

УДК 561.42

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЖИДКОСТНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗВИТОЙ КАВИТАЦИИ В ПРОЦЕССАХ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

© 2024 г. О. М. Градов^{а, *}, И. В. Зиновьева^а, Ю. А. Заходяева^а, А. А. Вошкин^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

*e-mail: lutt.plm@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 24.06.2024 г.

После доработки 29.06.2024 г.

Принята в печать 30.06.2024 г.

Схема ультразвуковой кавитационной экстракции использует растворение отработанного материала в глубоком эвтектическом растворителе для съема его с подложки с последующим извлечением ценного элемента методом ультразвуковых жидких мембран. Выполнено детальное описание этого метода для случая применения мощного ультразвука в типичных условиях кавитации, вызванной стоячими ультразвуковыми волнами, когда ее порог заметно превышен и процесс экстракции определяется кавитационными параметрами и ограничениями. Получено выражение для поведения во времени количества экстрагируемого элемента и зависимости этого параметра от величины акустического давления. Найдено пространственное распределение скорости акустического течения, вызванного кавитацией, в одномерном случае.

Ключевые слова: ультразвук, экстракция, кавитация, пульсации, акустическое давление, ударная волна

DOI: 10.31857/S0040357124040022 EDN: AWUAFQ

ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным развитием новых технологий и широким распространением автономных электронных устройств проблема их дальнейшей утилизации приобретает в настоящее время особую актуальность во всем мире [1–4]. Кроме содержания токсичных тяжелых металлов (Hg, Pb, Cd, As и др.), которые при неправильном выводе из эксплуатации могут попасть в сточные воды и почву, в подобных отходах содержится большой набор стратегически важных и полезных элементов, возвращение в товарный оборот которых позволит существенно сэкономить природные ресурсы при использовании их для повторного производства новых устройств [5, 6]. Хорошо известно, например [7–9], что катоды литий-ионных аккумуляторов с истекшим сроком службы относятся к вторичным ресурсам, объем которых сравним с запасами ископаемого сырья. В то же время при ненадлежащей утилизации отходы отработанных аккумуляторов представляют серьезную опасность для окружающей среды и человека, так как содержат токсичные органические вещества.

Современная технология обладает целым рядом процессов восстановления ценных металлов из отработанных литий-ионных аккумуляторов, включая гидрометаллургию, а также механические и термические методы обработки [10–12]. В процесс извлечения и разделения металлов из раствора выщелачиванием с получением готового продукта вовлечен прежде всего катодный материал, поскольку его анодный аналог легко отделяется от медной фольги механическими методами из-за слабого соединения графита с фольгой. В то же время сцепление между катодным материалом и алюминиевой фольгой сильнее, что вызывает определенные сложности при разделении этих двух материалов [13]. Предложенные подходы отделения катодного материала от алюминиевой фольги [14–17] нельзя назвать эффективными вследствие невысокой технологичности, материальных потерь и других причин производственного характера. В работах [18, 19] предложено, например, использование нагретых жидкостей для отделения активного материала от алюминиевой подложки, что также сопряжено с появлением сопутствующих про-

блем. Исследованный способ криогенного измельчения для извлечения катодных материалов из отработанных литий-ионных аккумуляторов [20] также имеет свои ограничения при массовом внедрении. Таким образом, эффективность предложенных методов недостаточна для широкого применения. Извлечение катодных материалов может достигать не более 90%, а качество очищенной фольги не позволяет использовать ее для повторного производства. К тому же большинство предложенных подходов не позволяют наладить непрерывный процесс на производстве, что увеличивает стоимость разделения и усложняет процесс переработки.

В процессе поиска эффективных методов переработки отходов литий-ионных аккумуляторов были разработаны новые перспективные подходы [21–25], обладающие высокой селективностью, обеспечивающие низкий расход энергии в непрерывном режиме, дающие экономическую выгоду и приемлемую технологичность. Использование ультразвукового (УЗ) воздействия способно помочь решить также одну из наиболее трудных проблем очистки алюминиевой фольги от катодного материала. С помощью УЗ-кавитационной экстракции этот материал можно снять с подложки путем его растворения в глубоком эвтектическом растворителе с последующим извлечением методом УЗ-жидких мембран. Для значений акустического давления, не превышающих порога возникновения кавитации, были выполнены всесторонние исследования [26–28], включающие теоретические разработки и эксперимент, описывающие основные особенности жидкостной экстракции в ультразвуковых полях разной конфигурации и пространственной структуры, под воздействием осциллирующих потоков и стационарных акустических течений. В настоящей работе этот метод детально проанализирован для случая применения мощного ультразвука в типичных условиях кавитации, вызванной стоячими УЗ-волнами, когда ее порог заметно превышен и процесс экстракции определяется кавитационными параметрами и ограничениями.

УСЛОВИЯ ПРОТЕКАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КАВИТАЦИИ

Ввиду большого разнообразия возможных форм распределения в пространстве УЗ-полей конкретный вид рабочих схем устройств

УЗ-жидкостной экстракции в условиях кавитации также может существенно отличаться. Но общие принципы подхода к анализу проблемы и методы расчета являются одинаковыми для всех рассматриваемых случаев и могут быть продемонстрированы на примере одного из распространенных типов УЗ-ванн. На рис. 1 схематично представлены основные элементы системы УЗ-кавитационной жидкостной экстракции, необходимые для ее нормального функционирования.

Ультразвук в ванне образует стоячую структуру (рис. 1) при выполнении известных резонансных условий [29], поскольку почти полностью отражается от поверхности жидкости. Это обеспечивает появление акустических течений 2, обладающих определенными свойствами [29] и существующих также в отсутствие кавитации. Находящаяся в УЗ-ванне 1 жидкость 5 облучается ультразвуком из источников 3, который распространяется вверх (ось Ox) к поверхности 6 раздела жидкость–воздух в виде бегущих волн, причем для осциллирующих во времени t с частотой ω скоростей $u_{1,2}$ каждой из жидкости, обозначенных индексом “1” и “2”, можно записать следующее выражение

$$u_{1,2} = u_{01,2} \sin(\omega t - kx). \quad (1)$$

Здесь k – волновое число, связанное с частотой соотношением $\omega = ck$, где c – скорость звука, величину которой у рассматриваемых жидкостей можно считать одинаковой. Из-за большой разницы в значениях плотностей $\rho_{1,2}$ жидкостей и воздуха УЗ-волна почти полностью отражается

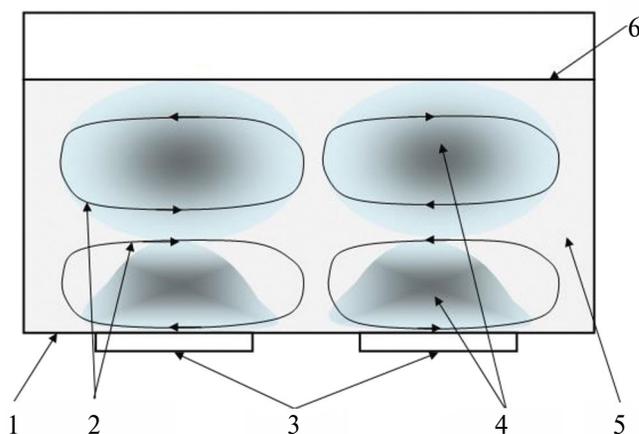


Рис. 1. Схематическое представление основных элементов конструкции системы УЗ-кавитационной жидкостной экстракции на примере устройства типичной УЗ-ванны: 1 – корпус УЗ-ванны; 2 – потоки акустического течения; 3 – излучатели ультразвука; 4 – области кавитации; 5 – состав из двух несмешивающихся жидкостей; 6 – поверхность жидкости.

от поверхности b и при выполнении резонансных условий образует структуру стоячей волны внутри ванны. При превышении амплитудой P_m акустического давления $P_a(x,t)$ определенного порогового значения в жидкости начинает развиваться кавитация, области которой 4 выделены на рис. 1 затенением разной интенсивности, когда более темные участки соответствуют областям с наиболее развитой кавитацией.

Высокочастотные УЗ-колебания на частоте ω оказывают непосредственное воздействие на жидкости, находящиеся в области их распределения. Если они не смешаются друг с другом, то произойдет разбиение одной из них на капли, форму которых можно с хорошим приближением считать шаровидной [30]. Для оценки размера этих капель можно воспользоваться условием реализации их равновесного состояния, возникающего в результате баланса между внешним напором, пытающимся раздробить каплю на более мелкие части, и силой поверхностного натяжения, противодействующей образованию прогиба ее поверхности, который и ведет, в конце концов, к дроблению. Как показано в работе [30], выражение для радиуса R_c капли может быть записано в виде соотношения, общего для параметрического резонанса, акустического течения и осцилляционных потоков:

$$R_c = \sqrt{\frac{2}{\eta\omega\rho_1}} \left(\frac{2\alpha}{3u_m} - \eta \right); u_m = \frac{P_m \Delta\rho}{c \rho_1 \rho_2}. \quad (2)$$

Здесь α – коэффициент поверхностного натяжения, $u_m = |u_{01} - u_{02}|$ – амплитуда скорости осцилляционного потока жидкостей (1) относительно друг друга, создаваемого в результате взаимодействия с ультразвуком, $\Delta\rho = |\rho_1 - \rho_2|$, и принята во внимание пренебрежительно малая разница между гидростатическими давлениями P_0 внутри и вне капли по сравнению с внешним воздействием. Формула (2) остается справедливой и для случая, когда дробление связано с потоками другого вида, например с акустическими течениями. В этом случае вместо u_m следует использовать значение скорости потока относительного движения жидкостей u_{st} .

Развитие кавитации начинается с возникновения кавитационных пузырьков из природных зародышей, равномерно распределенных в жидкости с плотностью N_b . По мере роста амплитуды ультразвука пузырьки начинают расширяться на том полупериоде УЗ-колебаний, когда происходит разрежение, а затем на этапе сжатия схлопываются на протяжении соответствующей четверти периода T ($T = 2\pi/\omega$) роста акустического давления. Время схлопывания пузырька τ_c с на-

чальным равновесным радиусом r_0 было получено еще Рэлеем [23, 29] при рассмотрении полости, заполненной вакуумом, и имеет вид:

$$\tau_c = 0.915 R_{\max} \sqrt{\frac{\rho_1}{P_0}}, \quad R_{\max} \approx r_0^3 \sqrt{\frac{P_m}{P_0}} \left(1 + \frac{P_0}{3P_m} \right). \quad (3)$$

В УЗ-диапазоне с верхним пределом в несколько сотен МГц этот параметр (3) на порядки величин меньше периода УЗ-колебаний. При этом энергия, содержащаяся в пузырьке E , описывается формулой [23]

$$E = \frac{4\pi R_{\min}^3}{3} P_{\max}, \quad P_{\max} = \frac{P_m}{81} \left(\frac{P_m}{P_0} \right)^3, \quad R_{\min} \approx 3r_0 \frac{P_0}{P_m} \left(1 - \frac{2P_0}{P_m} \right) \quad (4)$$

и выделяется при распространении фронта возникающей при этом ударной волны сферической формы. Для зависимости расстояния от фронта ударной волны до центра пузырька $L(t)$ в работе [23] получено следующее соотношение:

$$L(t) = \beta \left(\frac{E t^2}{\rho_1} \right)^{1/5}, \quad \beta = \text{const}. \quad (5)$$

Зная расстояние от центра пузырька до границы капли в начальный момент времени, по формулам (4) и (5) можно, например, определить время, за которое фронт ударной волны достигнет ее поверхности.

Поскольку схлопывание кавитационных пузырьков происходит в течение времени $T/4$, то по формуле (5) можно приближенно оценить толщину слоя L_c вокруг капли, в котором образующиеся ударные волны способны воздействовать на ее границу:

$$L_c = \beta \left(\frac{E T^2}{16\rho_1} \right)^{1/5}. \quad (6)$$

С ростом акустического давления растет число зародышей, начинающих принимать участие в формировании процессов кавитации. Когда число пузырьков невелико на ранней стадии, ударные волны, образуемые ими, локально воздействуют на поверхность капли, прогибая ее в отдельных местах и тем самым ускоряя экстракцию. Дело в том, что в капле находятся свободно движущиеся металлсодержащие частицы. При соприкосновении с границей капли они сразу же извлекаются в окружающую каплю жидкость. Поэтому, чем больше пузырьков схлопывается, чем сильнее ударное воздействие, тем интенсивнее осуществляется экстракция металла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа сущности жидкостной экстракции вытекает, что кавитация может оказать значительное влияние на протекание ее основных процессов. Для их детального изучения и оценки всех необходимых параметров рациональнее всего прибегнуть к рассмотрению упрощенной модели, которая адекватно с приемлемой точностью описывала бы сложную реальность. Пояснить ее смысл можно при помощи схемы, представленной на рис. 2. В среднем за период УЗ-колебаний на поверхность капли воздействуют ударные волны от пузырьков со средней энергией кавитации E_c , которая, согласно формулам, (4)–(6) имеет вид:

$$E_t = \frac{4\pi E}{3} N_b \{(R_c + L_c)^3 - R_c^3\}. \quad (7)$$

Эта дополнительная энергия кавитации вокруг капли обуславливает ее сжатие и увеличение ее энергии в соответствии с сохранением энергетического баланса.

Иными словами, кавитация увеличивает давление вокруг капли на величину P_b , которая в соответствии с (4) имеет следующее значение:

$$P_b = EN_b. \quad (8)$$

В реальности же пузырьки в рассматриваемом слое хаотично воздействуют на части поверхности капли, как это видно из рис. 2а, в течение времени $T/4$. Чем выше акустическое давление, тем больше это воздействие и тем равномернее обжимается граница капли. Прямое описание этого процесса весьма сложно и мало продуктивно. Для получения качественных оценок поведения параметров во времени гораздо проще заменить описание происходя-

щих взаимодействий на анализ эквивалентной схемы (рис. 2б), позволяющей в аналитическом виде сформулировать все необходимые оценки. Суть такой замены заключается в том, чтобы хаотичное искривление границы капли в течение четверти периода УЗ-колебаний соотнести с равносильным одномоментным обжатием ее поверхности с точки зрения ускоренного оседания на ней содержащихся в капле элементов, т.е. их экстрагирования. Для этого дополнительная кавитационная энергия, содержащаяся в слое пузырьков толщиной L_c , воздействующих на каплю в течение промежутка времени $T/4$, должна быть приравнена работе сил давления по изменению радиуса капли на величину δR , которая обеспечивает новое равновесное ее состояние при наличии извне развитой кавитации и, следовательно, дополнительного давления (8). Значение давления внутри капли в конце ее сжатия одинаково с внешним и равно величине $P_m + EN_b$. Поэтому соотношение энергетического баланса между дополнительной энергией кавитации вокруг капли, обуславливающей ее сжатие, и работой сил давления по изменению радиуса капли имеет вид:

$$N_b E \frac{4\pi}{3} \{(R_c + L_c)^3 - R_c^3\} = 4\pi R_c^2 \Delta R (N_b E + P_m). \quad (9)$$

Из (9) вытекает следующее значение для скачка радиуса капли под воздействием кавитации за промежуток времени Δt , равный периоду УЗ-колебаний:

$$\delta R = \frac{N_b L_c E}{N_b E + P_m}. \quad (10)$$

Зная число экстрагируемых частиц $N_c(t)$ в единице объема капли, с помощью (10) можно

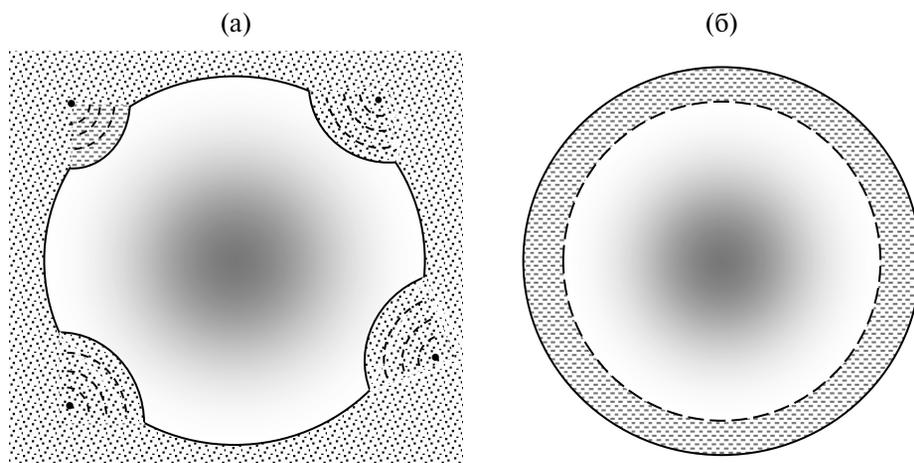


Рис. 2. Схема воздействия схлопывания пузырьков кавитации на поверхность капли (а) и модельное представление (б) эквивалентного обжатия капли дополнительным кавитационным давлением.

получить следующее соотношение для приращения этого числа ΔN_e за время Δt во всем объеме окружающей каплю среды:

$$\Delta N_e = -\frac{4\pi R_c^2 \delta R N_e \Delta t}{4\pi R_c^3 T / 3} \equiv -\frac{3N_e \delta R}{R_c T} \Delta t. \quad (11)$$

Интегрируя (11), можно получить следующее выражение для зависимости от времени числа плотности экстрагируемых частиц в каждой капле:

$$N_e(t) = N_0 \exp\left(-\frac{3\delta R}{R_c T} t\right), N_0 = \text{const}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что концентрация экстрагируемых частиц падает со временем от первоначального значения N_0 в исходном состоянии. Если общий объем этой жидкости обозначить символом V , то полное количество экстрагированных частиц составит величину $N_0 V - N_e V$. Умножение этого числа на молекулярную массу m_e этого металла дает полную его растущую массу $M_e(t)$, экстрагируемую в УЗ-ванне с течением времени:

$$M_e(t) = m_e N_0 V \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{3\delta R}{R_c T} t\right) \right\}. \quad (13)$$

На рис. 3 представлена эта зависимость (13) от времени и величины акустического давления для безразмерных параметров $M(t) = M_e(t)(m_e N_0 V)^{-1}$, $y = P_m/P_0$, $\tau = \omega t$ и следующих типичных значениях параметров задачи: $P_m = 10P_0$, $\rho_1 = 10^{-3} \text{ кгм}^{-3}$, $\alpha = 0.073 \text{ кгс}^{-2}$, $\beta = 0.1$.

Как видно из рис. 3, результаты расчетов приводят к выводу, что с течением времени масса экстрагированного металла нарастает по экспоненте, крутизна нарастания которой зависит от

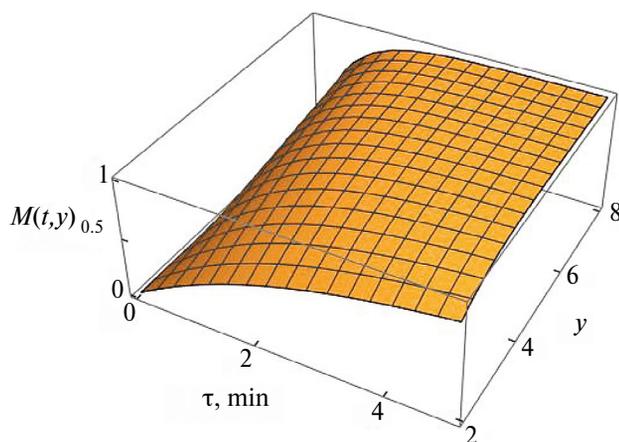


Рис. 3. Зависимость массы $M_e(t)$ экстрагируемого металла в УЗ-ванне от времени и от величины акустического давления для некоторых выбранных значений параметров задачи.

величины акустического давления. Влияние значений других параметров на ход экстракции также весьма существенно, поскольку их величины определяют размер всех коэффициентов, задающих динамику процесса.

Следует отметить, что в рассматриваемом приближении развитой кавитации полученные зависимости могут реализоваться с малыми искажениями только в случае, когда кавитационные процессы в жидкостной экстракции превалируют над изученными в работах [26–28, 30] взаимодействиями для докавитационных значений акустического давления. Если же эффективности этих двух типов механизмов УЗ-экстракции сравнимы или близки друг к другу по оценочным параметрам, то представленные расчеты допускают простое аддитивное обобщение конечной формулы (12) результатами работ [26–28, 30], полученных для разных видов акустического течения, схем воздействия и пространственного распределения акустического давления. Такое смешивание разных процессов делает выкладки более громоздкими, не позволяет детально рассмотреть особенности поведения экстракции в условиях кавитации, но приближает теоретический анализ к реальным условиям эксперимента.

Расход УЗ-энергии, связанный с образованием кавитации, приводит к уменьшению количества движения и тем самым становится причиной возникновения акустических течений разного вида [25, 29]. Можно рассчитать скорость такого стационарного движения w , исходя из уравнения сохранения количества движения с учетом формулы (9) в одномерном приближении, подобно тому, как это выполнено в работе [32] для случая бегущей УЗ-волны:

$$\rho_1 \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_1 w \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \{N_b E(x) + P_a(t, x)\}. \quad (14)$$

Перед тем, как провести усреднение по времени в уравнении (14), следует отметить, что все применения выражения (4) для энергии $E(x)$, представленные в настоящей работе, подразумевают использование локального значения для амплитуды $P_m(x) = P_{a0} \cos(kx)$ акустического давления. При этом поведение во времени величины $E(x)$ характеризуется, как это объяснялось выше, “пульсационным” проявлением этой энергии в течение менее четверти периода УЗ-колебаний, которые соответствуют нарастанию акустического давления, когда эта энергия рассеивается в виде ударной волны, а затем в течение оставшегося до конца периода колебаний времени происходит подготовка пузырьков кавитации к очередному схлопыванию. Это означает, что величина $E(x)$ остается неизменной для каждого

периода колебаний, т.е. постоянна во времени и зависит только от места нахождения в УЗ-ванне, характеризуемого координатой x .

Для установившегося движения ($dw/dt = 0$) и для одномерной задачи выражение (13) упрощается:

$$\frac{1}{2} \rho_1 w^2 + N_b E = \frac{1}{2} C, C = \text{const.} \quad (15)$$

В линейном приближении решение уравнения (14) можно записать с учетом, например, граничного условия $w = 0$ при $x = 0$:

$$w(x) = \sqrt{\frac{2E_0}{\rho_1}} (1 - \cos kx) \equiv \pm 2 \sqrt{\frac{E_0}{\rho_1}} |\sin(0.5kx)|, \quad (16)$$

$$E_0 = \frac{4\pi n_0^3 P_{a0}}{9}.$$

Из (15) видно, что акустическое течение, обусловленное кавитацией, дополняет те потоки, которые сформированы стоячей структурой УЗ-волны в случае амплитуд акустического давления, не превышающих пороговое значение для развития кавитации. Результат (16) заметно отличается от полученного в работе [32] для бегущей УЗ-волны, что говорит о существенной зависимости рассматриваемых процессов от пространственной структуры УЗ-полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях ужесточающейся с течением времени экономии ресурсов, усиливающейся борьбы за экологию, стремительного взлета науки любые частные хозяйственные или, казалось бы, второстепенные производственные проблемы все чаще получают свое достойное и эффективное решение на путях привлечения передовых научных достижений. Не является исключением и задача утилизации отработанных элементов компактного электропитания. Одним из направлений научного поиска, ведущегося в разных отраслях знаний, является изучение специальных особенностей жидкостной экстракции для всестороннего решения этой проблемы. Среди разных подходов на этом пути исследований весьма перспективным выглядит метод ультразвукового жидкостного извлечения ценных металлов, входящий важным звеном в схему повторного использования природных ресурсов при утилизации отработанных литий-ионных аккумуляторов. Наряду с выполненным ранее описанием [26–28, 30] основных особенностей УЗ-жидкостной экстракции при реализации различных УЗ-пространственных структур и видов акустического течения в докавитацион-

ном режиме, представленный в настоящей работе анализ воздействия кавитации на рассматриваемый процесс обеспечивает в той или иной степени полное описание предлагаемого подхода в более или менее целостном виде. Выявленные условия и сформулированные результаты возможного использования предлагаемых УЗ-систем позволяют сделать целенаправленный выбор соответствующей схемы в реальных условиях для максимально эффективного применения в существующих обстоятельствах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-13-00387, <https://rscf.ru/project/20-13-00387/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li H., Eksteen, J., Oraby E.* Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review. *Resour., Conserv. Recycl.* 2018. V. 139. P.2.
2. *Sun Z., Cao H., Xiao Y., Sietsma J., Jin W., Agterhuis H., Yang Y.* Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: The Hydrochemistry Processes. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2016. V. 5. № 1. P. 21.
3. *Fedorova M.I., Zakhodyaeva Y.A., Baranchikov A.E., Krenev V.A., Voshkin A.A.* Extraction reprocessing of Fe, Ni-containing parts of Ni–MH batteries. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 266.
4. *Zakhodyaeva Y.A., Izyumova K.V., Solov'eva M.S., Voshkin A.A.* Extraction separation of the components of leach liquors of batteries. // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. V. 51. P. 883.
5. *Alvial-Hein G., Mahandra H., Ghahreman A.* Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review. *J. Clean. Prod.* 2021. V. 297. P. 126592.
6. *Thompson D.L., Hartley J.M., Lambert S.M., Shiref M., Harper G.D.J., Kendrick E. et al.* The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review. *Green Chem.* 2020. V. 22. P. 7585.
7. *Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G.* Li-Ion Battery Materials: Present and Future // *Materials Today.* 2015. V. 18. P. 252.
8. *Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R. et al.* Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles // *Nature.* 2019. V. 575. P. 75.
9. *Xie J., Lu Y.-C.A.* Retrospective on Lithium-Ion Batteries // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 2499.
10. *Torkaman R., Asadollahzadeh M., Torab-Mostaedi M., GhanadiMaragheh M.* Recovery of cobalt from spent lithium ion batteries by using acidic and basic extractants in solvent extraction process // *Sep. Purif. Technol.* 2017. V. 186. P. 318.

11. *Fan E., Li L., Wang Z., Lin J., Huang Y., Yao Y., Chen R., Wu F.* Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects // *Chem. Rev.* 2020. V.1 20. P. 7020.
12. *Ma Y., Svärd M., Xiao X., Gardner J.M., Olsson R.T., Forsberg K.* Precipitation and Crystallization used in the production of metal salts for li-ion battery materials: a review // *Metals.* 2020. V. 10. P. 1609.
13. *Zhang T., He Y., Ge L., Fu R., Zhang X., Huang, Y.* Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries // *J. Power Sources.* 2013. V. 240. P. 766.
14. *Chen L., Tang X., Zhang Y., Li L., Zeng Z., Zhang Y.* Process for the recovery of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries // *Hydrometallurgy.* 2011. V. 108. P. 80.
15. *Li J., Shi P., Wang Z., Chen Y., Chang C.-C.* A combined recovery process of metals in spent lithium-ion batteries // *Chemosphere.* 2009. V. 77. P. 1132.
16. *Wang M., Tan Q., Liu L., Li J.* Efficient separation of aluminum foil and cathode materials from spent lithium-ion batteries using a low-temperature molten salt // *ACS Sustain Chem. Eng.* 2019. V. 7. P. 8287.
17. *Zou H., Gratz E., Apelian D., Wang Y.* A Novel method to recycle mixed cathode materials for lithium ion batteries // *Green Chemistry.* 2013. V. 15. P. 1183.
18. *Zeng X., Li J.* Innovative application of ionic liquid to separate anode and cathode materials from spent high-power lithium-ion batteries // *J. Hazard Mater.* 2014. V. 271. P. 50.
19. *Gu K., Chang J., Mao X., Zeng H., Qin W., Han J.* Efficient separation of cathode materials and anode foils from spent lithium batteries with glycerol heating: a green and unconventional way // *J. Clean Prod.* 2022. V. 369. P. 133270.
20. *Wang H., Liu J., Bai X., Wang S., Yang D., Fu Y., He Y.* Separation of the cathode materials from the anode foil in spent lithium-ion batteries by cryogenic grinding // *Waste Management.* 2019. V. 91. P. 89.
21. *Zinov'eva I.V., Fedorov A.Ya., Milevskii N.A., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A.* Dissolution of metal oxides in a choline chloride–sulphosalicylic acid deep eutectic solvent // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. P. 663.
22. *Ijardar S.P., Singh V., Gardas R.L.* Revisiting the physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents // *Molecules.* 2022. V. 27. P. 1368.
23. *Gradov O.M., Zinov'eva I. V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A.* Modelling of the erosive dissolution of metal oxides in a deep eutectic solvent-choline chloride/sulphosalicylic acid-assisted by ultrasonic cavitation // *Metals.* 2021. V. 11. P. 1964.
24. *Zinov'eva I. V., Fedorov A.Ya., Milevskii N.A., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A.* A deep eutectic solvent based on choline chloride and sulphosalicylic acid: properties and applications // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. P. 371.
25. *Gradov O.M., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A.* Kinetics of ultrasonic dissolution of metal oxide powder for different spatial combinations of the cavitation region and Eckart acoustic flow // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2023. V. 57. P. 255.
26. *Gradov O.M., Zakhodyaeva Yu.A., Zinov'eva I.V. and Voshkin A.A.* Some features of the ultrasonic liquid extraction of metal ions. // *Molecules.* 2019. V. 24. 3549.
27. *Gradov O.M., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A.* Dynamics of mass transfer through the interface between immiscible liquids under the resonance effect of ultrasound // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020. V. 54. № 6. P. 1148.
28. *Gradov O.M., Zakhodyaeva Yu.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A.* Ultrasonic intensification of mass transfer in organic acid extraction // *Processes.* 2021. V. 9. P. 15.
29. *Flynn H.G.* Physics of Acoustic Cavitations in Liquids // *Physical acoustics – Principles and methods.* N.Y.: Academic Press, 1964. P. 376.
30. *Gradov O.M., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A.* Break-up of immiscible liquids at the interface using high-power acoustic pulses // *Chem. Eng. Proc.: Proc. Intens.* 2018. V. 131. P. 125.
31. *Voshkin A.A., Gradov O.M.* Parametric splitting and transfer of liquid cuts for the intensification of mass exchange in a cylindrical volume // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017, V. 51. № 3. P. 274.
32. *Розенберг Л.Д.* Кавитационная область. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга, Наука, 1968. С. 221.