

# В.С. ЧЕРНЕГА,

к.т.н., доцент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия, e-mail: v\_chernega@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-5054-0396

## C.H. EPEMEHKO,

заведующий урологическим отделением, «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки, г. Симферополь, Россия, e-mail: medicalyug@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5794-2029

## A.H. EPEMEHKO,

врач-уролог, «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки, г. Симферополь, Россия, e-mail: medicalyug@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5318-6561

## Н.П. ТЛУХОВСКАЯ-СТЕПАНЕНКО,

ассистент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Россия, e-mail: ahaulyalyalyaptaa@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7382-4671

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ТРАНСУРЕТРАЛЬНОЙ ГОЛЬМИЕВОЙ ЛИТОТРИПСИИ В ЛЕЧЕНИИ УРОЛИТИАЗА

### УДК 519.24:616.62-003.7-089.879

### DOI: 10.37690/1811-0193-2020-2-72-80

Чернега В.С.<sup>1</sup>, Еременко С.Н.<sup>2,3</sup>, Еременко А.Н.<sup>2,3</sup>, Тлуховская-Степаненко Н.П.<sup>1</sup> **Прогнозирование времени трансуретральной гольмиевой литотрипсии В лечении уролитиаза** (<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», кафедра информационных систем, г. Севастополь, Россия; <sup>2</sup> «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия; <sup>3</sup> Клинический медицинский многопрофильный центр Святителя Луки, г. Симферополь, Россия)

Аннотация. Введение. Для оценки длительности всей операции в целом по удалению мочевых конкрементов с целью выбора тактики проведения операции, рационального планирования использования операционного помещения и высокотехнологического оборудования, применяемого при лечении уролитиаза, требуется знание времени, затрачиваемого на дробление мочевых конкрементов. Это время в свою очередь состоит из интервала времени собственно разрушения камня и времени, затрачиваемого на дополнительные действия: осмотр места дробления, перемещение лазерного волокна к смещенному в результате ретропульсии камню, промывания области дробления и проч. В настоящее время отсутствуют методы расчета или прогнозирования этих интервалов времени.

*Цель:* разработать способ прогнозирования времени разрушения мочевых камней с учетом дополнительных затрат времени при использовании контактной литотрипсии гольмиевым лазером, чтобы на основе знания времени операции рационально выстраивать тактику лечения, планировать варианты операционного пособия и загрузку операционного помещения и высокотехнологического оборудования.

Материалы и методы. В работе приведены собственные результаты измерений in vivo интервалов времени, затрачиваемых на собственно разрушение мочевого камня и на вспомогательные действия, необходимые при проведении трансуретральной контактной литотрипсии, а также общее время полного разрушения конкремента. Дробление камней осуществлялось с помощью полуригидного и гибкого уретероскопов в мочеточнике и чашечно-лоханочной системе. В ряде случаев прибегали к перкутанному минидренированию ЧЛС. Использованы методы статистической обработки данных и пакет Statistics and Machine Learning Toolbox системы Матлаб для прогнозирования длительности процедуры разрушения конкрементов гольмиевым литотриптером Triple («Медоптотех»).

Результаты. Для прогнозирования общего времени, затрачиваемого на дробление мочевого камня предложена линейная регрессионная модель, в которой общее время представлено в виде суммы времени, затрачиваемого на собственно процесс дробления, и времени дополнительных затрат на выполнение вспомогательных манипуляций. К вспомогательным действиям относятся: промывание области дробления, репозиционирование оптического волокна по причине смещения его из-за ретропульсии камня и дыхательной экскурсии и проч. Время непосредственного дробления камня определяется на основе массы камня, рассчитанной по измеренным при КТ объеме и плотности, а также удельной скорости потери массы камня при дроблении гольмиевым лазером, энергии и частоты импульсов лазерного литотриптера. Время дополнительных затрат представлено в виде произведения времени непосредственного дробления камня на коэффициент дополнительных затрат. Путем измерений in vivo и статистической обработки данных получены средние и максимально допустимые значения коэффициентов дополнительных затрат при дроблении в различных частях мочевыделительной системы. Средние значения этих коэффициентов составляют: 5,44±2,42 при дроблении камней в ЧЛС полуригидным уретероскопом; 3,86±1,95 при использовании гибкого УРС; 8,92±3,13 при дроблении камней в различных отделах мочеточника и 1,36±0,62 при использовании методики mini drainage.

© В.С. Чернега, С.Н. Еременко, А.Н. Еременко, Н.П. Тлуховская-Степаненко, 2020 г.

h, al III i

#### 2020. Nº 2

Заключение. Получены данные экспериментальных исследований длительностей дробления мочевых конкрементов и интервалов времени дополнительных затрат на проведение вспомогательных манипуляций, выполняемых наряду с процедурой собственно дробления камней, а также предложен способ дополнительного промывания полости дробления, позволяющий сократить время дополнительных затрат при дроблении не менее, чем в 4 раза. Разработана математическая модель для вычисления продолжительности общих затрат на дробление, позволяющая более точно прогнозировать длительность операции контактной литотрипсии гольмиевым лазером в целом.

Ключевые слова: контактная литотрипсия, гольмиевый лазер, мочевые камни, МКБ, дополнительное промывание, прогнозирование длительности литотрипсии.

#### UDC 519 24.616 62-003 7-089 879

Chernega V.S.<sup>1</sup>, Eremenko S.N.<sup>2,3</sup>, Eremenko A.N.<sup>2,3</sup>, Tluhovska-Stepanenko N.P.<sup>1</sup> Prediction of time of transurethral holmium lithotripsy in urolitiaz's treatment ("Sevastopol State University, Sevastopol, Russia; <sup>2</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia; <sup>3</sup>St. Luke's Clinical Medical Multidisciplinary Center, Simferopol, Russia)

Abstract. Introduction. Rational planning of use of the operating room and the high-tech equipment used at treatment of urolithiasis requires knowledge of time spent for ablation of uric concrements which in turn consists of time interval actually of stone breaking and time spent for additional actions: survey of the place of fragmentation, movement of laser fiber to the displaced stone, changes of caliber of an ureteroscop and so forth. Now there are no methods of calculation or prediction of these intervals of time.

Purpose; to develop a way of prediction of time of fragmentation of uric stones taking into account additional expenses of time when using a contact lithotripsy the holmium laser that on the basis of knowledge of time of operation it is rational to plan loading of the operational room and the high-tech equipment.

Materials and methods. Own results of measurements of in Vivo of the intervals of time spent for actually destruction of a uric stone and for the auxiliary actions necessary at carrying out operation of a lithotripsy and also the general time of final fragmentation of a concrement are given in work. Fragmentation of concrements was carried out by means of rigidny and flexible urethroscop in a ureter and cup pelvis to a system. Additional irrigation of operational area by means of a needle was applied. Methods of statistical data processing and a Statistics and Machine Learning Toolbox package of the Matlab system for prediction of duration of the procedure of fragmentation of concrements a holmium lithotripter of Triple (Medoptotekh) are used.

Results. The linear regression model is offered for prediction of the general time on ablation of urinary stone which the general time is presented in the form of the sum of time ablation for actually process of breaking, and time of additional costs of performance of auxiliary manipulations. Treat auxiliary actions: washing of field of crushing, a movement of optical fiber because of the shift of its retropulsion of a stone and a respiratory excursion, need of change of caliber of an urethroscop, repeated pass through a urethra and a ureter and so forth. Time of direct breaking of a stone is defined on the basis of the mass of a stone calculated on by the holmium laser measured at KT the volume and density, specific speed of loss of mass of a stone when breaking, energy and frequencies of impulses of a laser lithotripter. Time of additional expenses is presented in the form of the work of time of direct breaking of a stone for coefficient of additional expenses. By measurements in vivo and statistical data processing average and maximum allowed values of coefficients of additional expenses when ablations in various parts of a urinary system are received. Average values of these coefficients are 5.44±2.42 when breaking stones in cup pelvis a system a rigid ureteroscop; 3.86±1.95 when using flexible ureteroscop; 8.92±3.13 when breaking stones in various part of a ureter and 1.36±0.62 when using for additional washing of field of breaking by means of a needle.

Conclusion. The obtained data of pilot studies of during of crushing of uric concrements and intervals of time of additional costs of carrying out the auxiliary manipulations which are carried out along with the procedure actually of crushing of stones and also the way of additional washing of a cavity of crushing allowing to reduce time of additional expenses when crushing by 4 times is offered. The mathematical model for calculation of duration of the total costs of crushing allowing to predict more precisely duration of operation of a contact lithotripsy the holmium laser in general is developed.

Keywords: contact lithotripsy, holmium laser, uric stones, urolithiasis, prediction of a lithotripsy duration.

#### введение

онтактная гольмиевая литотрипсия при лечении мочекаменной болезни (МКБ) является «золотым стандартом» современной урологии ⊾и относится к разряду высокотехнологических операций, характеризующихся довольно высокой стоимостью. Поэтому актуальной задачей является оптимальное планирование операций, при котором степень загрузки операционного помещения и высокотехнологического оборудования будет максимальной. Это позволит увеличить количество плановых операций и приведет к уменьшению очереди ожидающих операции, увеличить доход лечебно-профилактического учреждения. Кроме этого, от продолжительности операции зависит выбор анестезиологического пособия, планирование литотрипсии, что особенно актуально при сложных формах нефролитиаза. Для осуществления такого планирования требуется на основании диагноза больного и резуль-

# технологии

татов предоперационного обследования спрогнозировать (оценить) время предстоящей операции и разработать мероприятия по его уменьшению.

В настоящее время проблеме прогнозирования длительности различного вида хирургических операций и оптимального планирования их проведения уделяется значительное внимание в зарубежных литературных источниках. Критерием оптимальности является степень загруженности операционного помещения и дорогостоящего высокотехнологического оборудования [1, 2].

В данной работе рассматривается проблема планирования операционного времени в урологическом отделении при выполнении контактной лазерной литотрипсии. В урологии до настоящего времени планирование операции литотрипсии базируется преимущественно на среднестатистических данных лечебного заведения о длительности операции литотрипсии и на интуиции и опыте хирургов. Оценка врачей длительности предстоящей литотрипсии, как правило, завышенная (пессимистическая). Как показал анализ планов операций в урологических отделениях ЛПУ [3], эти оценки в 1,5-2 раза могут превышать реальное время проведения литотрипсии. Это приводит к недогрузке операционных залов и простаивания высокотехнологического оборудования, увеличения времени нахождения больного в стационаре за счет меньшей пропускной способности операционной.

Одними из первых работ, в которых предпринята попытка спрогнозировать время дробления мочевых камней при контактной литотрипсии гольмиевым лазером являются статьи [3, 4]. Однако в этих работах оценивается только «чистое» время дробления конкрементов, без учета дополнительных временных затрат. Дополнительные затраты времени Т<sub>лз</sub> вызваны тем, что в процессе воздействия лазерного импульса на мочевой камень происходит поглощение лазерного излучения камнем, что приводит к образованию микрократера на поверхности камня и абляции (испарению) части вещества, которое разлетается в виде аэрозоля твердых и жидких частиц. Микровзрыв на поверхности камня приводит к турбулентному замутнению физиологической жидкости, окружающей камень, в связи с чем резко ухудшается видимость операционного поля. Для улучшения видимости проводится орошение (промывание) места расположения эндоскопа до исчезновения замутнения. Время промывания относится к непроизводительным

затратам процедуры дробления. Кроме этого, при выбросе аэрозоля камень в почечной лоханке или в мочевыводящих путях смещается за счет сил ретропульсии [5]. В связи с этим камень отскакивает от оптического волокна, что приводит к потере операционного времени, вызванной необходимостью осмотра места дробления и перемещения хирургом лазерного волокна к смещенному камню. К непроизводительным затратам относятся также потери времени на коррекцию положения лазерного волокна из-за смещения камня, происходящего вследствие дыхательной экскурсии и проч.

Целью исследования является прогнозирование времени дробления камня при известном объеме камня и его рентгенологической плотности с учетом дополнительных затрат времени на его фрагментацию, а также разработка способа уменьшения времени этих затрат.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным материалом для теоретических исследований послужили результаты собственных измерений *in vivo* «чистого» времени фрагментации конкремента и продолжительности дополнительных временных затрат на промывание области литотрипсии, на компенсацию позиционирования оптического зонда по причине смещения камня в результате ретропульсии и дыхательной экскурсии, а также других дополнительных манипуляций.

Всего было обследовано 83 больных. Из них 38 женщин и 45 мужчин. В предоперационном периоде пациенты проходили КТ мочевыделительной системы (МВС). Камни располагались в ЧЛС почки и в различных отделах мочеточника. Объем камня и его средняя плотность определялась на основании КТ-обследования и обработки результатов с помощью программы Inobitec DICOM Viewer Professional. Доступ к камню осуществлялся по стандартной трансуретральной методике с помощью полуригидного или гибкого уретероскопа. Объем камней колебался от 0,065 до 4,98 см<sup>3</sup>. Средняя рентгенологическая плотность составляла от 390 до 2400 НИ. Дробление осуществлялось гольмиевым лазером отечественного производства серии Triple с длиной волны лазерного излучения 2,1 мкм и диаметром оптического зонда 600, 400 и 270 мкм. Фрагментация камней выполнялась при энергиях импульсов от 0,8 до 2,5 Дж преимущественно при частоте импульсов 5-10 Гц. Литотрипсия проводилась до дисперсного состояния или мелких осколков до 1 мм. По показаниям прибегали к внутреннему

### 2020, Nº 2

стентированию почки. Интраоперационных осложнений не было. Пациенты выписывались на 1-3 сутки после операции.

Измерения временных интервалов проводились при локализации камней в чашечно-лоханочной системе (ЧЛС) правой (ПП) или левой (ЛП) почки либо в различных участках мочеточника (МТ) при осуществлении дробления следующим способом:

а) камней в ЧЛС с использованием контактной ригидной пиелокаликолитотрипсии (РПКЛТ);

б) камней в ЧЛС с использованием контактной ригидной пиелокаликолитотрипсии и дополнительным промыванием полости операционного поля с помощью иглы (РПКЛТ-И);

в) конкрементов в ЧЛС применением контактной фибропиелокаликолитотрипсии (ФПКЛТ);

г) конкрементов, локализованных в различных сегментах мочеточника с использованием ригидного уретероскопа (УЛТ).

Измерение временных интервалов отдельных этапов процесса дробления производилось путем анализа видеозаписи операции литотрипсии, выполненной эндовидеокамерой типа ENDOCAM® Performance HD, с помощью профессиональной программы редактирования и монтажа видео- и аудиопотоков Sony Vegas 16.0. На временной оси, выводимой на экран персонального компьютера, врач, проводивший литотрипсию, на основе просмотра в специальном окне программы Vegas 16.0 хода операции, ставил временные отметки, по которым измерялось время, затраченное на ту или иную процедуру. Измерение временных интервалов выполнялось с точностью до 0,1 с. Обработка данных осуществлялась с помощью табличного процессора Exel и пакета Statistics Toolbox системы Matlab.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи с тем, что время дополнительных затрат  $T_{\rm rs}$  зависит от объема камня, его плотности и места локализации, а «чистое» время собственно дробления камня под воздействием лазерных импульсов  $T_{\rm rs}$  также зависит от этих параметров, то общее время выполнения литотрипсии конкремента  $T_{\rm rs}$  можно представить в следующем виде:

$$T_{_{\rm JT}} = T_{_{\rm J}_{\rm q}} + T_{_{\rm J}_{\rm J}} = T_{_{\rm J}_{\rm q}} + K_{_{\rm J}_{\rm J}} T_{_{\rm J}_{\rm q}} = T_{_{\rm J}_{\rm q}} (1 + K_{_{\rm J}_{\rm J}}), \quad (1)$$

где  $T_{_{\rm A4}}$  – «чистое» время разрушения камня под воздействием импульсов лазерного литотриптера;  $K_{_{\rm PA}}$  – коэффициент дополнительных затрат. В статье [3] показано, что прогнозировать «чистое» время дробления мочевого камня *Т*дч под воздействием импульсов лазерного литотриптера целесообразно на основе среднего значения коэффициента удельной величины потери единицы массы камня, представляющего собой отношение изменения массы камня на единицу затраченной энергии лазерного излучения и являющейся константой для данного типа лазерного литотриптера:

$$\gamma = m / E_{\rm cym} \, [{\rm M}\Gamma / {\rm Д} {\rm M}], \qquad (2)$$

где *m* – общая масса камня в *мг*, *E*<sub>сум</sub> – суммарная энергия лазерного излучения в Джоулях, затраченная на полное разрушения камня данной массы.

Как показали исследования авторов [3], значение коэффициента  $\gamma$  при идеальных условиях дробления (in vitro) гольмиевым литотриптером является постоянной величиной. В реальных условиях (in vivo), под воздействием ряда случайных факторов, коэффициент  $\gamma$  колеблется в незначительных пределах около своего среднего значения. Это значение в процессе проведенных нами дополнительных испытаний (in vivo) уточнено и для литотрипсии гольмиевым лазером равно 0,402 ± 0,11 *мг/Дж*.

При прогнозировании длительности разрушения камня при контактной лазерной литотрипсии масса камня, по сравнению с его объемом, является более информативной единицей, так как она зависит прямо пропорционально как от объема камня V, так и от его химического состава и физической структуры. Масса камня m до операции может быть определена in vivo на основе его V объема, измеренного при KT, и физической плотности  $\rho$  по формуле:

$$m = V \times \rho, \tag{3}$$

где  $\rho$  – физическая плотность камня в *г/см<sup>3</sup>*.

Однако при компьютерной томографии определяется только рентгенологическая плотность, измеряемая в единицах Хаунсфилда (HU). Для перехода от рентгенологической плотности к физической целесообразно воспользоваться формулой, предложенной в работе [6], полученной авторами путем регрессионного анализа экспериментальных данных:

$$\rho = 1,539 + 0,000485 \times \text{HU} [\Gamma/\text{cm}^3].$$

Ожидаемое «чистое» время дробления камня  $T_{\rm дчо}$ , при заданных энергии и частоте импульсов гольмиевого литотриптера, можно вычислить на основе, рассчитанной по формуле (3) массы камня *т*:



#### и информационные ТЕХНОЛОГИИ

 $T_{\rm дчо} = m /(\gamma \times F_i \times E_i),$  (4) где m – масса камня в миллиграммах;  $E_i$  –значение энергии импульса в джоулях (Дж);  $F_i$  – частота следования импульсов лазера с  $E_i$  энергией в герцах (Гц);  $\gamma = 0,402 \pm 0,11$  мг/Дж.

Энергию и частоту импульсов определяет врач до начала операции на основании данных предоперационного обследования, места расположения и размеров камня, опыта предыдущих операций.

Длительность интервала времени дополнительных затрат на литотрипсию представляет собой стохастический процесс, являющийся суммой независимых случайных процессов, отображающих временные интервалы выполнения вспомогательных этапов операции, длительность которых зависит от многих факторов. Получить аналитическое выражение для вычисления коэффициента дополнительных затрат не представляется возможным. Он может быть получен только путем статистических испытаний, осуществляемых при проведении реальных операций контактной лазерной литотрипсии.

Время дополнительных затрат при дроблении конкрементов в мочеточнике и дроблении в чашечно-лоханочной системе (ЧЛС) почки в общем случае различаются.

Для измерения временных интервалов времени «чистого» дробления и интервалов, затрачиваемых на выполнение необходимых вспомогательных действий, использовалась триал-версия профессионального редактора видеосъемки типа Sony Vegas 16.0, установленного на персональном компьютере. Этот редактор выводит на экран монитора компьютера окно, в котором можно просматривать с регулируемой скоростью видеосъемку, а также временную ось с движущейся меткой, соответствующей времени отображаемого кадра по отношению к началу видеозаписи. Врач, проводивший операцию, в процессе просмотра видеозаписи этой операции проставляет на временной оси метки, соответствующие тому или иному этапу литотрипсии. С помощью меток определяются временные интервалы выполнения этапов литотрипсии. Этот процесс показан на *рис. 1.* 

Точное фактическое значение «чистого» времени дробления  $T_{\rm дч\phi}$  определялось на основании количества импульсов  $N_i$ , затраченных на дробление камня определенной массы (или размера) и частоты следования импульсов  $F_i$  лазерного литотриптера по формуле:

$$T_{\rm gup} = N_{\rm i} / F_{\rm i}.$$
 (5)

На основе проведенных измерений суммарного общего времени литотрипсии  $T_{\rm nr}$ , отсчитываемого от момента начала дробления до его завершения, вычислялся коэффициент дополнительных затрат, определяемый отношением фактического времени дополнительных затрат  $T_{\rm лзф}$  и фактического времени, в течение которого происходит собственно разрушение конкремента («чистое» время дробления)  $T_{\rm rayd}$ 

$$K_{_{III}} = (T_{_{III}\Phi} - T_{_{III}\Phi}) / T_{_{III}\Phi}.$$
 (6)

В *таблице 1*, в качестве примера, приведена часть данных измерений in vivo ожидаемых  $T_{\rm дчo}$  и  $T_{\rm rro}$ , и фактических  $T_{\rm дч\phi}$  и  $T_{\rm rro}$  интервалов времени, затрачиваемых на полное разрушение камня («чистое» дробление) и на необходимые дополнительные действия  $T_{\rm nra}$ , обеспечивающие процесс



Рис. 1. Вид главного окна программы Vegas 16.0 с окном с текущим кадром видеосъемки и временной осью с расставленными метками начала этапов литотрипсии

#### www.idmz.ru

#### 2020, Nº 2

Таблица 1

Возраст/ пол больного	Локализация	Масса, г	Т <sub>дчо</sub> расчет., мин	Т <sub>дчф</sub> факт., мин	Т <sub>лтф</sub> , мин	Т <sub>дзф</sub> , мин	$K_{_{ m J3}}$	Способ дробления
31/м	Лоханка ПП	2,44	0,91	1,08	7,15	6.07	5,6	РПКЛТ
57/ж	Лоханка ЛП	4,13	15,78	12,75	41,51	28,77	2,2	РПКЛТ
56/м	Лоханка ЛП	0,262	1,17	1,16	6,94	5,78	5,0	РПКЛТ
59/ж	Лоханка ЛП	1,774	12,35	11,94	24,92	12,97	1,1	РПКЛТ-И
50/м	Лоханка ПП	2,074	6,2	5,54	12,02	6,48	1,2	РПКЛТ-И
56/ж	Лоханка ЛП	2,465	11,0	14,64	36,57	21,53	1,5	ФПКЛТ
74/m	Чашечка ЛП	1,01	7,17	7,55	30,78	23,22	3,1	ФПКЛТ
64/ж	н/З ЛМТ	0,037	0,25	0,244	3,43	3,19	13,1	УЛТ
65/м	в/З ЛМТ	0,719	3,07	2,57	24,02	21,44	8,3	УЛТ

## Длительность фактических интервалов времени «чистого» и общего дробления, времени и коэффициента дополнительных затрат при различных способах дробления

фрагментации камня при различных способах его дробления, а также коэффициент дополнительных затрат, вычисленный на основании (5).

В связи с тем, что вид и общая продолжительность дополнительных затрат зависит от ряда случайных факторов, рассмотренных выше, то коэффициент дополнительных затрат представляет собой случайную положительную величину, изменяющуюся от некоторого минимального K<sub>min</sub> до максимального К<sub>тах</sub> значения. Обработка полученных при измерениях данных показала, что плотность распределения К<sub>та</sub> может быть аппроксимирована бета-распределением. Бета-распределение, также как и широко используемое нормальное распределение, задаётся двумя параметрами –  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$ . Однако в отличие от нормального, всегда имеющего форму колокола, бета-распределение обладает гораздо большей гибкостью. В зависимости от параметров  $\alpha$  и  $\beta$  оно может принимать форму равномерного распределения, вогнутую форму (колодца) или выпуклую, близкую к нормальному распределению.

На основе вычисленного по экспериментальным данным среднего значения коэффициента дополнительных затрат  $K_{\rm дз}$  и стандартного отклонения, а также минимального  $K_{\rm min}$  и максимального значения  $K_{\rm max}$  этого коэффициента по формулам [7] определены параметры бета-распределения  $\alpha$  и  $\beta$ .

С учетом этих параметров путем использования функции пакета Statistics Toolbox системы Matlab  $f = betapdf(x, \alpha, \beta)$  для построения плотности бетараспределения [8] рассчитана зависимость плотности распределения для нормированных значений коэффициента дополнительных затрат  $K_{\pi\pi}$  с параметрами бета-распределения *α* = 1,7776; *β* = 3,4148 при дроблении в ЧЛС с помощью полуригидного уретероскопа. График этой функции распределения изображен на *рис. 2а*.

Переход от нормированных значений параметра *x* к действительному значению коэффициента дополнительных затрат выполняется по формуле:

$$K_{\rm max} = x \left( K_{\rm max} - K_{\rm min} \right) + K_{\rm min}.$$
 (7)

График зависимости плотности распределения для действительных значений  $K_{\rm дз}$  при тех же значениях параметров бета-распределения изображен на *рис. 26.* Среднее значение коэффициента дополнительных затрат составило 5,44 при стандартном отклонении, равном 2,42.

На основании плотности вероятности  $f = betapdf(x, \alpha, \beta)$  можно рассчитать вероятность того, что нормированное значение коэффициента дополнительных затрат не превысит некоторого наперед заданного значения *хтах.* Для нахождения этой вероятности необходимо вычислить определенный интеграл:

$$P(x \le x \max) = \int_{x \min=0}^{x \max} f(x) dx.$$

При вычислении такого интеграла используется функция из Statistics Toolbox системы Matlab [8]:

## $P = quad(betapdf', xmin, xmax, 1. e-6, 0, \alpha, \beta).$

Графики вероятности того, что коэффициент дополнительных затрат  $K_{\rm дз}$ , при дроблении конкрементов в ЧЛС с помощью полуригидного УРС,



# технологии



Рис. 2. Графики зависимости плотности вероятности коэффициентов дополнительных затрат для нормированных (a) и действительных значений коэффициентов  $K_m$  (b) при дроблении полуригидным УРС в ЧЛС

не превысит заданное значение для нормированных и действительных значений коэффициентов  $K_{_{дз'}}$ построенные на основании данной формулы, изображены соответственно на *рис. За* и *Зб*.

Из графика За видно, что для обеспечения 95% вероятности того, что нормированное значение коэффициента дополнительных затрат не превысит некоторого максимально допустимого значения *xmax*, нормированное значение этого коэффициента должно быть выбрано равным 0,7. При *xmax* = 0,7 вероятность *P* = 0,9551. Нормированная величина *xmax* = 0,7 согласно (7) соответствует действительному значению  $K_{\rm дз}$  =10,25. Это означает, что при выборе  $K_{\rm дз-доп}$  =10,25 в 95% случаев прогнозируемое (ожидаемое) время полного дробления конкремента в ЧЛС согласно (1) не превысит величины:

$$T_{\rm jrk} = T_{\rm gro} \left(1 + K_{\rm g3-gon}\right) = 11,25 T_{\rm gro}$$

Аналогичным образом получены параметры бета-распределения коэффициента дополнительных затрат при дроблении камней в ЧЛС с помощью гибкого уретероскопа. Максимальное значение коэффициента дополнительных затрат



Рис. 3. Графики вероятности того, что коэффициент дополнительных затрат  $K_{_{\!R}\!}$ не превысит заданное значение для нормированных (а) и действительных значений коэффициентов  $K_{_{\!R}\!}$  (б) при дроблении в ЧЛС полуригидным уретероскопом

## 2020, Nº 2

при использовании гибкого уретероскопа снизилось в 2 раза. На *рис. 4* показаны зависимости плотности распределения для нормированных (*a*) и действительных (*б*) значений коэффициента дополнительных затрат  $K_{\rm A3}$  с параметрами бета-распределения  $\alpha = 0,5996; \beta = 0,6567.$ 

Среднее значение коэффициента дополнительных затрат составило 3,86 при стандартном отклонении, равном 1,99. Для обеспечения 95% вероятности того, что действительное значение  $K_{_{23}} \le K_{_{23-доп}}$ , допустимое значение этого коэффициента должно быть не менее 6,7.

При дроблении конкрементов в различных частях мочеточника среднее значение коэффициента дополнительных затрат равно 8,92 при стандартном отклонении 2,13. Максимальное значение  $K_{\rm дз}$  в этом случае составило 15, а минимальное 5,0. Бета-параметры плотности распределения значений длительности дополнительных затрат при этом равны:  $\alpha = 0,5596$ ;  $\beta = 0,866$ . Значение коэффициента дополнительных затрат  $K_{\rm дз-доп}$ , при котором прогнозируемое время полного время дробления конкремента в мочеточнике не превысит величины, вычисленной по формуле (1), должно быть равным 13,6.

Одним из факторов, существенно влияющим на увеличение дополнительных затрат времени при дроблении конкрементов, является резкое ухудшение видимости из-за выброса микрочастиц разрушающегося конкремента после воздействия лазерного импульса на камень. Хирург вынужден

ожидать, пока в результате промывания операционного поля снова станут видимыми камень и зонд, и можно продолжить процесс дробления.

Для уменьшения времени ожидания в сложных случаях (инфицированные камни, ураты и фосфаты, большая масса конкремента, небольшой объем ЧЛС) в интраренальной хирургии применялась авторская методика «mini drainage» чрезкожного микродренирования ЧЛС. Суть методики состоит в следующем. Под УЗИ-контролем выполняется чрезкожная пункция через одну из чашек иглой 17,5-19 G. Тем самым значительно улучшается видимость операционного поля и снижается компрессия ЧЛС ирригационным раствором. Через мини-дренаж осуществляется эвакуация микрочастиц и уменьшается вероятность развития пиеловенозных рефлюксов, интра- и послеоперационных воспалительных осложнений. После окончания литотрипсии дренажная игла удаляется. Благодаря использованию этой методики время (коэффициент) дополнительных затрат на выполнение необходимых действий, характерных для контактной литотрипсии гольмиевым лазером, существенно уменьшилось. Так, среднее значение коэффициента дополнительных затрат при дроблении камней в ЧЛС посредством полуригидного УРС и использовании дополнительного промывания с помощью иглы уменьшилось с 5,44± 2,42 до 1,363± 0,62, что практически в 4 раза сократило общее время, затрачиваемое на дробление камня. Бета-параметры плотности распределения



Рис. 4. Графики зависимости плотности вероятности коэффициентов дополнительных затрат для нормированных (a) и действительных значений коэффициентов Кдз (б) при дроблении гибким УРС

## и информационные ТЕХНОЛОГИИ

значений длительностей дополнительных затрат при этом равны:  $\alpha$  = 1,64;  $\beta$  = 3,297;  $K_{\min}$  = 0,3;  $K_{\max}$  = 3,5.

Следует отметить, что при расчете по формуле (1) длительности общего прогнозируемого (ожидаемого) времени литотрипсии  $T_{\rm лко}$ , следует подставлять в формулу верхнюю границу ожидаемого чистого времени дробления камня  $T_{\rm дчо}$ . Это время вычисляяется по формуле (4) при минимальном значении коэффициента  $\gamma = 0,402 - 0,11 = 0,292$ .

Сравнение прогнозируемого и фактического времени выполнения трансуретральной гольмиевой литотрипсии показало, что абсолютная погрешность прогнозирования составила ± 4,5 мин., что на настоящее время, при общей длительности операции 80–90 мин., является приемлемым значением.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований установлено, что длительность трансуретральной контактной лазерной литотрипсии можно представить в виде суммы длительностей интервалов времени, затрачиваемых на собственно дробление мочевых конкрементов и интервалов времени дополнительных затрат на проведение вспомогательных манипуляций, выполняемых наряду с процедурой собственно дробления камней, а время дополнительных затрат связано с интервалом собственно дробления коэффициентом дополнительных затрат. Установлено, что коэффициенты дополнительных затрат являются случайными величинами, плотность вероятности которых может быть аппроксимирована бета-распределением. Экспериментальным путем получены статистические характеристики распределений коэффициентов дополнительных затрат при различных способах дробления камней, локализованных в ЧЛС и различных сегментах мочеточников. Предложен способ вспомогательного промывания полости дробления, позволяющий сократить время дополнительных затрат при дроблении практически в 4 раза. Разработана математическая модель для вычисления продолжительности общих затрат на дробление, позволяющая более точно прогнозировать длительность операции контактной литотрипсии гольмиевым лазером в целом. Установлено, что при использовании такой модели абсолютная погрешность прогнозирования длительности контактной лазерной литотрипсии не превышает ± 4,5 мин, что при общей длительности операции 1,5-2 часа является приемлемой величиной.

# ЛИТЕРАТУРА



- 1. *Gillespie Brigid M., Chaboyer Wendy, Fairweather Nicole.* Factors that influence the expected length of operation: results of a prospective study. BMJQual Saf. 2012; 21: P. 3–12. doi:10.1136/bmjqs-2011–000169.
- Brown Pearly T., DNP, RN, CNOR, P.T. (2017). A Retrospective Analysis of Surgeon Estimated Time and Actual Operative Time to Develop an Efficient Operating Room Scheduling System. URL: https://hsrc. himmelfarb.gwu.edu/son\_dnp/2 (Дата обращения: 04.12.2019).
- Чернега В.С., Тлуховская-Степаненко Н.Р., Еременко А.Н., Еременко С.Н. Оценка скорости фрагментации мочевых камней при контактной литотрипсии гольмиевым лазером. Урология. 2018. № 5. С. 37–40.
- **4.** Чернега В.С., Тлуховская-Степаненко Н.П., Еременко С.Н., Еременко А.Н. Сетевая модель для оценки длительности медицинского технологического процесса лазерной контактной литотрипсии. Врач и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 75–81.
- Kamal W., Kallidonis P., Koukiou G., Amanatides L., Panagopoulos V., Ntasiotis P. and Liatsikos E. Stone Retropulsion with Ho: YAG and Tm: YAG Lasers: A Clinical Practice-Oriented Experimental Study. Journal of Endourology. – 2016. – V. 30. – № 11. – P. 1145–1149. DOI: 0.1089/end.2016.0212.
- **6.** *Кузьмичева Г.М., Антонова М.О., Руденко В.И. и др.* Методология изучения образования мочевых камней // Фундаментальные исследования. 2012. № 9–1. С. 193–198. URL: http://www. fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30202 (Дата обращения: 16.10.2019).
- 7. Олейникова С.А. Аппроксимация закона распределения суммы случайных величин, распределенных по закону бета // Кибернетика и программирование. 2015. № 6. С. 35–54. DOI: 10.7256/2306–4196.2015.6.17225. URL: http://e-notabene.ru/kp/article\_17225.html (Дата обращения: 16.10.2019).
- 8. Probability density functions beta distribution. Russian (Функции плотности вероятности бета-распределения). URL: http://matlab.exponenta.ru/statist/book2/3/betapdf.php (Дата обращения: 04.12.2019).