

# Сравнительное исследование эффективности электроимпульсного и электрогидравлического литотрипторов *in-vitro*

## Comparative study of the efficacy of the electroimpulse and electrohydraulic lithotripters *in vitro*

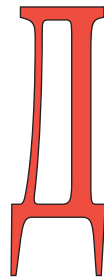
A.G. Martov, A.V. Gudkov,  
V.M. Diamant, G.I. Chepovetskiy,  
M.I. Lerner

Aim of the study was to compare the efficacy of the artificial stone desintegration between new nanosecond electroimpulse lithotripter (NSEIL) and standard electrohydraulic lithotripter (EGL). Two types of "stones" were used, which simulated hard and soft urinary stones and were made of dental ultrastrong gypsum BegoStone. EGL was performed using sounds of 3 diameters: 3.0 Fr, 4.5 Fr and 7.0 Fr; NSEIL – using sounds 2.7 Fr, 4.5 Fr and 6.0 Fr. Efficacy of the lithotripters was compared for two comparable sounds with a one corresponding "stone" size. Afore mentioned "stones" were placed on the cage bottom made of stainless steel with a cell size of 2x2 mm, lying in the water with the home temperature. Experiment was considered to be finished, when at the surface of the cage there were no more visible "stone" fragments. The results obtained have showed, that desintegration of the artificial "stones" demanded substantially less energy and time in case of NSEIL. The part of the fully desintegrated "stones" with the use of NSEIL was 100%, taking in account that in 2 experiments EGL failed to fragmentize all the "stones". Only in case of small energy impulses, small diameter of sounds and soft "stones" the similar results were obtained with regard to two investigated lithotripters. Otherwise electro-impulse lithotripsy demonstrated a significant advantage over the electrohydraulic lithotripsy. It was shown, that for NSEIL substantially lower summary values of energy are needed to desintegrate the "stone".

A. Г. Мартов<sup>1</sup>, А. В. Гудков<sup>2</sup>, В. М. Диамант<sup>2</sup>, Г. И. Чеповецкий<sup>2</sup>,  
М. И. Лернер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра урологии ФГОУ ДПО ИПК ФМБА, Москва

<sup>2</sup>Кафедра урологии ГБОУ ВПО Сибирский государственный медицинский университет МЗ РФ, Томск



Для того чтобы избавить пациента от камней мочевых путей, применяют различные консервативные и оперативные методы лечения. До конца 70-х годов XX столетия основным оперативным методом лечения больных мочекаменной болезнью (МКБ) являлись открытые операции. Поиски менее травматичных способов удаления камней из верхних и нижних мочевых путей привели к созданию специального эндоскопического инструментария, контактных литотрипторов и разработке малоинвазивных пособий, таких как чрескожная (перкутанная) нефролитотрипсия, трансуретральная контактная уретеро- и пиелокаликотрипсия, а так же чрескожная и трансуретральная контактная цистолитотрипсия [1-3].

Собственно разрушение камней в мочевых путях осуществляется с помощью ультразвуковых, пневматических, электрокинетических, электрогидравлических и лазерных контактных литотрипторов, либо их комбинации. При этом каждый литотриптор имеет свои преимущества и недостатки [3, 4]. Так, при ультразвуковой литотрипсии используются только ригидные зонды и ригидные эндоскопы и сфера ее применения в настоящее время ограничивается в основном камнями почки. Ударная литотрипсия (пневматический или электрокинетический литотрипторы) является одним из наиболее эффективных и безопасных способов контактного разрушения камней. Вместе с тем использование таких литотрипторов также ограничено ригидными эндоскопами, а ретроградная пропульсия камня при трансуретральной уретеролитотрипсии считается недостатком метода. Электрогидравлический и лазерный методы литотрипсии, являясь эффективными

способами контактного дробления, могут применяться как с ригидными, так и с гибкими эндоскопами, что значительно расширяет сферу их использования в современной урологии. Однако электрогидравлическая литотрипсия вызывает существенно больше осложнений по сравнению с другими методами, поскольку произведенная ударная волна повреждает окружающие ткани. Лазерная литотрипсия менее травматична, но, требует более дорогостоящего оборудования и больше времени для фрагментации камня. При этом одним из недостатков метода является наличие потенциальной опасности лазерного излучения для окружающих и возможность повреждения дорогостоящих гибких эндоскопов за счет поломки лазерного волокна в изогнутом инструменте [3-7].

Для того, чтобы преодолеть недостатки устройств, существующих на рынке для интракорпоральной литотрипсии, компания Lithotech Medical Ltd (Израиль) разработала новый литотриптор, который позволяет безопасно разрушать камни во всех частях мочевых путей пациентов с помощью зондов различных диаметров, которые являются совместимыми как с ригидными так и с гибкими эндоскопами [8]. Этот метод литотрипсии существенно отличается по своему принципу действия от существующих и использует для разрушения камней короткие наносекундные электрические импульсы с крутыми фронтами [9-12].

Целью данной работы явилось проведение в лабораторных условиях сравнительного исследования эффективности фрагментации искусственных мочевых камней наносекундным электроимпульсным литотриптором (НЭИЛ) и стандартным электрогидравлическим литотриптором (ЭГЛ).

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

При внешней схожести двух рассматриваемых контактных литотрипторов (зонд с двумя электродами на дистальном конце, на который подается электрический импульс) они имеют между собой принципиальные отличия. Электрогидравлическая литотрипсия являлась первым методом интракорпоральной фрагментации мочевых камней, при которой использовался тонкий зонд, подводимый непосредственно к разрушаемому камню и содержащий два электрода. При подаче напряжения на зонд между электродами возникает разрядная электрическая дуга, которая испаряет жидкость, контактирующую с дистальным концом зонда. Электрический пробой жидкости создает кавитационные пузырьки, которые быстро расширяются, создавая, в свою очередь, первую ударную волну. После разрыва (лопания) кавитационных пузырьков, вторичная ударная волна создает давление, которое затем передается на близко расположенный камень. Многократно приложенная ударная волна создает сжимающие и растягивающие механические напряжения, которые приводят к разрушению мочевого камня. [13-15]. В тоже время новая технология *электроимпульсного разрушения* твердых биологических конкрементов основана на следующем явлении: при подаче коротких наносекундных электрических импульсов определенного напряжения на твердое тело, находящееся в жидкой среде, установлено, что твердый диэлектрик имеет более низкое напряжения пробоя, чем жидкая среда. Когда наносекундный импульс высокого напряжения с крутым фронтом приложен к мочевому камню, являющимся в своей основе твердым неорганическим диэлектриком, происходит его пробой и электрический ток протекает через плазменные каналы, образующиеся в объеме диэлектрика. При этом в камне возникают растягивающие термомеханические напряжения, которые приводят к его растрескиванию и, в конечном итоге, разрушению [8, 9].

На рис. 1 схематично дано сопоставление вольт-секундных характеристик пробоя при одинаковом разрядном промежутке для твердого тела и жидкой среды. Точка пересечения вольт-секундных характеристик Ас соответствует равенству диэлектрических прочностей сравнимых сред. При экспозиции импульсного напряжения менее  $2 \cdot 3 \cdot 10^{-7}$ с твердое тело становится электрически сла-

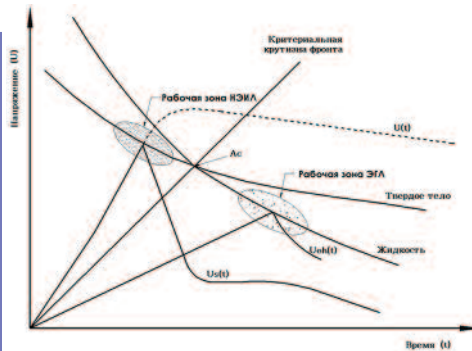


Рис. 1. Принципы электроимпульсного и электрогидравлического разрушения; сопоставление вольт-секундных характеристик различных сред (объяснения в тексте). Ас – точка, где вероятности пробоя жидкости и твердого тела равны; U(t) – импульс напряжения в отсутствии пробоя, Us(t) – импульс напряжения при пробое твердого диэлектрика, Ueh(t) – импульс напряжения при пробое жидкости. Здесь и далее: НЭИЛ – наносекундная электроимпульсная литотрипсия, ЭГЛ – электрогидравлическая литотрипсия

бее такого жидкого диэлектрика, как техническая вода, и в области диаграммы левее Ас преобладает электрический пробой твердого тела, вызывающий его разрушение. В то же время при известном электрогидравлическом способе дробления электрический разряд и пробой происходит всегда через жидкость (области диаграммы правее Ас), производя в ней ударную волну из-за использования намного более длинных импульсов и более низкого напряжения по сравнению с НЭИЛ. Эта ударная волна, вызванная ЭГЛ, может вызвать серьезное повреждение окружающих тканей, что явилось причиной, из-за которой ЭГЛ практически перестал использоваться для эндоскопического дробления камней. При электроимпульсном методе разрушения камней, в отличие от электрогидравлического, энергия электрического импульса выделяется непосредственно в объеме разрушаемого тела, а не в жидкости, что требует значительно меньших энергий для его дезинтеграции.

На рис. 2 схематично показан принцип работы НЭИЛ при использовании инверсии диэлектрической прочности между жидкостью и твердым телом в диапазоне коротких наносекундных импульсов с крутыми фронтами. Импульс напряжения U(t), имеющий параметры, соответствующие левой части диаграммы от точки Ас (рис. 1), подается на электроды, установленные на поверхности твердого тела (рис. 2а). При этом пробой твердого тела происходит в промежутке внутри твердого тела, а не по кратчайшему пути на его поверхности (рис. 2б). Явление, показанное на рисунке 2б, известно как «внедрение разряда в твердое тело» [9]. Стадия внедрения разряда характери-

зуется протеканием в канале разряда импульса тока I(t) и выделением энергии (рис. 2б). Если выделение энергии в канале разряда происходит достаточно быстро, то в твердом теле произойдет микровзрыв, приводящий к формированию кратера с отрывом части материала от твердого тела (рис. 2в). Среда, окружающая разрушаемый массив материала с токоподводящими электродами, выполняет в процессе роль агента, способствующего электрическому пробое твердого тела. Данная разновидность способа разрушения твердых тел электрическим пробоем получила название электроимпульсного способа разрушения материалов [9].

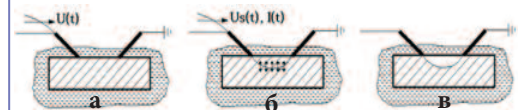


Рис. 2 а,б,в. Последовательность процессов пробоя и разрушения твердого тела при НЭИЛ (объяснения в тексте). U(t) – импульс напряжения, поданный на твердое тело; Us(t) – импульс напряжения при пробое, I(t) – импульс тока

Рис. 3 схематично показывает принцип работы ЭГЛ. Импульс напряжения U(t), имеющий параметры, соответствующие правой части диаграммы от точки Ас (рис. 1), подается на электроды, находящиеся в непосредственной близости от поверхности твердого тела. При достижении напряжения Ueh(t) происходит пробой жидкости вблизи поверхности твердого тела. Эта стадия характеризуется протеканием в канале разряда импульса тока I(t) и выделением энергии (рис. 3а). При этом, как уже отмечалось выше, при электрическом пробое жидкости происходит создание кавитационных пузырьков (рис. 3б), приводящих к возникновению ударной волны, созданию области давления на твердое тело и его последующего разрушения (рис. 3в).

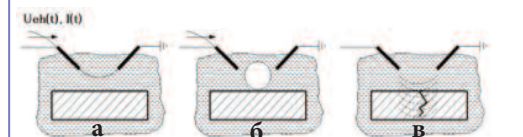


Рис. 3 а,б,в. Последовательность процессов пробоя жидкости и разрушения твердого тела при ЭГЛ (объяснения в тексте); Ueh(t) – импульс напряжения при пробое жидкости, I(t) – импульс тока

Механизм разрушения мочевых камней с помощью НЭИЛ, исходя из теории процесса, можно представить следующими взаимосвязанными стадиями. Первоначально происходит разрушение поверхности камня, которая расположена между электродами, под действием электрической дуги, создающей эффект микровзрыва и приводящей к созданию лунки откола в зоне электродов (рис 2а-в, рис. 4а).

Далее происходит накопление микроповреждений в объеме камня за счет создания в нем термомеханических напряжений, вызванных электрическим пробоем. Затем происходит объединение повреждений в магистральную трещину, соединяющуюся с исходной лункой-зоной разрушения между электродами и приводящих к последующему расколу камня (рис.4б).

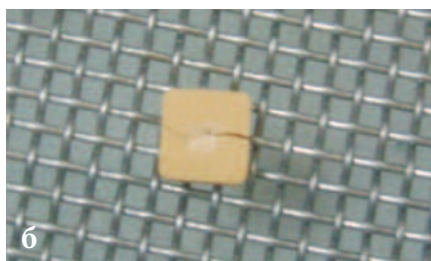
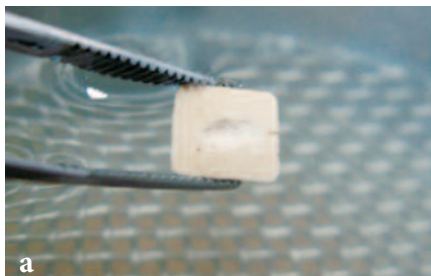


Рис. 4 а, б. Стадии разрушения образца искусственного «мочевого камня» при работе наносекундного электроимпульсного литотриптора (объяснения в тексте)

В то же самое время при ЭГЛ на начальной стадии не происходит создание кратера (рис. 5а), а механические напряжения, вызванные прохождением ударной волны через твердое тело, накапливаются в его объеме и, в конечном итоге, приводят к растрескиванию твердого тела. (рис. 5б).

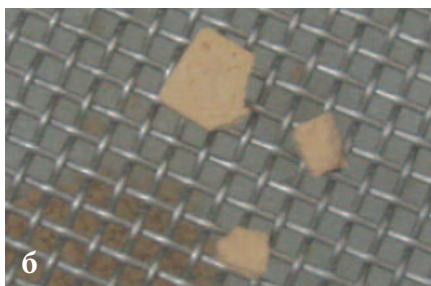
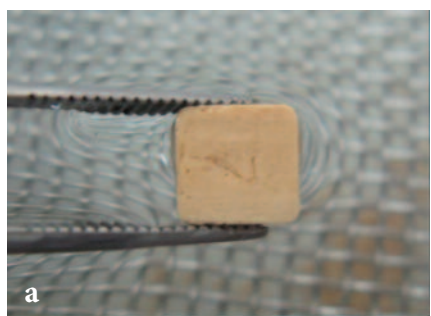


Рис. 5 а, б. Стадии разрушения образца искусственного «мочевого камня» при работе электрогидравлического литотриптора (объяснения в тексте)

На основе электроимпульсного способа был разработан новый, не имеющий аналогов, наносекундный электроимпульсный литотриптор (НЭИЛ), позволяющий создавать электрический пробой в мочевых камнях с последующей их фрагментацией [8]. В настоящее время НЭИЛ используется в клинической практике в десятках российских клиник и зарекомендовал себя как эффективный и безопасный литотриптор [10-12]. Базовыми характеристиками разработанного прибора является создание наносекундного импульса с фронтом менее 50 наносекунд, длительностью 250–500 наносекунд и напряжением до 10 kV при прикладываемой к объекту энергии от 0.3 и до 1.0 Дж.

В то же время необходимо отметить, что если при НЭИЛ зонд литотриптора по какой-либо причине не будет иметь прямого контакта с камнем или на него будет подано соответствующее напряжение, когда зонд расположен только в жидкости, то мы также получим разряд, пробой жидкости и создание волны давления. В связи с этим были выполнены эксперименты на собаках для проверки безопасности НЭИЛ, где была показана низкая травматичность метода для уретры и мочевого пузыря собак [16]. В дополнение к этому, при проведении тестов на репульсацию модельных камней, мы установили, что НЭИЛ создает существенно более низкие величины давления в сравнении с ЭГЛ и при этом наблюдается значительно меньшая пропульсия образцов.

Для моделирования «твердых» и «мягких» мочевых камней мы использовали два вида искусственных камней «Begostone» [17], физические свойства которых представлены в табл. 1. Процедура приготовления образцов была выдержана в соответствии с рекомендациями изготовителя [18]. Разница в плотности и твердо-

сти материалов достигалась изменением пропорции исходного порошка материала к воде при их перемешивании (табл. 1).

На полученных материалах были измерены плотность в единицах по шкале Хунсфильда (НУ) и твердость по методу Виккерса (НV). Измеренная усредненная плотность «твердых» образцов составляла 2530 единицы НУ, «мягких» образцов - 1400 единиц НУ. Измерение твердости по Виккерсу выполнялось при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 секунд. Измеренная величина микротвердости для «твердых» образцов составляла ~ 90 НV, а для «мягких» образцов ~ 60 НV. Для проведения испытаний были изготовлены 3 типа-размера образцов камней в форме прямоугольного параллелепипеда. Каждый размер камня соответствовал определенному размеру зонда литотрипторов. В экспериментах с ЭГЛ использовали зонды трех типоразмеров: 3.0 Fr, 4.5 Fr и 7.0 Fr. Для НЭИЛ использовались зонды 2.7 Fr, 4.5 Fr и 6.0 Fr. Мы выбрали размеры камней для соответствующих зондов таким образом, чтобы твердые камни были разрушены НЭИЛ приблизительно в пределах 1/3 рабочего ресурса зонда при максимальной энергии импульса. Сравнение эффективности литотрипторов в экспериментах было выполнено для пар зондов, которым соответствовал определенный размер камня (табл. 2).

Во всех экспериментах один зонд использовался для разрушения одного камня определенного размера.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сравнительные исследования проводились в физиологическом растворе (0,9% раствор NaCl) при комнатной температуре. Камни указанного размера для каждого типа зонда литотрипторов помещались на

Таблица 1. Свойства искусственных камней Begostone

Соотношение Begostone:вода	15:3 / 15:6
Объем образцов, используемых в тестах	100, 256, 320 mm <sup>3</sup>
Прочность на растяжение	7 МПа / 3.2 МПа
Продольная скорость волны	8.2 * 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> sec / 4.9 * 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> sec
Поперечная скорость волны	4.6 * 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> sec / 2.8 * 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> sec

Таблица 2. Выбор зондов и камней для сравнения эффективности литотрипторов

Но. сравнения	Зонд НЭИЛ	Зонд ЭГЛ	размер камня, мм
1	2.7 Fr	3.0 Fr	5x5x4
2	4.5 Fr	4.5 Fr	8x8x4
3	6.0 Fr	7.0 Fr	8x8x5

НЭИЛ – наносекундный электроимпульсный литотриптор, ЭГЛ – электрогидравлический литотриптор

Таблица 3. Условия проведения эксперимента для рассматриваемых литотрипторов

НЭИЛ			ЭГЛ		
Энергия в импульсе Дж.	E min	0.4	Энергия в импульсе Дж.	E min	0.36
	E max	1		E max	0.96
Частотный режим	Режим единичных импульсов		Частотный режим	Режим единичных импульсов	
Количество последовательных импульсов, подаваемых на камень	Изменяемое		Количество последовательных импульсов, подаваемых на камень	Изменяемое	

сетку из нержавеющей стали с размерами ячеек 2x2 мм, погруженную в раствор. Дистальную часть зонда располагали под углом 90 градусов к горизонтальной поверхности «камня» и приводили в контакт с образцом (НЭИЛ), либо располагали в непосредственной близости к поверхности камня (ЭГЛ). После этого на зонд подавался электрический импульс от соответствующего литотриптора. После подачи серии импульсов поверхность разрушаемого камня исследовалась, после чего эксперимент продолжался. Переустановка зонда выполнялась также после каждой потери контакта с разрушаемым камнем. Эксперимент прекращали, когда на поверхности сетки не оставалось частичек разрушенного «камня», то есть когда фрагментируемый образец был раздроблен на части менее 2 мм. Это и являлось успешным критерием проведения эксперимента. Для предотвращения влияния эффекта репульсации «камня» (эффект отталкивания) на результаты эксперимента, камень или его часть удерживалась в процессе дробления специальным пинцетом. Каждый эксперимент с заданным типом и размером «камня» и зонда повторяли не менее 5 раз.



Рис. 6. Приборы, используемые в экспериментах: а. наносекундный электроимпульсный литотриптор «Urolit-105M»; б. электрогидравлический литотриптор «Lithotron EL 25»

При заданной энергии регистрировалось количество импульсов, необходимое для разрушения определенного камня заданным типом зонда. Эффективность НЭИЛ и ЭГЛ сравнивалась при сопоставимых уровнях энергии, используя одинаковые типы камней и соответствующие диаметры зондов. В дальнейшем регистрируемые данные были пересчитаны для обоих случаев в накопленную энергию, необходимую для полной фрагментации камня на части, размером менее 2 мм.

**В экспериментах использовались:**

1. Наносекундный электроимпульсный литотриптор «Urolit-105M» («Lithotech Medical Ltd.», Израиль) (рис. 6а), имеющий энергию в импульсе от 0.3 до 1 Дж. (при этом диапазон энергий поделен на 8 частей с шагом 0.1 Дж.), работающий в режиме однократных импульсов и частотном режиме 1 - 5 Гц (шаг 1 Гц).

2. Электрогидравлический литотриптор «Lithotron EL 25 Combilith» («Wald Elektronik GmbH», Германия) (рис. 6б), имеющий энергию в импульсе от 0.36 и 0.96 Дж, работающий в режиме однократных импульсов и таком же частотном режиме.

Рабочие параметры оборудования для выполнения сравнительных тестов приведены в табл. 3. Как видно из табл. 2, 3, некоторая разница в минимальной и максимальной мощности сравниваемых устройств частично компенсируется разницей в диаметре зондов.

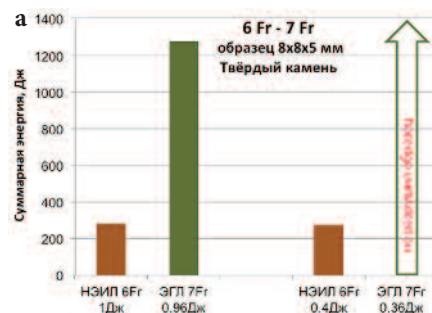
После проведения тестов был выполнен статистический анализ результатов измерений. Критерием оценки существенного отличия полученных результатов для двух исследуемых приборов был выбран критерий р-значения при статистическом уровне значимости 5%. Расчет проводился с использованием программы SPSS Statistics.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

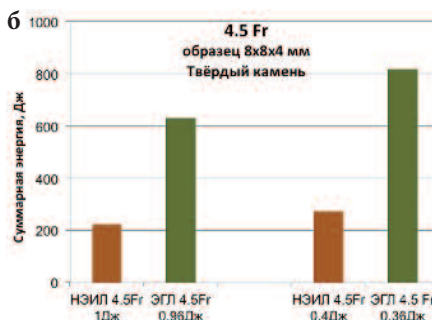
Суммарная энергия (E sum) и количество импульсов, необходимое для разрушения «камня» определенного типа и размера для двух сравниваемых литотрипторов в эксперименте приведены в табл. 4.

Критерием для сравнения эффективности приборов была выбрана суммарная энергия, затраченная на разрушение камня и приводящая к его требуемой фрагментации. Для наглядности, данные суммарной энергии рассматриваемых пар зондов (табл. 4) представлены на рис. 7.

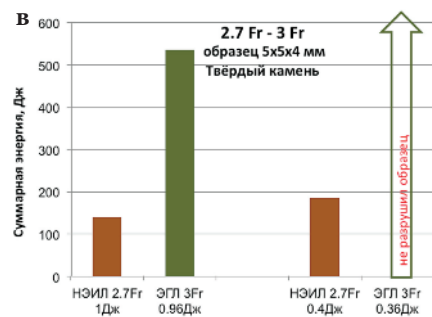
Рис. 7. Сравнение суммарной энергии, затраченной на фрагментацию камней для выбранных пар зондов



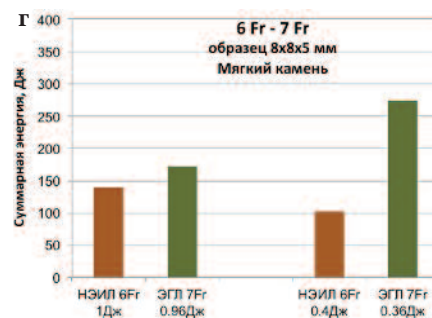
а - зонды 6.0 Fr и 7.0 Fr, твердый камень



б - зонды 4.5 Fr и 4.5 Fr, твердый камень



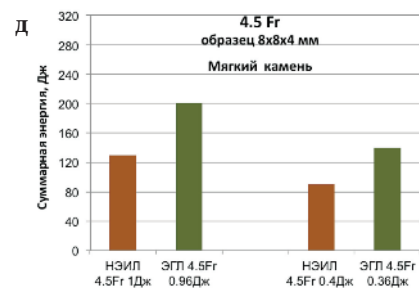
в - зонды 2.7 Fr и 3.0 Fr, твердый камень



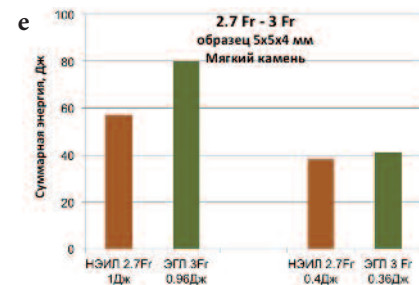
г - зонды 6.0 Fr и 7.0 Fr, мягкий камень

Таблица 4. Результаты испытаний, где Esum – суммарная энергия, потребовавшаяся для разрушения камня

Твердый «камень», Электроимпульсный Литотриптор, Энергия импульса 1 Дж					
зонд 2.7 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		6 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>141</b>	<b>141</b>	<b>222</b>	<b>222</b>	<b>280</b>	<b>280</b>
(±76)		(±22)		(±59)	
Твердый «камень», Электрогидравлический Литотриптор, Энергия импульса 0.96 Дж					
зонд 3 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		7 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>535</b>	<b>557</b>	<b>630</b>	<b>656</b>	<b>1276</b>	<b>1329</b>
(±169)		(±200)		(±181)	
Твердый «камень», Электроимпульсный Литотриптор, Энергия импульса 0.4 Дж					
зонд 2.7 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		6 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>186</b>	<b>465</b>	<b>273</b>	<b>683</b>	<b>275</b>	<b>688</b>
(±90)		(±225)		(±176)	
Твердый «камень», Электрогидравлический Литотриптор, Энергия импульса 0.36 Дж					
зонд 3 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		7 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>473</b>	<b>1315</b>	<b>818</b>	<b>2272</b>	<b>(1904)</b>	<b>(5288)</b>
Не разрушил		(±86)		(±238)	
Мягкий «камень», Электроимпульсный Литотриптор, Энергия импульса 1 Дж					
зонд 2.7 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		6 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>57</b>	<b>57</b>	<b>129</b>	<b>129</b>	<b>139</b>	<b>139</b>
(±10)		(±45)		(±38)	
Мягкий «камень», Электрогидравлический Литотриптор, Энергия импульса 0.96 Дж					
зонд 3 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		7 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>80</b>	<b>83</b>	<b>201</b>	<b>209</b>	<b>172</b>	<b>179</b>
(±17)		(±90)		(±48)	
Мягкий «камень», Электроимпульсный Литотриптор, Энергия импульса 0.4 Дж					
зонд 2.7 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		6 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>38</b>	<b>95</b>	<b>90</b>	<b>224</b>	<b>101</b>	<b>253</b>
(±5)		(±40)		(±99)	
Мягкий «камень», Электрогидравлический Литотриптор, Энергия импульса 0.36 Дж					
зонд 3 Fr, камень 5x5x4 мм		4.5 Fr, камень 8x8x4 мм		7 Fr, камень 8x8x5 мм	
Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.	Esum, Дж	К-во имп.
<b>41</b>	<b>113</b>	<b>140</b>	<b>389</b>	<b>274</b>	<b>761</b>
(±17)		(±41)		(±56)	



д - зонды 4.5 Fr и 4.5 Fr, мягкий камень



е - зонды 2.7 Fr и 3.0 Fr, мягкий камень

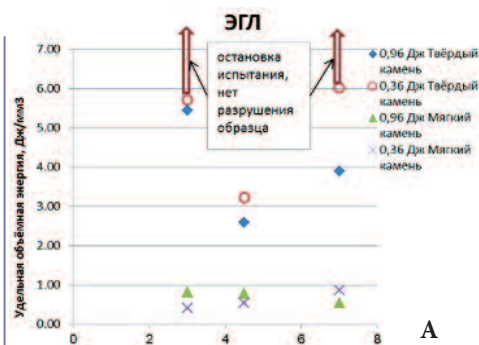
Таким образом, из приведенных данных (табл. 4) и построенных диаграмм (рис. 7 а-е) ясно видно, что практически во всех исследованных случаях при разрушении искусственных камней НЭИЛ требует значительно меньших энергий, чем ЭГЛ, что говорит о его более высокой эффективности. При этом следует отметить, что количество успешно фрагментированных камней в нашей работе при использовании НЭИЛ составило 100%, то есть во всех выполненных экспериментах образцы были разрушены на части менее 2 мм. В то же время при использовании ЭГЛ в двух экспериментах «камни» не были фрагментированы (рис. 7а, в; «твердые камни», энергия 0.36 Дж). Рассчитанная величина «р» для большинства рассмотренных случаев, в которых было возможно проведение статистической оценки (кроме двух экспериментов, в которых на электрогидравлическом литотрипторе не удалось вообще разрушить исследуемые образцы), составляла менее 0,04 ( $p < 0,04$ ). И только в одном случае при разрушении мягких камней зондами 2.7 Fr (НЭИЛ) и 3.0 Fr (ЭГЛ) при минимальной энергии импульса 0,4 Дж и 0,36 Дж соответственно величина «р» была выше порогового значения 0,05 ( $p > 0,05$ ) (рис. 7е).

Из приведенных данных (табл. 4, рис. 7) следует, что для подавляющего большинства исследованных случаев при фрагментации искусственных камней наносекундный электроимпульсный литотриптор требует существенно более низкой суммарной энергии для их разру-

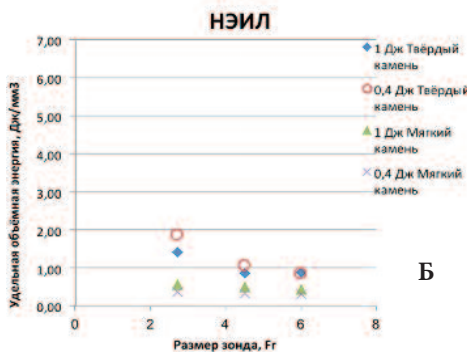
шения, чем электрогидравлический литотриптор, то есть является более эффективным. Отличия по суммарной энергии разрушения, количеству импульсов и времени работы прибора во многих случаях отличаются в несколько раз. Вместе с тем, основываясь на результатах статистической обработки данных, полученных в экспериментах при разрушении мягких камней зондами 2.7 Fr (НЭИЛ) и 3.0 Fr (ЭГЛ) при минимальной энергии импульса 0.4 Дж и 0.36 Дж, можно сказать, что, несмотря на некую разницу в результатах эксперимента (табл. 3, рис 7е), мы не можем однозначно заявить о преимуществе НЭИЛ в данном специфическом случае, так как рассчитанная величина критерия «р» выше порогового значения. То есть в данном случае только при малых энергиях импульса, зондах небольшого диаметра и «мягких» камнях мы имеем сходные результаты по двум рассматриваемым методам контактной литотрипсии. Во всех остальных исследованных случаях (особенно при использовании импульсов с энергией приблизительно 1 Дж на «твердых» камнях) электроимпульсный метод разрушения камней продемонстрировал свое существенное преимущество над электрогидравлическим, что однозначно подтверждается и статистической обработкой данных. Кроме значительного различия в величинах регистрируемых показателей разброс их значений в большинстве случаев также существенно ниже для НЭИЛ по сравнению с ЭГЛ.

Принимая во внимание полученные результаты, представляется также интересным рассмотреть зависимость затраченной суммарной энергии для разрушения «камня» приведенной к его объему (удельную энергию фрагментации «камня») от плотности «камня» и размера зонда для обоих литотрипторов. Данные удельной суммарной энергии фрагментации для каждого литотриптора в зависимости от размера зонда и плотности «камня» приведены на рис. 8 а, б.

Полученные результаты показывают совершенно разные зависимости удельной энергии, затрачиваемой на разрушение «камней», как от плотности образца, так и от диаметра зонда. Так, для ЭГЛ не наблюдается явной зависимости удельной энергии импульса, приложенной к «камню» от плотности материала образца и от диаметра зонда. Вместе с



а. Электрогидравлический литотриптор



б. Наносекундный электроимпульсный литотриптор

Рис. 8. Зависимость удельной энергии фрагментации камня от его плотности и размера зонда литотриптора

тем для разрушения «твердых камней» всегда требуются существенно большие удельные энергии, чем для разрушения «мягких камней» (Рис. 8 а). В тоже время для НЭИЛ наблюдается явная зависимость удельной энергии от плотности разрушаемого материала и происходит явное уменьшение удельной энергии, требуемой для разрушения «камня» при увеличении размера зонда (Рис. 8б). При этом общий, усредненный по всем полученным результатам, уровень необходимой удельной энергии фрагментации «камней» для НЭИЛ более чем в 4 раз

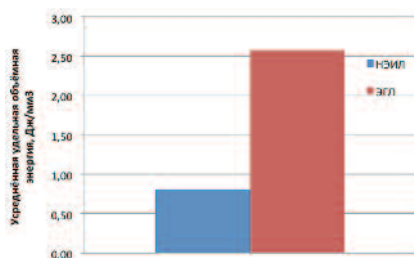


Рис. 9. Общая удельная энергия, необходимая для разрушения экспериментальных образцов ниже, чем для ЭГЛ (Рис. 9).

Таким образом, для НЭИЛ требуются существенно более низкие значения суммарной энергии для разрушения «камня» и соответственно затраченного для этого времени при сопоставимых параметрах импульсов.

Как было описано ранее, действия сравниваемых литотрипторов отличаются механизмом разрушения образцов и, в пер-

вую очередь, способом передачи энергии камню с целью его последующего разрушения. При наносекундном электроимпульсном разрушении энергия как бы непосредственно «вкачивается» в камень в отличие от электрогидравлической литотрипсии. В связи с этим НЭИЛ требует значительно меньших энергий для разрушения камней по сравнению с ЭГЛ, что и доказано экспериментально. Кроме того, эффективность НЭИЛ зависит от пробивного расстояния между электродами зонда, а это расстояние связано с диаметром зонда, поэтому с увеличением его диаметра требуется меньшая удельная энергия для разрушения камня. Таким образом, явные различия в результатах эксперимента и зависимостях, приведенных на рис. 7 и рис. 8 экспериментально подтверждают утверждение, что, несмотря на внешнюю схожесть двух методов (подача электрического импульса на зонд, электрический разряд на конце зонда), мы имеем дело с разными механизмами разрушения твердых тел. Различием в механизмах разрушения камней и объясняется существенное отличие полученных данных, а также различное влияние плотности (твердости) образцов искусственных камней на полученные результаты.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящей работе проведены сравнительные экспериментальные исследования эффективности наносекундного электроимпульсного литотриптора с электрогидравлическим литотриптором. Сравнимые литотрипторы отличаются механизмом разрушения образцов, что и приводит к различному влиянию плотности и твердости образцов камней на полученные результаты. Результаты исследований показывают, что для большинства режимов работы и типов образцов камней НЭИЛ требует существенно более низкой энергии и меньшего времени для разрушения «камней», чем ЭГЛ. При этом число успешно фрагментированных образцов при использовании НЭИЛ составило 100%, то есть во всех выполненных экспериментах образцы были разрушены на части менее 2 мм, в то время как при работе ЭГЛ в ряде случаев не удалось получить положительные результаты, то есть камни не были фрагментированы. Следовательно, по всем параметрам электроимпульсный литотриптор является более эффективным устройством для контактного дробления мочевых камней, чем электрогидравлический. ■

**Резюме:**

Цель работы - сравнительное исследование эффективности фрагментации искусственных мочевого камней новым наносекундным электроимпульсным литотриптором (НЭИЛ) и стандартным электрогидравлическим литотриптором (ЭГЛ). Применялись образцы двух типов камней, симулирующие «твердые» и «мягкие» мочевого камни, для приготовления которых использовался стоматологический сверхпрочный гипс BegoStone. Для ЭГЛ использовали зонды трех типоразмеров: 3.0 Fr, 4.5 Fr и 7.0 Fr, для НЭИЛ - зонды 2,7 Fr, 4,5 Fr и 6,0 Fr. Сравнение эффективности литотрипторов в экспериментах было выполнено для пар зондов, которым соответствовал определенный размер камня. «Камни» указанного размера для каждого типа зонда литотрипторов помещались на сетку из нержавеющей стали с размерами ячеек 2x2 мм, погруженную в воду комнатной температуры. Эксперимент прекращали, когда на поверхности сетки не оставалось частичек разрушенного «камня». Результаты показали, что для разрушения большинства искусственных камней НЭИЛ требовал существенно более низкой энергии и меньшего времени, чем ЭГЛ. Количество успешно фрагментированных «камней» при использовании НЭИЛ составило 100%, в то же время при использовании ЭГЛ в двух экспериментах «камни» не были фрагментированы. Только при малых энергиях импульса, зондах небольшого диаметра и «мягких» камнях получены сходные результаты по двум рассматриваемым методам контактной литотрипсии. Во всех остальных случаях электроимпульсный метод продемонстрировал существенное преимущество над электрогидравлическим. Показано, что для НЭИЛ требуются существенно более низкие значения суммарной энергии для разрушения «камня».

**Ключевые слова:** электроимпульсный литотриптор, электрогидравлический литотриптор, мочевого камни.

**Key words:** electropulse lithotripter, electrohydraulic lithotripter, urinary stones.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Урология: Учебник. [Под ред. Н.А.Лопаткина]. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-МЕД, 2011. – 815 с.
2. Мартов А.Г., Ергаков Д.В. Достижения современной эндоурологии. // Материалы XII съезда Российского общества урологов. М., 2012. С. 417-426.
3. Мартов А.Г., Сафаров Р.М., Гуцин Б.Л., Кудрявцев Ю.В. Сравнительная характеристика эффективности и безопасности применения различных типов контактных литотрипторов. // Материалы пленума правления Российского общества урологов, Саратов, 15-17 сентября 1998 г. Москва, 1998. С. 312-313.
4. Piergiovanni M, Desgrandchamps F, Cochand-Priollet B, Janssen T, Colomer S, Teillac P, Le Duc A. Ureteral and bladder lesions after ballistic, ultrasonic, electrohydraulic, or laser lithotripsy. // J Endourol. 1994. Vol. 8, N 4. P. 293-299.
5. Sofer M, Watterson JD, Wollin TA, Nott L, Razvi H, Denstedt JD. Holmium:YAG laser lithotripsy for upper urinary tract calculi in 598 patients. // J Urol. 2002. Vol. 167. P. 31-34.
6. Marks AJ, Teichman JM. Lasers in clinical urology: state of the art and new horizons. // World J Urol. 2007. Vol. 25, N 3. P. 227-233.
7. Santa-Cruz RW, Leveillee RJ, Krongrad A. Ex vivo comparison of four lithotripters commonly used in the ureter: what does it take to perforate? // J Endourol. 1998. Vol. 12, N 5. P. 417-422.
8. Chernenko V, Diamant V, Lerner M, Khachin S, Khachin V. Method for intracorporeal lithotripsy fragmentation and apparatus for its implementation. // Патент US 7087061 and US 20070021754.
9. Усов А.В., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсных технологий. СПб.: Наука, 2000. - 160с.
10. Гудков А.В., Бощенко В.С., Афонин В.Я. Контактная электроимпульсная литотрипсия. // Урология. 2009. N 2. С. 32-37
11. Румянцев А.А., Дутов В.В., Беляев В.В., Саакян А.А., Беляев Д.В. Трансуретральная контактная электроимпульсная уретеропиелолитотрипсия. // Урология. 2011. N 3. С. 40-43.
12. Boshchenko, VS, Gudkov AV, Afonin VY, Petlin AV. Assessment of efficiency and safety of retrograde contact electropulse lithotripsy: Simple pilot multicenter study. // 27th Annual Congress of the European Association of Urology, Paris 2012. Eur Urol Suppl. 2012. Vol. 11. P. e496.
13. Siegel JH, Ben-Zvi JS, Pullano WE. Endoscopic electrohydraulic lithotripsy. // Gastrointest Endosc. 1990. Vol. 36. P. 134.
14. Grocela JA, Dretler SP. Intracorporeal lithotripsy. Instrumentation and development. // Urol Clin North Am. 1997. Vol. 24, N 1. P. 13-23.
15. Zhong P, Tong HL, Cocks FH, Preminger GM. Transient oscillation of cavitation bubbles near stone surface during electrohydraulic lithotripsy. // J Endourol. 1997. Vol. 11, N 1. P. 55-61.
16. Boshchenko VS, Gudkov AV, Arseniev AV, Afonin VY. Contact electric pulse impact on urinary tract wall in dogs: 1-year experimental morphological study. // 27th Annual EAU Congress, February 2012, Paris. Eur Urol Suppl. 2012. Vol. 11. P. e101.
17. Esch E, Simmons WN, Sankin G, Cocks HF, Preminger GM, Zhong P. A simple method for fabricating artificial kidney stones of different physical properties. // Urol Res. 2010. Vol. 38, N 4. P. 315-319.
18. Liu Y, Zhong P. BegoStone - a new stone phantom for shock wave lithotripsy research. // J Acoust Soc Am. 2002. Vol. 112, N 4. P. 1265-1268.



**Обновленная версия Uro.TV работает не только на компьютерах и ноутбуках, но также на мобильных устройствах, включая iPhone и iPad!**

