

Преобразование энергии в колебательном контуре и цилиндрической разрядной камере в процессе электрического разряда в воде

В. М. Косенков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com*

Теоретически исследован процесс преобразования энергии конденсаторной батареи в результате высоковольтного электрического разряда в воде, заполняющей замкнутую разрядную камеру, в энергию плазмы, жидкости и твердого тела. В качестве основного метода исследования использовано математическое моделирование в связанной геометрически и физически нелинейной постановке электродинамических, гидродинамических и упругопластических волновых процессов в разрядной камере. Выявлено распределение энергии конденсаторной батареи, передаваемой плазме, жидкости и твердому телу, через их контактные границы в зависимости от параметров динамической системы.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, ударная волна, преобразование энергии, математическое моделирование, резонанс.

УДК 621.3.016.33:537.528

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени электрические разряды в воде находят широкое применение в качестве импульсного источника энергии в различных волновых процессах [1–3]. В отличие от взрывчатых веществ (ВВ), величиной и скоростью выделения энергии электрического разряда можно управлять в достаточно широких пределах, изменяя время выделения энергии от нескольких до сотен микросекунд. Легко обеспечить повторение разрядов с частотой от десятых до десяти герц в автоматическом режиме. Так же, как при использовании ВВ, энергия от канала разряда к объекту воздействия передается ударными волнами. Эффективность воздействия на объект во многом определяется энергией ударных волн. Заряд конденсаторной батареи служит источником энергии, передаваемой объекту.

Энергия последовательно преобразуется в разрядном контуре, канале разряда, жидкости и технологическом объекте. Причем в каждом из этих элементов процесс преобразования энергии определяется волновыми процессами. Их изучению посвящено большое количество работ. Электродинамические процессы в разрядном контуре и канале разряда подробно исследованы в [4–10], основные особенности волновых процессов в жидкости – в [11–13]. Проблеме взаимодействия гидродинамических волн с твердыми телами посвящены работы [14–23]. В работе [24] исследован процесс воздействия на цилиндрическую оболочку ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, с учетом основных элементов разрядной системы. При этом оболочка была тонкой, и поэтому энергия ее

упругих деформаций намного меньше энергии пластической деформации. В работе [25] исследованы процессы резонансного взаимодействия канала разряда (впоследствии парогазовой полости) с толстой стенкой цилиндрической разрядной камеры, но при этом не изучены процессы преобразования энергии. Актуальность таких исследований определяется необходимостью повышения эффективности использования энергии конденсаторной батареи в условиях волнового взаимодействия канала разряда с упругими элементами разрядной камеры.

Как правило, процесс преобразования энергии происходит в конечном объеме жидкости, ограниченном стенками разрядной камеры, которым в конечном итоге и передается оставшаяся часть энергии конденсаторной батареи [26]. Разрядные камеры характеризуются большим разнообразием форм и размеров [1–3]. В некоторых случаях часть элементов разрядных камер является основным объектом воздействия ударных волн, тогда им необходимо передать как можно больше энергии конденсаторной батареи.

Многие из существующих разрядных камер имеют достаточно сложную с точки зрения динамического расчета конструкцию, поэтому, чтобы разобраться детально с волновыми процессами в жидкости и твердом теле, рассмотрены процессы в камерах наиболее простой цилиндрической формы, применяемых в технологических процессах приготовления эмульсий, калибровки, штамповки деталей и т.п. [1–2]. Такие разрядные камеры обладают осевой симметрией и преимущественно радиальными колебаниями жидкости и твердых тел, что естественным обра-

зом облегчает анализ волновых процессов преобразования энергии.

Цель настоящего исследования – изучение волновых процессов преобразования энергии конденсаторной батареи в колебательном контуре и цилиндрической разрядной камере во время и после электрического разряда в воде.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным объектом исследования являлись волновые процессы преобразования энергии в колебательном контуре и разрядной камере, представленные на рис. 1. Внутренний диаметр (D), толщина стенки (δ) и расстояние между электродами (l_k) – геометрические параметры разрядной камеры, а емкость конденсаторной батареи (C), индуктивность разрядного контура (L) и электрическое сопротивление элементов разрядного контура, кроме канала разряда (R_{sh}), – физические параметры разрядного контура.

Канал электрического разряда имеет достаточно сложную форму и заполнен низкотемпературной плазмой. Его формирование и расширение сопровождаются нелинейными электро- и гидродинамическими процессами в плазме и окружающей жидкости. Однако с точки зрения преобразования энергии эти процессы можно рассмотреть в упрощенной постановке, используя ряд предположений:

- канал разряда и образовавшаяся впоследствии парогазовая полость имеют форму кругового цилиндра;
- ось канала разряда совпадает с осью разрядной камеры;
- термодинамические параметры плазмы и плотность электрического тока распределены однородно в объеме канала разряда;
- затраты энергии на пробой слоя жидкости между электродами и формирование канала разряда пренебрежимо малы;
- расстояние между электродами равно высоте разрядной камеры;
- разрядная камера заполнена идеальной сжимаемой жидкостью;
- эффектом Рихтмайера – Мешкова в процессе сжатия парогазовой полости можно пренебречь;
- материал цилиндрической стенки разрядной камеры упругопластический неупрочняемый;
- трением цилиндрической стенки о сопрягаемые поверхности можно пренебречь;
- плоские поверхности разрядной камеры, ограничивающие полость, заполненную водой, абсолютно твердые и неподвижные.

Исследование процессов в системе выполняли с помощью разработанной ранее математической модели [24], которая состоит из уравнений, опи-

сывающих преобразование энергии в разрядном контуре, гидродинамические явления в жидкости и динамику деформируемого твердого тела. Чтобы обеспечить многократное использование разрядной камеры, ее стенки не должны получать заметных пластических деформаций, поэтому материал цилиндрической стенки считали упругопластическим неупрочняемым, пластические свойства которого характеризуются статическим пределом текучести σ_T .

Уравнения математической модели [24] дополнены граничными условиями, соответствующими физике волновых процессов. На плоских поверхностях разрядной камеры нормальные компоненты скорости жидкости равны нулю. На границах между каналом разряда и жидкостью, а также жидкостью и поверхностью цилиндрической стенки разрядной камеры заданы условия на контактном разрыве. До электрического разряда все элементы исследуемой системы находились в состоянии покоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Баланс энергии в процессе ее преобразования в элементах разрядной цепи и разрядной камеры исследован на примере колебательного контура, характеризуемого параметрами: $C = 52$ мкФ, $L = 4$ мкГн, $R_{sh} = 0,04$ Ом, $l_k = 42$ мм. Для оценки влияния параметров электрической цепи на перераспределение энергии в ее элементах сопротивление R_{sh} изменяли в пределах от 0,01 до 0,04 Ом, а расстояние между электродами l_k – от 42 до 63 мм. Напряжение заряда конденсаторной батареи (U_0) варьировали в пределах от 10 до 50 кВ. Внутренний диаметр разрядной камеры D , заполненной водой, изменяли в пределах от 100 до 400 мм. Толщину стенки (δ) приняли равной 100 мм. Считали, что цилиндрическая стенка разрядной камеры изготовлена из сплава 17Г2С, имеющего параметры: модуль Юнга $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,27$, $\rho_m = 7800$ кг/м³, $\sigma_T = 350$ МПа.

Преобразование энергии происходит последовательно в разрядном контуре, канале разряда, жидкости и цилиндрической стенке разрядной камеры. От каждого из этих элементов к следующему передается только часть энергии. Конечным элементом динамической системы является цилиндрическая стенка разрядной камеры. От доли передаваемой энергии зависят волновые процессы в стенке, формирующие ее напряженно-деформированное состояние и появление в ней пластических деформаций, приводящих к изменению ее размеров и разрушению. Поэтому необходимо изучить процесс преобразования энергии конденсаторной батареи

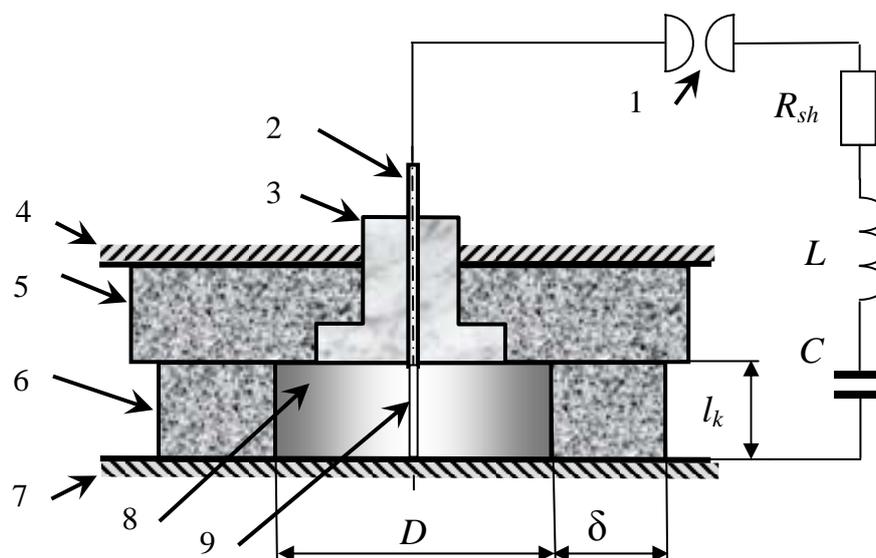


Рис. 1. Схема колебательного контура и разрядной камеры:
 1 – разрядник; 2 – высоковольтный электрод; 3 – изолятор; 4 – плита; 5 – крышка;
 6 – цилиндрическая стенка камеры; 7 – основание; 8 – полость, заполненная водой; 9 – канал разряда.

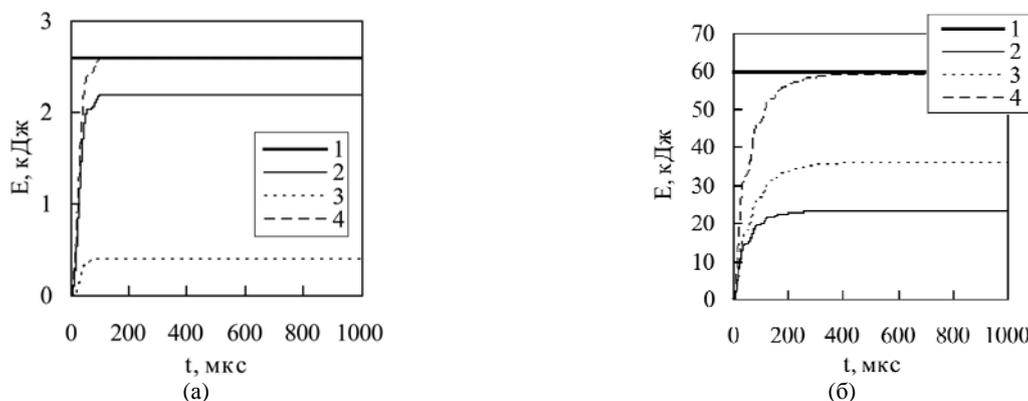


Рис. 2. Изменение энергии, выделившейся в канале разряда (2), потерь энергии в элементах разрядного контура (3) и полной энергии (4) разрядного контура при запасаемой энергии (E_0 , кДж): (а) – 2,6; (б) – 59,9.

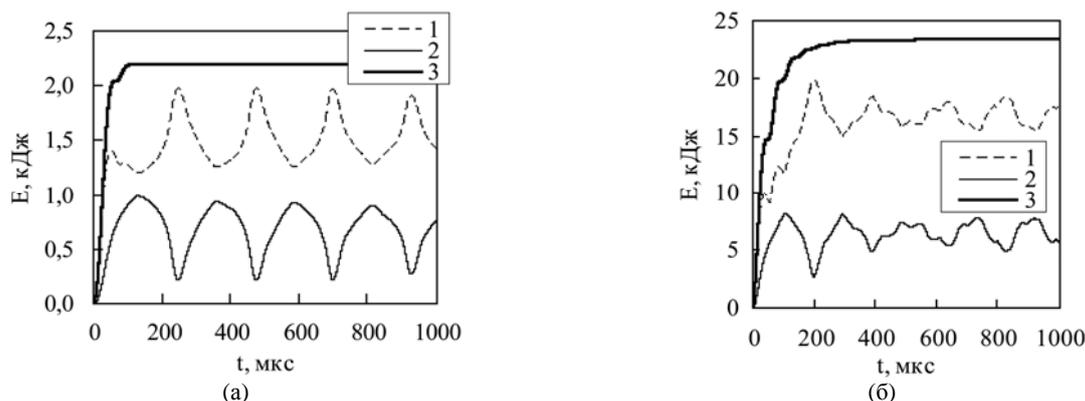


Рис. 3. Изменение внутренней энергии плазмы (1), работы расширения (2) и полной энергии (3) канала разряда при запасаемой энергии E_0 , кДж: (а) – 2,6; (б) – 59,9.

в механическую энергию цилиндрической стенки разрядной камеры.

Энергия конденсаторной батареи выделяется в активных сопротивлениях разрядного контура, которые можно разделить на две группы: сопротивление канала разряда и сумму сопротивлений остальных элементов контура [4]. Сопротивление канала разряда определяет часть энергии, передаваемой разрядной камере, а во второй

группе сопротивлений контура энергия безвозвратно теряется. Сопротивление канала изменяется в процессе разряда в зависимости от его объема, длины и давления плазмы. Сопротивление остальной части контура в процессе разряда практически не изменяется.

Часть энергии, поглощаемой элементами разрядного контура, существенно зависит от напряжения заряда конденсаторной батареи (U_0) и,

следовательно, энергии заряда конденсаторной батареи (E_0). При напряжении 10 кВ приблизительно 80% энергии E_0 выделяется в канале разряда (E_k), а 20% – в остальных элементах разрядного контура (E_{sh}) (рис. 2а). Увеличение U_0 до 48 кВ приводит к уменьшению E_k приблизительно до 40% энергии E_0 (рис. 2б). Время выделения энергии в этом случае увеличивается в три раза.

Энергия, выделившаяся в канале разряда, распределяется в соответствии с основным термодинамическим соотношением между внутренней энергией плазмы (E_{kv}) и работой расширения канала разряда (A_k). Соотношение между E_{kv} и A_k зависит от взаимодействия волн давления, отраженных от цилиндрической стенки разрядной камеры, с границей канала разряда, а после завершения разряда – с образовавшейся парогазовой полостью. Расширение канала чередуется с его сжатием за счет энергии отраженных волн, поэтому внутренняя энергия и работа канала разряда и парогазовой полости периодически изменяются. Соотношение между максимальными величинами E_{kv} и A_k зависит от U_0 и E_0 , как следует из рис. 3а,б. Работа A_k составляет от 23 до 55% по отношению к энергии канала E_k .

Работа канала A_k формирует ударные волны в жидкости, сообщая ей энергию, которая преобразуется во внутреннюю энергию сжатия (E_{fv}) и кинетическую энергию (E_{fk}). Внутренняя энергия зависит от изменения объема жидкости и давления. Кинетическая энергия жидкости, называемая применительно к электрическому разряду в воде энергией «гидропотока» [1, 2], зависит от скорости жидкости. Внутренняя и кинетическая энергии жидкости периодически изменяются как при малой энергии конденсаторной батареи (рис. 4а), так и при большой (рис. 4б). Кинетическая энергия достигает максимальной величины, составляющей от 40 до 60% работы канала, в первый период ее изменения. В последующие периоды E_{fk} меньше максимальной величины от 2 до 4 раз. В результате взаимодействия ударных волн жидкости с цилиндрической стенкой разрядной камеры их кинетическая энергия достигает практически нулевого уровня, а внутренняя энергия сжатия жидкости – максимальной величины. В этом случае правомерна аналогия с гидравлическим ударом. Из этого следует, что кинетическая и внутренняя энергии жидкости вносят равноценный вклад в формирование волновых процессов и динамического напряженно-деформированного состояния стенки разрядной камеры.

В результате волнового взаимодействия часть энергии жидкости (приблизительно до 20%) передается цилиндрической стенке (рис. 5а,б), а остальная энергия переносится волнами, отра-

женными от стенки, к границе канала или парогазовой полости, совершая работу ее сжатия. В моменты времени (с учетом запаздывания от пробега волн в жидкости), когда энергия жидкости (рис. 4а,б) и энергия стенки (рис. 5а,б) достигают минимума, внутренняя энергия парогазовой полости максимальна вследствие ее сжатия (рис. 3а,б). В эти периоды большая часть энергии, переданной каналом разряда жидкости, возвращается к нему или к парогазовой полости, образовавшейся в результате электрического разряда. Процесс перераспределения энергии между парогазовой полостью, жидкостью и цилиндрической стенкой циклически повторяется.

Энергия, полученная от жидкости, распределяется в цилиндрической стенке (E_s) в виде внутренней энергии (E_{sv}), равной работе деформации материала и кинетической энергии (E_{sk}) (рис. 5а,б). Внутреннюю энергию можно представить в виде суммы энергии упругих (E_{su}) и пластических (E_{sp}) деформаций. При малых энергиях конденсаторной батареи пластическая составляющая внутренней энергии равна нулю, поэтому внутренняя энергия колеблется практически от нуля до максимальных значений (рис. 5а). Увеличение энергии конденсаторной батареи приводит к появлению пластических деформаций стенки. В этом случае внутренняя энергия колеблется от энергии пластических деформаций до максимальных значений (рис. 5б). Внутренняя энергия пластических деформаций необратима и определяет величину потерь энергии в исследуемой динамической системе.

При неизменных параметрах разрядного контура $C = 52$ мкФ, $L = 4$ мкГн, $R_{sh} = 0,04$ Ом, $l_k = 42$ мм распределение энергии в исследуемой системе существенно зависит от напряжения U_0 и соответственно энергии заряда E_0 , а также от частоты колебаний стенки разрядной камеры.

Частота колебаний стенки (f_s) зависит от ее диаметра D и соотношения между собственной частотой колебаний стенки (f_{s0}), парогазовой полости (f_{pg}) и частотой пробега волн в жидкости. Связь между этими величинами можно характеризовать как относительную частоту колебаний стенки (f_{rel}), определенную отношением частоты колебаний стенки (f_s) к собственной частоте ее колебаний (f_{s0}). Величина f_{s0} вычислена в результате моделирования колебаний цилиндрической стенки различных диаметров D в вакууме под действием малого начального импульса, с использованием части уравнений математической модели [24], описывающих колебания цилиндрической стенки. Как видно из рис. 6, энергия стенки разрядной камеры (E_s) существенно зависит от относительной частоты

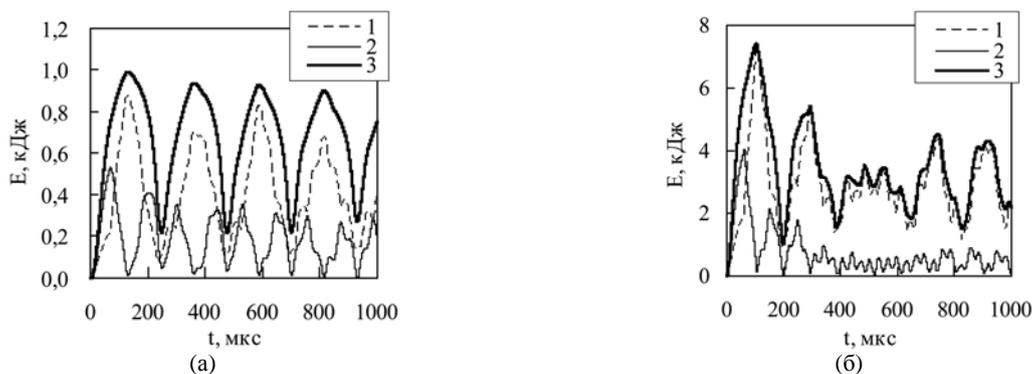


Рис. 4. Изменение внутренней (1), кинетической (2) и полной энергии (3) жидкости, заполняющей разрядную камеру при запасаемой энергии E_0 , кДж: (а) – 2,6; (б) – 59,9.

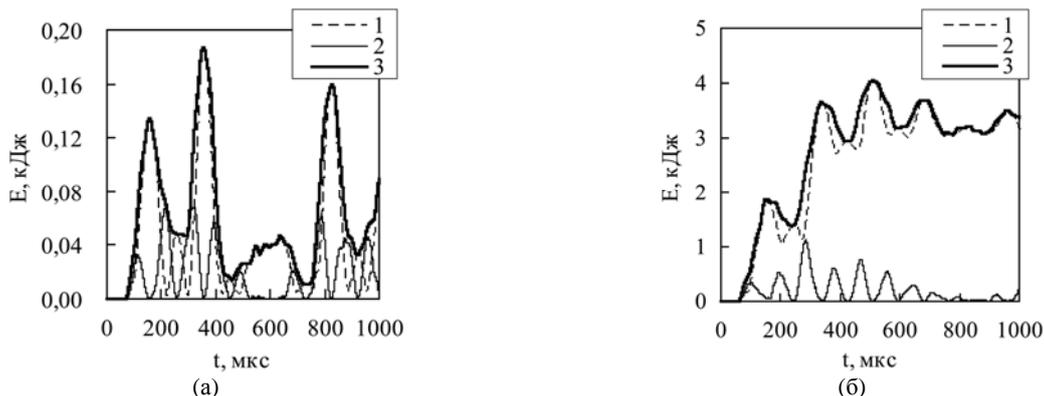


Рис. 5. Изменение внутренней (1), кинетической (2) и полной энергии (3) цилиндрической стенки разрядной камеры при запасаемой энергии E_0 , кДж: (а) – 2,6; (б) – 59,9.

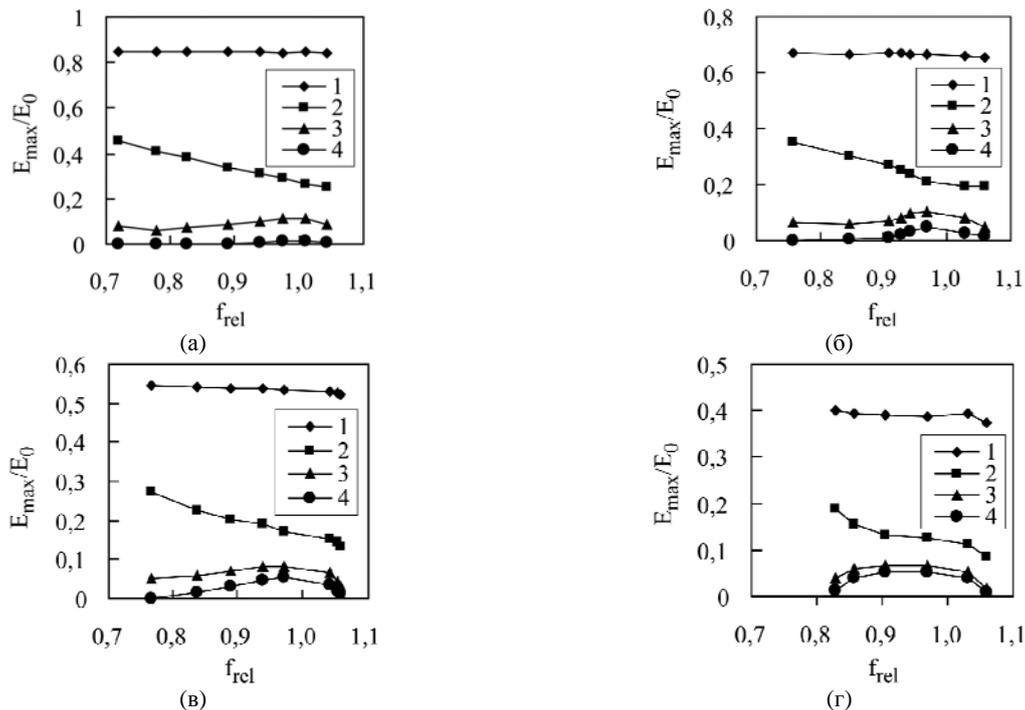


Рис. 6. Отношение максимальных величин энергии канала разряда (1), работы канала разряда (2), энергии стенки (3) и работы пластической деформации стенки (4) к энергии конденсаторной батареи, кДж, когда (а) – $E_0 = 2,6$; (б) – $E_0 = 10,4$; (в) – $E_0 = 23,4$; (г) – $E_0 = 59,9$.

ее колебаний (f_{rel}). Максимум E_s наблюдается вблизи резонансного режима колебаний, когда f_{rel} близка к единице. Величина f_{rel} , соответствующая максимуму E_s ($(f_{rel})_{max}$), меньше единицы, что свидетельствует о поглощении энергии в результате пластической деформации цилиндрической стенки разрядной камеры [27]. Чем меньше

$(f_{rel})_{max}$, тем больше затраты энергии на пластическую деформацию (E_{sp}), возрастающие с увеличением энергии, запасаемой в конденсаторной батарее E_0 .

В пределах изменения U_0 от 10 до 48 кВ (E_0 от 2,6 до 59,9 кДж) соотношения между максимальными значениями работы канала разряда (A_k)_{max},

энергии стенки $(E_s)_{\max}$ и работы пластической деформации $(A_p)_{\max}$ пропорциональны энергии канала разряда E_k . Относительная энергия, выделенная в канале разряда, уменьшается при увеличении энергии E_0 приблизительно по степенной зависимости от 85 до 38% энергии заряда E_0 . При больших E_0 62% энергии заряда поглощается в активных сопротивлениях разрядной цепи, не достигая канала разряда. Следовательно, для уменьшения потерь энергии в разрядном контуре необходимо согласовывать сопротивление канала разряда R_{ck} и сопротивление остальной части контура R_{sh} .

Можно рассмотреть два способа уменьшения потерь энергии заряда в разрядном контуре. Первый из них связан с непосредственным уменьшением активного сопротивления R_{sh} , а второй – с увеличением сопротивления канала разряда R_{ck} .

Учитывая автомодельность процесса расширения канала разряда [5, 12], его сопротивление можно увеличить за счет увеличения расстояния между электродами, если разряд инициируется самопробоем воды, или увеличив длину микропроводника, инициирующего разряд. Увеличение расстояния между электродами приводит к возрастанию потерь энергии на формирование канала разряда [4], и это обстоятельство необходимо учитывать.

Для проверки эффективности этих методов рассмотрены два варианта изменения параметров разрядного контура. В первом из них сопротивление R_{sh} уменьшили до 0,01 Ом без изменения остальных параметров. Это позволяет увеличить энергию канала разряда от 38 до 60% энергии конденсаторной батареи E_0 . В среднем в такой же степени увеличивается работа канала и энергия, передаваемая стенке ударными волнами. Относительная частота резонансных колебаний стенки $(f_{rel})_{\max}$ изменилась от 0,93 до 0,9.

Во втором варианте, в дополнение к первому изменению параметров контура ($R_{sh} = 0,01$ Ом), расстояние между электродами l_k увеличили от 42 до 63 мм. Это увеличило энергию канала разряда от 60 до 73% энергии конденсаторной батареи E_0 . После изменения этих двух параметров разрядного контура энергия канала разряда E_k , работа расширения канала A_k и энергия стенки E_s увеличились приблизительно в два раза, что демонстрирует эффективность применения рассмотренных способов для более полного использования энергии конденсаторной батареи.

Необходимо отметить, что распределение энергии конденсаторной батареи в разрядном контуре практически не зависит от формы разрядной камеры, если расстояние от канала разряда до окружающих его поверхностей настолько велико, что отраженные от них волны не успе-

вают оказывать влияние на процесс выделения энергии в канале разряда. Это также соответствует выводам работ [19, 24]. Данное условие удовлетворяется для значений параметров рассмотренной системы, если расстояние от оси канала разряда до ближайшей стенки камеры более 40 мм, что выполняется во многих практически важных случаях. Следовательно, рассмотренные способы перераспределения энергии конденсаторной батареи в разрядном контуре являются достаточно универсальными для повышения эффективности ее использования.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования демонстрируют важность комплексного анализа баланса энергии в электроразрядной системе от ее источника до конечного элемента (стенки разрядной камеры) и позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Волновые процессы в жидкости и твердом теле оказывают определяющее влияние на режим взаимодействия канала разряда и стенки разрядной камеры, формирующий частоты их вынужденных колебаний. При совпадении частот колебаний канала разряда (впоследствии парогозовой полости) и стенки разрядной камеры возникает резонансный режим колебаний, тогда энергия упругих деформаций стенки достигает максимума, не превышающего 12% энергии конденсаторной батареи. Если колебания происходят в противофазе, то энергия стенки не превышает 7% энергии конденсаторной батареи.

2. Энергия, передаваемая ударными волнами от канала разряда стенке разрядной камеры тем больше, чем больше отношение активного сопротивления канала к активному сопротивлению остальных элементов разрядного контура. Если энергия конденсаторной батареи не превышает 5 кДж, то активное сопротивление канала разряда, как правило, составляет существенно большую часть полного сопротивления разрядного контура, но при большей энергии необходимо принимать специальные меры для увеличения сопротивления канала разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта*. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
2. Мериин Б.В. *Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий*. Л.: Машиностроение, 1985. 119 с.
3. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Радченко С.Ю. *Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением*. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

4. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
5. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1977. 151 с.
6. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. *Технічна електродинаміка*. 2010, (5), 69–74.
7. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. *Технічна електродинаміка*. 2013, (3), 3–11.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. *Технічна електродинаміка*. 2014, (3), 12–18.
9. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G. and Poklonov S.G. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2013, **49**(3), 241–246.
10. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G. and Poklonov S.G. *Tech Phys Lett+*. 2012, **38**(5), 446–449.
11. Косенков В.М., Каменская Л.А. *Акустичний вісник*. 2001, (2), 47–53.
12. Иванов В.В., Рыбка О.М., Царенко П.И. и др. *Энергетическое оборудование высоковольтных импульсных установок*. Сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 1985. С. 5–23.
13. Барбашова Г.А. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных процессов*. Сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 1992. С. 43–48.
14. Барбашова Г.А., Косенков В.М. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. Межвед. сборник научных трудов. Вып. 3. Николаев: Атолл, 2000. С. 32–36.
15. Барбашова, Г.А., Косенков. В.М. *ПМТФ*. 2001, **42**(6), 93–97.
16. Барбашова Г.А., Жирнов М.В., Косенков В.М. *Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий*. Межвед. сборник научных трудов. Вып. 1. Киев: Наукова думка, 1993. С. 38–44.
17. Барбашова Г.А., Иванов А.В., Каменская Л.А. *Новое в электрогидроимпульсной обработке*. Сборник научных трудов. Киев: Наукова думка, 1986. С. 20–25.
18. Косенков В.М., Каменская Л.А., Старков Н.В. *Акустический вестник*. 2005, **8**(1–2), 64–68.
19. Дубовенко К.В. *ЭОМ*. 2013, **49**(1), 30–38.
20. Golovashchenko S.F., Bessonov N.M. and Ilinich A.M. *J Mater Process Technol*. 2011, **211**, 875–885.
21. Rohatgi A., Stephens E.V., Soulamy A., Davies R.W., et al. *J Mater Process Tech*. 2012, **212**, 1070–1079.
22. Kosenkov V.M., Bychkov V.M. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2015, **51**(2), 167–173.
23. Щерба А.А., Косенков В.М., Бычков В.М. *ЭОМ*. 2015, **51**(6), 71–78.
24. Косенков В.М. *ЖТФ*. 2011, **81**(10), 133–139.
25. Косенков В.М. *ПМТФ*. 2011, (4), 43–51.
26. Косенков В.М. *ЭОМ*. 2014, **50**(29), 81–90.
27. Пановко Я.Г. *Основы прикладной теории колебаний и удара*. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.

Поступила 05.10.15

Summary

The process of the energy conversion of capacitor banks as a result of high-voltage electrical discharge in water, filling a closed discharge chamber into the energy of plasma, liquid and solid is studied. Mathematical modeling in a coupled geometrically and physically non-linear statement of electrodynamic, hydrodynamic, and elastic-plastic wave processes in the discharge chamber is used as the main research method. The distribution of the capacitor banks energy transferred into the plasma, liquid and solid body, through their contact boundaries, depending on the parameters of the dynamic system is determined.

Keywords: electrical discharge in water, shock wave, energy conversion, mathematical modeling, resonance.