для повышения эффективности плавки медного концентрата и уменьшения потерь меди.

Управление процессом должно включать мониторинг и контроль расходов на электроэнергию, топливо и сырье, позволяющие своевременно выявлять и устранять искажения цен на факторы производства, влияющие на энергоэффективность. Однако, помимо этих технических критериев, необходимо учитывать также экологические показатели производства, такие как: реализация возможности уменьшения воздействия производства на окружающую среду за счет утилизации отходов и вторичных ресурсов с одновременной компенсацией затрат на сырье и сокращение объема отходов; использование более эффективных систем очистки и фильтрации выбросов и переход к экономике замкнутого цикла. В целом реализация этих критериев позволит создать более эффективную и экологически устойчивую технологию плавки медных концентратов.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева, А.А., Бодуэн, А.Я., Минералогические особенности и способы переработки медных цинксодержащих концентратов (Учалинский горно-обогатительный комбинат), *Изв. Томского политехнич. унив. Инжиниринг георесурсов*, 2023, т. 334, № 3, с. 61. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3956>
2. Растяникова, Е.В., Мировой рынок ресурсов цветной металлургии. *Восточная аналитика*, 2020, № 3, с. 109. <https://doi.org/10.31696/2227-5568-2020-03-109-130>
3. Schlesinger, M.E., Sole, K.C., Davenport, W.G., Alvear Flores, G.R.F., Ch. 11 – Capture and fixation of sulfur. In: *Extractive Metallurgy of Copper*. Amsterdam: Elsevier, 2022, p. 281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821875-4.00016-X>
4. Kania, H. and Saternus, M., Evaluation and current state of primary and secondary zinc production – A review, *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 3, art. ID 2003. <https://doi.org/10.3390/app13032003>
5. Starev, N. and Doganov, G., KCM – Innovator in the Pb metal production through ausmelt technology and variable SO<sub>2</sub> concentration off-gas utilization. In: *PbZn 2020: 9th Int. Symposium on Lead and Zinc Processing*. Siegmund, A., et al. (eds.). The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, p. 321. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1_28)
6. Christina Alexander, Hannu Johto, Mari Lindgren, Lauri Pesonen, et al., Comparison of environmental performance of modern copper smelting technologies, *Cleaner Envir. Syst.*, 2021, vol. 3, art. ID 100052. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100052>
7. Юсупходжаев, А.А., Маткаримов, С.Т., Очилдиев, К.Т., *Малоотходные технологии в медном производстве*. Ташкент: ТашГТУ, 2020. 100 с.
8. Набойченко, С.С., Агеев, Н.Г., Дорошкевич, А.П., Жуков, В.П., и др., *Процессы и аппараты цветной металлургии*. Учебник для вузов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГГУ-УПИ, 2005. 700 с.
9. Диомидовский, Д.А., Шалыгин, Л.М., Гальнбек, А.А., Южанинов, И.А., *Расчеты пиропроцессов и печей цветной металлургии*. Учебное пособие. Москва: Гос. науч.-технич. изд. лит. по черной и цветной металлургии, 1963. 231 с.
10. Schlesinger, M.E., Sole, K.C., Davenport, W.G. and Alvear Flores, G.R.F., Bath matte smelting processes. Ch. 7, In: *Extractive Metallurgy of Copper*. Amsterdam: Elsevier, 2022, p. 143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821875-4.00002-X>
11. Schlesinger, M.E., Sole, K.C., Davenport, W.G. and Alvear Flores, G.R.F., Theory to practice: pyrometallurgical industrial processes. Ch. 5, In: *Extractive Metallurgy of Copper*. Amsterdam: Elsevier, 2022, p. 95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821875-4.00006-7>
12. Yuan, H.-B., Cai, B., Song, X.-C., Tang, D.-Z., et al., Insight on the reduction of copper content in slags produced from the ausmelt converting process, *J. Min. Metall., Sect. B: Metallurgy*, 2021, vol. 57, p. 155. <https://doi.org/10.2298/JMMB201016013Y>
13. Tsymbulov, L., Pigarev, S.P., Kongoli, F. and McBow, I., Basic control principles of a new process technology for copper matte converting in a two-zone Vaniukov furnace, *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, vol. 46, no. 16, p. 188.
14. Ospanov, Ye.A., Kvyatkovskiy, S.A., Kozhakhmetov, S.M., Sokolovskaya, et al., Slag heterogeneity of autogenous copper concentrates smelting, *Canad. Metall. Quart.*, 2023, vol. 62, no. 3, p. 594. <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2119495>
15. Kenzhaliyev, B.K., Kvyatkovskiy, S.A., Dyussebekova, M.A., Semenova, A.S., et al., Analysis of existing technologies for depletion of dump slags of autogenous melting, *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4(323), p. 23. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.36>
16. Dyussebekova, M.A., Kenzhaliyev, B.K., Kvyatkovskiy, S.A., Sit'ko, E.A., et al., The main reasons for increased copper losses with slags from vanyukov furnace, *Metalurgija*, 2021, vol. 60, nos. 3–4, p. 309. <https://hrcak.srce.hr/256045>
17. Topçu, M.A., Rüßen, A. and Derin, B., Minimizing of copper losses to converter slag by a boron compound

- addition, *J. Mater. Res. Technol.*, 2019, vol. 8, no. 6, p. 6244. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.018>
18. Khalid, M.K., Hamuyuni, J., Agarwal, V., Pihlasalo, J., et al., Sulfuric acid leaching for capturing value from copper rich converter slag, *J. Cleaner Prod.*, 2019, vol. 215, p. 1005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.083>
  19. Topçu, M.A., Rüßen, A. and Küçük, Ö., Treatment of copper converter slag with deep eutectic solvent as green chemical, *Waste Manag.*, 2021, vol. 132, p. 64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.022>
  20. Katarzyna, M., Grzegorz., I., Dawid, S., Konstantinos, M., et al., *Hazard. Mater.*, 2021, vol. 403, art. ID 123602. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123602>
  21. Sibanda, V., Sipunga, E., Danha, G., Mamvura, T.A., et al., Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal, *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 1, art. ID e03135. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
  22. Pavez, O., Herrera, P., González, M. and Rivera, O., Copper recovery through smelter slag flotation in Atacama, Chile: an industrial case study, *Ing. Investig.*, 2021, vol. 41, no. 1, art. ID e84162. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n1.84162>
  23. Wood, J., Wilson, D. and Hughes, S., A new era in smelting sustainability—Intensification of the Outotec® Ausmelt Top Submerged Lance (TSL) process for zinc production. In: *PbZn 2020: 9th International Symposium on Lead and Zinc Processing*, 2020, p. 63. Siegmund, A., et al. (eds). The Minerals, Metals & Materials Series. Springer: Cham. 986 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1_6)
  24. Nuorivaara, T., Klemettinen, A., Serna-Guerrero, R., Improving the flotation recovery of Cu from flash smelting slags by utilizing cellulose-based frother formulations, *Miner. Eng.*, 2022, vol. 181, art. ID 107522. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107522>
  25. Nuorivaara, T. and Serna-Guerrero, R., Unlocking the potential of sustainable chemicals in mineral processing: Improving sphalerite flotation using amphiphilic cellulose and frother mixtures, *J. Cleaner Prod.*, 2020, vol. 261, art. ID 121143. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121143>
  26. Toro N., Pérez, K., Saldaña, M., Salinas-Rodríguez, E., et al., Treatment of black copper with the use of iron scrap. Part I, *Hem. Ind.*, 2020, vol. 74, no. 4, p. 237.
  27. Nikolić, I.P., Milošević, I.M., Milijić, N.N. and Mihajlović, I.N., Cleaner production and technical effectiveness: Multi-criteria analysis of copper smelting facilities, *J. Clean. Product.*, 2019, vol. 215, p. 423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.109>
  28. Pérez, K., Toro, N., Gálvez, E., Robles, P., et al., Environmental, economic and technological factors affecting Chilean copper smelters – A critical review, *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 15, p. 213. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.007>
  29. Klaffenbach, E., Montenegro, V., Guo, M. and Blanpain, B., Sustainable and comprehensive utilization of copper slag: A review and critical analysis, *J. Sustain. Metall.*, 2023, vol. 9, p. 468. <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00683-4>
  30. Reijnders, L., Is near-zero waste production of copper and its geochemically scarce companion elements feasible? *Min. Process. Extract. Metallur. Rev.*, 2022, vol. 43, no. 8, p. 1021. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1986706>
  31. Wang, Q.-M., Wang, S.-S., Tian, M., Tang, D.-X., et al., Relationship between copper content of slag and matte in the SKS copper smelting process, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 2019, vol. 26, p. 301. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1738-4>
  32. Sokolovskaya, L.V., Kvyatkovskiy, S.A., Kozhakhmetov, S.M., Semenova, A.S., et al., Effect of reducing agent on structure and thermal properties of autogenous copper sulfide concentrate smelting slags, *Metallurgist*, 2021, vol. 65, p. 529. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01187-w>
  33. Manuel Devia, Roberto Parra, Claudio Queirolo, Mario Sánchez, et al., Copper smelting and converting: past and present Chilean developments, *Miner. Process. Extract. Metall.*, 2019, vol. 128, p. 108. <https://doi.org/10.1080/25726641.2018.1542050>
  34. Schmidt, A., Montenegro, V., Wehinger, G.D., Transient CFD modeling of matte settling behavior and coalescence in an industrial copper flash smelting furnace settler, *Metall. Mater. Trans. B*, 2021, vol. 52, p. 405. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02026-0>
  35. Xie, B., Geng, N., Yu, Q., He, D., et al., Removal of SO<sub>2</sub> from flue gas using blast furnace dust as an adsorbent, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2021, vol. 29, p. 15642. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16842-7>
  36. Štirbanović, Z., Urošević, D., Đorđević, M., Sokolović, J., et al., Application of thionocarbamates in copper slag flotation, *Metals*, 2022, vol. 12, art. ID 832. <https://doi.org/10.3390/met12050832>
  37. Sokolović, J., Stanojlović, R., Andrić, Lj., Štirbanović, Z., et al., Flotation studies of copper ore Majdanpek to enhance copper recovery and concentrate grade with different collectors, *J. Mining Metall. A: Mining*, 2019, vol. 55, p. 53. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1676260>
  38. Semushkina L.V., Tussupbayev N.K., Turysbekov D.K., et al., Flotation processing of copper-containing technogenic raw materials using a composite flotation reagent, *Complex Use of Mineral Resources*, 2023; vol. 324(1), p. 34. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.05>
  39. Mkhonto, P.P., Zhang, X., Lu, L., Xiong, W., et al., Adsorption mechanisms and effects of thiocarbamate collectors in the separation of chalcopyrite from pyrite minerals: DFT and experimental studies, *Miner. Eng.*, 2022, vol. 176, art. ID 107318. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107318>
  40. Zhou, H., Liu, G., Zhou, C., Chen, Y., et al., Quantitative characterization and magnetic separation

- of copper pyrometallurgical tailing for molybdenum and copper pre-concentration and cleaning of environmentally hazardous elements, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2023, vol. 122, p. 210. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.02.022>
41. Bai, X., Wen, S., Feng, Q., Liu, J., et al., Utilization of high-gradient magnetic separation–secondary grinding–leaching to improve the copper recovery from refractory copper oxide ores, *Miner. Eng.*, 2019, vol. 136, p. 77. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.009>
  42. Wen, X., Dai, P., Wang, J., Guo, L., et al., An environmentally-friendly method to recover silver, copper and lead from copper anode slime by carbothermal reduction and super-gravity, *Miner. Eng.*, 2022, vol. 180, art. ID 107515. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107515>
  43. Wang, Z., Gao, J., Lan, X., Feng, G., et al., A new method for continuous recovery of fine copper droplets from copper matte smelting slag via super-gravity, *Resour., Conserv. Recycl.*, 2022, vol. 182, art. ID 106316. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106316>
  44. Loibl, A. and Espinoza, L.A.T., Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America, *Resour., Conserv. Recycl.*, 2021, vol. 169, art. ID 105462. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105462>
  45. Shin, S., Moon, Y., Lee, J., Jang, H., et al., Signal processing for real-time identification of similar metals by laser-induced breakdown spectroscopy, *Plasma Sci. Technol.*, 2019, vol. 21, art. ID 034011. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaed6c/>
  46. Mal, E., Junjuri, R., Gundawar, M.K. and Khare, A., Optimization of temporal window for application of calibration free-laser induced breakdown spectroscopy (CF-LIBS) on copper alloys in air employing a single line, *J. Anal. Atomic Spectromet.*, 2019, vol. 34, p. 319. <https://doi.org/10.1039/C8JA00415C>
  47. Litvinenko, V.S., Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector, *Nat. Resour. Res.*, 2020, vol. 29, p. 1521. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09568-42>
  48. Matveeva, V.A., Alekseenko, A.V., Karthe, D. and Puzanov, A.V., Manganese pollution in mining-influenced rivers and lakes: current state and forecast under climate change in the Russian Arctic, *Water*, 2022, vol. 14, no. 7, art. ID 1091. <https://doi.org/10.3390/w14071091>
  49. Дурягина, А.М., Таловина, И.В., Либервирт, Х., Илалова, Р.К., Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья, *Записки Горного института*, 2022, т. 256, с. 527. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.76>
  50. Пронин, Е.М., Васильев, В.Е., Цветков, В.Ю., Факторы, определяющие устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса и их влияние на оценку результатов деятельности предприятий, *Записки Горного института*, 2011, т. 191, с. 176.
  51. Кирос Кабасканго, В.Э., Автоматизированный контроль теплового режима газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля, Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 102 с.
  52. Yang, B., Zha, G., Hartley, W., Kong, X., et al., Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials, *J. Cleaner Prod.*, 2019, vol. 219, p. 110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.011>.
  53. Guo, X., Zhou, Y., Zha, G., Jiang, W., et al., A novel method for extracting metal Ag and Cu from high value-added secondary resources by vacuum distillation, *Separ. Purif. Technol.*, 2020, vol. 242, art. ID 116787. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116787>
  54. Xu, M. and Lin, B., Energy efficiency gains from distortion mitigation: A perspective on the metallurgical industry, *Resour. Policy*, 2022, vol. 77, art. ID 102758. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102758>
  55. Sha, R., Li, J. and Ge, T., How do price distortions of fossil energy sources affect China's green economic efficiency? *Energy*, 2021, vol. 232, art. ID 121017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121017>
  56. Rioux, B., Galkin, P., Murphy, F., Feijoo, F., et al., The economic impact of price controls on China's natural gas supply chain, *Energy Econom.*, 2019, vol. 80, p. 394. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.12.026>
  57. Phiri, T.C., Singh, P. and Nikoloski, A.N., The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part I, *Miner. Eng.*, 2022, vol. 180, art. ID 107474. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107474>
  58. Phiri, T.C., Singh, P. and Nikoloski, A.N., The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review – Part II, *Miner. Eng.*, 2021, vol. 172, art. ID 107150. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107150>
  59. Maria, A.I., Merchán, M., Marchand, M., Eguizabal, D., et al., Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis. *J. Cleaner Prod.*, 2022, vol. 356, art. ID 131790. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131790>
  60. Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., et al., Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management, *Environ. Res.*, 2021, vol. 197, art/ ID 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
  61. Sugimura, Y., Kawasaki, T. and Murakami, S., Potential for increased use of secondary raw materials in the copper industry as a countermeasure against climate change in Japan, *Sust. Prod. Consump.*, 2023, vol. 35, p. 275. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.007>

62. Скобелев, Д.О., Череповицына, А.А., Гусева, Т.В., Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат, *Записки Горного института*, 2023, т. 259, с. 125. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.10>

### Summary

The review, based on the publications by both Russian and international researchers, presents an analysis of the problems of existing technologies for smelting copper concentrates. Three main problems requiring solutions were identified and considered: increasing the efficiency

of smelting copper sulfide-containing ores by reducing the copper content in slags obtained during the conversion process; increasing efficiency, including by obtaining an additional economic effect from waste disposal; reducing the harmful impact on the environment. It was established that trends towards the development of new efficient, environmentally friendly and cost-effective technologies are characteristic not only of the selected research object, but also of a number of other non-ferrous metals, such as lead and zinc.

*Keywords:* electrorefining, sulphide containing alloys, matte smelting, processing, copper