

УДК 561.42

## ЭРОЗИОННАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОЧИСТКА КАТОДНОЙ ЛЕНТЫ ОТРАБОТАННЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ТИПА NMC

© 2024 г. О. М. Градов\*, И. В. Зиновьева, Ю. А. Заходяева, А. А. Вошкин

*Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия*

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

Поступила в редакцию 03.11.2023 г.

После доработки 12.01.2024 г.

Принята к публикации 29.01.2024 г.

Предложен метод очистки катодной фольги отработанного литий-ионного аккумулятора от катодного материала с помощью ультразвука. Разработана общая схема компоновки устройств с анализом взаимодействия всех основных узлов конструкции. В основу метода положен эффект кавитационной ультразвуковой эрозии твердых тел, помещенных в жидкость, которая находится под воздействием ультразвука. Получено выражение для глубины слоя покрытия, который удаляется с ленты при однократном прохождении всей ее длины через все зоны кавитации устройства. Выполнен аналитический и численный анализ зависимости скорости очистки от интенсивности ультразвука, его частоты, скорости движения ленты и других параметров схемы. Экспериментально показана возможность эффективной очистки алюминиевой фольги от катодного материала литий-ионного аккумулятора типа NMC.

*Ключевые слова:* ультразвуковая очистка, кавитационная эрозия, литий-ионные аккумуляторы, катодный материал, алюминиевая фольга

**DOI:** 10.31857/S0040357124010057, **EDN:** ZEBNYI

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение литий-ионных аккумуляторов носит практически повсеместный характер в условиях массового использования электронных устройств и оборудования (например, сотовых телефонов, ноутбуков, электромобилей и т. д.). Литий-ионные аккумуляторы состоят из четырех основных компонентов: катода, анода, пористого сепаратора, пропитанного электролитом, и металлического корпуса. Катод состоит из активного материала, проводника, связующего компонента и токоприемника Al. При этом активный материал чаще всего представляет собой литийсодержащий оксидный материал и может содержать большое количество ценных элементов, таких как Co, Ni, Mn, Li, Al, Cu, Fe. По этой причине катоды литий-ионных аккумуляторов с истекшим сроком службы относятся к вторичным ресурсам, объем которых сравним с запасами ископаемого сырья [1–3]. К тому же при ненадлежащей утилизации отходы отработанных аккумуляторов могут представлять опасность для окружающей среды и человека, так как содержат токсичные органические вещества.

На сегодняшний день существует целый ряд процессов рециркуляции ценных металлов из

отработанных литий-ионных аккумуляторов, включая механические, термические методы обработки и гидрометаллургию [4–12]. Процесс рециклинга аккумуляторов можно разделить на несколько основных этапов: разрядка и демонтаж; отделение активных материалов от подложки; выщелачивание металлов из катодно-активных материалов; извлечение и разделение металлов из раствора выщелачивания с получением готового продукта. Анодный материал можно без труда отделить от медной фольги механическими методами ввиду непрочного сцепления графита с фольгой. Напротив, адгезия между катодным материалом и алюминиевой фольгой сильнее, что усложняет процесс разделения этих двух материалов [13]. В литературе предложены некоторые подходы, которые позволяют отделить катодный материал от алюминиевой фольги [14–17]. Авторы работы [18] предложили использовать нагретую ионную жидкость для эффективного растворения поливинилиденфторида (ПВДФ), который используется для связывания катодного материала и фольги. В работе [19] также использовали нагретый растворитель для отделения активного материала от алюминиевой подложки. Исследована технология криогенного измельчения для извле-

чения катодных материалов отработанных литий-ионных аккумуляторов [20]. Однако эффективность предложенных методов недостаточна для широкого применения. Потери катодных материалов могут достигать 10%, а качество очистки фольги недостаточно для ее повторного использования. Кроме того, большинство предложенных методов не позволяют реализовать непрерывный процесс на практике, что увеличивает стоимость разделения и усложняет процесс переработки.

При совершенствовании традиционных подходов к переработке отходов литий-ионных аккумуляторов были разработаны новые перспективные методы [20–24], обеспечивающие высокую селективность, низкое потребление энергии в непрерывном режиме, экономическую эффективность и высокую технологичность. Применение ультразвукового (УЗ) воздействия может решить одну из наиболее трудных задач очистки алюминиевой фольги от катодного материала. С помощью УЗ кавитационной эрозии этот материал можно снять с подложки в обычной водной среде в виде порошка, размер частиц которого можно регулировать, и в дальнейшем использовать его надлежащим образом.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрическая мощность  $W_T$ , которую потребляют из сети различные ультразвуковые устройства, отличается от той акустической мощности  $W$ , которую с помощью различных преобразователей, датчиков, гидрофонов удается ввести внутрь жидкой среды, используемой в таких устройствах. С помощью коэффициента полезного действия  $\eta$  эту связь можно выразить формулой  $W = \eta W_T$ . Передача энергии в жидкую среду осуществляется, например, с помощью пьезо-керамической пластины, поверхность которой площадью  $S_p$  испытывает под воздействием электрического сигнала перемещение вдоль нормали, вызывая движение жидкости поблизости, величина смещения элементов которой  $\xi(t)$  зависит от времени  $t$  по закону, задаваемому поверхностью пластины. В случае, когда это перемещение осуществляется по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , для  $\xi(t)$  можно использовать следующее выражение:

$$\xi(t) = \xi_m \cos \omega t. \quad (1)$$

Если параметры среды позволяют колебаниям распространяться в жидкости в виде волнового процесса со скоростью  $c_s$ , то плотность потока акустической энергии  $q_a$ , идущего от пьезопластины по нормали к ее поверхности, определяется с помощью (1) следующей формулы:

$$q_a = \rho \xi_m^2 \omega^2 c_s / 2. \quad (2)$$

С другой стороны, эта же плотность потока равна величине  $W/S_p$ . Отсюда получается следующая связь между амплитудой колебаний  $\xi_m$  и мощностью  $W_T$ :

$$\xi_m = \left\{ 2\eta W_T / (\rho \omega^2 c_s S_p) \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

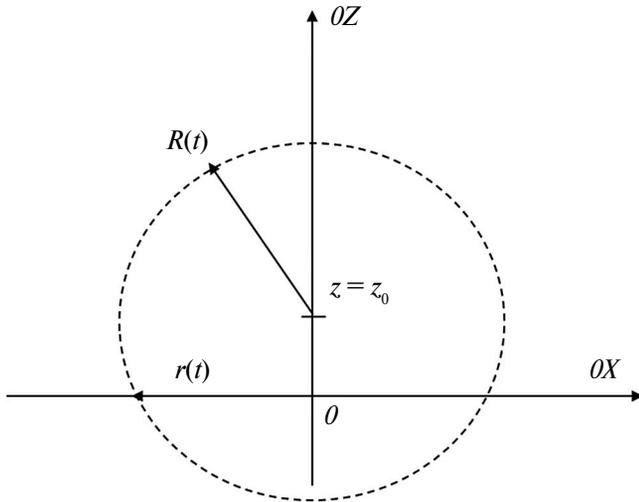
Акустическое давление  $P_a$  связано с амплитудой  $\xi_m$  известным соотношением  $P_a = \xi_m \rho \omega c_s$  [27]. С помощью (3) его также можно выразить через входную мощность  $W_T$  соотношением:

$$P_a = \left\{ 2\eta W_T \rho c_s / S_p \right\}^{1/2}. \quad (4)$$

Приведенные формулы дают возможность проводить все последующие расчеты с использованием величины расходуемой электрической мощности и параметров системы, что создает определенные удобства при проведении оценок в процессе разработки практических схем.

Применение эрозионных возможностей кавитации для целей очистки твердой поверхности основывается на способности кавитационных пузырьков схлопываться и генерировать ударные волны, которые своим воздействием вызывают разрушения встречающихся на их пути препятствий [27]. Зная основные закономерности этого явления, можно рассчитать скорость эрозии, определить оптимальные геометрические размеры и дистанцию облака кавитационных пузырьков до обрабатываемого материала, найти наилучшие соотношения параметров излучения для обеспечения ожидаемых выходных характеристик процесса УЗ очистки.

При захлопывании кавитационной полости давление на ее поверхности может достигать очень больших значений. При этом полость излучает сферические возмущения конечной амплитуды, образующие при распространении в жидкости ударные волны, которые обуславливают воздействие кавитации на различные вещества и структуры. Для более детального рассмотрения этого воздействия рассмотрим одиночный кавитационный пузырек, расположенный на расстоянии  $z = z_0$  от обрабатываемой плоской поверхности, которая размещена в точке  $z = 0$  по оси  $OZ$  вдоль направления нормали (рис. 1). В момент времени  $t = 0$  радиус пузырька равен  $R_{\min}$ , при этом давление на его поверхности достигает максимального значения  $P_{\max}$ . Возникающая сферическая ударная волна с радиусом  $R(t)$  изображена на рис. 1 пунктирной линией. Вся картина ее движения в жидкости определяется при этом всего двумя параметрами: плотностью жидкости  $\rho$  и энергией, сосредоточенной первоначально в пузырьке и выделяющейся при распространении ее фронта. При удалении фронта ударной



**Рис. 1.** Схема воздействия сферической ударной волны от кавитационной полости на плоскую поверхность твердого тела.

волны от центра схлопывающегося кавитационного пузырька скачок давления на нем уменьшается в результате перераспределения по поверхности сферы. Из рис. 1 видно, что на фронте ударной волны перепад давления станет меньше предела текучести  $\sigma_T$  катодного материала для  $R(t) \leq R_c$ , где  $R_c$  определяется из условия:

$$P_c \equiv \frac{R_{\min}^2}{R_c^2} P_{\max} = \sigma_T, R_c = R_{\min} \sqrt{\frac{P_{\max}}{\sigma_T}}. \quad (5)$$

В формуле (5) величина  $P_c$  представляет собой, согласно [23], давление в кавитационном пузырьке, обладающим радиусом  $R_c$ .

Таким образом, эрозия идет до момента времени  $t_c$ , когда  $R(t_c) = R_c$ . Очевидно, что в ней принять участие могут только те кавитационные пузырьки с равновесным радиусом  $R_0$ , которые расположены ближе к обрабатываемой поверхности, чем расстояние  $R_c$  от него, т. е. для  $R_0 \leq R_c$ . С другой стороны, размер образующейся каверны не может в диаметре превышать величину  $2R_c$ . Если плотность зародышей пузырьков, то есть их количество в единице объема, обозначить через  $\kappa$ , то в столбике жидкости с единичной площадью на поверхности мишени и высотой  $\Delta L$  их будет находиться  $\Delta n = \kappa \Delta L$ . После схлопывания каждый из пузырьков с помощью ударной волны, разрушающей поверхность катодного материала, создаст каверну, величина которой будет зависеть от  $R_0$  и  $R_c$ . Объем этой каверны  $V$ , ограниченной плоскостью катодного материала и сегментом сферы радиусом  $R_c$  с центром в точке на высоте  $z_0$  от поверхности мишени, определяется интегралом (см. рис. 1):

$$V = 2\pi \int_0^{\vartheta_c} d\vartheta \sin \vartheta \int_R^R dr r^2,$$

$$\vartheta_c = \arccos \frac{z_0}{R_c}, R_1 = R_c - \frac{z_0}{\cos \vartheta}. \quad (6)$$

В результате интегрирования получается выражение:

$$V \equiv V(z_0) = 2\pi R_c^2 z_0 \left\{ \ln \frac{R_c}{z_0} - \frac{2}{3} + \frac{z_0}{R_c} - \frac{z_0^2}{3R_c^2} \right\}. \quad (7)$$

Как и следовало ожидать, размер каверны зависит от высоты  $z_0$ , на которой зародыш появился над поверхностью катодного материала. В столбце жидкости высотой  $\Delta z_0$  с единичным по площади основанием находится  $\kappa \Delta z_0$  зародышей, которые создадут каверны общим объемом  $\Delta V$ , величина которого имеет вид:

$$\Delta V = 2\pi R_c^2 z_0 \left\{ \ln \frac{R_c}{z_0} - \frac{2}{3} + \frac{z_0}{R_c} - \frac{z_0^2}{3R_c^2} \right\} \Delta z_0. \quad (8)$$

После интегрирования по всем значениям  $z_0$ , приводящим к образованию каверн, т. е. в диапазоне  $0 \leq z_0 \leq R_c$ , можно определить общий объем каверн, который создает кавитация, а зная плотность выброшенного катодного материала  $\rho_M$ , определить массу  $M$  эродированного материала:

$$M = 5 \frac{\pi}{6} L_c^4 S^{\circ} \rho_M. \quad (9)$$

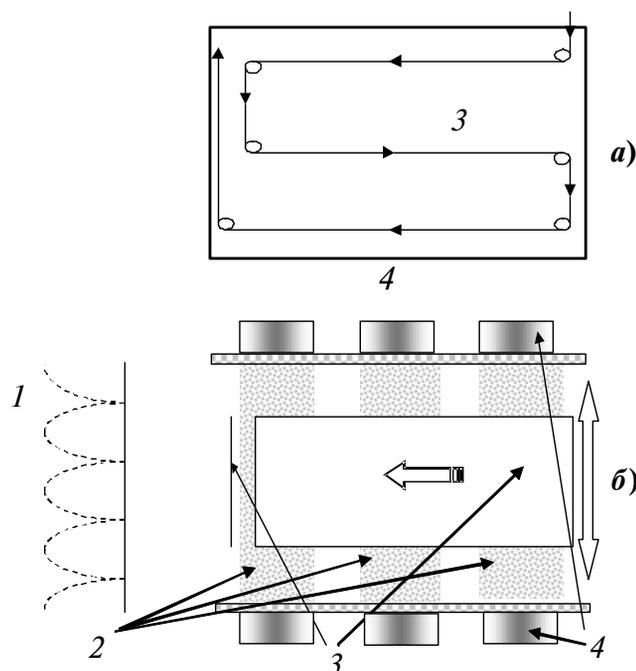
Здесь  $S$  – общая площадь поверхности обработанного катодного материала. Масса  $M$ , определенная по этой формуле, выбрасывается за время, меньшее одной четверти периода колебаний ультразвука в момент, когда завершается период разрежения и начинается сжатие. За время, равное продолжительности  $N$  таких периодов, она увеличится в  $N$  раз, т. е. с точностью до периода колебаний  $T = 2\pi/\omega$  растет линейно со временем, так что для полной массы  $M_T$  можно записать:

$$M_T = \frac{M \tau}{T} = \frac{5}{12\pi} \left( \frac{P_a}{3P_0} \right)^4 \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 \times \kappa R_0^4 S \omega \tau \kappa \rho_M, R_0 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{P_a}{\rho}}. \quad (10)$$

Здесь  $\tau$  – текущее время, единица измерения которого превышает период УЗ колебаний  $T$ . Видно, что масса эродируемого катодного материала чувствительна даже к небольшим изменениям акустического давления. Если считать, что материал удаляется эрозией с алюминиевой фольги равномерно, то есть  $M_T = \rho_M S \delta_c$ , где  $\delta_c$  – глубина эрозии, то за время  $\tau$  толщина удаленного слоя катодного материала будет определяться формулой:

$$\delta_c = \frac{5}{12\pi} \left( \frac{P_a}{3P_0} \right)^4 \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 R_0^4 \kappa \omega \tau = \frac{15}{4\pi} \left( \frac{P_a}{3P_0} \right)^6 \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 \frac{P_0^2}{\omega^3 \rho^2} \kappa \tau. \quad (11)$$

Таким образом, с помощью кавитационной эрозии, возбуждаемой ультразвуком, можно осуществить процесс утилизации наиболее трудоемких элементов отработанных источников электрического питания. Одна из возможных общих схем этого процесса представлена на рис. 2. Устройство представляет собой емкость, наполненную жидкостью, к двум противоположным сторонам которой присоединены УЗ преобразователи в виде плоских пластин магнитоstrictionного или пьезоэлектрического типа. Обрабатываемая лента движется между ними с помощью валов, причем это движение может быть закольцовано. В зависимости от величины мощности, прикладываемой к пластинам, внутри жидкости могут возникать области кавитации различного размера. Проходя через них, поверхности обрабатываемой катодной ленты будут испытывать кавитационную эрозию, т. е. частицы ленты при определенных условиях будут вырваны с ее поверхности и начнут скапливаться в ней в нарастающем количестве. Этот



**Рис. 2.** Схема УЗ кавитационной очистки катодных лент компактных источников электропитания: а) – вид сбоку; б) – вид сверху. 1 – распределение интенсивности ультразвука в пространстве между пьезопластинами; 2 – местоположение областей кавитации; 3 – катодная лента, подвергаемая УЗ очистке; 4 – позиции пьезоэлектрических пластин.

процесс предполагается продолжать до полной очистки поверхности ленты.

Поскольку пространственная структура акустического давления в устройстве имеет вид стоячей волны, то для определения связи ширины полосы с кавитацией протяженностью  $l_c$  с пороговым значением акустического давления  $P_{th}$ , при превышении которого в жидкости возникает кавитация, можно записать следующее уравнение:

$$P_a \cos \frac{l_c \omega}{c_S} = P_{th};$$

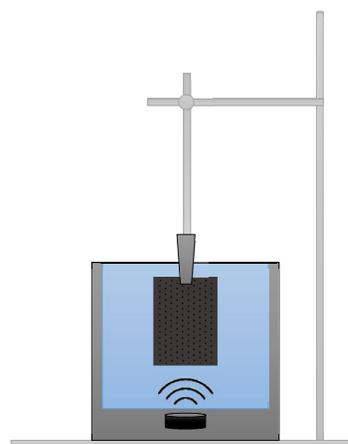
$$l_c = \frac{c_S}{\omega} \arccos \frac{P_{th}}{P_a}. \quad (12)$$

Величина  $P_{th}$  является характеристикой жидкости и зависит от ее состава и состояния [27], как и плотность зародышей пузырьков, т. е. их количество в единице объема, обозначенное символом  $\kappa$ .

Представленная схема отражает упрощенный вариант рассматриваемого процесса кавитационной очистки с помощью ультразвука. Но она содержит все основные элементы конструкции и позволяет рассчитать наиболее важные характеристики соответствующего устройства.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Катод был получен из литий-ионного аккумулятора типа NMC18650 (АО «Энергия», Россия). Эксперимент по ультразвуковой очистке алюминиевой фольги от катодного материала был проведен в дистиллированной воде и 1 М водном растворе лимонной кислоты при температуре от 20 до 70°C. Для проведения экспериментов использовался ультразвуковой генератор 28–35 С («Град-Технология», Россия) частотой 35 кГц и регулируемой мощностью. На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки.



**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки для изучения очистки алюминиевой фольги от катодного материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При движении катодной ленты длиной  $L_c$  со скоростью  $w_c$  каждый линейный в направлении перпендикулярном движению элемент ее поверхности будет находиться под воздействием кавитации время  $t_c$ , которое, очевидно, меньше величины  $L_c/w_c$ , соответствующей времени прохождения всей ленты мимо позиции старта ее начального края. Это связано с тем, что область кавитации занимает не весь объем жидкости, так что движущаяся лента пересекает попеременно полосы с кавитацией протяженностью  $l_c$  и без нее. Если полосы с кавитацией одинаковы и их число обозначить через  $n_c$ , то при одноразовом прохождении ленты через них для  $t_c$  можно записать выражение:

$$t_c = n_c l_c / w_c. \tag{13}$$

Поэтому за один проход ленты через все области кавитации продолжительностью  $L_c/w_c$  глубина эрозии  $\delta$ , согласно (6) и (7), определяется формулой:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{12\pi} \left( \frac{P_a}{3P_0} \right)^4 \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 R_0^4 \kappa \omega t_c = \\ &= \frac{15}{4\pi} \left( \frac{P_a}{3P_0} \right)^6 \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 \frac{\kappa P_0^2 n_c l_c}{\omega^3 \rho^2 w_c}. \end{aligned} \tag{14}$$

Формулу (14) можно переписать с помощью соотношения (4) для получения более наглядной связи между параметром УЗ утилизации и используемой электрической мощностью:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5\kappa}{64\pi} \frac{W_T^3}{W_0^3} \left( \frac{P_0}{\sigma_T} \right)^2 \frac{P_0^2 n_c l_c}{\omega^3 \rho^2 w_c}; \\ W_0 &= \frac{9S_P P_0^2}{16\eta \rho c_S}. \end{aligned} \tag{15}$$

Очевидно, что для равномерного удаления покрытия с ленты необходимо обеспечить такой режим ее движения, при котором вся поверхность проходит все полосы кавитации. При этом толщина покрытия уменьшается на величину  $\delta$ , определяемую выражениями (14) и (15). Как видно из этих соотношений, значение  $\delta$  можно регулировать изменением амплитуды ультразвука, его частоты, а также скорости движения ленты. На рис. 4 некоторые из этих зависимостей представлены для следующих типичных значений параметров рассматриваемого процесса:  $P_0 = 0.1$  Мпа;  $n_c = 5$ ;  $w_c = 0.1$  м с<sup>-1</sup>;  $P_a = 0.5$  Мпа;  $c_s = 10^3$  м с<sup>-1</sup>;  $\rho = 10^3$  кг м<sup>-3</sup>;  $S_p = 0.03$  м<sup>2</sup>;  $\sigma_T = 2$  Мпа;  $\omega_0 = 2 \cdot 10^5$  Гц;  $\kappa = 10^{10}$  м<sup>-3</sup>;  $\eta = 0.3$ .

Здесь использованы следующие обозначения:  $z = W_T/W_0$ ;  $\Omega = \omega/\omega_0$ .

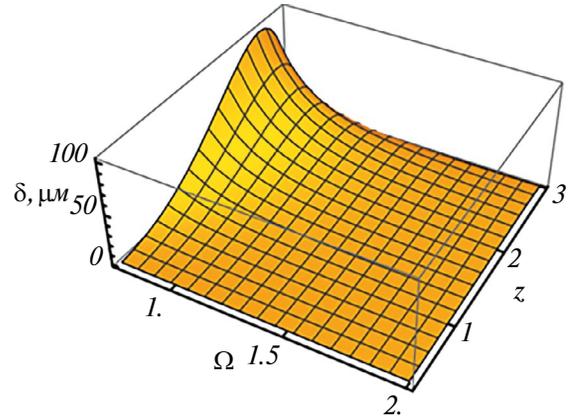
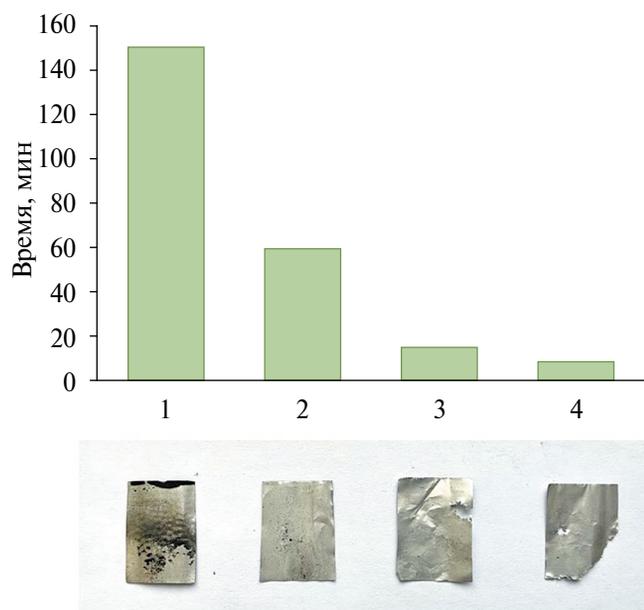


Рис. 4. Зависимость глубины слоя удаляемого покрытия в процессе УЗ кавитационной очистки катодных лент литий-ионных аккумуляторов от частоты и мощности УЗ при однократном прохождении всей ленты через области кавитации.

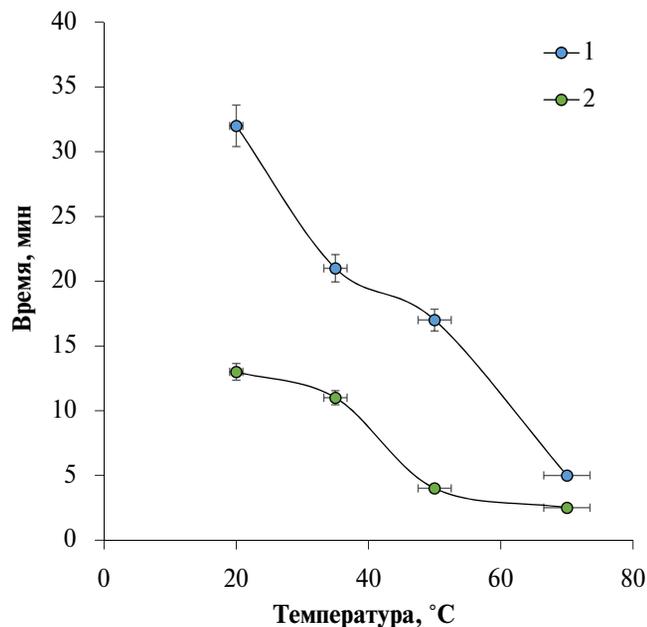
Как это следует из рис. 4, глубина удаленного слоя  $\delta_c$  при одноразовом пропускании очищаемой ленты через области кавитации уменьшается при увеличении частоты ультразвука. Это связано с соответствующим падением ударной силы воздействия от схлопывания кавитационного пузырька и синхронным уменьшением его равновесного радиуса. В то же время эта глубина существенно возрастает при увеличении акустического давления. Такая высокая чувствительность в этой зависимости может оказаться весьма полезной при тонкой настройке выходных параметров процесса. Вполне понятная обратная пропорциональность величины  $\delta$  скорости движения ленты также может быть использована для оптимизации характеристик рассматриваемой схемы утилизации компактных источников электрического питания. Из рис. 4 также видно, что проявление зависимости размера полосы с кавитацией  $l_c$  (12) от величины акустического давления становится все более заметным при уменьшении частоты для тех же фиксированных значений параметров устройства.

На рис. 5 представлены результаты серии экспериментов очистки алюминиевой фольги с использованием УЗ кавитационной эрозии, демонстрирующие возможность управления процессом очистки катодной ленты литий-ионного аккумулятора типа NMC. Время, необходимое для полной очистки алюминиевой фольги, снижается с увеличением мощности ультразвукового воздействия со 150 до 9 мин. Однако при увеличении мощности свыше 55 Вт алюминиевая фольга начинает разрушаться и дробиться до металлического алюминиевого порошка. Поэтому оптимальная мощность была определена на уровне 44 Вт.



**Рис. 5.** Время полной очистки алюминиевой фольги от катодного материала в зависимости от мощности ультразвукового генератора, Вт: 1–33; 2–44; 3–55; 4–66. Температура 20 °С.

Применение УЗ кавитационной эрозии для очистки алюминиевой фольги от катодного материала позволило диспергировать частицы катода, тем самым уменьшая размер частиц и увеличивая удельную поверхность. Эти характеристики благоприятны для последующего процесса выщелачивания с целью извлечения ценных металлов из катодных материалов.



**Рис. 6.** Время полной очистки алюминиевой фольги от катодного материала в 1 М растворе лимонной кислоты в зависимости от температуры при мощности, Вт: 1–33; 2–44.

Экспериментально исследовано влияние температуры на время очистки алюминиевой фольги от катодного материала (рис. 6). Из рис. 6 видно, что эффективность отслаивания катодного материала от фольги увеличивается с ростом температуры. Это можно объяснить тем, что увеличивается растворимость полимерного связующего материала (ПВДФ), который используется для связывания частиц активного материала друг с другом и с алюминиевой фольгой; в растворе лимонной кислоты. К тому же при увеличении мощности время, требуемое для полного отслоения катода от фольги, уменьшается. Исходя из полученных данных видно, что увеличение мощности УЗ воздействия сокращает время очистки алюминиевой фольги от катодного материала, поскольку с увеличением мощности усиливается кавитация. Таким образом, эффективная очистка алюминиевой фольги от катодных материалов происходит в результате растворения связующего материала в сочетании с кавитацией под действием ультразвука.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ультразвука для снятия катодного материала с алюминиевого токоприемника отработанных литий-ионных аккумуляторов является экологичным и эффективным методом восстановления наиболее сложных для обработки деталей, подлежащих утилизации химических источников тока. Многообразные свойства ультразвука и многочисленные способы его применения не оставляют сомнения в том, что его полезные возможности способны проявить себя и на других этапах рассматриваемого восстановительного процесса. В результате этого становится реалистичной перспектива разработки общей схемы рекультивации непригодных для дальнейшей эксплуатации источников тока, в которой на всех этапах восстановления основным действующим средством воздействия выступает ультразвук. Создание таких унифицированных систем должно повысить экономичность, а также упростить и сделать более компактным и качественным всю процедуру переработки полного набора деталей, отработавших свой срок литий-ионных аккумуляторов.

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

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$W_T$	сетевая электрическая мощность, которую потребляют ультразвуковые устройства
$W$	акустическая мощность, которая вводится внутрь жидкой среды

$\eta$	коэффициент полезного действия
$S_p$	площадь поверхности пьезокерамической пластины
$\xi(t)$	поблизости, величина смещения элементов жидкости
$t$	от времению частота колебаний пьезокерамической пластины
$c_s$	скорость распространения волнового процесса в жидкости
$q_a$	плотность потока акустической энергии
$P_a$	акустическое давление в жидкости
$\xi_m$	амплитудой волнового процесса в жидкости
$\rho$	плотность жидкости
$z_0$	расстояние от кавитационного пузырька до обрабатываемой плоской поверхности
$R_{\min}$	минимальное значение радиуса кавитационного пузырька
$P_{\max}$	максимальное значение давления на поверхности кавитационного пузырька
$\sigma_T$	предел текучести катодного материала
$P_c$	критическое значение давления в кавитационном пузырьке, обладающим радиусом $R_c$
$R_c$	критическое значение радиуса кавитационного пузырька, когда на фронте ударной волны перепад давления становится равным пределу текучести $\sigma_T$ катодного материала
$R_0$	равновесный радиус кавитационного пузырька
$\kappa$	плотность зародышей пузырьков в жидкости
$V$	объем каверны на поверхности катодного материала
$M$	масса эродированного материала
$S$	общая площадь поверхности обработанного катодного материала
$\tau$	текущее время
$T$	период ультразвуковых колебаний
$\delta_c$	глубина эрозии
$P_{th}$	пороговое значение акустического давления, при превышении которого в жидкости возникает кавитация
$l_c$	протяженность ширины полосы с кавитацией
$w_c$	скорость движения катодной ленты длиной
ПВДФ	поливинилиденфторид
NMC	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-Ion Battery Materials: Present and Future // *Materials Today*. 2015. V. 18. № 5. P. 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2014.10.0402>.
2. Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles // *Nature*. 2019. № 575. P. 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-53>.
3. Xie J., Lu Y.-C. A Retrospective on Lithium-Ion Batteries // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. № 1. P. 2499. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-94>.
4. Torkaman R., Asadollahzadeh M., Torab-Mostaedi M., Ghanaadi Maragheh 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. 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.0235>.
5. 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. 120. № 14. P. 7020–7063. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b005356>.
6. 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. № 12. P. 1609. <https://doi.org/10.3390/met101216097>.
7. Kim K., Raymond D., Candeago R., Su X. Selective cobalt and nickel electrodeposition for lithium-ion battery recycling through integrated electrolyte and interface control // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 1. P. 6554. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26814-78>.
8. Jin S., Mu D., Lu Z., Li R., Liu Z., Wang Y., Tian S., Dai C. A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: urgent status and technology advances // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 340. P. 130535. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.1305359>.
9. Jung J.C.-Y., Sui P.-C., Zhang J. A Review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments // *J. Energy Storage*. 2021. V. 35. P. 102217. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.10221710>.
10. Lei S., Sun W., Yang Y. Solvent Extraction for Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries // *J. Hazard Mater.* 2022. V. 424. P. 127654. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.12765411>.
11. Qin L., Di J., He Y. Efficient synthesis of furfuryl alcohol from corncob in a deep eutectic solvent system // *Processes*. 2022. V. 10. P. 1873. <https://doi.org/10.3390/pr1009187312>.
12. 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. 255–264. <https://doi.org/10.1134/S004057952303006513>.
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. 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.00914>.
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. 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.01015>.
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. 1132–1136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.04016>.
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. 8287–8294. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b0669417>.
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. <https://doi.org/10.1039/c3gc40182k18>.
  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. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.00119>.
  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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.13327020>.
  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. 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.05821>.
  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. 663–670. <https://doi.org/10.1134/S004057952104037022>.
  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. <https://doi.org/10.3390/molecules2704136823>.
  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/sulfosalicylic acid – assisted by ultrasonic cavitation // *Metals*. 2021. V. 11. P. 1964. <https://doi.org/10.3390/met1112196424>.
  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 sulfosalicylic acid: properties and applications // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. P. 371–379. <https://doi.org/10.1134/S004057952103024625>.
  25. Milevsky N.A., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A. Extractive Separation of Co/Ni pair with the deep eutectic solvent aliquat 336/Timol // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2022. V. 56. P. 45–52. <https://doi.org/10.1134/S0040579522010080>.
  26. Milevskii N.A., Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A. Separation of Li(I), Co(II), Ni(II), Mn(II), and Fe(III) from hydrochloric acid solution using a menthol-based hydrophobic deep eutectic solvent // *Hydrometallurgy*. 2022. V. 207. P. 105777. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.10577727>.
  27. Flynn H. G. *Physics of Acoustic Cavitations in Liquids* // *Physical acoustics – Principles and methods*. NY.: Academic Press, 1964, P. 376.