

И. А. Блайда, Т. В. Васильева, К. И. Семенов

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина, тел.: +38(048) 746 61 02,
e-mail: iblayda@ukr.inet

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И ДЕСУЛЬФУРИЗАЦИИ УГЛЕЙ

В статье представлен краткий обзор современной научно-методической литературы, раскрывающей основные механизмы действия ультразвука на твердые субстраты, водные системы, микроорганизмы. Рассмотрены различные физико-химические и биологические эффекты, возникающие под действием ультразвуковых полей разной интенсивности и частоты, в частности, у микроорганизмов и в процессах с их участием. Приведены примеры использования ультразвуковой обработки для повышения технологических показателей процессов десульфуризации углей и биовыщелачивания металлов.

Ключевые слова: ультразвук, десульфуризация, выщелачивание, микроорганизмы.

Ультразвук (УЗ) представляет собой упругие колебания и волны в диапазоне частот 10^4 – 10^9 Гц. Помимо звуковых колебаний, представляющих собой распространение в среде продольных волн, к ультразвуку относятся колебания изгиба и сдвига, а также поперечные и поверхностные колебания [4]. Распространение ультразвука подчиняется общим закономерностям, характеризующим акустические или звуковые волны, причем в газообразных и жидких средах, в том числе в клетках и мягких тканях микроорганизмов, состоящих на 75% из воды, распространяются продольные волны, а в твердых телах – продольные и сдвиговые [1, 2, 16]. Скорость распространения ультразвука в среде определяется ее упругостью и плотностью [4]. При кавитации в жидкой среде происходит образование полостей (пузырьков), которые возникают под действием больших разрывающих напряжений и мгновенно всхлопывают. Это сопровождается физико-химическими процессами, в частности, большими давлениями и локальным нагревом среды. Импульсы давления, возникающие при смыкании кавитационных камер, способны разрушать не только твердые и жидкие тела, но и многие биообъекты, в частности микроорганизмы. Это нашло практическое применение в



процессах дегазации, эмульгирования, коагуляции, диспергирования, дезинтеграции клеток, стерилизации и т.д. Акустические потоки возникают при передаче части энергии ультразвуковой волны массе «озвучиваемого» вещества в виде механического импульса, что сопровождается усилением массообмена, улучшением перемешивания, в том числе и во внутриклеточных микроскопических структурах [1, 2, 16]. Появление указанных эффектов зависит как от физико-химических характеристик «озвучиваемой» среды или системы (плотность, вязкость, наличие дефектов и т.д.), так и от параметров ультразвукового воздействия (частота, интенсивность, мощность, периодичность и т.д.) [1, 4, 16].

Учитывая, что в ультразвуковом поле частицы совершают интенсивные колебательные движения с большими ускорениями, и это может приводить в облучаемой среде к разности давлений в несколько атмосфер, то вполне очевидно, что наложение ультразвуковых колебаний влияет на находящиеся в облучаемой среде живые организмы и клетки и может рассматриваться как один из внешних физических факторов воздействия на биологические объекты. Эффекты, достигаемые в результате такого воздействия, обычно обусловлены совместным действием многих факторов, и не всегда ясно, какой из них играет первостепенную роль. Тем не менее биологическое действие ультразвуковых волн связывают в большей степени с явлением кавитации [1]. В настоящее время УЗ с частотой в диапазоне 10^4 – 10^9 Гц широко применяют в медицине, экспериментальной биологии, а также в биотехнологии.

Использование УЗ в медицине (диагностике и лечении), обусловленное совместным действием упомянутых выше факторов, приводит к активизации обменных и репаративных процессов, ускорению рассасывания инфильтратов и кровоизлияний, улучшению проницаемости тканевых мембран [4, 8, 13]. Использование ультразвука в экспериментальной биологии обусловлено его способностью разрушать клеточные оболочки биологических объектов. УЗ используют при необходимости выделения из клетки биологически активных веществ, например, ферментов; разрушения митохондрий и хлоропластов для изучения взаимосвязи между их структурой и функциями. Применение УЗ в экспериментальной биологии также связано с его способностью повреждать молекулы ДНК, что вызывает возникновение мутаций [2, 18].

В промышленности применение ультразвука основано на возникновении под его влиянием упомянутых выше кавитационных и потоковых эффектов в жидких средах и на твердых поверхностях в сложных многофазных системах. В этом случае механизм ультразвукового воздействия приводит к интенсификации процессов массообмена, диспергирования, смешения, растворения и т.д. и нашло применение в процессах очистки сточных вод [12, 14], измельчения и обогащения минералов [7, 17, 29], десульфуризации топлива [19, 26, 44], выщелачивания металлов, в частности, микробного [20, 40, 42]. Внимание к применению ультразвуковой обработки в биотехнологии обусловлено как непосредственным воздействием на клетки бактерий, так и возможностью изменения физико-химических характеристик субстратов, к которым прикрепляются микроорганизмы. Это имеет особое значение для интенсификации биотехнологических процессов, направленных на извлече-



ние металлов из обедненных (некондиционных) природных руд и техногенных отходов.

Воздействие ультразвука на жидкие среды сопровождается различными явлениями: характерным шумом во всем диапазоне частот и сильным акустическим сигналом; ускорением одних химических реакций и иницированием других; интенсивными микропотоками и ударными волнами, способными перемешивать слои жидкости и разрушать поверхности граничащих с кавитирующей жидкостью твердых тел; ультразвуковым свечением, а также различными биологическими эффектами [1, 16]. Под действием кавитации молекулы воды образуют -OH^\cdot , H_2O_2 , озон, которые являются сильными окислителями с высоким потенциалом окисления (до +2,8 В) [19, 23]. Процесс сопровождается локальным повышением температуры и электрическими разрядами и служит основанием передовой быстро развивающейся технологии Advanced Oxidation Process (AOP) [19].

Влияние УЗ на твердые поверхности, в частности, природных минералов, обусловлено теми же эффектами, которые возникают в жидких системах. За счет кавитационной энергии эрозии и расклинивающего действия кавитационных пузырьков происходит разрушение минерального вещества и поверхностных пленок, приводящее к измельчению минералов и увеличению их дисперсности [7, 25, 37]. Мощный УЗ способствует перемешиванию пульпы, уменьшению толщины ламинарного слоя у границы с твердым телом и устранению диффузионных ограничений [17]. Этот процесс играет большую роль при ультразвуковой очистке поверхности рудных частиц от загрязнений минерального характера, в частности, при флотации.

Использование ультразвука при десульфуризации топлива

Ультразвуковые эффекты, возникающие в водной среде и на поверхности минералов, используются для повышения эффективности десульфуризации природного топлива [5, 24, 28]. Для обессеривания углей применяют различные физико-химические и микробиологические методы обработки, которые, несмотря на их достоинства, не обеспечивают достаточно высокого эффекта десульфуризации при сохранении тепловых качеств топлива [5, 15].

В настоящее время показана перспективность использования ультразвуковых технологий для обогащения ископаемых углей, нефти и дизельного топлива [33, 36, 38], а также перспективных водно-угольных суспензий (CWS от англ. *coal-water slurry*) [39]. Преимущество использования УЗ в процессах десульфуризации заключается в том, что эта технология является экологически чистой и с ее помощью можно одновременно удалить серу и снизить зольность [36]. В ультразвуковом поле разрушение угля происходит за счет диспергирования выступающих кромок и острых углов угольных частиц, обладающих небольшой твердостью, в результате чего частицы угля приобретают округлую форму со сглаженной поверхностью [35].

На сегодня доказана эффективность использования УЗ для десульфуризации как высоко-, так и низкосернистых углей [19, 35, 38] с удалением всех



форм серы, в частности, и наиболее труднодоступной органической [17, 34].

Так, Ambedkar В. с соавторами [19] проводили ультразвуковую водную десульфуризацию угля зольностью 18,9 %, содержащего (%) серы общей – 5,03; сульфатной – 2,45; пиритной и органической – 2,56; связанного углерода – 36,47. УЗО осуществляли в течение 60 минут с частотой 20, 25, 132, 430 кГц и мощностью 500 Вт. Такая обработка приводит к удалению серы на 62,0%. В работах Ghadyani Azam и Mesroghli Sh. с соавторами [26, 34] изучено влияние УЗО на эффективность десульфуризации иранского угля шахты «Табас» на разных стадиях технологического процесса. Ультразвуковая энергия с частотой 24 кГц и мощностью 400 Вт использована для обессеривания турецких углей (завод Афсин-Эльбистан, Турция) [44]. В работе Vinoy K. Saikia с соавторами [21] приведены данные об использовании УЗ для обессеривания бразильского угля одного из крупнейших энергетических комплексов Южной Америки. После УЗО содержание общей серы уменьшилось на 70,0 и 77,0%, органической – на 67,0 и 81,0%, пиритной – на 48,0 и 60,0% и сульфатной серы – на 91,0 и 96,0% соответственно в растворах окислителя – 0,2 М и 0,025 М H_2O_2 .

УЗО может быть эффективна в сочетании с современными перспективными биотехнологическими подходами к обессериванию отечественных углей, основанными на использовании активности микроорганизмов микробиоты руд [5, 6].

Влияние ультразвука на микроорганизмы

Биологическое действие УЗ на живые системы, в том числе на микроорганизмы, связано с изменением механических, электрических и иных свойств клеточных оболочек и мембран, нарушением внутреннего состава клеток и изменением концентраций веществ, растворенных в цитоплазме. Основным результатом ультразвукового облучения – разрыв клеточных мембран и нарушение механической целостности клеток. При повышении интенсивности ультразвука до значений, когда в среде возникают механические усилия, сравнимые с прочностью клеточных мембран, начинается процесс разрушения клеток. Разрушающее действие УЗ на микроорганизмы лежит в основе методов стерилизации и дезинфекции. Стерилизующее действие УЗ на микроорганизмы проявляется на частотах 20 кГц и выше при интенсивности более 0,5 Вт/см³ [9, 16, 18].

Достаточно хорошо изучено влияние УЗ на грамположительные и грамотрицательные бактерии [3, 11]. Так, при воздействии УЗ легко разрушаются клетки *Salmonella typhimurium*, *Lactobacterium casei*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas fluorescens*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus anthracis*. Более устойчивы *Sarcin aurea*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Acetobacter suboxydans*. Среди патогенных форм наибольшую устойчивость к УЗ выявили *Mycobacterium tuberculosis* [9]. Выявлено, что под влиянием УЗ у микроорганизмов изменяется чувствительность к антибиотикам. Так, при воздействии УЗ частотой в 800 кГц в течении 10 мин у *Staphylococcus haemolyticus* чувствительность к пенициллину возрастает в 2–5 раз [18].

Важной с практической точки зрения особенностью, возникающей под



влиянием УЗО, является изменение способности микроорганизмов прикрепляться к различным субстратам [31]. Антушевой Т.И. с соавторами [3] показано, что облучение УЗ частотой 60 кГц в течение 7–10 часов приводило к уменьшению в 2,0–2,7 раза адгезивной активности музейных и циркулирующих штаммов *Corynebacterium diphtheriae* в зависимости от диапазона ультразвукового облучения. Авторы экспериментально доказали, что влияние УЗ приводило к снижению индекса адгезивной активности микроорганизмов, причем степень угнетения адгезивного потенциала прямо пропорционально зависела от времени воздействия УЗ на бактерии.

Известно, что извлечение металлов из минерального сырья происходит по прямому и непрямоу механизмам, в которых принимают участие свободные и прикрепленные клетки микроорганизмов [6, 10, 32]. Ключевым моментом прикрепления ацидофильных хемолитотрофных бактерий (АХБ) к поверхности субстратов является адгезия. Роль адгезинов у АХБ выполняют полисахариды и поверхностные белки клеточных стенок. Они образуют специфическую пленку, благодаря которой происходят процессы выщелачивания металлов.

В результате разрыва клеточных оболочек под воздействием УЗ высвобождаются биологически активные вещества и появляются ферменты, отсутствующие у «неозвученных» клеток. Так, например у *Saccharomyces globosus* после 30 мин воздействия УЗ с частотой 740 кГц появляется инвертаза, отсутствующая у интактных, «неозвученных» клеток [16]. Под влиянием низкочастотного (27 кГц) и высокочастотного (2,64 МГц) ультразвука у *Aspergillus niger* отмечена инактивация глюкозооксидазы [11].

Влияние ультразвука на процессы биовыщелачивания металлов

В последнее время повышенное внимание к ультразвуковым технологиям в биотехнологии обусловлено не только непосредственным воздействием на клетки микроорганизмов, но и возможностью применения УЗО для изменения физико-химических характеристик субстратов, к которым прикрепляются микроорганизмы [2]. Это в первую очередь относится к вопросам повышения эффективности бактериального выщелачивания металлов из природных некондиционных руд и техногенных отходов.

Бактериальное выщелачивание металлов – гетерогенный процесс, протекающий в системе «жидкость (выщелачивающий раствор, раствор окислителей) – твердое тело (природные минералы, сульфидные руды, техногенные отходы) – суспензия микроорганизмов». Основными механизмами ультразвукового воздействия на такую систему выступают описанные ранее акустические кавитация и потоковые эффекты [42, 45, 47].

В таблице приведены результаты по микробному выщелачиванию никеля из природных руд с использованием различных представителей микромикетов родов *Aspergillus*, *Penicillium* и бактерий родов *Pseudomonas*, *Sporosarcina*, *Bacillus* [22, 27, 41].



Таблица

Результаты по биовыщелачиванию никеля из природных руд с использованием гетеротрофных микроорганизмов

Table

Results of bacterial bioleaching of nickel from natural ores using heterotrophic microorganisms

Месторождение	Состав руды, %	Условия выщелачивания	Извлечение металлов, %	Ссылка
Латеритные отложения	Ni – 0,72 Fe – 36,85 Zn – 0,10	Аборигенный штамм <i>Aspergillus humicola</i> SKP102 температура 30 °C 30 дней 1. стационарный режим 2. перемешивание 120 об/мин	1. Ni – 17,78 2. Ni – 53,80	27
Гарниерит	Ni – 2,40 Fe – 6,70	Типовые штаммы <i>A. niger</i> ATCC 1015 <i>B. megaterium</i> ATCC 21916 <i>Pseudomonas sp.</i> ATCC 21025	Ni – 78,0	22
Латеритная руда	Ni – 1,27 Fe – 70,78	1. Аборигенные <i>Aspergillus sp.</i> 2. Химическое выщелачивание 1М щавелевой кислотой	1. Ni – 0,29 2. Ni – 6,66	41

В работе Ghosh S. и Paul A. [27] максимальное извлечение никеля, как в стационарном режиме (17,78%), так и при перемешивании (53,8%) достигали через 30 дней. В работе Castro I.M. с соавторами [22] приведен пример использования бактерий родов *Bacillus* и *Pseudomonas*, грибов *Aspergillus* и *Penicillium* для выщелачивания никеля из гарньерита. Максимальное извлечение никеля (78,0%) было достигнуто при использовании типового штамма *Aspergillus niger* ATCC 1015, что, по мнению авторов, связано с синтезом этим штаммом лимонной кислоты. С другой стороны, авторы Sukla L.B. и Panchanadikar V. [41], изучая извлечение никеля из латеритной руды ассоциацией собственной микробиоты, в которой доминировали представители *Aspergillus sp.*, показали, что большее количество никеля можно экстрагировать с использованием химического выщелачивания 1М раствором щавелевой кислоты (6,66%), чем органическими метаболитами (0,29%).

Ультразвуковое воздействие значительно повышает эффективность извлечения никеля из латеритной руды, в частности, месторождений в Сукинде (Orissa, Индия) [30, 43]. Swamy K.M. с соавторами [43] для извлечения никеля из этой руды с содержанием железа и никеля 70,83% и 1,27% соответственно использовали аборигенный штамм *A. niger* и воздействие УЗ с частотой 720, 430 и 20 кГц и соответствующей мощностью 15, 120 и 375 Вт. Установлены оптимальные параметры выщелачивания: плотность пульпы 8,7%; частота ультразвука 20 кГц; интенсивность ультразвука 1,5 Вт/см²; время – 30 мин. Эти условия обеспечивали извлечение из руды никеля и железа, соответственно, на 95,0 и 0,16% за 14 дней. Без УЗ воздействия при тех же параме-



трах выщелачивание никеля и железа составило 24,9 и 5,0%, соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии УЗО на повышение селективности извлечения никеля по отношению к железу. Увеличение частоты УЗО приводило к снижению степени извлечения никеля, что связано с разрушением клеток штамма *A. niger*, и как следствие, снижением синтеза органических кислот, являющихся по сути выщелачивающими реагентами никеля из руды [43].

В работе Kar R.N. с соавторами [30] с использованием той же латеритной руды представлены результаты по влиянию на эффективность биовыщелачивания никеля различных факторов (концентрация биомассы аборигенного штамма *Aspergillus niger*, плотность пульпы, параметры УЗО). Как и в предыдущей работе, показано положительное влияние УЗО на извлечение никеля: максимальное (95,0%) извлечение регистрировали через 14 дней при концентрации суспензии *Aspergillus niger* 10^6 кл/мл, ежедневной УЗО в течение 30 мин ультразвуком с частотой 43 кГц и мощностью 1,5 Вт/см². При обычном выщелачивании за этот же период в раствор переходило лишь 24,9% никеля. Авторы также отмечают, что УЗО способствует селективности извлечения никеля по отношению к железу.

В работе Anjum F. с соавторами [20] установлено положительное влияние УЗ на процессы извлечения металлов из пакистанских черных сланцев аборигенным штаммом *Aspergillus niger*. Концентрация алюминия и железа в руде составляла 8,80% и 3,76% соответственно; Cu, Zn, Co и Ni присутствовали в незначительных количествах (~ 10–40 мг/кг). УЗО с частотой 40 кГц проводили ежедневно в течение 7 мин в период роста *Aspergillus niger* (15 дней) и период выщелачивания (24 или 36 дней). Установлено, что УЗО стимулирует образование *Aspergillus niger* органических кислот – лимонной (6,2%), яблочной (3,5%), щавелевой (2,4%) и винной (0,052%), в то время как их количество без УЗО составляло 0,44, 1,14, 0,20 и 0,02% соответственно. Таким образом, авторами подтверждено положительное влияние УЗ на продуцирование органических кислот микромицетами *A. niger*. Кроме этого, УЗО также способствовала увеличению количества биомассы *A. niger* до 30,0%, по сравнению с 13,0% в контрольном варианте (без УЗО). Аналогичные результаты получены в работе Swamy K.M. с соавторами [42].

В работе Yi Wai Chiang с соавторами [46] приведены результаты по влиянию УЗО на микробное выщелачивание никеля из олевина с применением коллекционных штаммов *Paenibacillus mucilaginosus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum* и *Humicola grisea*. В работе использовано оливковое сырье (Нидерланды) состава, %: Si – 20,7; Fe – 3,7; Ni – 0,27; Cr – 0,24; Al – 0,17. УЗО при частоте 37 кГц, мощности 300 Вт и интенсивности 0,2 Вт/см² проводили в период фазы роста на протяжении 7 дней и фазы выщелачивания ежедневно в течение 15 мин. Использование УЗ в фазе роста способствовало повышению количества биомассы на 15,7–30,0%, что совпадало с результатами Swamy K.M. с соавторами [42]. Извлечение никеля через 17 дней под влиянием УЗО составило 15,7% по сравнению с 9,9% при отсутствии УЗО. Полученный эффект может быть связан с различными механизмами, в первую



очередь с увеличением количества биомассы и продуцированием биологически активных веществ, в том числе органических кислот [20, 42]. Как считает Yi Wai Chiang с соавторами [46], органические соединения, продуцируемые микроорганизмами, могут действовать как лиганды при образовании поверхностных или водных комплексов, что ослабляет химические связи в оливине и приводит к быстрейшему извлечению металлов. В результате ультразвуковых кавитации и микропотоков происходит измельчение минералов. Так, размер частиц оливина до УЗ обработки составлял 158,2 мкм, после – 79,2 мкм. УЗ помимо повышения степени извлечения никеля из оливина способствует увеличению селективности извлечения никеля по отношению к магнию и железу (коэффициент селективности составил 2,2). По результатам проведенных исследований авторы считают, что *Aspergillus niger* обладает большей выщелачивающей активностью по сравнению с *Paenibacillus mucilaginosus*, *Penicillium chrysogenum* и *Humicola grisea*. По-видимому, это обусловлено большим количеством синтезированных органических кислот, как результат, снижением рН до 2,3, что способствует ускорению растворения минерала.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективном влиянии УЗО на процессы микробного выщелачивания металлов из природных минералов. Рядом авторов установлено, что влияние УЗ на микробиологические процессы носит разнонаправленный характер, связанный с различными физико-химическими эффектами [2, 8, 19]. УЗО разрушает частицы минералов, повышает гомогенизацию пульпы, увеличивая площадь поверхности. Низкочастотный УЗ способствует накоплению биомассы и увеличению синтеза биологически активных веществ, высокочастотный УЗ способствует полной или частичной гибели всех или определенных микроорганизмов [1, 9, 19]. Таким образом, ультразвук способен изменять состав и активность природных микробных сообществ, следовательно, может регулировать жизнеспособность, численность и активность микроорганизмов.

Анализ литературы показывает, что основное внимание ученых привлечено к изучению влияния ультразвука на бактериальное выщелачивание с использованием гетеротрофных микроорганизмов. Данных о влиянии ультразвука на биовыщелачивание металлов автотрофными и хемолитотрофными микроорганизмами практически нет.

Заключение

Результаты исследований дают основания предполагать, что ультразвуковая обработка может значительно интенсифицировать и сделать рентабельными процессы переработки обедненного некондиционного минерального сырья и техногенных отходов за счет воздействия ультразвука как на поверхность частиц субстратов, так и на клетки микроорганизмов их аборигенной микробиоты. Это позволит значительно ускорять процессы и сократить количество энергии и реагентов, необходимых для более полного перехода ценных металлов в раствор на фоне большого количества балластных веществ, составляющих основу некондиционных геогенных и техногенных субстратов.



І. А. Блайда, Т. В. Васильєва, К. І. Семенов
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна, тел.: +38(048) 746 61 02,
e-mail: iblayda@ukr.net

ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКУ НА ПРОЦЕСИ БІОВИЛУГОВУВАННЯ МЕТАЛІВ І ДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Реферат

У статті подано короткий огляд сучасної науково-методичної літератури, яка розкриває основні механізми дії ультразвуку на тверді субстрати, водні системи, мікроорганізми. Розглянуто різні фізико-хімічні та біологічні ефекти, що виникають під дією ультразвукових полів різної інтенсивності і частоти, зокрема, у мікроорганізмів і в процесах за їх участі. Наведені приклади використання ультразвукової обробки для підвищення технологічних показників процесів десульфуризації вугілля і біовилуговування металів.

Ключові слова: ультразвук, десульфуризація, вилуговування, мікроорганізми.

I. A. Blayda, T. V. Vasyleva, K. I. Semenov
Odesa National Mechnykov University,
2, Dvoryanska St., Odesa, 65082, Ukraine, tel.: +38 (048) 746 61 02,
e-mail: iblayda@ukr.net

IMPACT OF ULTRASOUND ON COAL DESULFURIZATION AND PROCESS OF BIOLEACHING OF METALS

Summary

This paper briefly reviews a range of modern research and methodological literature that explores the impact of ultrasound on solid substrates, water systems and microorganisms. The authors examined various physical-chemical and biological effects occurring in particular in microorganisms as well as in processes, in which they are involved, under the exposure to ultrasound fields of different intensity and frequency. The examples of the use of ultrasound treatment aimed at increasing technological results of coal desulfurization as well as bioleaching of metals are provided.

Key words: ultrasound, desulfurization, leaching, microorganisms.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопян В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 225 с.
2. Антушева Т. И. Некоторые особенности влияния ультразвука на микроорганизмы // Живые и биокосные системы. – 2013, № 4. – С. 11–15.



3. Антушева Т. И., Бабич Е. М., Кивва Ф. В., Калининко С. В., Рыжкова Т. А., Скляр Н. И., Коваленко О. И. Влияние ультразвука и электромагнитных волн миллиметрового диапазона на адгезивные свойства *C. diphtheriae* // Успехи современного естествознания. – 2014, № 3 – С. 48–52.

4. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1957. – 726 с.

5. Блайда И. А., Васильева Т. В. Бактериальная десульфуризация углей (обзор). Bacterial desulphurization of Coals (review) // Мікробіологія і Біотехнологія. Microbiology & Biotechnology. – 2017, №3. – С. 6–23. DOI: [http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.3\(39\).110877](http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.3(39).110877).

6. Блайда И. А., Васильева Т. В., Баранов В. И. Использование биогидрометаллургических технологий в решении проблем утилизации техногенных отходов с получением ценных металлов // Комплексное использование минерального сырья. – 2015, № 3. – С. 75–82.

7. Губин Г. Г., Ярош Т. П., Скляр Л. В. Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых // Спеціальні та комбіновані методи. Збагачення корисних копалин. – 2016. – Вып. 62 (103). – С. 78–87.

8. Демин И. Ю., Прончатов-Рубцов Н. В. Современные акустические методы исследований в биологии и медицине (учебно-методические материалы). – Нижний Новгород, 2007. – 118 с.

9. Исаенко Е. Ю. Применение ультразвука для дезинтеграции микробных клеток // Annals of Mechnicov Institute. – 2008, №1. – С. 5–9.

10. Каравайко Г. И., Дубинина Г. А., Кондратьева Т. Ф. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа // Микробиология. – 2006, № 5. – С. 593–629.

11. Карасёва Е. И., Тарун Е. И., Метелица Д. И. Ультразвуковая инактивация глюкозооксидазы *Aspergillus niger* в водных растворах // Прикладная биохимия и микробиология. – 2009. – Т. 45, № 1. – С. 14–22.

12. Келлер О. К. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

13. Лучевая диагностика: Учебник Т. 1. / под ред. Г. Е. Труфанова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – С. 39–44.

14. Мамченко А. В., Кий Н. Н., Чернова Л. Г. Исследование влияния способов модификации природного доломита на деманганацию воды // Химия и технология воды. – 2008. – 30, Вып. 4. – С. 347–35.

15. Назимко Е. И. Исследования по проблеме удаления серы, содержащейся в углях // Вісті Донецького гірничного інституту. – 2014, № 2. – С. 60–65.

16. Физические основы применения ультразвука в медицине и экологии: учебно-методическое пособие / Под общ.ред. профессора С. П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. – 110 с.

17. Черных С. И., Рыбакова О. И., Лебедев Н. М., Журнова Т. И. К вопросу изучения влияния ультразвука, магнитных полей и электрического тока на флотацию золота // Цветная металлургия. – 2003, № 6. – С. 15–21.



18. Шапхаев Э. Г., Цыренов В. Ж., Чебунина Е. И. Основы биотехнологии. 5. Дезинтеграция микробных клеток. – Улан-Уде: Издательство ВСГТУ, 2005. – С. 53–65.
19. *Ambedkar B., Nagarajan R., Jayanti S.* Ultrasonic coal-wash for desulfurization // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2011, N18. – P. 718–726.
20. *Anjum F., Bhatti H.N., Ghauri M.A.* Enhanced bioleaching of metals from black shale using ultrasonics // *Hydrometallurgy*. – 2010, N100. – P. 122–128.
21. *Binoy K. Saikia, Adilson C. Dalmora, Rahul Choudhury, Tonkeswar Das, Silvio R. Taffarel, Luis F.O. Silva.* Effective removal of sulfur components from Brazilian power-coals by ultrasonication (40 kHz) in presence of H₂O₂ // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2016, N 32. – P. 147–157.
22. *Castro I. M., Fietto J. L. R., Vieira R. X., Tropia M. J. M., Campos L.M.* Bioleaching of zinc and nickel from silicates using *Aspergillus niger* cultures // *Hydrometallurgy*. – 2000, N 57. – P. 39–49.
23. *Christman C. L., Carmichael A. J., Mossoba M. M., Riesz P.* Evidence for free radicals produced in aqueous solutions by diagnostic ultrasound // *Ultrasonics*. – 1987, N 25. – P. 31–34.
24. *Duran J. E., Mahasay S. R., Stock L. M.* The occurrence of elemental sulfur in coals // *Fuel*. – 1986, N 65. – P. 1167–1168.
25. *Franco F., Pérez-Maqueda L. A., Pérez-Rodríguez J. L.* The effect of ultrasound on the particle size and structural disorder of a well-ordered kaolinite // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2004, N 274. – P. 107–117.
26. *Ghadyani Azam, Noaparast Mohammad, Ziaedin Sied.* A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high ash coal flotation and kinetics // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. – 2017, N 36. – P. 1–18.
27. *Ghosh S. , Paul A. K.* Bioleaching of nickel by *Aspergillus humicola* SKP102 isolated from Indian lateritic overburden // *Journal of Sustainable Mining*. – 2016, N 15. – P. 108–114.
28. *Giovanni Rossi.* The Microbial Desulfurization of Coal // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* – 2014, N 142. – P. 147–167.
29. *Gopi K. R., Nagarajan R.* Application of power ultrasound in cavitation erosion testing of nano-ceramic particle/polymer composites // *Solid State Phenomena*. – 2008, N 13. – P. 191–204.
30. *Kar R. N., Sukla L. B., Swamy K. M., Panchanadikar V. V., Narayana K.L.* Bioleaching of Lateritic Nickel Ore by Ultrasound // *Metallurgical and materials transactions*. – 1996, N 27. – P. 351–354.
31. *Klemm P., Schembri M. A.* Bacterial adhesions: Function and structure // *Int. J. Med. Microbiol.* – 2001, N 293. – P. 34–39.
32. *Kondrateva T. F., Pivovarova T. A., Tsaplina I. A.* Diversity of communities of acidophilic chemolithotrophic microorganisms in natural and technogenic ecosystems // *Microbiology*. – 2012. – V. 81, N 1. – P. 3–27.
33. *Mello Paola de A., Duarte F. A., Matheus A. G., Mauro Korn Nunes, Valderi L. Deossler, Flores Erico M. M.* Ultrasound assisted oxidative process for sulfur removal from petroleum product feedstocks // *Ultrason. Sonochem.* – 2009, N 16. – P. 732–736.



34. *Mesroghli Sh., Yperman J., Reggers G., Jorjani E., Carleer R.* Impacts of sonication and post-desulfurization on organic sulfur species by reductive pyrolysis // *Fuel*. – 2016, N 183. – P. 258–291.
35. *Nagarjan R.* Use of ultrasonic cavitation in surface cleaning efficiency and surface erosion rate // *J. Inst. Environ. Sci.* – 2006, N 49. – P. 40–50.
36. *Ozkan S. G.* Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes // *Fuel*. – 2012, N 93. – P. 576–580.
37. *Perez-Rodrigue J. L., Pascual J., Franco F., Jimenez de Haro, Duran A.* The influence of ultrasound on the thermal behaviour of clay minerals // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2006, N 26. – P. 747–753.
38. *Saikia B. K., Dutta A. M., Baruah B. P.* Feasibility studies of desulfurization and de-ashing of low grade medium to high sulfur coals by low energy ultrasonication // *Fuel*. – 2014, N 123. – P. 12–18.
39. *Shen Y., Sun T., Liub X., Jiaa J.* Rapid desulfurisation of CWS via ultrasonic enhanced metal boron hydrides reduction under ambient conditions // *RSC Adv*. – 2012, N 2. – P. 4189–4197.
40. *Sinisteria J. V.* Application of ultrasound to biotechnology: an overview // *Ultrasonics*. – 1992, N 30. – 180 p.
41. *Sukla L. B., Panchanadikar V.* Bioleaching of lateritic nickel ore using a heterotrophic micro-organism // *Hydrometallurgy*. – 1983, N 32. – P. 373–379.
42. *Swamy K. M., Narayana K. L., Vibhuti N.* Bioleaching with ultrasound // *Ultrason. Sonochem.* – 2005, N 12. – P. 301–306.
43. *Swamy K. M., Sukla L. B., Narayana K. L., Kar R. N.* Use of ultrasound in microbial leaching of nickel from laterites // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 1995. – V. 2, N 1. – P. 55–59.
44. *Toraman O. Y., Delibalta M. S.* Ultrasonic Desulfurization of Low Rank Turkish Coal Using Various Chemical Reagents // *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. – 2016. – P. 4621–4623.
45. *Willscher S., Bosecker K.* Studies on the leaching behaviour of heterotrophic microorganisms isolated from an alkaline slag dump // *Hydrometallurgy*. – 2003, N 71. – P. 257–264.
46. *Yi Wai Chiang, Rafael M. Santos, Aldo Van Audenaerde, Annick Monballiu, Tom Van Gerven.* Chemoorganotrophic Bioleaching of Olivine for Nickel Recovery // *Minerals*. – 2014, N 4. – P. 564–573.
47. *Yusuf Chist.* Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity // *TRENDS in Biotechnology*. – 2003, N 21. – P. 89–93.

References

1. Akopjan VB. Fundamentals of interaction of ultrasound with biological objects. Moscow: MGTU Bauman. 2005. 225 p.
2. Antusheva TI. Some features of the influence of ultrasound on microorganisms. *Zhivye i biokosnye sistemy*. 2013; (4): 11-15.
3. Antusheva TI, Babich EM, Kivva FV, Kalinichenko SV, Ryzhkova TA, Skljar NI, Kovalenko OI. The influence of ultrasound and electromagnetic waves in the millimeter range on the adhesive properties of *C. diphtheria*. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014; (3): 48-52.



4. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology. M.: Izd-vo inostr. lit-ry. 1957. 726 p.
5. Blayda IA, Vasileva TV. Bacterial desulphurization of Coals (review). *Microbiology & Biotechnology*. 2017; (3): 6-23.
DOI: [http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.3\(39\).110877](http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.3(39).110877).
6. layda IA, Vasileva TV, Baranov VI. The use of bio-hydrometallurgical technologies in solving problems utilization of manmade waste and receiving from them valuable metals. *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syr'ya*. 2015; (3): 75-82.
7. Gubin GG, Jarosh TP, Skljar LV. Generalization and analysis of the possibility of using ultrasonic vibrations during processing of minerals. *Special'ni ta kombinovani metodi. Zbagachennja korisnih kopaln*. 2016; 62 (103): 78-87.
8. Demin IJu, Pronchatov-Rubcov NV. Modern acoustic methods of research in biology and medicine (teaching and methodological materials). *Nizhnij Novgorod*. 2007. 118 p.
9. Isaenko E Ju. Application of ultrasound for the disintegration of microbial cells. *Annals of Mechnicov Institute*. 2008; (1): 5-9.
10. Karavajko GI, Dubinina GA, Kondrat'eva TF. Lithotrophic microorganisms of oxidation cycles of sulfur and iron. *Mikrobiologija*. 2006; (5): 593-629.
11. Karasjova EI, Tarun EI, Metelica DI. Ultrasonic inactivation of glucose oxidase *Aspergillus niger* in aqueous solutions. *Prikladnaja biohimija i mikrobiologija*. 2009; 45 (1): 14-22.
12. Keller OK. Ultrasonic cleaning. L.: Mashinostroenie. 1977. 325 p.
13. Radiation diagnostics: Textbook V.1. Eds GE Trufanova. M.: GJeOTAR-Media. 2009: 39-44.
14. Mamchenko AV, Kij NN, Chernova LG. Investigation of the influence of methods of modification of natural dolomite on the demanganation of water. *Himija i tehnologija vody*. 2008; 30 (4): 347-35.
15. Nazimko EI. Studies on the problem of removing sulfur contained in coals. *Visti Donec'kogo girnichnogo institutu*. 2014; (2): 60-65.
16. Physical bases of ultrasound application in medicine and ecology: educational-methodical manual. Eds SP Kundasa. Minsk: MGJeU name AD Saharova, 2009. 110 p.
17. Chernyh S I, Rybakova OI, Lebedev NM, Zhirnova TI. To the study of the influence of ultrasound, magnetic fields and electric current on gold flotation. *Cvetnaja metallurgija*. 2003; (6): 15-21.
18. Shaphaev JeG, Cyrenov VZh, Chebunina EI. Disintegration of microbial cells. In: *Fundamentals of Biotechnology*. Ulan-Ude: Izdatel'stvo VSGTU, 2005: 53-65.
19. Ambedkar B, Nagarajan R, Jayanti S. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011; (18): 718-726.
20. Anjum F, Bhatti HN, Ghauri MA. Enhanced bioleaching of metals from black shale using ultrasonics. *Hydrometallurgy*. 2010; (100): 122-128.
21. Binoy K Saikia, Adilson C Dalmora, Rahul Choudhury, Tonkeswar Das, Silvio R Taffarel, Luis FO Silva. Effective removal of sulfur components from Brazilian power-coals by ultrasonication (40 kHz) in presence of H₂O₂. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016; (32): 147-157.



22. Castro IM, Fietto JLR, Vieira RX, Tropa MJM, Campos LM. Bioleaching of zinc and nickel from silicates using *Aspergillus niger* cultures. *Hydrometallurgy*. 2000; (57): 39–49.
23. Christman CL, Carmichael AJ, Mossoba MM, Riesz P. Evidence for free radicals produced in aqueous solutions by diagnostic ultrasound. *Ultrasonics*. 1987; (25): 31–34.
24. Duran JE, Mahasay SR, Stock LM. The occurrence of elemental sulfur in coals. *Fuel*. 1986; (65): 1167–1168.
25. Franco F, Pérez-Maqueda LA, Pérez-Rodríguez JL. The effect of ultrasound on the particle size and structural disorder of a well-ordered kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004; (274): 107–117.
26. Ghadyani Azam, Noaparast Mohammad, Ziaedin Sied. A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high ash coal flotation and kinetics. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2017; (36): 1-18.
27. Ghosh S, Paul AK. Bioleaching of nickel by *Aspergillus humicola* SKP102 isolated from Indian lateritic overburden. *Journal of Sustainable Mining*. 2016; (15): 108-114.
28. Giovanni Rossi. The Microbial Desulfurization of Coal. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol*. 2014; (142): 147-167.
29. Gopi KR, Nagarajan R. Application of power ultrasound in cavitation erosion testing of nano-ceramic particle/polymer composites. *Solid State Phenomena*. 2008; (13): 191–204.
30. Kar RN, Sukla LB, Swamy KM, Panchanadikar VV, Narayana KL. Bioleaching of Lateritic Nickel Ore by Ultrasound. *Metallurgical and materials transactions*. 1996; (27): 351-354.
31. Klemm P, Schembri MA. Bacterial adhesions: Function and structure. *Int. J. Med. Microbiol*. 2001; (293): 34-39.
32. Kondrateva TF, Pivovarova TA, Tsaplina IA. Diversity of communities of acidophilic chemolithotrophic microorganisms in natural and technogenic ecosystems. *Microbiology*. 2012; 81 (1): 3–27.
33. Mello Paola de A, Duarte FA, Matheus AG, Mauro Korn Nunes, Valderi L Deossler, Flores Erico MM. Ultrasound assisted oxidative process for sulfur removal from petroleum product feedstocks. *Ultrason. Sonochem*. 2009; (16): 732–736.
34. Mesroghli Sh, Yperman J, Reggers G, Jorjani E, Carleer R. Impacts of sonication and post-desulfurization on organic sulfur species by reductive pyrolysis. *Fuel*. 2016; (183): 258 – 291.
35. Nagarjan R. Use of ultrasonic cavitation in surface cleaning efficiency and surface erosion rate. *J. Inst. Environ. Sci*. 2006; (49): 40–50.
36. Ozkan SG. Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*. 2012; (93): 576–580.
37. Perez-Rodrigue JL, Pascual J, Franco F, Jimenez de Haro, Duran A. The influence of ultrasound on the thermal behaviour of clay minerals. *Journal of the European Ceramic Society*. 2006; (26): 747–753.



38. Saikia BK, Dutta AM, Baruah BP. Feasibility studies of de-sulfurization and de-ashing of low grade medium to high sulfur coals by low energy ultrasonication. *Fuel*. 2014; (123): 12–18.
39. Shen Y, Sun T, Liub X, Jiaa J. Rapid desulfurisation of CWS via ultrasonic enhanced metal boron hydrides reduction under ambient conditions. *RSC Adv*. 2012; (2): 4189-4197.
40. Sinisteria JV. Application of ultrasound to biotechnology: an overview. *Ultrasonics*. 1992; (30): 180 p.
41. Sukla LB, Panchanadikar V. Bioleaching of lateritic nickel ore using a heterotrophic micro-organism. *Hydrometallurgy*. 1983; (32): 373–379.
42. Swamy KM, Narayana KL, Vibhuti N. Bioleaching with ultrasound. *Ultrason. Sonochem*. 2005; (12): 301–306.
43. Swamy KM, Sukla LB, Narayana KL, Kar RN. Use of ultrasound in microbial leaching of nickel from laterites. *Ultrasonics Sonochemistry*. 1995; 2 (1): 55-59.
44. Toraman OY, Delibalta MS. Ultrasonic Desulfurization of Low Rank Turkish Coal Using Various Chemical Reagents. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. 2016: 4621-4623.
45. Willscher S, Bosecker K. Studies on the leaching behaviour of heterotrophic microorganisms isolated from an alkaline slag dump. *Hydrometallurgy*. 2003; (71): 257–264.
46. Yi Wai Chiang, Rafael M Santos, Aldo Van Audenaerde, Annick Monballiu, Tom Van Gerven. Chemoorganotrophic Bioleaching of Olivine for Nickel Recovery. *Minerals*. 2014; (4): 564-573.
47. Yusuf Chist. Sonobioreactors: using ultrasound for enhanced microbial productivity. *TRENDS in Biotechnology*. 2003; (21): 89-93.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017 р.

