

УДК 616.62-003.7:615.84

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ЗОНДОВ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ЛИТОТРИПСИИ**Л.А. Хохлова<sup>1</sup>, Л.Ю. Иванова<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Томский политехнический университет<sup>2</sup>ООО «МедЛайн», г. Томск

E-mail: hohla@tpu.ru

**Хохлова Людмила Анатольевна**, студентка II курса магистратуры кафедры промышленной и медицинской электроники Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: hohla@tpu.ru

Область научных интересов: электроимпульсное разрушение органоминеральных конкрементов, контактная литотрипсия.

**Иванова Людмила Юрьевна**, ассистент кафедры физики высоких технологий в материаловедении Института физики высоких технологий ТПУ, инженер-электронщик ООО «МедЛайн».

E-mail: ily@tpu.ru

Область научных интересов: электроимпульсная дезинтеграция органоминеральных конкрементов, эндоскопические инструменты, контактная литотрипсия.

В данной статье представлена оценка ресурса работы зондов различных конструкций для электроимпульсной литотрипсии, выявлены наиболее часто возникающие дефекты. Сделаны выводы о перспективах применения и дальнейшего совершенствования конструкций.

**Ключевые слова:**

Литотрипсия, электроимпульсное разрушение, зонд для электроимпульсной литотрипсии, ресурс работы.

Сегодня проблема образования органоминеральных конкрементов в организме человека, и в частности мочекаменной болезни (уролитиаз), крайне актуальна. Данное заболевание характеризуется образованием камней в почках и других органах мочевыделительной системы.

Заболеваемость мочекаменной болезнью (МКБ) в мире достигает 5–10 %, причем наиболее часто встречается в возрасте 20–50 лет, поражая людей в самый активный период их жизни [1]. Заболеваемость МКБ в последние два десятилетия имеет тенденцию к росту (в США процент заболеваемости с 1998 по 2008 г. возрос с 5,2 до 8,9 % [2]).

Данное заболевание значительно ухудшает качество жизни человека, может привести к серьезным осложнениям, вплоть до смертельного исхода.

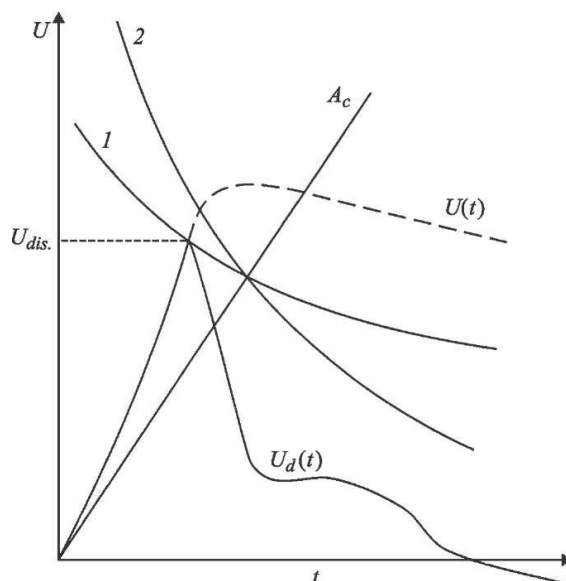
Поэтому в настоящее время интенсивно ведутся работы по разработке и совершенствованию способов борьбы с мочекаменной болезнью, в том числе и различные методы разрушения камней, которые получили общее название – литотрипсия. К таким способам относятся малотравматичные эффективные методы разрушения конкрементов, основанные на передаче энергии разрушения к камню посредством зонда, введенного через эндоскоп, – так называемые методы контактной литотрипсии. Одним из таких методов является электроимпульсная литотрипсия.

При исследовании импульсной электрической прочности жидких и твердых диэлектриков было установлено, что их вольт-секундные характеристики по-разному меняют свой наклон. С увеличением крутизны фронта импульса напряжения или времени его воздействия прочность жидких диэлектриков становится выше, чем твердых [3].

Если при статическом напряжении электрическая прочность твердых диэлектриков обычно превышает прочность жидких диэлектриков, то при импульсном напряжении длительностью  $10^{-6}$  секунд и менее, а также амплитудах порядка  $10^5$  В электрическая прочность диэлектрической жидкости и даже воды становится выше прочности твердых диэлектриков, включая горные породы.

Крутизну фронта импульса напряжения, когда наступает этот эффект, называют критической крутизной и обозначают  $A_c$ . Этот эффект, открытый группой А.А. Воробьева и Г.А. Воробьева [3], был назван «эффектом Воробьевых».

Принцип действия этого эффекта демонстрируется кривыми на рис. 1. Здесь условно показаны зависимости напряжения пробоя от времени его воздействия (вольт-секундные характеристики) на твердый и жидкий диэлектрики при пробое на косоугольном импульсе напряжения [4].



**Рис. 1.** Диаграммы, условно показывающие «эффект Воробьевых»:  $U(t)$  – импульс воздействующего напряжения;  $U_{dis}$  – напряжение, при котором наступает пробой твердого диэлектрика;  $U_d(t)$  – напряжение на диэлектрике в процессе разряда в нем;  $1$  и  $2$  – вольт-секундные характеристики соответственно твердого (1) и жидкого (2) диэлектриков;  $A_c$  – критическая крутизна на фронте импульса напряжения, выше которой проявляется «эффект Воробьевых» [5]

Точка пересечения этих характеристик определяет критическую крутизну роста напряжения на фронте импульса  $A_c = \frac{dU}{dt}$ . При крутизне нарастания напряжения меньше критической ( $A < A_c$ ) разряд между электродами происходит в жидкости по поверхности твердого диэлектрика. При большей крутизне ( $A > A_c$ ) он внедряется внутрь диэлектрика. Это приводит к образованию разряда между катодом и анодом, но уже внутри твердого диэлектрика. Для различных комбинаций твердых и жидких диэлектриков, а также материала электродов величина  $A_c = 10^{10} - 10^{11}$  В/с [5]. Если в канале разряда будет выделено достаточно быстро необходимое количество энергии от импульсного генератора, то произойдет взрыв внутри твердого диэлектрика с образованием воронки на поверхности твердого тела.

Данный метод имеет следующие особенности, определяющие его высокую эффективность по отношению к другим методам:

- простой способ передачи энергии к камню;
- разрушение камня происходит при выделении энергии в его объеме, что существенно снижает вероятность повреждения живой ткани и урологического оборудования, в частности конструктивных элементов литоэкстрактора и эндоскопа, а также риск миграции конкрементов в вышележащие отделы мочевыделительного тракта;
- создает импульсное нагружение камня, обеспечивающее менее энергоемкое хрупкое разрушение, позволяющее создавать высокие механические напряжения в камне при ограниченном исходном количестве энергии в импульсе;
- нагружение материала происходит с преобладанием напряжения разрыва, сдвига, а не сжатия (прочность на разрыв и сдвиг в минеральных материалах существенно ниже их прочности на сжатие[6]).

Рабочим инструментом для разрушения камней в мочевыделительной системе является изображенный на рис. 2 зонд, состоящий из электрического разъема (1), передающей части (2) и разрядной головки (3).



**Рис. 2.** Общий вид зондов электроимпульсного литотриптора

Зонд вводится в тело человека через естественные или искусственные проходы посредством эндоскопа, имеющего рабочие каналы диаметром от 1,0 до 2,2 мм. Соответственно, внешний диаметр зонда варьирует в пределах 0,9...2,0 мм [7].

Электроимпульсная литотрипсия обладает такими достоинствами, как тонкий, гибкий зонд, высокая эффективность разрушения, низкая травматичность. Однако зонды электроимпульсного литотриптора, как и зонды для любого другого вида контактной литотрипсии, имеют небольшой срок службы. Поэтому наиболее перспективным направлением дальнейшего усовершенствования прибора является модернизация конструкции рабочего инструмента в целях повышения эффективности разрушения, надежности и срока службы (ресурса зонда).

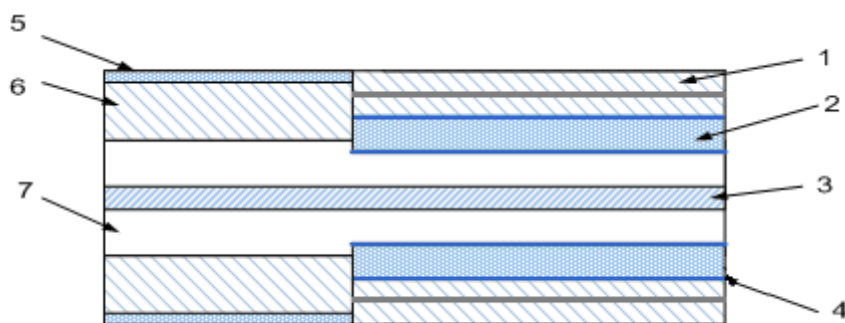
Целью данных испытаний является определение влияния различных конструктивных решений на эффективность разрушения, а также определение ресурса работы рабочего инструмента. Под ресурсом понимается количество произведенных импульсов, после которого эффективность разрушения снижается настолько, что дальнейшее разрушение становится невозможным или нецелесообразным.

Эксперименты по оценке эффективности разрушения камней мочевыделительной системы и ресурса эффективной и безопасной работы зондов заключались в разрушении модельных камней из смеси VegoStone [8], твердости 150 и 50 HV, размером 8×8×5 и 8×8×8 мм, в условиях, приближенных к реальным условиям разрушения в организме (жидкая среда – физиологический раствор).

В кювету, наполненную физиологическим раствором, на силиконовую подложку помещался модельный объект. Далее производилось его разрушение зондами конструкций 1 (рис. 3) и 2 (рис. 4). Разрушение производилось сериями по 10 импульсов с частотой импульсов в серии 5 Гц, энергия импульса 1 Дж.



**Рис. 3.** Конструкция разрядной головки: 1 – внешний электрод; 2 – межэлектродная изоляция; 3 – жила коаксиального кабеля (внутренний электрод); 4 – цианоакрилатный клей; 5 – изоляция коаксиального кабеля; 6 – оплетка кабеля; 7 – изоляция жилы кабеля



**Рис. 4.** Конструкция с усиленным внешним электродом разрядной головки: 1 – внешний спаянный электрод; 2 – межэлектродная изоляция; 3 – жила коаксиального кабеля (внутренний электрод); 4 – цианоакрилатный клей; 5 – изоляция коаксиального кабеля; 6 – оплетка кабеля; 7 – изоляция жилы кабеля

В ходе эксперимента определялось количество импульсов, необходимое для разрушения камня (до размеров осколков менее  $\frac{1}{4}$  части камня). Электроды зонда прикладывались вплотную к камню, по возможности в одну точку. Также производились измерения диаметра головок зонда после окончания работы. Разница между первоначальным и конечным диаметром разрядной головки (развальцовка внешнего электрода) должна быть невелика, чтобы обеспечивалось свободное прохождение зонда по каналу эндоскопа. Результаты испытаний представлены в таблице.

**Таблица.** Результаты испытания зондов с разными электродами

Внешний диаметр зонда, мм		Кол-во втулок внешнего электрода шт.	Толщина внешнего электрода, мм	Толщина изоляции, мм	Ресурс, имп.	Кол-во разрушенных камней	Примечания
до эксплуатации	после 700 имп.						
0,89	1,05	1	0,15	0,225	870 ±50	1–2	Второй камень не разрушен или разрушен частично. Быстро выгорает изоляция, заметное снижение эффективности в среднем после 700 импульсов.
0,89	0,91	2	0,16	0,220	965 ±58	2	Два камня разрушены полностью для каждого зонда, третий камень не разрушается (трещины). Зонды конструкции № 2 в целом эффективнее зондов конструкции № 1

В ходе проведения исследования были выявлены следующие возможные неисправности зондов:

- развальцовка (вплоть до разрыва) внешнего электрода;
- разрушение электрической изоляции головки зонда, ведущее к снижению эффективности разрушения;

- электрической пробой коаксиального кабеля передающей части зонда на максимальных энергиях – единичный случай.

Все перечисленные неисправности, за исключением пробоя изоляции в передающей части кабеля, являющиеся технологическим браком, проявляются в процессе работы зонда после некоторого количества произведенных импульсов.

Исходя из экспериментальных данных был определен ресурс для зондов, который составил  $870 \pm 50$  и  $965 \pm 58$  импульсов для конструкций № 1 и 2 соответственно. Учет отработки ресурса зонда при проведении процедуры литотрипсии позволит увеличить ее эффективность и обеспечить сохранность эндоскопической аппаратуры.

Величина развальцовки внешнего электрода оказалась невелика и составила 0,06 мм для конструкции № 1 и 0,02 мм для конструкции № 2. Данные результаты говорят о том, что используемые зонды препятствий при работе с эндоскопом не вызовут.

Эффективность работы зондов конструкции № 2 оказалась выше, зонды данной конструкции разрушили полностью в среднем по 2 модельных камня, в то время как зонды конструкции № 1 разрушили в среднем 1,75 камня.

Основной причиной снижения эффективности зондов является разрушение изоляции в межэлектродном промежутке. Для увеличения ресурса работы зондов необходимо либо увеличивать толщину изоляционного слоя, либо использовать более износостойкие изоляционные материалы. Это и будет предметом дальнейших экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scales Jr.C.D. Prevalence of Kidney Stones in the United States / C.D. Scales Jr., A.C. Smith, J. M. Hanley, C.S. Saigal // *European Urology*, 2012. – Vol. 62 (1). – P. 1–30.
2. Kidney Stones: A Global Picture of Prevalence, Incidence, and Associated Risk Factors / V. Romero, H. Akpınar, D.G. Assimos // *Reviews in urology*, 2010. – Vol. 12 (2–3). – P. 86–96.
3. Воробьев А.А. Электрической пробой и разрушение твердых диэлектриков / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. – М.: Высшая школа, 1966. – 224 с.
4. Месяц Г.А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // *Письма в ЖТФ*. – 2005. – Т. 31. – Вып. 24. – С. 51–59.
5. Семкин Б.В. Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б.В. Семкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.
6. Лопатин В.В., Лернер М.И., Буркин В.В., Черненко В.П. Электроразрядное разрушение биологических конкрементов // *Известия вузов. Физика*. – 2007. – № 9. – Приложение. – С. 181–184.
7. Лернер М.И. Применение электрического импульсного разряда в медицине / М.И. Лернер, В.П. Черненко, Л.Ю. Анненкова, А.В. Дутов // *Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А.Воробьева*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 2. – С. 283–288.
8. Liu Y. BegoStone – a new stone phantom for shock wave lithotripsy research / Y. Liu, P. Zhong // *Journal of the Acoustical Society of America, Letters to the editor*, 2012. – Vol. 112(4). – P. 1265–1268.

Поступила 17.07.2013 г