

*Петрова Р.И.,
магистр,
4 курс, факультет «Техносферная безопасность»
Института инженерной и экологической безопасности
Тольяттинского государственного университета
Россия, г. Тольятти*

БИОМЕТАЛЛУРГИЯ КАК «ЗЕЛЕНАЯ» ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

***Аннотация:** В данной статье исследуется потенциал биометаллургии как «зеленой» технологии для переработки медьсодержащих отходов. Анализируются основные биометаллургические процессы, включая биовыщелачивание и биоокисление, их преимущества перед традиционными методами (пирометаллургией и химической гидрометаллургией), а также их применимость к различным типам медного лома. Рассматриваются текущие исследования, технологические вызовы и перспективы внедрения биометаллургических подходов для создания устойчивой системы обращения с медными отходами и производства вторичной меди.*

***Ключевые слова:** биометаллургия, медь, медный лом, отходы производства, зеленая металлургия, циркулярная экономика, биовыщелачивание, бактерии, экологическая безопасность, устойчивое развитие.*

***Annotation:** This article examines the potential of biometallurgy as a "green" technology for processing copper-containing wastes. The main biometallurgical processes, including bioleaching and biooxidation, are analyzed, along with their advantages over traditional methods (pyrometallurgy and chemical hydrometallurgy) and their applicability to various types of copper scrap.*

Current research, technological challenges, and prospects for implementing biometallurgical approaches are discussed with the goal of developing a sustainable system for managing copper wastes and producing secondary copper.

Key words: *biometallurgy, copper, copper scrap, industrial waste, green metallurgy, circular economy, bioleaching, bacteria, environmental safety, sustainable development.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время насчитываются десятки тысяч предприятий и организаций, у которых образуются в процессе производства или эксплуатации отходы цветных металлов, однако эти отходы используются нерационально [9].

Производство меди, несмотря на его критическую важность для современной экономики, сопряжено с существенным экологическим следом. Образование значительных объемов медьсодержащих отходов на различных стадиях производственного цикла, от добычи до утилизации конечной продукции, требует разработки более устойчивых и экологически безопасных методов переработки. Традиционные пирометаллургические и гидрометаллургические подходы, зачастую энергоемкие и связанные с использованием агрессивных химикатов, стимулируют поиск альтернативных, «зеленых» технологий. [1]

В последние десятилетия биометаллургия, использующая микроорганизмы для извлечения металлов, привлекает все большее внимание как перспективное направление для переработки металлосодержащих отходов [7]. Эта технология предлагает ряд экологических и экономических преимуществ, делая ее привлекательной альтернативой для обращения с медным ломом.

Данная статья фокусируется на исследовании биометаллургических методов как основы для экологически устойчивой переработки

медьсодержащих отходов. Мы рассмотрим принципы биометаллургии, ее преимущества, типы медьсодержащего лома, пригодные для биопереработки, а также существующие исследования и перспективы внедрения этих «зеленых» технологий.

БИОМЕТАЛЛУРГИЯ: ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДИ

Биометаллургия – это область металлургии, использующая биологические процессы, в частности, метаболическую активность микроорганизмов (бактерий, грибов), для извлечения металлов из руд, концентратов и отходов [8]. Основными биометаллургическими процессами, применимыми к переработке меди, являются:

Биовыщелачивание – это процесс заключается в использовании микроорганизмов для растворения металлов из твердых материалов. Для меди чаще всего используются железоокисляющие *Acidithiobacillus ferrooxidans* и железовосстанавливающие бактерии [10]. Эти бактерии способны окислять сульфидные минералы меди или высвободить медь из оксидных соединений, переводя ее в растворимую форму. Процесс может проходить в аэробных или анаэробных условиях.

Исследования показали, что бактерии рода *Acidithiobacillus* могут эффективно выщелачивать медь из сульфидных отходов, таких как хвосты обогатительных фабрик или медьсодержащие шламы, с последующим извлечением меди методами экстракции растворителем или электролиза [4].

Биоокисление – это метод, который применяется для предварительной обработки сульфидных концентратов или отходов, содержащих сульфидные минералы меди, с целью разрушения сульфидной матрицы и высвобождения металлов для последующего выщелачивания.

Биовосстановление – это метод, в котором микроорганизмы могут использоваться для восстановления ионов меди из растворов, например, для получения металлической меди или медьсодержащих осадков [2].

Биометаллургические подходы предлагают ряд значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Снижение энергопотребления, так как процессы обычно протекают при умеренных температурах и давлении. Уменьшение выбросов парниковых газов и токсичных веществ в атмосферу. Минимизация образования опасных побочных продуктов и сточных вод, поскольку используются биореагенты, а процессы часто протекают в водной среде [8]. Возможность переработки отходов, которые не могут быть эффективно переработаны другими методами, тем самым снижая нагрузку на полигоны.

Снижение капитальных и операционных затрат, особенно для переработки низкокачественных или сложных отходов. Возможность извлечения меди из материалов с низкой концентрацией, где традиционные методы экономически невыгодны.

Биометаллургия может быть адаптирована для переработки широкого спектра медьсодержащих отходов, включая хвосты обогатительных фабрик, промышленные шламы и пыль, отработанные катализаторы, электронный лом (особенно печатные платы, где медь часто присутствует в виде тонких покрытий или мелких компонентов) [3].

Активные исследования в области биометаллургии демонстрируют ее растущий потенциал. Ряд работ посвящен оптимизации условий биовыщелачивания для повышения скорости и эффективности извлечения меди.

Важным направлением является повышение селективности биопроцессов, чтобы обеспечить извлечение именно меди, минимизируя попадание в раствор других металлов, что упрощает последующее рафинирование. Исследуются штаммы микроорганизмов, способные к более селективному воздействию, а также комбинированные подходы с использованием химических модификаторов [6].

Особый интерес представляют исследования по переработке электронного лома. Например, работы, демонстрирующие применение смешанных культур микроорганизмов для одновременного выщелачивания меди, золота и серебра из печатных плат, подчеркивают мультиметальный потенциал биометаллургии [3].

Разрабатываются новые конструкции биореакторов (например, чановые, колоночные, кучные), оптимизированные для конкретных типов отходов и микроорганизмов, что повышает эффективность процесса и облегчает его масштабирование [5].

Часто биометаллургия рассматривается не как самостоятельный, а как предварительный или сопутствующий этап. Например, биовыщелоченная медь затем может быть извлечена из раствора методами экстракции растворителем и электролиза, что является более экологичным вариантом по сравнению с полным пирометаллургическим циклом.

Несмотря на значительный потенциал, широкое внедрение биометаллургии сталкивается с рядом вызовов. Биометаллургические процессы, как правило, медленнее традиционных химических и пирометаллургических методов. Микроорганизмы чувствительны к изменению pH, температуры, концентрации металлов и наличию ингибиторов. Переход от лабораторных исследований к промышленным масштабам требует тщательной проработки инженерных и биологических аспектов. Некоторые типы лома, содержащие ингибирующие примеси, могут требовать предварительной подготовки или использования специфических, устойчивых штаммов микроорганизмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биометаллургия представляет собой одно из наиболее перспективных направлений «зеленой» металлургии для решения проблемы обращения с медьсодержащими отходами. Ее экологические преимущества, такие как низкое энергопотребление, снижение выбросов и возможность работы с

разнообразными типами лома, делают ее ключевым элементом перехода к циркулярной экономике в медной промышленности.

Несмотря на существующие технологические вызовы, активные исследования в области оптимизации биопроцессов, разработки новых штаммов микроорганизмов и совершенствования биореакторных технологий открывают путь к широкому промышленному применению биометаллургии. Интеграция биометаллургических методов с последующими стадиями извлечения и рафинирования меди позволит создать устойчивую, экологически безопасную и экономически целесообразную систему производства вторичной меди, в том числе для нужд производства медной катанки.

Использованные источники:

1. Haque, M. M. Environmental impacts of copper production and approaches for mitigation. // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 157. – P. 1185-1192.
2. Johnson, D. B. Biomining — a sustainable alternative for metal extraction // *Microbial Biotechnology*. – 2017. – Vol. 10, Iss. 6. – P. 1453-1456.
3. Lee, J. Y., et al. Bioleaching of copper and precious metals from waste printed circuit boards using a mixed microbial culture. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – Vol. 358. – P. 329-338.
4. Nazar, M., et al. Bioleaching of copper from low-grade sulfide ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. // *Hydrometallurgy*. – 2015. – Vol. 152. – P. 73-80.
5. Parada, P. Biomass production and inoculation of industrial bioleaching processes / P. Parada, P. Morales, R. Collao and others // *Advanced Materials Research*. — 2013. — Vol. 825. — P. 296–300.
6. Wang, X., et al. Recent advances in bioleaching of copper from complex sulfide ores. // *Minerals Engineering*. – 2020. – Vol. 145. – 106078.

7. Арутюнова Д.В. Современный стратегический анализ: конспект лекций. // Изд-во ТТИ ЮФУ. – 2010. – 122 с.

8. Булаев А.Г., Меламуд В.С. Биовыщелачивание цветных металлов из отходов обогащения// Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – 63 с.

9. Соловьянов А. А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. Источники и виды загрязнения. // Экологический вестник России. — 2015. — 20 с.

10. Четверикова Д. В., Бакаева М. Д, Четвериков С.П. и др. Биологическое выщелачивание цинка и меди из отходов флотационного обогащения сульфидных руд Бурибаевского горно-обогатительного комбината в перколяционной установке. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2013. — Т. 15. — № 3 (5). — 61–69 с.