

А. Г. Мартов, В. М. Диамант, А. В. Борисик, А. С. Андронов, Д. А. Джалилов

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО И ЛАЗЕРНОГО ЛИТОТРИПТОРОВ IN VITRO

Городская клиническая больница № 57 Департамента здравоохранения Москвы
(главврач – И. А. Назарова), кафедра урологии ФМБА (зав. – проф. А. Г. Мартов),
кафедра эндоскопической урологии РМАПО (зав. – проф. О. В. Теодорович)

Автор для связи: А. Г. Мартов, e-mail: martovalex@mail.ru

В работе представлено сравнительное исследование наносекундного электроимпульсного и гольмиевого лазерного литотрипторов in vitro. Применялись образцы двух типов, симулирующие “твердые” и “мягкие” мочевые камни, для приготовления которых использовался стоматологический сверхпрочный гипс BegoStone. Для проведения испытаний были изготовлены четыре типоразмера образцов камней в форме прямоугольного параллелепипеда. При этом размеры зондов и камней в определенной степени симулировали реальную клиническую ситуацию. В экспериментах для Ho:YAG лазерного литотриптора (ЛЛ) использовали зонды трех типоразмеров: 230, 365 и 600 мкм, для электроимпульсного литотриптора (ЭИЛ) – зонды 2, 7, 3, 6, 4, 5 и 6 Fr. Сравнение эффективности литотрипторов в экспериментах было выполнено для пар зондов, которым соответствовал определенный размер камня. Сравнительные исследования проведены в водной среде при комнатной температуре. “Камни” указанного размера для каждого типа зонда литотрипторов помещались на сетку из нержавеющей стали с размерами ячеек 2x2 мм, погруженную в воду. Дистальную часть зонда (кончик) располагали под углом 90° к горизонтальной поверхности “камня” и приводили в контакт с образцом. Эксперимент прекращали, когда на поверхности сетки не оставалось частичек разрушенного “камня”. Каждый эксперимент с заданным типом и размером “камня” и зонда повторяли не менее 5 раз. Результаты исследований показали, что для разрушения всех типов образцов “камней” наносекундный ЭИЛ требует гораздо более низких, чем ЛЛ, энергетических и временных затрат, т. е. по физическим параметрам более эффективен. Для разрушения “мягких камней” ЭИЛ всегда требовал заметно меньше энергии, чем для разрушения “твердых камней”. В то же время при работе с ЛЛ часто затрачивалась примерно та же энергия, а иногда даже и больше, чем для разрушения “твердого камня”. Различные зависимости от энергии импульса и свойства “камней” при их разрушении для двух рассматриваемых методов контактной литотрипсии подтверждены экспериментально.

К л ю ч е в ы е с л о в а: мочевые камни; контактная литотрипсия; литотриптор; гольмиевый лазерный литотриптор

Введение. Мочекаменная болезнь является распространенным заболеванием и составляет в разных странах более 30% всех урологических заболеваний [1]. При этом для лечения наиболее сложных форм нефроуретеролитиаза (крупные, множественные и коралловидные камни почки, “вколоченные” и крупные камни мочеточника и др.) все чаще применяют эндоурологические методы, в частности перкутанную и трансуретральную контактную литотрипсию, которая позволяет снижать периоперационные риски дистанционной ударно-волновой литотрипсии и открытой литотомии, а также сокращать продолжительность стационарного и амбулаторного лечения [2].

В области контактной литотрипсии в настоящее время используется несколько основных методов: ультразвуковой, пневматический, электрокинетический, лазерный и электрогидравлический. Каждый литотриптор имеет свои преимущества и недостатки. Для ультразвуковой литотрипсии используются только ригидные зонды и ригидные эндоскопы, а сфера ее применения в настоящее время ограничивается в основном “камнями” почки. Ударная литотрипсия

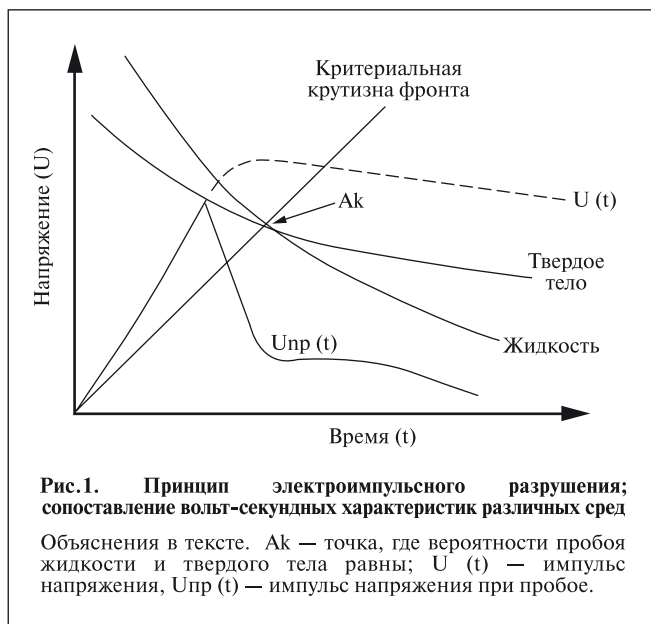
(пневматический или электрокинетический методы) считается одним из наиболее эффективных и безопасных способов контактного разрушения “камней”. Однако использование таких литотрипторов также ограничено возможностями ригидных эндоскопов, а ретроградная пропульсия “камня” при трансуретральной уретеролитотрипсии считается недостатком метода. Электрогидравлический и лазерный методы литотрипсии, являясь эффективным способом контактного дробления, могут быть применены как с ригидными, так и с гибкими эндоскопами, что значительно расширяет сферу их использования в современной урологии. Однако электрогидравлическое дробление сопровождается большей частотой осложнений по сравнению с другими методами, так как электрический разряд, в результате которого возникает ударная волна, вызывает повреждение ткани, когда он происходит слишком близко от стенок мочевого тракта. Лазерное дробление безопаснее, но требует больше времени и более дорогостоящего оборудования. Кроме того, частое повреждение гибкого уретропиелоскопа за счет поломки лазерного волокна в изогнутом эндоскопе является большим недостатком данного метода [3–7].

Как альтернативу существующим методам литотрипсии компания "Lithtech Medical Ltd." (Израиль) разработала новый метод и контактный литотриптор, позволяющий безопасно осуществлять разрушение "камней" во всех частях мочевой системы человека, имеющий зонды различных диаметров, которыми можно работать как с жесткими, так и с гибкими эндоскопами. Этот метод литотрипсии существенно отличается от существующих по своему принципу действия и использует для разрушения "камней" короткие наносекундные электрические импульсы [8–11].

Новая технология разрушения твердых биологических конкрементов основана на следующем явлении: при подаче очень коротких электрических импульсов определенного напряжения на твердое тело, находящееся в жидкой среде, твердый диэлектрик имеет более низкое, чем жидкая среда, напряжение пробоя. Когда наносекундный импульс высокого напряжения воздействует на мочевой камень, в основе являющийся 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 – к разрушению [8]. При электроимпульсном методе разрушения "камней", в отличие от электрогидравлического, энергия электрического импульса выделяется непосредственно в объеме разрушаемого тела, что требует значительно меньших энергий для его дезинтеграции.

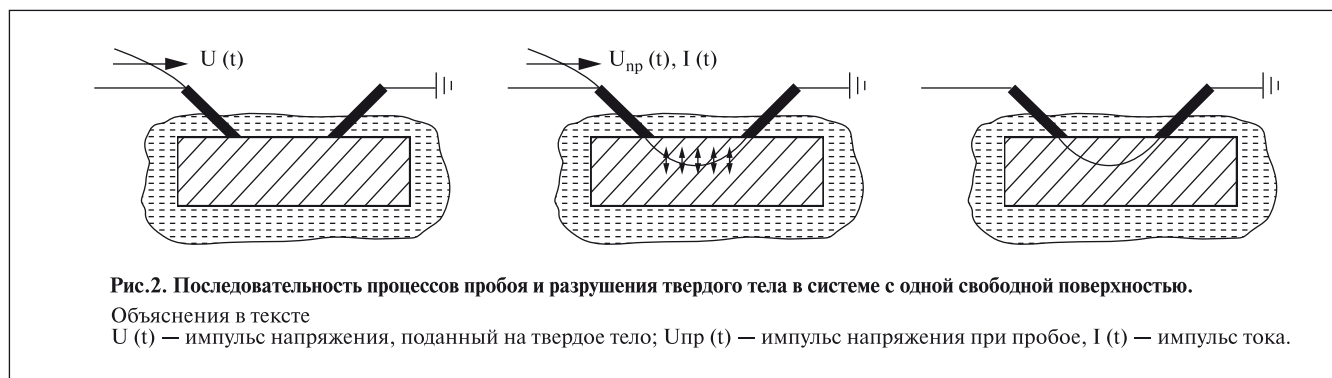
На рис. 1 схематично сопоставлены вольт-секундные характеристики пробоя при одинаковом разрядном промежутке для твердого тела и жидкой среды. Точка пересечения вольт-секундных характеристик A_k соответствует равенству прочностей и вероятности электрического пробоя сравниваемых сред. При экспозиции импульсного напряжения менее $2-3 \times 10^{-7}$ твердое тело становится электрически слабее такого жидкого диэлектрика, как техническая вода, и в области диаграммы левее A_k преобладает электрический пробой твердого тела.

Реализация отмеченного эффекта инверсии электрической прочности диэлектриков применительно к разрушению твердого тела поясняется на рис. 2. К электродам, установленным на поверхность твердого тела, прикладывается импульс напряжения $U(t)$ с параметрами, соответствующими левой части графика, от точки, равной вероятности (рис. 2, а). Пробой в промежутке с вероятностью более чем 50% происходит внутри твердого тела, а не по крат-



чайшему пути на поверхности твердого тела. Это явление называется внедрением разряда в твердое тело. Пробивная стадия процесса характеризуется протеканием в канале разряда импульса тока $I(t)$ и выделением энергии (рис. 2, б). При этом, если в канале разряда достаточно быстро будет выделено необходимое количество энергии, воздействие канала разряда на твердое тело по внешним признакам будет аналогично микровзрыву в твердом теле с образованием воронки и отрывом части материала от массива (рис. 2, в). Среда, окружающая разрушаемый массив материала с токоподводящими электродами, выполняет роль агента, способствующего электрическому пробоему твердого тела.

Данная разновидность способа разрушения твердых тел электрическим пробоем получила название электроимпульсного способа разрушения материалов. Главной предпосылкой к разрушению материалов таким способом является их склонность к электрическому пробоему и хрупкому разрушению в условиях импульсного силового нагружения. Указанный способ был положен в основу работы нового, не имеющего аналогов наносекундного электроимпульсного литотриптора (ЭИЛ), позволяющего создавать электрический пробой в мочевых "камнях" с последующей их фрагментацией. В настоящее время ЭИЛ используется в клинической практике в десятках российских клиник и зарекомендовал себя как эффективный и безопасный литотриптор [9–11].



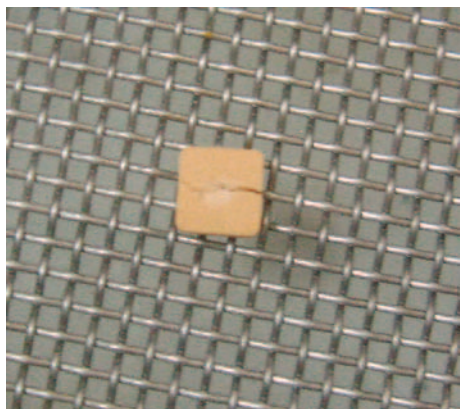
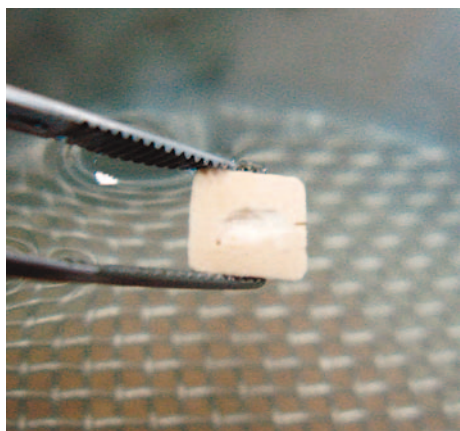


Рис.3. Начальная стадия разрушения образца искусственного "мочевого камня" при работе наносекундного ЭИЛ

Базовыми характеристиками разработанного прибора является создание наносекундного импульса с фронтом менее 50 нс, длительностью 250–500 нс и напряжением до 9,6 кВ при прикладываемой к объекту энергии от 0,3 до 1 Дж.

Механизм разрушения мочевого "камня" с помощью ЭИЛ, исходя из теории самого процесса, можно представить следующими взаимосвязанными стадиями. Первоначально происходит разрушение поверхности "камня", которая расположена между электродами под действием электрической дуги, создающей эффект микровзрыва с образованием взрывной термической и механической ударной волны, приводящей к созданию лунки откола в зоне электродов (см. рис. 2, а–в). Далее происходит накопление микроповреждений в объеме "камня" за счет распространения в нем ударных волн, вызванных

электрическим пробоем. Объединение повреждений в магистральную трещину, соединяющуюся с исходной лункой – зоной разрушения между электродами, обуславливает последующий раскол камня (рис. 3).

Целью данной работы было в лабораторных условиях сравнить эффективность фрагментации искусственных мочевого "камней" наносекундным ЭИЛ и стандартным гольмиевым (Ho:YAG) лазерным литотриптором (ЛЛ), широко применяемым в клинической практике.

Материалы и методы. Исследования проведены на образцах двух типов, симулирующих "твердые" и "мягкие" мочевого камни, для приготовления которых использовался стоматологический сверхпрочный гипс VegoStone (VegoStone plus™, "Vego, США), имеющий очень низкий коэффициент расширения. Процедура приготовления образцов была выдержана в соответствии с рекомендациями изготовителя [12]. Разница в плотности и твердости материалов достигалась изменением пропорции исходного порошка материала к воде при их перемешивании. "Твердые" образцы имели весовое соотношение порошок:вода 15:3, "мягкие" – соответственно 15:6. Плотность полученных образцов оценивали по шкале Хаунсфильда (НУ), твердость – по методу Виккерса (НV). Измерение твердости по Виккерсу выполнено при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 с. Средняя плотность "твердых" образцов составила 2530 НУ, "мягких" – около 1400 НУ, показатели микротвердости – около 90 и 60 НV соответственно.

Для проведения испытаний было изготовлено 4 типоразмера образцов "камней" в форме прямоугольного параллелепипеда. Каждый размер "камня" соответствовал определенному размеру зонда сравниваемых литотрипторов. При этом размеры зондов и "камней" в определенной степени симулировали реальную клиническую ситуацию. В экспериментах для Ho:YAG ЛЛ использовали зонды Genuine StarMedTec fibers ("StarMedTec", Германия) трех типоразмеров: 230, 365 и 600 мкм. Для ЭИЛ использовались зонды 2,7, 3,6, 4,5 и 6 Fg. Сравнение эффективности литотрипторов в экспериментах было выполнено для пар зондов, которым соответствовал определенный размер "камня" (табл. 1). В табл. 1 также показано основное клиническое применение сравниваемых зондов.

При работе с ЭИЛ один зонд использовался для разрушения одного камня определенного размера. При ЛЛ использовались зонды многократного применения до прекращения работы зонда. Кончик лазерного зонда обрезался специальным инструментом как в течение эксперимента, если это требова-

Т а б л и ц а 1
Выбор размера зондов и "камней" для сравнения эффективности литотрипторов

| Размер зонда ЭИЛ, Fg | Размер зонда Ho:YAG ЛЛ, мкм | Размер камня, мм | Основное клиническое применение (локализация камня) |
|----------------------|-----------------------------|------------------|---|
| 2,7 | 230 | 5x5x4 | Мочеточник, почка (т.д.) |
| 3,6 | 365 | 6x6x4 | Мочеточник |
| 4,5 | 600 | 8x8x4 | Мочеточник, мочевого пузыря |
| 6 | 600 | 8x8x5 | Мочевого пузыря, почка (п.д.) |

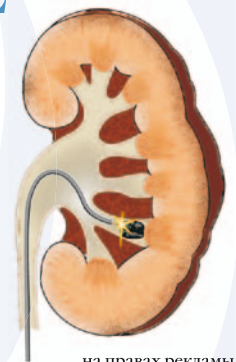
П р и м е ч а н и е. т.д. — трансуретральный доступ, п.д. — перкутанный доступ.

Наносекундный электроимпульсный литотриптор «Уролит»



**БЫСТРОЕ И ЭФФЕКТИВНОЕ
ДРОБЛЕНИЕ МОЧЕВЫХ КАМНЕЙ
ИЗ ЛЮБОГО ДОСТУПА
БЕЗ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТКАНЕЙ
И ОПТИКИ
ПО МИНИМАЛЬНОЙ ЦЕНЕ**

www.medline-ltd.com



на правах рекламы

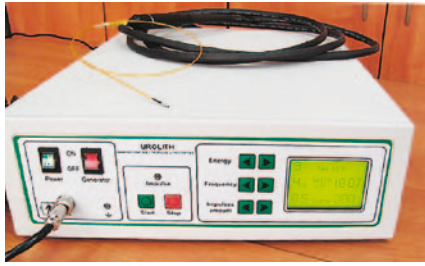


Рис. 4. Приборы, использованные в экспериментах
 а — наносекундный ЭИЛ Urolit-105M, б — Ho:YAG лазерный литотриптор Auiga.

лось (согласно визуальной инспекции зонда), так и перед каждым новым экспериментом для обновления рабочей поверхности зонда.

Методика эксперимента. Сравнительные исследования проведены в водной среде при комнатной температуре. «Камни» указанного размера для каждого типа зонда литотрипторов помещали на сетку из нержавеющей стали с размерами ячеек 2x2 мм, погруженную в воду. Дистальную часть зонда (кончик) располагали под углом 90° к горизонтальной поверхности «камня» и приводили в контакт с образцом. Эксперимент прекращали, когда на поверхности сетки не оставалось частичек разрушенного «камня», т. е. когда фрагментируемый образец был раздроблен на части менее 2 мм. Таким образом, критерием успешности эксперимента являлась фрагментация образца камня на кусочки размером меньше 2 мм. Каждый эксперимент с заданным типом и размером «камня» и зонда повторяли не менее 5 раз.

При заданной энергии и частоте импульсов регистрировали количество импульсов (для ЭИЛ) или накопленную энергию (для ЛЛ), необходимую для разрушения определенного «камня» заданным типом зонда. Эффективность ЭИЛ и ЛЛ сравнивали при близких уровнях энергии для обоих устройств, используя одинаковые типы камней и соответствующие диаметры зондов. В дальнейшем регистрируемые данные были пересчитаны для обоих случаев в количество импульсов и накопленную энергию, а также «чистое» время, необходимое для полной фрагментации камня на соответствующие части размером 2 и менее миллиметров.

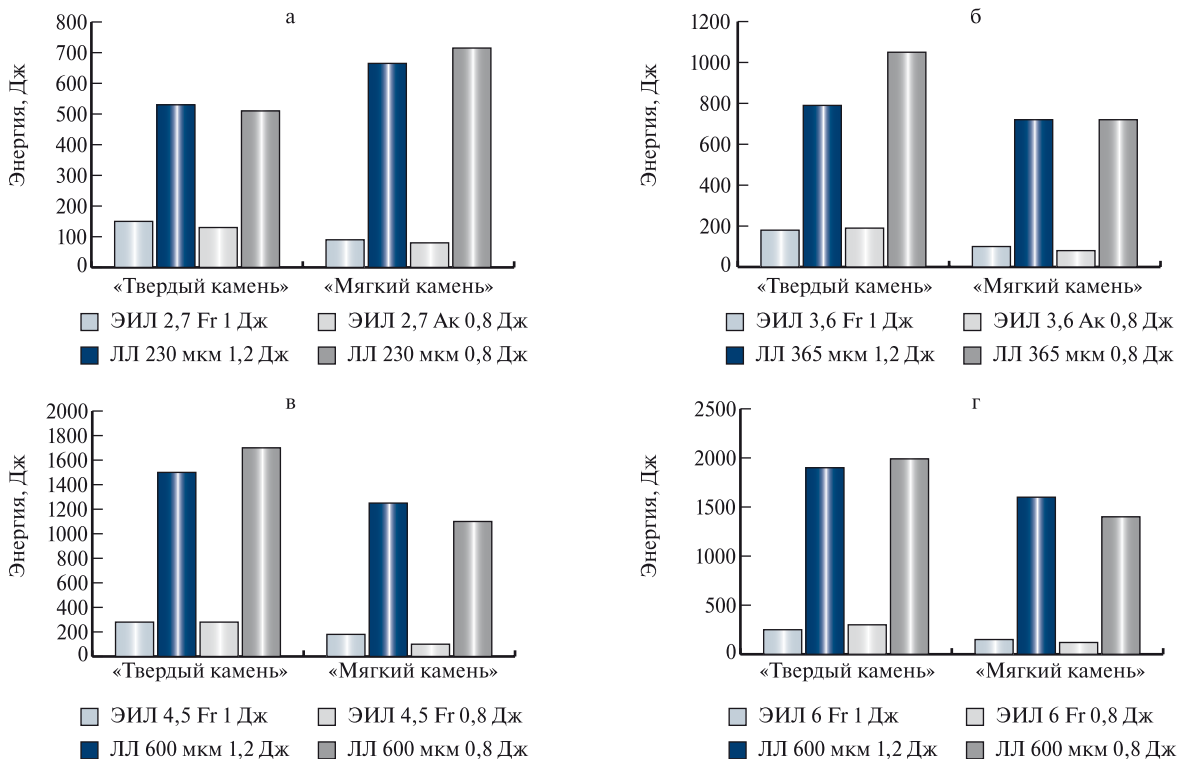


Рис. 5. Сравнение суммарной энергии, затраченной на фрагментацию «камней» для выбранных пар зондов и 365 мкм, «камень» 6x6x4 и 230 мкм, «камень» 5x5x4 мм; б — зонды 3,6 Fg а — зонды 2,7 Fg и 600 мкм, «камень» 8x8x4 мм; г — зонды 6 Fg мм; в — зонды 4,5 Fg мм.

В экспериментах использовали:

- наносекундный ЭИЛ Urolit-105M (“Lithtech Medical Ltd.” и “Medline Ltd.”, Израиль) (рис. 4, а); максимальную энергию импульса 1 Дж, максимальную частоту 5 Гц, максимальную выходную мощность 5 Вт;
- Ho:YAG ЛЛ Auriga (“StarMedTech”, Германия) (рис. 4, б), работающий в частотном режиме (до 20 Гц) с длиной волны 2080 нм и позволяющий передавать энергию импульса к “камню” до 3 Дж. Выходная мощность системы до 30 Вт.

Рабочие параметры оборудования для выполнения базовых сравнительных тестов, где устройства сравнивались при тех же уровнях энергии импульса, были следующими: для ЭИЛ минимальная примененная энергия импульса составила 0,8 Дж, максимальная – 1 Дж, для ЛЛ – 0,8 и 1,2 Дж соответствен-

но; число импульсов в пачке для ЭИЛ было 5, для ЛЛ – неограниченно; частота следования импульсов для обоих литотрипторов была равной 5, как и частотный режим, который был мультимодальным.

В дополнение к основному (базовому) эксперименту в лабораторных условиях была проведена оценка эффективности ЛЛ при более высоких, чем в базовом эксперименте, энергиях импульса. Лазерный литотриптор с зондом 365 мкм был исследован при разрушении искусственных “камней” при энергии импульса 1,6 Дж (“камень” 6х6х4 мм). Кроме того, были проведены тесты и с самым большим, изученным в этой работе лазерным зондом 600 мкм для энергий импульса 1,6, 2 и 2,5 Дж на образцах “камней” 8х8х4 и 8х8х5 мм. Для этих тестов использовали “твердые” и “мягкие” камни. Дополнительно исследовали эффективность ЛЛ при

Результаты испытаний

Т а б л и ц а 2

| Параметр | Esum, Дж | Количество импульсов | Время, с |
|--|----------|----------------------|----------|
| “Твердый камень”, ЭИЛ, энергия импульса E _{min} =0,8 Дж | | | |
| Зонд 2,7 Fг, образец 5х5х4 мм | 137±54 | 171±68 | 34±14 |
| Зонд 3,6 Fг, образец 6х6х4 мм | 171±21 | 214±27 | 43±5 |
| Зонд 4,5 Fг, образец 8х8х4 мм | 288±69 | 360±87 | 72±17 |
| Зонд 6 Fг, образец 8х8х5 мм | 290±67 | 363±84 | 73±17 |
| “Твердый камень”, ЛЛ, энергия импульса E _{min} =0,8 Дж | | | |
| Зонд 230 мкм, образец 5х5х4 мм | 524±75 | 655±94 | 131±19 |
| Зонд 365 мкм, образец 6х6х4 мм | 1010±121 | 1263±151 | 253±30 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х4 мм | 1718±364 | 2147±455 | 429±91 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х5 мм | 1984±86 | 2480±108 | 496±22 |
| Мягкий “камень”, ЭИЛ, энергия импульса E _{min} =0,8 Дж | | | |
| Зонд 2,7 Fг, образец 5х5х4 мм | 79±27 | 98±34 | 20±7 |
| Зонд 3,6 Fг, образец 6х6х4 мм | 77±10 | 96±13 | 19±3 |
| Зонд 4,5 Fг, образец 8х8х4 мм | 119±34 | 149±42 | 30±8 |
| Зонд 6 Fг, образец 8х8х5 мм | 97±16 | 121±20 | 24±4 |
| “Мягкий камень”, ЛЛ, энергия импульса E _{min} =0,8 Дж | | | |
| Зонд 230 мкм, образец 5х5х4 мм | 726±31 | 908±38 | 182±8 |
| Зонд 365 мкм, образец 6х6х4 мм | 724±111 | 905±139 | 181±28 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х4 мм | 1117±197 | 1396±246 | 279±44 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х5 мм | 1407±94 | 1758±117 | 356±21 |
| Твердый “камень”, ЭИЛ, энергия импульса E _{max} =1 Дж | | | |
| Зонд 230 мкм, образец 5х5х4 мм | 151±43 | 151±43 | 30±9 |
| Зонд 365 мкм, образец 6х6х4 мм | 30±9 | 154±32 | 31±7 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х4 мм | 285±70 | 285±70 | 57±14 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х5 мм | 236±43 | 236±43 | 47±9 |
| Твердый “камень”, ЛЛ, энергия импульса E _{max} =1,2 Дж | | | |
| Зонд 230 мкм, образец 5х5х4 мм | 539±102 | 449±85 | 90±17 |
| Зонд 365 мкм, образец 6х6х4 мм | 787±71 | 656±59 | 131±12 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х4 мм | 1510±350 | 1258±292 | 252±58 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х5 мм | 1858±204 | 1548±170 | 310±34 |
| Мягкий “камень”, ЭИЛ, энергия импульса E _{max} = 1 Дж | | | |
| Зонд 2,7 Fг, образец 5х5х4 мм | 87±8 | 87±8 | 18±2 |
| Зонд 3,6 Fг, образец 6х6х4 мм | 95±13 | 95±13 | 19±3 |
| Зонд 4,5 Fг, образец 8х8х4 мм | 160±29 | 160±29 | 32±6 |
| Зонд 6 Fг, образец 8х8х5 мм | 129±16 | 129±16 | 26±3 |
| Мягкий “камень”, ЛЛ, энергия импульса E _{max} =1,2 Дж | | | |
| Зонд 230 мкм, образец 5х5х4 мм | 664±83 | 553±69 | 111±14 |
| Зонд 365 мкм, образец 6х6х4 мм | 722±109 | 601±91 | 120±18 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х4 мм | 1256±173 | 1047±144 | 209±29 |
| Зонд 600 мкм, образец 8х8х5 мм | 1592±267 | 1328±223 | 265±46 |

Результаты испытаний ЛЛ при увеличении энергии импульса

Т а б л и ц а 3

| Параметр | Esum, Дж | Количество импульсов | Время, с |
|---|----------|----------------------|----------|
| “Твердый камень” | | | |
| Энергия импульса 1,6 Дж, зонд 365 мкм, образец 6x6x4 мм | 773±63 | 483±40 | 97±8 |
| Энергия импульса 1,6 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x4 мм | 1617±171 | 1011±107 | 202±21 |
| Энергия импульса 2 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x4 мм | 1770±187 | 885±94 | 177±19 |
| Энергия импульса 2 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x5 мм | 1992±167 | 996±85 | 199±17 |
| Энергия импульса 2,5 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x5 мм | 1735±223 | 694±89 | 139±18 |
| “Мягкий камень” | | | |
| Энергия импульса 1,6 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x4 мм | 1322±94 | 827±59 | 165±12 |
| Энергия импульса 2 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x4 мм | 1378±264 | 689±132 | 138±26 |
| Энергия импульса 2 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x5 мм | 1938±114 | 969±57 | 194±11 |
| Энергия импульса 2,5 Дж, зонд 600 мкм, образец 8x8x5 мм | 1623±238 | 649±95 | 130±19 |

различных мощностях (изменяли энергию импульса и частоту). Лазерный литотриптор с самым большим в этом исследовании лазерным зондом 600 мкм был исследован при используемой мощности 14,4, 24 и 30 Вт на образцах камней 8x8x4 и 8x8x5 мм. В экспериментах использованы только “твердые камни”.

После проведения тестов был выполнен статистический анализ результатов измерений. Критерием оценки существенного отличия полученных результатов для двух исследуемых приборов был выбран критерий p при уровне значимости не менее 0,05. Расчет проведен с использованием статистической программы IBM SPSS Statistics.

Результаты и обсуждение. Следует отметить, что число успешно фрагментированных “камней” в настоящей работе составляет 100%, т.е. во всех выполненных экспериментах образцы были разрушены на части размером менее 2 мм.

Суммарная энергия (Esum) и количество импульсов, необходимое для разрушения “камня”, а также “чистое” время, затраченное на фрагментацию “камня” определенного типа и размера, для двух сравниваемых видов литотрипторов в базовом эксперименте приведены в *табл. 2*.

Главным критерием сравнения эффективности приборов была выбрана суммарная энергия, затра-

ченная на разрушение “камня” и приводящая к его требуемой фрагментации. Для наглядности показатели Esum рассматриваемых пар зондов представлены на *рис. 5*.

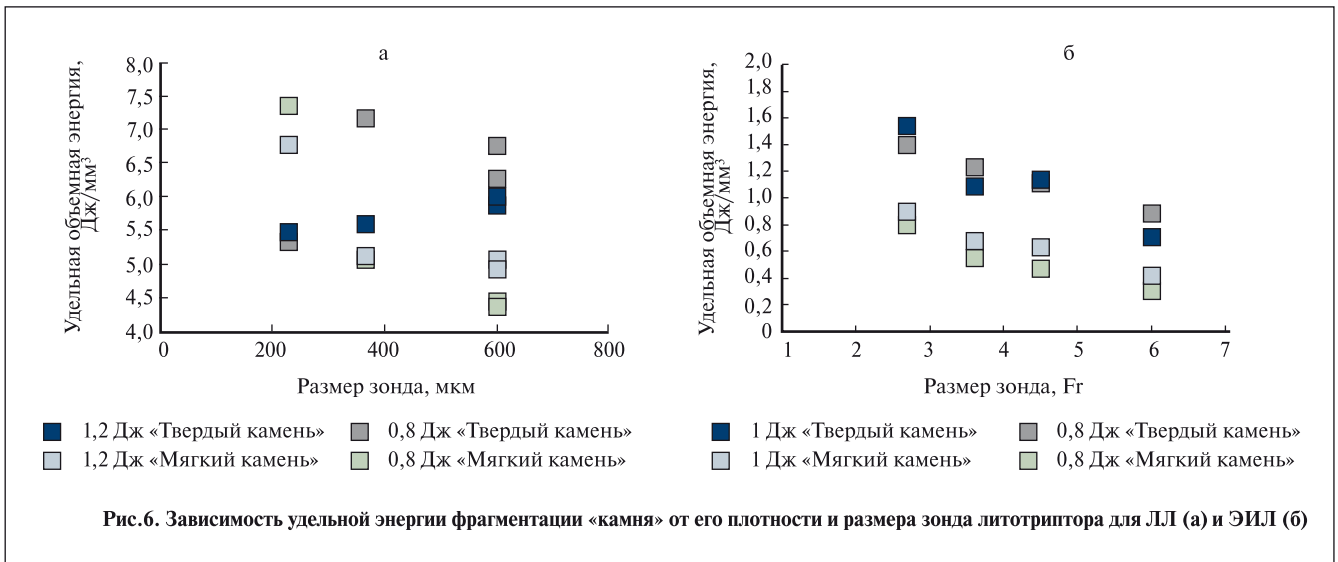
Результаты экспериментальных исследований по изучению эффективности ЛЛ, работающего при более высоких, чем в базовом эксперименте, энергиях импульса представлены в *табл. 3*. Результаты экспериментальных исследований эффективности ЛЛ, работающего при различных мощностях, приведены в *табл. 4*. Из приведенных в *табл. 2–4* и на *рис. 5* данных следует, что для всех проверенных типов образцов “камней” наносекундный ЭИЛ требует существенно более низкой суммарной энергии и меньшего, чем ЛЛ, времени для разрушения искусственных “камней”. Суммарная энергия разрушения, количество импульсов и время работы прибора во многих случаях различались почти на порядок ($p < 0,05$). При этом при работе с обоими литотрипторами удалось фрагментировать все образцы “камней” на части менее 2 мм.

Для разрушения “мягких камней” ЭИЛ всегда требовал заметно меньше энергии, чем для разрушения “твердых камней” ($p < 0,05$). В то же время при работе с ЛЛ часто затрачивалась примерно та же энергия, а иногда даже и большая, чем для разруше-

Результаты испытаний ЛЛ по разрушению “твердого камня” при увеличении мощности (зонд 600 мкм)

Т а б л и ц а 4

| Параметр | Esum, Дж | Количество импульсов | Время, с |
|--|----------|----------------------|----------|
| Энергия импульса 0,8 Дж, образец 8x8x4 мм, частота 18 Гц, мощность 14,4 Вт | 2379±138 | 2974±173 | 165±10 |
| Энергия импульса 3 Дж, образец 8x8x5 мм, частота 8 Гц, мощность 24 Вт | 2418±294 | 806±98 | 101±12 |
| Энергия импульса 2,5 Дж, образец 8x8x5 мм, частота 12 Гц, мощность 30 Вт | 2922±318 | 1169±127 | 97±11 |



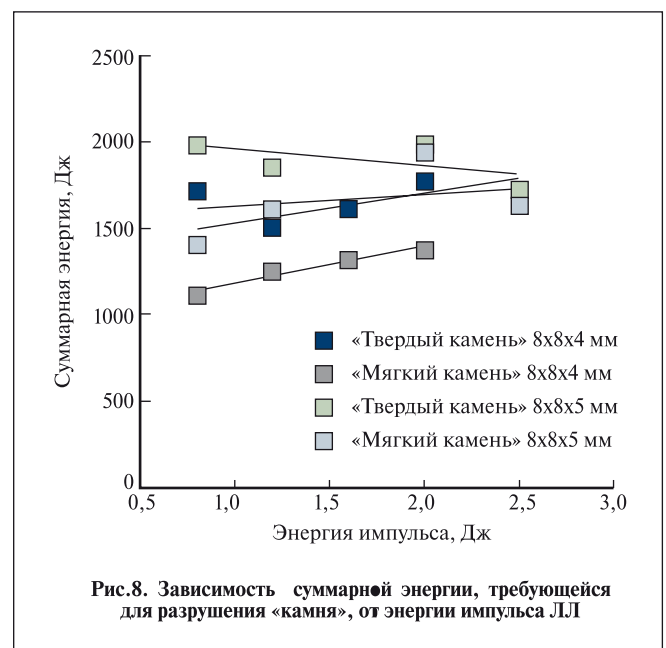
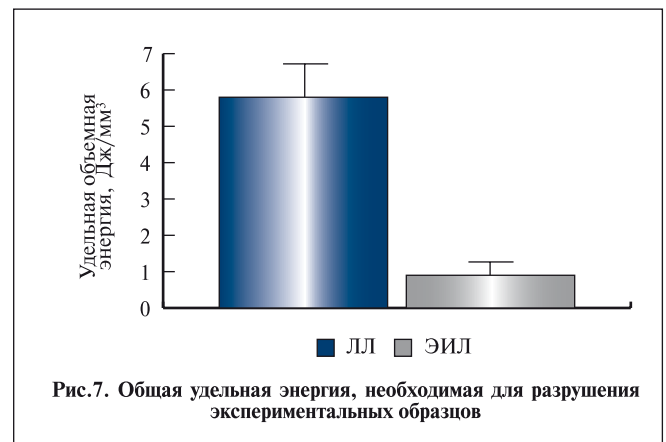
ния «твердого камня». Понятно, что действия сравниваемых литотрипторов различаются механизмом разрушения образцов, имеющих разную плотность (твердость), чем, по нашему мнению, и объясняется существенное различие полученных данных [8, 13]. Статистический анализ подтвердил наличие принципиального отличия выборок полученных результатов. Кроме значительного различия в самих регистрируемых показателях разброс их значений также был гораздо меньшим для ЭИЛ, чем для ЛЛ.

Принимая во внимание полученные результаты, представлялось интересным рассмотреть приведенную характеристику затраченной суммарной энергии для разрушения «камня» к объему его образца (удельную энергию фрагментации) и ее зависимость от размера зонда литотриптора (рис. 6).

Показано, что для ЛЛ не характерна явная зависимость удельной энергии импульса, приложенной к камню, от плотности материала образца и от диаметра зонда ($p < 0,05$), что, по-видимому, подтверждает известное мнение об относительной «безразличности» лазера к свойствам фрагментируемого материала. В то же время при работе с ЭИЛ продемонстрирована четкая зависимость удельной энергии от плотности разрушаемого материала: отмечается уменьшение удельной энергии, требуемой для разрушения «камня», при увеличении размера зонда ($p < 0,05$). При этом общий средний по всем полученным результатам уровень необходимой удельной энергии фрагментации «каменей» для ЭИЛ более чем в 6 раз ниже, чем для ЛЛ (рис. 7). Таким образом, для ЭИЛ требуются существенно более низкие значения E_{sum} для разрушения «камня» и, соответственно, затраченного для этого времени при сопоставимых параметрах импульсов.

В связи с этим нами была предпринята попытка определить параметры импульса ЛЛ, при котором возможно получить схожие с ЭИЛ результаты. Для этой цели были проведены дополнительные испытания (см. табл. 3). Как видно на рис. 8, увеличение энергии импульса ЛЛ более чем в 3 раза привело лишь к незначительным изменениям суммарной энергии, требующейся для разрушения «каменей», и даже наблюдалась тенденция к увеличению необ-

ходимой для фрагментации суммарной энергии с увеличением энергии импульса ЛЛ. На этом основании можно сделать следующий клинический вывод: при гольмиевой лазерной литотрипсии, если имеется необходимость раздробить «камень» до песка (трансуретральная пиелокаликотрипсия, «вко-



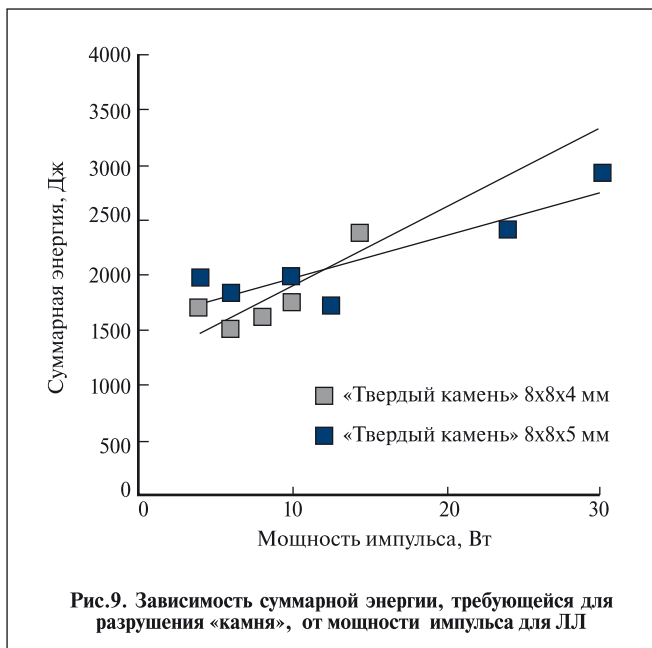


Рис.9. Зависимость суммарной энергии, требующейся для разрушения «камня», от мощности импульса для ЛЛ

лоченный" "камень" мочеочника и др.), не следует стремиться начинать дробление на высоких энергиях.

Дополнительно было проведено исследование работы ЛЛ при увеличении мощности передаваемого сигнала за счет изменения энергии импульса и его частоты (см. табл. 4). Полученные результаты приведены на рис. 9. Как и в предыдущем случае, увеличение прикладываемого импульса дало обратный результат и привело к повышению требуемой энергии для фрагментации образцов ($p < 0,05$).

Заключение. Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что для всех типов образцов камней в данном эксперименте наносекундный ЭИЛ требует существенно более низкой энергии и меньшего времени для разрушения "камней", чем ЛЛ, то есть по физическим параметрам является более эффективным для их дробления.

Действия сравниваемых литотрипторов отличаются механизмом разрушения образцов "камней", чем объясняется различное влияние плотности и твердости их образцов на полученные результаты. Так, при разрушении мягких "камней" для наносекундного ЭИЛ всегда требовалось затратить заметно меньше энергии по сравнению с "твердыми камнями". В то же время для лазерного литотриптора часто требовалась одна и та же энергия для разрушения как твердого, так и мягкого "камней", а иногда для "мягкого камня" требовалось затратить даже больше энергии, чем для "твердого".

Таким образом, в данном экспериментальном исследовании подтверждены различные варианты зависимости энергии импульсов и свойств "камней" при их разрушении для двух рассматриваемых методов контактной литотрипсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урология: Учебник / Под ред. Н.А. Лопаткина. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-МЕД, 2011. 815 с.: ил.
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. и др. Сравнительная

характеристика эффективности и безопасности применения различных типов контактных литотрипторов. Пленум правления Российского общества урологов. Саратов, 15–17 сентября 1998 г. М., 1998. С. 312–313.

4. Piergiovanni M., Desgrandchamps F., Cochand-Priollet B. et al. Ureteral and Bladder Lesions After Ballistic, Ultrasonic, Electrohydraulic, or Laser Lithotripsy. J. Endourol. 1994 ;8(4): 293–299.
5. Sofer M., Watterson J.D., Wollin T.A. et al. Holmium:YAG laser lithotripsy for upper urinary tract calculi in 598 patients. J. Urol. 2002;167:31–34.
6. Marks A.J., Teichman J.M. Lasers in clinical urology: state of the art and new horizons. World J Urol. 2007; 25(3): 227–233.
7. Santa-Cruz R.W, Leveillee R.J, Krongrad A. Ex vivo comparison of four lithotripters commonly used in the ureter: what does it take to perforate? J. Endourol. 1998;12(5):417–422.
8. Усов А.В., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсных технологий. СПб.: Наука, 2000. 160 с.
9. Гудков А.В., Бощенко В.С., Афонин В.Я. Контактная электроимпульсная литотрипсия. Урология. 2009;2:32–37.
10. Румянцев А.А., Дутов В.В., Беляев В.В. и др. Трансуретральная контактная электроимпульсная уретеропиелолитотрипсия. Урология. 2011;3:40–45.
11. Boshchenko V.S., Gudkov A.V., Afontin V.Y. et al. 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. European Urology – Supplements, 2012-02-01, e496.
12. Yunbo Liu, Pei Zhong. BegoStone – a new stone phantom for shock wave lithotripsy research. J. Acoust. Soc. Am. 2002;112(4):1268–1268.
13. Vassar G.J., Chan K.F., Teichman J. et al. Holmium: YAG Lithotripsy: Photothermal Mechanism. J. Endourology. 1999;13(3):181–190.

Поступила

COMPARATIVE EVALUATION OF EFFICACY OF ELECTROPULSE AND LASER LITHOTRIPTORS IN VITRO

A.G. Martov, V.M. Diamant, A.V. Borisik, A.S. Andronov, D.A. Dzhalilov

The article presents a comparative study of the nanosecond electropulse and holmium laser lithotriptors in vitro. Two types of samples simulating the «hard» and «soft» urinary stones were used; for their preparation stomatological ultrastrength plaster BegoStone was used. For the tests, four sizes of samples of stones in the cuboid shape were made. The sizes of the probes and stones, to some extent, simulated real clinical situation. In the experiments for Ho:YAG laser lithotripter (LL), three sizes of probes were used: 230, 365 and 600 microns; for electropulse lithotripter (EPL) - 2.7, 3.6, 4.5, and 6 Fr probes. A comparison of the effectiveness of lithotriptors in the experiments was performed for pairs of probes, which corresponded to a specific size of the stones. Comparative studies were performed in water at room temperature. «Stones» with specified size for each type of probe of lithotriptors were placed on stainless steel mesh with a mesh size 2x2 mm, immersed in water. Distal part of the probe (tip) was placed at an angle of 90° to the horizontal surface of the «stone» and brought into contact with the sample. The experiment was stopped when the surface of the mesh was free of particles of «stone» destroyed. Each experiment with the type and size of the «stone» and the probe was repeated at least 5 times. The results showed that nanosecond EPL requires much lower energy and time costs than the LL, ie, its physical parameters are more effective for the destruction of all types of samples stones. For the destruction of the «soft» stones, EPL always required much less energy than for the destruction of «hard» stones. At the same time, working with LL often required same energy, and sometimes even more than for the destruction of «hard» stone. For the two methods of contact lithotripsy, different depending on the pulse energy and the properties of the «stones» in their destruction is confirmed experimentally.

Key words: uroliths, contact lithotripsy, lithotripter, holmium laser lithotripter