

УДК 347.779

СОНОЛЮМИНИСЦЕНЦИЯ КАК ОСНОВА ТЕОРИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Наталья Михайловна Чигринова, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет, Беларусь
Тел.+375-17-293-95-81, E-mail: chygrynova@yandex.by

Аннотация. В статье при разработке способов активации процесса микродугового оксидирования (МДО) изучены особенности изменения электромеханической активности водно-щелочных электролитов, определяющих динамику роста керамоподобных покрытий, посредством воздействия на жидкость ультразвукового поля. Автором предложен механизм увеличения электрохимической и электромеханической активности водно-щелочных растворов при осуществлении микродуговой обработки вентильного металла в ее разных вариациях, посредством пропускания через электролит ультразвуковых колебаний различной частоты. В работе представлены данные теоретического анализа результатов моделирования физических явлений, сопровождающих процесс одного из вариантов МДО – анодного микродугового оксидирования (АМДО), проанализированы механизмы и выявлены параметры, управляющие динамикой выделения энергии при схлопывании газовых пузырьков, образовавшихся в электролите при ультразвуковом воздействии.

Ключевые слова: сонолюминисценция, анодное микродуговое оксидирование, ультразвуковое поле, электромеханическая активность, покрытие.

ULTRASONIC INTENSIFICATION OF ANODE-CATHODIC INTERACTIONS IN MICROPLASMA SPARK PROCESSES

Natalia M. Chigrinova, D. Eng.

Abstract. In the article, during the development of methods for activating the microarc oxidation (MAO) process, the features of changes in the electromechanical activity of aqueous-alkaline electrolytes, which determine the growth dynamics of ceramic-like coatings, were studied by exposing the liquid to an ultrasonic field. The author proposes a mechanism for increasing the electrochemical and electromechanical activity of aqueous alkaline solutions during various microarc machining (MAM) techniques on valve metals by passing ultrasonic vibrations of varying frequencies through the electrolyte. This paper presents theoretical analysis of the results of modeling the physical phenomena accompanying one of the MMA variants—anodic microarc oxidation (AMAO). The mechanisms are analyzed and the parameters governing the dynamics of energy release during the collapse of gas bubbles formed in the electrolyte during ultrasonic treatment are identified.

Keywords: sonoluminescence, anodic microarc oxidation, ultrasonic field, electromechanical activity, coating.

Введение

К настоящему времени механизм формирования покрытий с использованием метода анодного микродугового оксидирования (АМДО) однозначно не установлен. Нет единого мнения, что управлять скоростью и стабильностью массопереноса, от чего

преимущественно зависит химическая активность электролита, его рецептуры или электрических параметров процесса. Для осуществления направленного микроплазменного синтеза пленок заданного химического состава и кристаллической структуры на аноде при микродуговом оксидировании обычно используются различные способы управления процессом микродугового оксидирования (МДО), но предпочтение отдается варьированию химического состава электролита.

В настоящей работе при разработке способов управления процессом АМДО основное внимание уделялось не составу, а электромеханическому состоянию электролита. В статье предложен механизм увеличения электромеханической активности водно-щелочных электролитов при проведении процессов микродугового оксидирования в его разных вариациях посредством воздействия на раствор ультразвукового поля (УЗ).

Цель разработки физико-математической модели активированного процесса АМДО состоит в оптимизации режимов ультразвукового воздействия на динамику анодного микродугового оксидирования, на процессы анодно-катодных и химических взаимодействий в активированных электролитах.

Решаемые задачи:

1. Изучение механизма, сопровождающего мощное выделение энергии при коллапсе кавитационных пузырьков.
2. Определение количества энергии, выделяемой при схлопывании кавитационного пузырька, влияющего на динамику происходящих в жидкости процессов.
3. Разработка и оптимизация параметров, определяющих интенсивность амплитуды, давления и частоты УЗ, плотности, вязкости, статического давления на процесс интенсификации энергомассообменных процессов при микродуговом оксидировании.
4. Создание математической модели динамики развития кавитационных пузырьков в условиях внешнего ультразвукового воздействия.

1. Основное содержание и результаты работы

Основой для разработки механизма ультразвуковой интенсификации процесса АМДО автором выбрана теория искрения с образованием парогазовых пузырьков.

Известно [1, 2], что кавитация (от латинского «*kavitas*» – полость) – образование газовых, паровых или парогазовых полостей (кавитационные пузырьки), сопровождающих распространение ультразвуковых колебаний в жидкости, является причиной выделения мощной энергии. Акустическая кавитация возникает в жидкости, которая подвергается звуковому или ультразвуковому воздействию частотой от 20 кГц до 10 МГц [3, 4]. При прохождении ультразвуковой волны в электролите происходят пульсации: расширение (отрицательное давление) и сжатие (положительное давление). Если интенсивность (амплитуда) звукового поля достаточно высока, то ультразвук может вызвать образование, рост и быстрое сжатие пузырьков насыщенного пара. Кавитационные пузырьки наблюдаются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже критического значения P_{cr} (в реальной жидкости P_{cr} приближенно равно давлению ее насыщенного пара при данной температуре). Они образуются на так называемых кавитационных зародышах, которыми чаще всего являются газовые включения, содержащиеся в жидкости, на колеблющейся поверхности акустического излучателя или на имеющихся в жидкости специально введенных примесях, как в случае химической и электрической интенсификаций процесса АМДО. Наличие заряженных полирадикалов, выполняющих роль миникатодов, создает дополнительное электрическое поле, повышая его давление вблизи оксидируемого металла. Пузырьки, попадая в область повышенного давления, схлопываются (конденсируются) кумулятивными струйками в точ-

ки. В таких многочисленных локальных областях кумулятивные эффекты приводят к точечному кратковременному (длительностью $\sim 10^{-6}$ с) повышению давлений до десятков тысяч атмосфер, с образованием точечных температур в десятки тысяч градусов [4]. Схлопывание (коллапс) сжимающегося пузырька приводит также к локализованному мощному выделению тепловой энергии, интенсифицируя таким образом протекание высокоэнергетических химических процессов. Кроме того, резкое исчезновение кавитационных пузырьков вызывает образование гидравлических ударов и, как следствие, создание волн сжатия и растяжения в жидкости с ультразвуковой частотой [5]. Если ударная волна встречает на своем пути препятствие, то она разрушает его поверхность. Это является положительным фактором для получения высокоплотного покрытия, поскольку верхние, вновь нарастающие слои, подвергаемые такому разрушению, имеют пористую и неоднородную структуру. Энергия схлопывающихся пузырьков расходуется не только на излучение ударных волн, но и на локальный нагрев газа, содержащегося в сжимающихся кавитационных полостях, на образование свободных радикалов, приводящих к более интенсивному протеканию химических реакций, ускоряющих процесс роста оксидных слоев. Совместное воздействие кумулятивных струй, гидродинамических ударов и ультразвукового поля способствует стерилизации обрабатываемой жидкости, эмульгированию обычно не смешиваемых продуктов [4, 5], что часто наблюдается в такой сложной, постоянно меняющейся системе, как электролит. При этом интенсифицируются химические реакции, твердые частицы в растворе диспергируются до микронного уровня и служат новыми центрами зарождения пузырьков. Происходит также гомогенизация обрабатываемого продукта, что способствует улучшению качества формируемого при АМДО покрытия.

Эти явления послужили предпосылкой для выбора ультразвуковой интенсификации процесса АМДО как одного из основных приемов, ускоряющих протекание электрохимических реакций в электролите и активизирующих процесс образования и скорость роста оксидных покрытий.

Почему именно кавитация выбрана автором для разработки механизма интенсификации процесса АМДО?

Основные теоретические положения механизма кавитации и его применения в технике изложены в [2, 3, 5]. Кавитация отличается от обычного кипения тем, что при повышении относительной скорости потока относительно тела давление потока понижается до давления насыщенных паров (вакуума). При этом жидкость вскипает, и образуются кавитационные парогазовые пузырьки микроскопических размеров. Акустическая кавитация, в отличие от гидродинамической (обусловленной понижением давления вследствие больших локальных значений скорости в потоке движущейся жидкости), возникает при прохождении ультразвуковых волн с высокой амплитудой, превосходящей некоторую пороговую величину [4]. Звуковое поле в жидкости, вызывающее кавитацию, особенно в результате ее наполнения дополнительными химическими и прочими ингредиентами, неоднородно по пространству. Это приводит к тому, что наряду с пульсациями, пузырек движется в жидкости поступательно. В стоячей ультразвуковой волне направление движения пузырька зависит от соотношения между его радиусом R и частотой его собственных колебаний, которая совпадает с частотой ультразвуковой волны. При радиусе пузырьков, меньше резонансного ($R < R_{\text{res}}$), они пульсируют в фазе с колебаниями давления и мигрируют по направлению к пучности давления, а при ($R > R_{\text{res}}$) пузырьки перемещаются к узлам давления. Трансляционное (поступательное) движение пузырьков является причиной коагуляционного механизма их роста, а скорость этого движения пузырьков, находящихся в ультразвуковом поле со

звуковым давлением P_a , зависит также от свойств жидкости – коэффициентов кинематической вязкости и поверхностного натяжения [4, 5]. Количественно момент возникновения кавитации и степень ее развития характеризуются так называемым числом кавитации:

$$C = (p_{stat} - p_s) / A \quad (1)$$

где p_s – давление насыщенного пара (Па), A – амплитуда звуковых колебаний, p_{stat} – гидростатическое давление (Па).

Одним из явлений, сопровождающих мощное выделение энергии при коллапсе кавитационных пузырьков, является сонолюминесценция.

Сонолюминесценция (СЛ), впервые описанная в [6, ..., 8], это явление преобразования в свет энергии, образующейся в результате акустически управляемого коллапса газового пузырька. При этом возникают высокие температуры и давления, обусловленные прохождением ударных волн, направленных к центру газовых пузырьков.

Физическая интерпретация эффекта сонолюминесценции состоит в том, что звуковая волна достаточно большой интенсивности (в фазе разрежения) может вызвать столь большие напряжения в жидкости, что ей не составит труда локально разорвать сплошную среду, создав в ней маленькую полость, пузырек, заполненный водяным паром и растворенными в воде газами. Через полпериода, под действием сжимающего эффекта ультразвука и сил поверхностного натяжения, этот пузырек схлопывается, но не до конца. Именно в момент достижения минимального радиуса из пузырька вырывается вспышка светового излучения [8]. На рисунке 1, а представлена классическая зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени развития процесса его роста и схлопывания: толстой линией показаны результаты измерения радиуса пузырька в масштабе периода ультразвуковых колебаний. Синусоида здесь – это величина напряжений ультразвуковой волны.

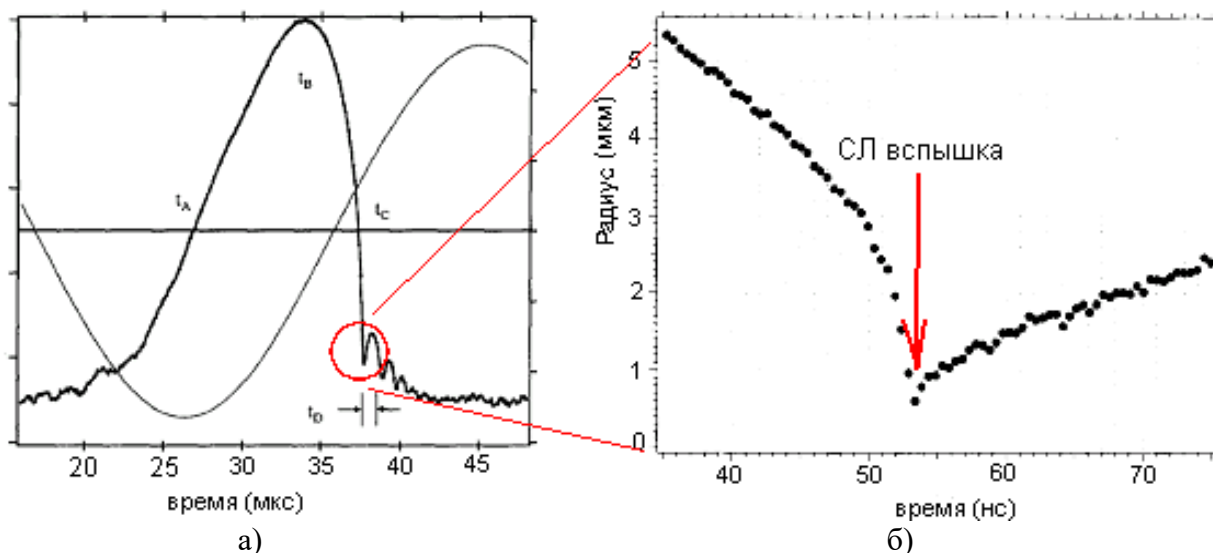


Рисунок 1. Зависимость радиуса пузырька от времени
(стрелкой показан момент излучения СЛ света)

Из приведенного рисунка видно, что пузырек сначала растет, а затем схлопывается. То, что происходит с пузырьком в конце катастрофического сжатия, показан

но на рисунке 1, б из которого следует, что скорость схлопывания на финальном участке составляет 1–1,5 км/сек.

На рисунке 2 показан типичный спектр сонолюминесценции – сплошной, без отдельных линий излучения, растущий в ультрафиолетовую область. Поскольку максимум спектра не виден, следует, что внутри пузырька развиваются тепловые процессы с температурой в десятки тысяч градусов. А это значит, что внутри СЛ пузырька находится плазма [8].

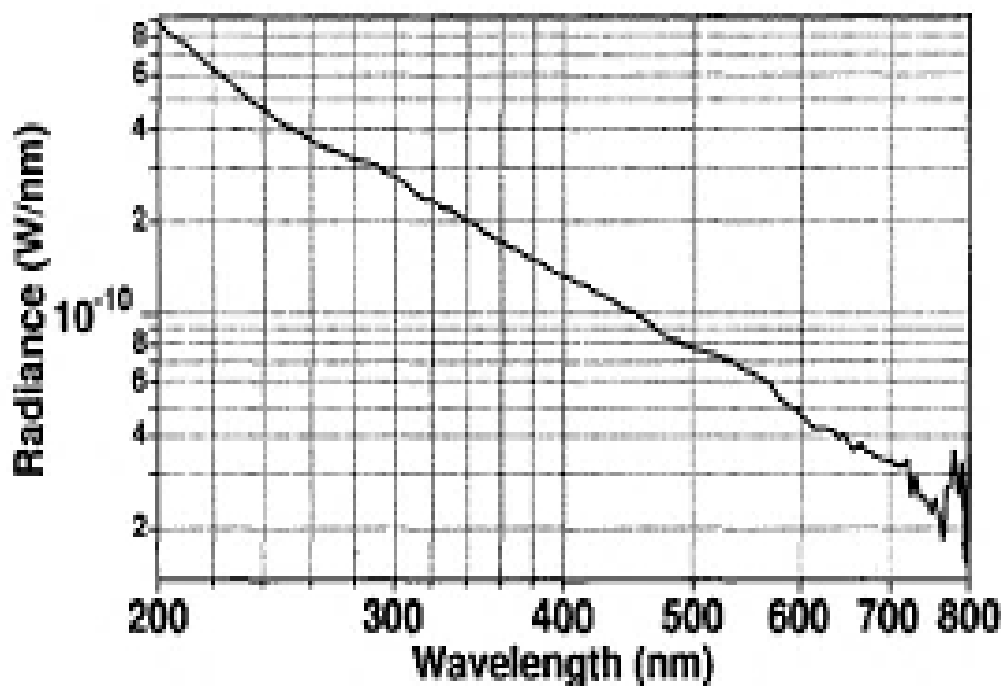


Рисунок 2. Типичный спектр сонолюминесцентного излучения [21]

При осуществлении процесса АМДО в растворе электролита, когда критическая мощность ультразвука достигается в довольно большом объеме воды и вследствие этого в фазе разрежения рождается не один, а сотни кавитационных пузырьков, отдельные пузырьки начинают взаимодействовать друг с другом, сливаться, образуя более крупные полости. Поэтому в данном случае реализуется режим многопузырьковой СЛ. Исследования показали, что спектр излучаемого в таком режиме света существенно отличается от картины однопузырьковой СЛ.

Это иллюстрируется рисунком 3, на котором приведены сравнительные спектры одно- и многопузырьковой СЛ в 0,1-молярном растворе NaCl в воде при одинаковых прочих условиях. В многопузырьковой СЛ отчетливо наблюдаются отдельные линии излучения, в том числе линия излучения радикала $\text{OH}^\cdot$ при длине волны 310 нм [8, 9]. Описываемые явления характерны для химически и электрически активированных электролитов при пропускании через них ультразвуковых волн.

Количество энергии, выделяемой при схлопывании пузырька, обусловленном внешним ультразвуковым воздействием, заметно влияющим на динамику происходящих в жидкости процессов, имеет свои пределы. Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, эта энергия зависит в первую очередь от отношения R_{max}/R_0 , где R_{max} – максимальный радиус пузырька, достигаемый им в процессе полупериода растяжения жидкой среды при ультразвуковом воздействии, а R_0 – начальный

радиус пузырька, образованного в результате кавитации, размер которого определяется размером его зародыша [9-12].

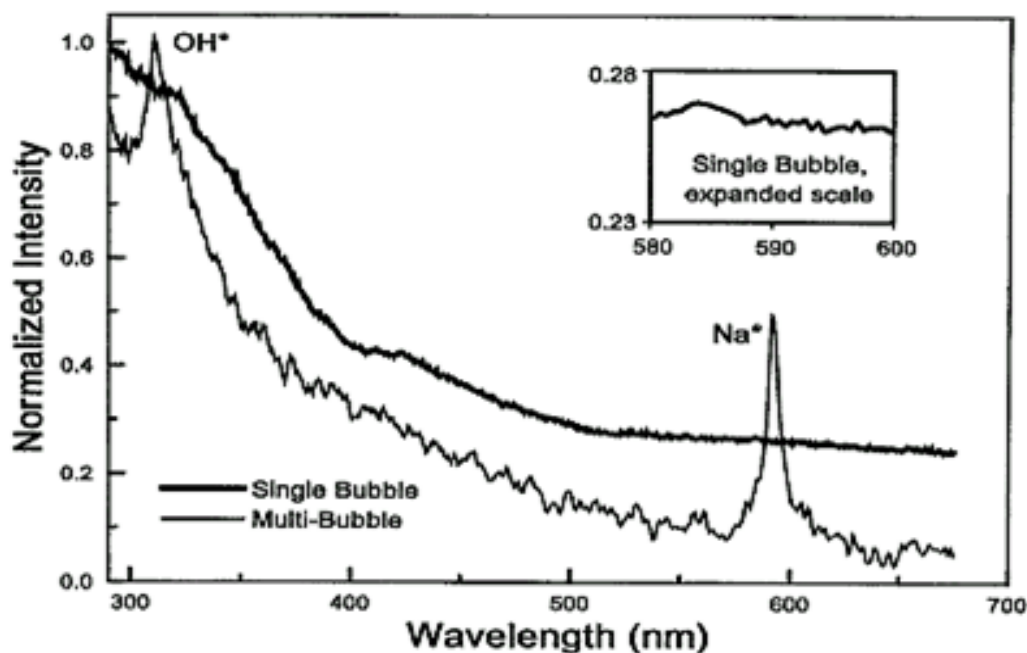


Рисунок 3. Сравнение спектров одно- и многопузырьковой СЛ

При описании явления сонолюминесценции показано, что размер зародыша зависит от концентрации газовых включений в жидкости или размера растворенных твердых частиц, также являющихся центрами зарождения кавитационных пузырьков [12,13]. Такими центрами в процессе АМДО, как отмечалось выше, являются растворенные в электролите частицы оксидируемого металла или химические ингредиенты в мелкодисперсном состоянии (в зависимости от рецептуры электролита). Это отношение определяется и внешними динамическими параметрами (в частности, амплитудой и частотой ультразвука) и собственными физическими свойствами жидкости (плотностью, вязкостью, поверхностным натяжением жидкости и скоростью распространения звука в ней). Изменение указанных параметров и их оптимизация позволят управлять процессом АМДО.

Потенциальная энергия U , выделяемая при схлопывании пузырька радиусом $R_{\max}$, с высокой степенью приближения может быть записана в виде:

$$U = P_c \left(\frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 \right)_{\text{Дж}}, \quad (2)$$

где P_c – давление окружающей среды в начале процесса схлопывания пузырька, которое можно рассматривать как давление коллапса, (Па).

Эта энергия распределена между атомами и молекулами газа, присутствующего в пузырьке, и выделяется в результате его коллапса. Предполагая обычные равновесные условия для газа в пузырьке радиусом R_0 , можно оценить число атомов или молекул в этом пузырьке N_0 .

Очевидно, что N_0 пропорционально объему пузырька $V = \frac{4}{3}\pi R_0^3$ (м³). Отсюда энергетическая плотность, т.е. энергия в эВ (1 Дж = 6,242·10¹⁸ эВ), приходящаяся на молекулу или атом, выражается простым соотношением [14]:

$$E_d = U / N_0 = 0.025(P_c / P_0)(R_{\max} / R_0)^3, \quad (3)$$

где P_0 – начальное давление перед ростом пузырька, (Па).

С учетом особенностей политропического процесса, для которого давление и объем идеального газа связаны соотношением $pV^k = \text{Const}$, выражение для энергетической плотности E_d приобретает вид:

$$E_d = 0.025 \left(\frac{R_{\max}^3}{R_0^3} \right) \left[\frac{1}{1 + k \left(\frac{P_c}{P_0} \right) \left(\frac{R_{\max}^3}{R_0^3} \right)} \right] \quad (4)$$

где k – политропическая константа.

Коэффициент 0,025 в выражении (4) объясняется переводом энергии из джоулей в электрон-вольты, а также включает значения числа Авогадро и универсальной газовой постоянной.

Если давление в момент схлопывания пузырька P_c можно для оценки принять равным давлению окружающей жидкости P_0 , то $E_d = 0.025(R_{\max} / R_0)^3$, и плотность энергии, выделяемой в процессе коллапса одного пузырька в условиях внешнего ультразвукового воздействия, является только функцией отношения $R_{\max}/R_0$. Например, при значении коэффициента расширения пузырька, равного 10 (типичное значение для однопузырькового коллапса)[10], энергетическая плотность равна 25 эВ на атом или молекул. Чем больше радиус коллапсирующего пузырька, тем выше энергия, высвобождаемая при его схлопывании. Именно этот параметр кавитации является определяющим при оптимизации условий ультразвуковой интенсификации процесса АМДО [14].

В работе [15] проведена оценка температуры внутри коллапсирующего пузырька T_g и давления P_g , исходя из решения уравнения Релея–Плессе для радиуса $R(t)$ пульсирующего пузырька вместе с адиабатическим уравнением состояния для газа, находящегося при давлении P_g и температуре T_g равномерно сжатого пузырька:

$$T_g(R) = \frac{T_0 R_0^{3(\gamma-1)}}{(R^3 - a^3)^{\gamma-1}}, \quad (\text{град.}), \quad P_g(R) = \frac{P_0 R_0^{3\gamma}}{(R^3 - a^3)^{\gamma}}, \quad \text{Па} \quad (5)$$

где γ – отношение теплоемкостей C_p/C_v , a – радиус газового пузырька, (м), сжатого до его ван-дер-Ваальсового радиуса твердой сферы, ρ – плотность, (кг/м³), c – скорость звука, (м/с), σ – коэффициент поверхностного натяжения, (Дж/м²) и μ – вязкость жидкой среды, (П). Для медленных пульсаций пузырька $T_g \approx T_0$, где T_0 – температура окружающей среды. Расчеты по приведенным формулам показывают, что температура внутри пузырьков может достигать 10⁸ К [15].

2. Общий алгоритм расчетов

Разработанная математическая модель динамики развития кавитационных пузырьков в условиях внешнего ультразвукового воздействия, как и большинство работ, посвященных динамике развития пузырьков кавитационного происхождения, основана на классическом уравнении Рэля–Плессе (Rayleigh–Plesset), представляющем собой одну из форм уравнения сохранения момента. Оно описывает поведение сферического изолированного пузырька гомогенного состава в бесконечной жидкой среде в отсутствие эффектов тепло– и массообмена.

Уравнение Рэля–Плессе (точнее, его модификация Нотлингга–Неппираса–Порицкого), сугубо нелинейное. Фактически, оно является примером описания хаотической динамической системы [15]. Анализ нелинейной динамики пузырька в акустическом поле, состоящем из мощной гармонической и шумовой составляющих, показывает, что влияние стохастической компоненты существенно в области бистабильности динамических состояний пузырька. Поведение его в этой области характеризуется значительным увеличением длительности переходных процессов и существенно негауссовым распределением флуктуаций вблизи устойчивых траекторий.

Уравнение Рэля–Плессе в типичной форме записи имеет следующий вид:

$$\frac{p_v(T_\infty) - p_\infty(t)}{\rho_L} + \frac{p_{G_0}}{\rho_L} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 + \frac{4\mu_L \dot{R}}{R} + \frac{2S}{\rho_L R}, \quad (\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}) \quad (6)$$

где R – радиус пузырька, м, ρ_L – плотность и μ – кинематическая вязкость жидкой среды, c – скорость звука в жидкой среде, S – коэффициент поверхностного натяжения на поверхности пузырька, p_{G_0} – парциальное давление газа в пузырьке радиусом R_0 , $p_v(T_\infty)$ – давление насыщенного пара при температуре T_∞ вдали от пузырька, k – политропическая константа. Верхние точки над символами – производные по времени.

Внешнее ультразвуковое воздействие описана членом $p_\infty(t) = p_{\text{stat}} + A \cdot \sin(2\pi f t)$, где p_{stat} – внешнее давление, Па, A – амплитуда давления, (Па) и f частота, (Гц), ультразвуковой волны. Очевидно, уравнение (6) нелинейно и не имеет аналитического решения. Кроме того, в нем не учитывается сжимаемость жидкости – эффект, который с необходимостью должен проявляться при высоких давлениях коллапса пузырьков кавитационного происхождения [13–15]. Этот недостаток устранен в модели Келлера–Миксиса [14] и в ее модификации, выполненной Парлицем с соавторами [15], которая выражается следующим уравнением:

$$\left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \left(1 - \frac{\dot{R}}{3c} \right) = \left(1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \frac{P}{\rho_L} + \frac{R}{\rho_L c} \dot{P}, \quad (7)$$

где

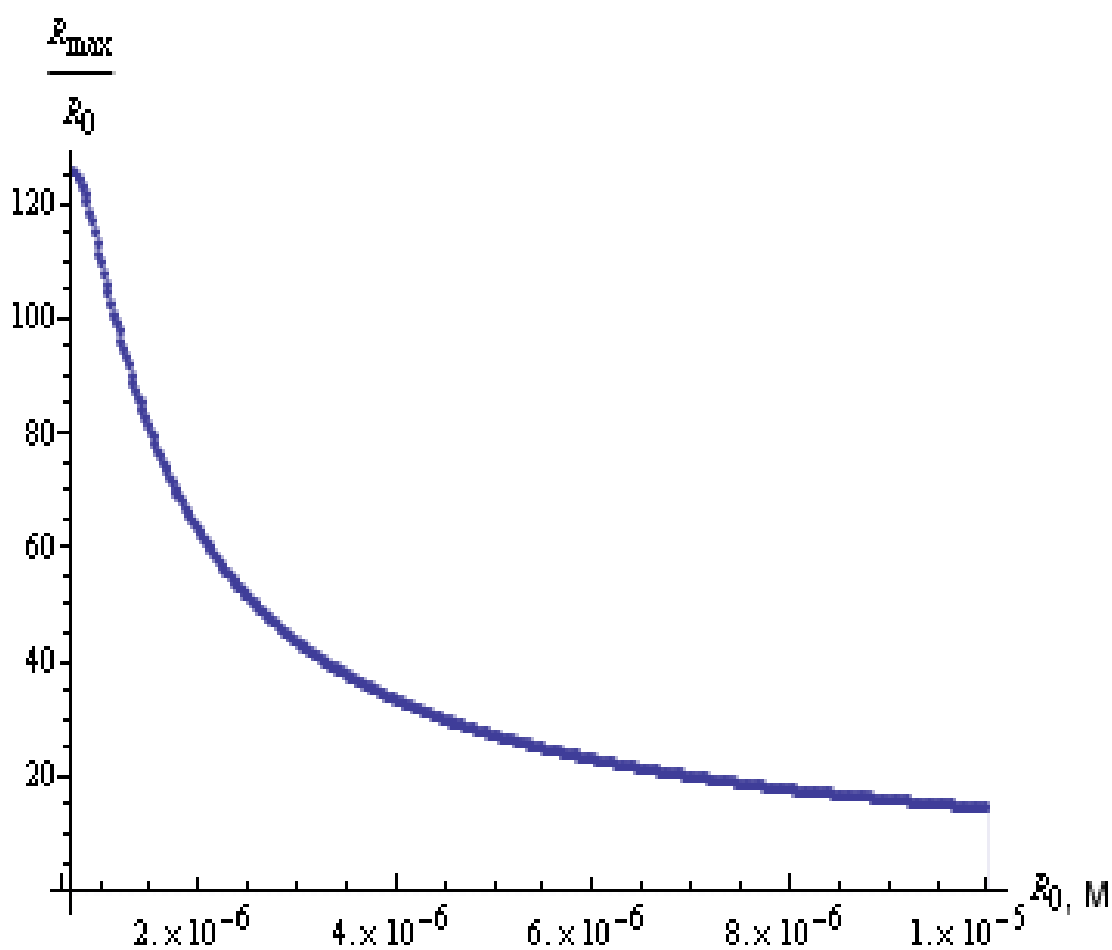
$$P = \left(p_{\text{stat}} - p_v(T_\infty) + \frac{2S}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3k} - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu_L \dot{R}}{R} - p_{\text{stat}} + p_v(T_\infty) - A \sin(2\pi f t), \quad (8)$$

Некоторые результаты экспериментов, проведенных с учетом разработанной модели, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от амплитуды, давления и частоты ультразвукового воздействия при фиксированном значении $R_0 = 1 \text{ мкм}$

$A, \text{Па}$	$f, \text{кГц}$		
	20	25	30
$2,0 \cdot 10^5$	110,7	86,9	71,2
$3,0 \cdot 10^5$	212,1	168,6	139,8

На рисунке 4 показана зависимость $R_{\max}/R_0$ от начального радиуса пузырька R_0 при фиксированных значениях амплитуды и частоты ультразвукового воздействия. Результаты расчетов показывают, что максимальное соотношение $R_{\max}/R_0$ проявляется в достаточно узком, но реальном с точки зрения практической реализации, диапазоне изменения R_0 : 1–3 мкм.

Рисунок 4. Зависимость $R_{\max}/R_0$ от R_0 при фиксированных значениях $A = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $f = 20 \text{ кГц}$ ультразвука

Заключение

С учетом изложенных теоретических и экспериментальных данных о факторах, влияющих на кавитационные процессы при ультразвуковом воздействии на электролит, проведены расчетные и оптимизационные исследования параметров, определяющих интенсивность «входного» воздействия (амплитуда, давления и частота УЗ), а

также диапазон «выходных» параметров – характеристик электролита, в котором происходит процесс АМДО (плотность, вязкость), состояния окружающей среды (статическое давление), с целью выработки рекомендаций по интенсификации энергомассообменных процессов при микродуговом окислении.

На основе теоретических представлений о явлениях микрокавитации и сонолюминесценции смоделирован процесс ультразвукового воздействия на энерго- и массоперенос и на характер взаимодействий в электролите как наиболее интенсивный прием активации всех анодно-катодных взаимодействий в околоанодной области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яблонский, А. А. и др. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Нореiko. – Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: Лан, 2003. – 247 с.
2. Gogate, Parag R. A technology on the horizon / Parag R. Gogate, K. Rajiv // *Current Science*. – 10 July 2006. – Vol. 91, № 1. – P. 35–46.
3. Suslick, K. S. Acoustic cavitations and its chemical consequences / K. S. Suslick [et al.] // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1999. – A 357 – P. 353–357.
4. Matsumoto, Y. Behavior of a bubble cluster in an ultrasound field / Y. Matsumoto, S. Yoshizawa // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – February 2004. – № 47 (6–7). – P. 591–601.
5. Crum, L. A. Sonoluminescence / L. A. Crum // *Physics Today*. – September 1994. – P. 22–29.
6. Storey, B. D. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry / B.D.Storey, A. J. Szeri // *Proc. R. Soc. Lond.* – 2000. – A 456. – P. 1685–1709.
7. Putterman, S. Cavitation science: Is there a simple theory of sonoluminescence? / S. Putterman [et al.] // *Nature*. – February 2001. – № 409. – P. 782–783.
8. Matsumoto, Y. and Yoshizawa, S. Behaviour of a bubble cluster in an ultrasound field. / Y. Matsumoto and S. Yoshizawa / *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47 (6–7), February 2004, P. 591–601.
9. Keller, J. B. Bubble oscillations of large amplitude / J. B. Keller, M. Miksis // *Journal of the Acoustical Society of America*. – August 1980. – № 68 (2). – P. 628–633.
10. Чигринова, Н. М. Механизм управления технологией анодного микродугового окисления для получения покрытий заданной толщины и качества / Н. М. Чигринова // *Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка*. Минск, 25–27 марта 2009 г. – Минск, 2009. – С.115–117.
11. Devaney, R. L. An Introduction to Chaotic Dynamical Systems / R. L. Devaney // *Studies in Nonlinearity*. Westview Press, Boulder. – Colorado, 2nd edition, 2003.
12. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // *Master thesis, Brigham Young University*. – 2007. – 117 pp.
13. Suslick, K. S. Upper Bound for Neutron Emission from Sonoluminescing Bubbles in Deuterated acetone / K. S. Suslick [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2007. – Vol.98, № 9. – P. 625–628.
14. Parlitz, U. Robust method for experimental bifurcation analysis / U. Parlitz // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2002. – № 12(8). – P. 1909–1913.
15. Parlitz, U. Bifurcation structure of bubble oscillators / U. Parlitz [et al.] // *Journal of the Acoustical Society of America*. – August 1990. – № 88 (2). – P. 1061–1077.

REFERENCES

1. Yablonsky, A. A. and others. Course on the theory of oscillations / A. A. Yablonsky, S. S. Noreiko. – St. Petersburg-Moscow-Krasnodar: Lan, 2003. – 247 p.
2. Gogate, Parag R. A technology on the horizon / Parag R. Gogate, K. Rajiv // Current Science. – 10 July 2006. – Vol. 91, № 1. – P. 35–46.
3. Suslick, K. S. Acoustic cavitations and its chemical consequences / K. S. Suslick [et al.] // Phil. Trans. R. Soc. Lond. – 1999. – A 357 – P. 353–357.
4. Matsumoto, Y. Behavior of a bubble cluster in an ultrasound field / Y. Matsumoto, S. Yoshizawa // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – February 2004. – № 47 (6–7). – P. 591–601.
5. Crum, L. A. Sonoluminescence / L. A. Crum // Physics Today. – September 1994. – P. 22–29.
6. Storey, B. D. Water vapour, sonoluminescence and sonochemistry / B. D. Storey, A. J. Szeri // Proc. R. Soc. Lond. – 2000. – A 456. – P. 1685–1709.
7. Putterman, S. Cavitation science: Is there a simple theory of sonoluminescence? / S. Putterman [et al.] // Nature. – February 2001. – № 409. – P. 782–783.
8. Matsumoto, Y. and Yoshizawa, S. Behaviour of a bubble cluster in an ultrasound field. / Y. Matsumoto and S. Yoshizawa / International Journal for Numerical Methods in Fluids, 47 (6–7), February 2004, P. 591–601.
9. Keller, J. B. Bubble oscillations of large amplitude / J. B. Keller, M. Miksis // Journal of the Acoustical Society of America. – August 1980. – № 68 (2). – P. 628–633.
10. Chigrinova, N. M. Mechanism for controlling anodic microarc oxidation technology for producing coatings of a given thickness and quality / N. M. Chigrinova // Surface engineering. New powder composite materials. Welding. Minsk, March 25–27, 2009 – Minsk, 2009. – P. 115–117.
11. Devaney, R. L. An Introduction to Chaotic Dynamical Systems / R. L. Devaney // Studies in Nonlinearity. Westview Press, Boulder. – Colorado, 2nd edition, 2003.
12. Diaz de la Rosa, M. A. High-frequency ultrasound drug delivery and cavitation / M. A. Diaz de la Rosa // Master thesis, Brigham Young University. – 2007. – 117 pp.
13. Suslick, K. S. Upper Bound for Neutron Emission from Sonoluminescing Bubbles in Deuterated acetone / K. S. Suslick [et al.] // Physical Review Letters. – 2007. – Vol. 98, № 9. – P. 625–628.
14. Parlitz, U. Robust method for experimental bifurcation analysis / U. Parlitz // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2002. – № 12(8). – P. 1909–1913.
15. Parlitz, U. Bifurcation structure of bubble oscillators / U. Parlitz [et al.] // Journal of the Acoustical Society of America. – August 1990. – № 88 (2). – P. 1061–1077.

Вклад авторов: статья написана автором единолично.

Contribution of the authors: The article was written by the author alone

Статья поступила в редакцию 06.02.2026; одобрена после рецензирования 16.02.2026; принята к публикации 26.02.2026

The article was submitted February 6, 2026; approved after reviewing February 16, 2026; accepted for publication February 26, 2026.