

Оценка эффективности инвазивного акустического воздействия при санации нефростом

Аннотация

В результате проведенных исследований по повышению эффективности санации нефростом от нежелательных последствий наружного дренирования, в частности инкрустации, предложен метод инвазивного ультразвукового воздействия и разработан способ, обеспечивающий санацию мочеточниковых стентов. Показано, что ультразвуковое озвучивание мочеточникового стента является результативным и безопасным способом уменьшения солевой обструкции, который может быть рекомендован к применению в составе комплекса лечебных мероприятий, направленных на профилактику обструктивного пиелонефрита.

Введение

Многие врожденные и приобретенные заболевания органов мочеполовой системы являются объектом хирургических вмешательств. При обструктивных уропатиях основным методом лечения является дренирование чашечно-лоханочной системы почки. Существуют два варианта: стентирование мочеточников (внутреннее дренирование: ретроградное введение в мочеточник специальной трубки – стента между лоханкой почки и мочевым пузырем) и чрескожная пункционная нефростомия (наружное дренирование: пункционное введение дренажной трубки – нефростомы в полостную систему почки) [1]. При оказании неотложной помощи последний способ является более предпочтительным и распространенным. И если продолжительность дренирования определяется клинической ситуацией, то эффективность функционирования конкретного дренажа у конкретного пациента, а значит, и необходимость повторных вмешательств по его замене на новый, определяется скоростью развития его обструкции.

Одной из основных причин, лежащих в основе осложнений дренирования, является отложение солей на внутренней и внешней поверхностях дренажа, а также образование биопленок между ним и слизистой оболочкой мочевыводящих путей [2]. Эти два феномена взаимообуславливают и взаимоотягощают друг друга. Адгезия солей магния и аммония приводит к обструкции дренажа в 50...74 % [3].

В результате тематического поиска в следующих базах данных: Embase, Medline, Google Scholar, Scopus – по запросам с ключевыми словами nephrostomy tube, incrustation, prevention не обнаружено иссследовательских работ, которые предлагают меры профилактики осложнений данного вида дренирования верхних мочевыводящих путей. Однако авторы многочисленных статей указывают на большие сложности, возникающие при замене инкрустированных нефростом [4]-[7]. При потере адекватной дренажной функции сама нефростома становится источником инфекции, приводя к развитию осложнений в виде обструктивного пиелонефрита, что требует более частых профилактических замен дренажей.

Решением данной проблемы может стать ультразвуковая санация нефростом. Ранее авторами был предложен метод санации внутренних стентов посредством экстракорпорального акустического воздействия, основанный на ультразвуковом воздействии излучателем над проекцией стента [8], [9]. Для наружных дренажей (нефростом) предлагается инвазивная ультразвуковая чистка.

Цель исследования

Исследование особенностей прохождения ультразвуковых колебаний в жидкой среде через протяженную полиуретановую трубку малого диаметра, а также оценка эффективности применения способа инвазивной ультразвуковой санации нефростом для профилактики обструктивного пиелонефрита.

Теория

В медицине ультразвуковая чистка возможна только в пассивных средах, без использования химически активных веществ. Механизм ультразвуковой чистки стента обусловлен механическим воздействием жидкой среды и может быть объяснен разрушением (дроблением) пленки загрязнений, возникающим в результате появления ударной волны при аннигиляции кавитационных пузырьков, проникающих в поры, щели и зазоры между загрязнениями и внутренней поверхностью полиуретанового стента.

Поскольку в процессе кавитации нарушается сплошность жидкой среды в результате формирования паргазовых образований [10], необходимо рассмотреть схему протекания процессов вблизи рабочего торца инструмента, находящегося в технологической среде. Для описания процесса вблизи рабочего торца инструмента примем допущение, что распространение волны идет в области пространственного объема, ограниченного излучающей поверхностью. Изменение акустического давления, создаваемого в среде акустического поля, осуществляется по синусоидальному закону. Сжимаемый и растягиваемый объем в этом случае ограничивается протяженностью в половину длины волны.

Также акустическое давление можно описать как периодическое изменение давления, т. е. волновые процессы, происходящие в данном объеме, можно представить в соответствии с рис. 1а.

Из приведенного графика видно, что существует предельная величина отрицательного давления акустического поля $P_m = P_p$, при которой еще сохраняется линейность процессов растяжения в объеме жидкой технологической среды. При превышении этой величины при растяжении образуются разрывы в жидкости, приводящие к изменению физической природы пространственного объема жидкой среды.

Давление во всех точках жидкости одинаково и в состоянии, когда на жидкость действует только сила тяжести, оно равно атмосферному давлению [11]. Отсюда следует, что предельная величина отрицательного давления акустического поля P_p будет определяться внешним (атмосферным) давлением. В данном случае, к атмосферному давлению добавится давление столба жидкости, находящегося над волноводом. Таким образом, величина давления P_p , которое должно быть преодолено для выхода волнового процесса за линейную область,

$$P_p = P_0 + \rho gh, \quad (1)$$

где ρ – плотность технологической жидкости; h – высота столба жидкости; P_0 – атмосферное давление.

Как показано на рис. 1а, линейность волновых процессов в жидкой среде сохранится лишь в пределах $2t_1 + T/2$ за период выходной частоты, а для заштрихованной зоны в оставшееся время периода выходной частоты, равное $T/2 - 2t_1$, формиру-

ется разрыв в виртуальном жидкостном стержне. Соотношение этих времен обозначим как

$$K = \frac{\frac{T}{2} - 2t_1}{\frac{T}{2} + 2t_1} = \frac{1 - 4ft_1}{1 + 4ft_1}. \quad (2)$$

Для определения длительности t_1 запишем соответствующее уравнение, вытекающее из условий на рис. 1а:

$$\sin \omega \cdot t_1 = \frac{P_p}{P_m} \quad \text{или} \quad \omega t_1 = 2\pi f t_1 = \arcsin \frac{P_p}{P_m}. \quad (3)$$

И, с учетом уравнений (1) и (3),

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{P_p}{P_m} = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{P_0 + \rho gh}{\rho_{жс} c_{жс} \omega A_m}. \quad (4)$$

При подстановке уравнения (4) в уравнение (2):

$$K = \frac{\pi - 2 \arcsin \frac{P_0 + \rho gh}{\rho_{жс} c_{жс} \omega A_m}}{\pi + 2 \arcsin \frac{P_0 + \rho gh}{\rho_{жс} c_{жс} \omega A_m}}. \quad (5)$$

Тогда среднее значение скорости звука образующейся газожидкостной смеси

$$C_{ср} = C_g \left(\frac{K}{K+1} \right) + C_{ж} \left(\frac{K}{K+1} \right). \quad (6)$$

Полученное выражение позволяет оценить изменение скорости распространения звука в жидкой среде при возникновении кавитации. В соответствии с полученным выражением построена зависимость $C_{ср} / C_{жс} = f(A_m)$ при изменении амплитуды от 0,5 до 10 мкм (рис. 1б).

На полученной зависимости видно, что при развитой кавитации скорость звука в среде уменьшается почти на 40 %.

Экспериментальное оборудование и методы исследования

Для проведения экспериментальной части исследования был рассчитан, спроектирован и изготовлен ультразвуковой инструмент, длина рабочей части которого составляет 103 мм. Диаметр волновода для удобства введения в трубки разного внутреннего диаметра от 2 мм составляет 1,8 мм.

Излучатель конструктивно размещен в корпусе типа «пистолет» как наиболее удобный для формирования инвазивного воздействия в урологических катетерах. Физические характеристики ультразвукового воздействия: $A_m - 10$ мкм; $f - 20$ кГц; мощность – 30 Вт, время воздействия – 1 мин. Для обеспечения безопасного применения аппарата, с точки зрения поверхностного тепловыделения, в дополнительном увеличении амплитуды колебаний нет необходимости.

Оценка эффективности очистки способом ультразвуковой санации была проведена на загрязненном (инкрустированном) урологическом стенте типа «свиной хвост» 12СН длиной 28 см.

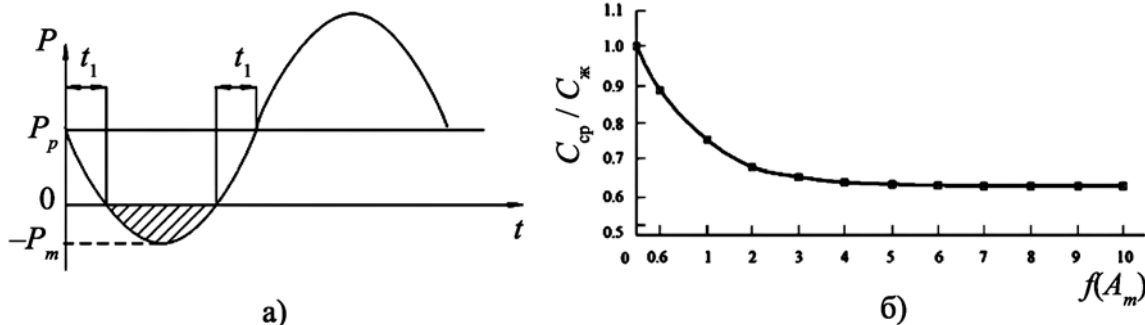


Рис. 1. Схема волновых процессов в виртуальном объеме (а); теоретическая зависимость скорости звука в среде от амплитуды колебания (б)

Экспериментальный материал (рис. 2б) был разрезан на 8 участков. Сегменты стента 4 размещали в соответствии с их положением в нефростоме посредством регулирования длины двух переходников 3. Затем осуществлялось ультразвуковое воздействие на жидкую среду в системе, причем для обеспечения акустического контакта инструмента с жидкостью в сегменте обеспечивалось протекание жидкости из верхнего сосуда в нижний через систему трубок, как показано на рис. 2а.

Предварительно для оценки условий распространения ультразвука в жидкой среде, находящейся в условиях тонкой протяженной трубки, был проведен эксперимент с новой нефростомой. Измерялась интенсивность звука на выходе нефростомы по мере увеличения длины вводимого в нефростому инструмента. Результаты измерения интенсивности звука на каждом шаге (через 1 см) инструмента представлены на рис. 3.

Полученные результаты позволяют примерно определить длину волны ультразвукового воздействия и, зная частоту, определить скорость распространения ультразвуковой волны в тонкой трубке при наличии развитой кавитации в жидкой среде. Экспериментально полученные данные позволяют оценить длину ультразвуковой волны $\lambda = 4$ см, тогда как при стандартной скорости звука в жидкости длина волны при заданной частоте будет соответствовать 7,5 см.

Результаты и обсуждение

После экспериментальной инвазивной очистки сегментов нефростомы эффективность чистки определялась по уменьшению веса сегмента урологического стента (табл. 1).

Таблица 1

Результаты экспериментального взвешивания образцов

№ п/п	Вес сегмента чистой нефростомы (до использования), г	Вес сегмента инкрустированной нефростомы, г	Вес сегмента нефростомы после УЗ-чистки, г
1 (коннектор)	0,9503	1,1352	1,1309
2	0,2577	0,3110	0,3032
3	0,2493	0,3102	0,3066
4	0,257	0,3106	0,3024
5	0,2577	0,3006	0,3001
6	0,2545	0,3931	0,3085
7	0,2624	0,4494	0,3594
8 (пигтейл)	0,6722	1,2917	0,9244

Исходя из результатов взвешивания сегментов после инвазивного ультразвукового воздействия, можно сделать вывод, что очищение происходит по всей протяженности трубки, однако наиболее эффективная очистка наблюдается на 6-м, 7-м и 8-м участках.

Для оценки состояния внутренней поверхности нефростомы после ультразвуковой чистки были проведены исследования на растровом электронном микроскопе JCM-5700 («JEOL») с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром JED-2300 (рис. 4).

На внутренней поверхности нового стента (рис. 4а) имеются неровности размером 0,2 мкм, что связано с особенностью изготовления полиамидных катетеров. На поверхности intactного стента (рис. 4б) присутствует грубая монолитная структура биопленки. Поверхность очищенного стента оценивалась на 6-м участке (рис. 4в). Данный сегмент отличается наличием раздробленных мелких участков биопленки.

Для использованной в эксперименте частоты в 20 кГц и известной скорости звука в воде (1450 м/с) несложно сделать вывод о том, что уменьшение диаметра водяного столба существенно снижает скорость распространения ультразвуковой волны в жидкости (длина полуволны по расчету – 75 мм, а по эксперименту – 40 мм). Это связано с возникающей турбулентностью в столбе жидкости и образованием газожидкостной среды при возникновении кавитации, что увеличивает потери при прохождении УЗ-колебаний и приводит к снижению скорости распространения ультразвуковой волны в среде.

Выводы

1. При прохождении ультразвуковых колебаний через протяженные трубки малого диаметра почти на 40 % снижается скорость распространения ультразвуковой волны в жидкой среде, что подтверждается теоретическими данными.

2. Предложенный метод обеспечивает удаление 50 % загрязнений при воздействии продолжительностью 1 мин.

Таким образом, профилактическая ультразвуковая санация нефростом является эффективным и безопасным способом уменьшения солевой обструкции, который может быть рекомендован к применению.

Список литературы:

1. Mokhmalji H., Braun P.M., Martinez Portillo F.J. et al. Percutaneous nephrostomy versus ureteral stents for diversion of hydronephrosis caused by stones: A prospective, randomized clinical trial // The Journal of Urology. 2001. Vol. 165. № 4. PP. 1088-1092.
2. Venkatesan N., Shroff S., Jeyachandran K. et al. Effect of uropathogens on in vitro encrustation of polyurethane double J ureteral stents // Urological Research. 2011. Vol. 39. № 1. PP. 29-37.

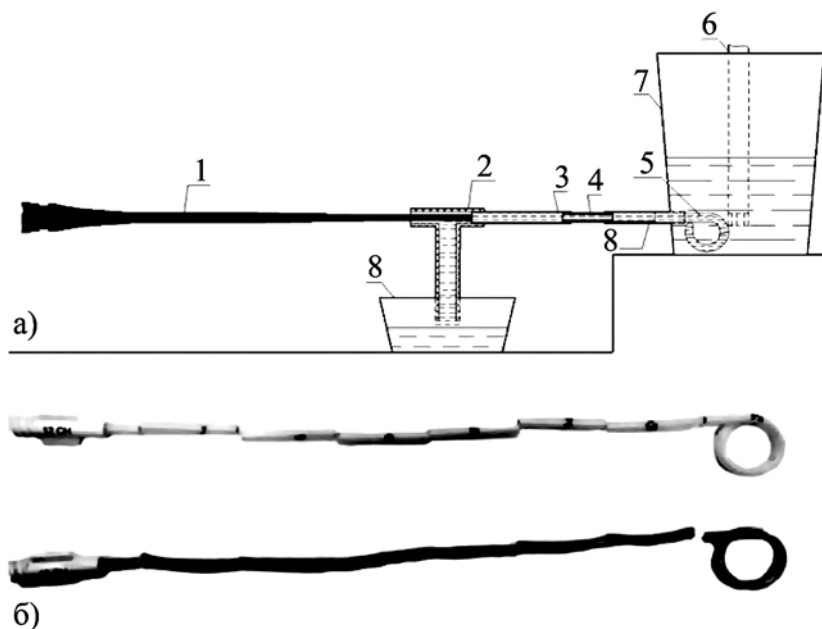


Рис. 2. Схема эксперимента (а): 1 – УЗ-инструмент; 2 – тройник; 3 – переходник; 4 – сегмент нефростомы; 5 – сегмент пигтеила нефростомы; 6 – микрофон прибора для измерения шума «Ассистент»; 7 – резервуар подачи жидкости; 8 – резервуар для слива жидкости. Исследуемые образцы урологических катетеров типа «свиной хвост» (б)

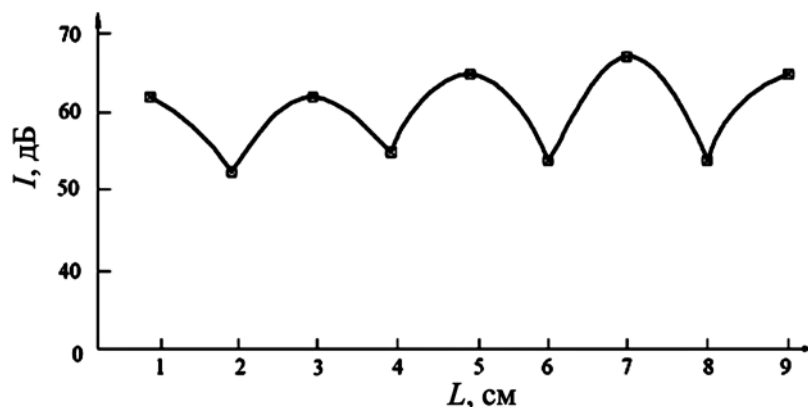


Рис. 3. Интенсивность звука в нефростоме

3. *Canales B.K., Higgins L.A., Markowski T. et al.* Presence of five conditioning film proteins are highly associated with early stent encrustation // *Journal of Endourology*. 2009. Vol. 23. № 9. PP. 1437-1442.
4. *Farooq A., Agarwal S., Jones V.* Safe removal of an encrusted nephrostomy tube using a vascular sheath: A technique revisited // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2013. Vol. 36. № 3. PP. 820-823.
5. *Mangera A. et al.* Lithoclast removal of an encrusted nephrostomy tube // *Annals of the Royal College of Surgeons of England*. 2010. Vol. 92. № 4. PP. 353-354.
6. *Huang S. et al.* Management of Dysfunctional Catheters and Tubes Inserted by Interventional Radiology // *Seminars in Interventional Radiology*. 2015. Vol. 32. № 2. PP. 067-077.
7. *Cazenave F.L., Glass-Royal M.C., Barth K.H.* Exchange of an obstructed loop nephrostomy catheter: Technical note // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 1990. Vol. 13. № 5. PP. 327-328.
8. *Шустер П.И., Борчишин Б.Б., Галкина О.Г., Новиков А.А., Шустер Я.Б.* Неинвазивная ультразвуковая санация мочеточниковых стентов / Сб. научн. труд. V конгр. урологов Сибири с междунар. участием «Актуальные вопросы урологии». – Красноярск, 2016. С. 264-266.
9. *Novikov A.A., Tsukanov A. Yu., Akhmetov D.S., Mustafaev R.F., Mulyukova A.R.* Noninvasive Ultrasonic Sanitation of Stents for Drainage of the Upper Urinary Tract // *Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 52. № 3. PP. 173-176.
10. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. – М.: Физматлит, 1963. 583 с.
11. *Бахтин Б.И., Ивашов А.И., Кузнецов А.В., Скороходов А.С.* Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 3. С. 662-669.

Алексей Алексеевич Новиков,
 д-р техн. наук, профессор,
 кафедра «Машиностроение и материаловедение»,
 ФГБОУ ВО «Омский государственный
 технический университет» Минобразования России,
Антон Юрьевич Цуканов,
 д-р мед. наук, профессор,
 кафедра «Хирургические болезни и урология ДПО»,
 ФГБОУ ВО «Омский государственный
 медицинский университет» Минздрава России,
Александра Рустамовна Путинцева,
 аспирант,
Дарья Александровна Седых,
 доцент,
 кафедра «Машиностроение и материаловедение»,
 ФГБОУ ВО «Омский государственный
 технический университет» Минобразования России,
Данияр Сарсенбаевич Ахметов,
 аспирант,
 кафедра «Хирургические болезни и урология ДПО»,
 ФГБОУ ВО «Омский государственный
 медицинский университет» Минздрава России,
врач-уролог,
 БУЗОО «ГКБСМП № 2»;
София Павловна Семикина,
 студент,
Александр Игоревич Иванов,
 студент,
 ФГБОУ ВО «Омский государственный
 медицинский университет» Минздрава России,
 г. Омск,
 e-mail: yarus952@mail.ru

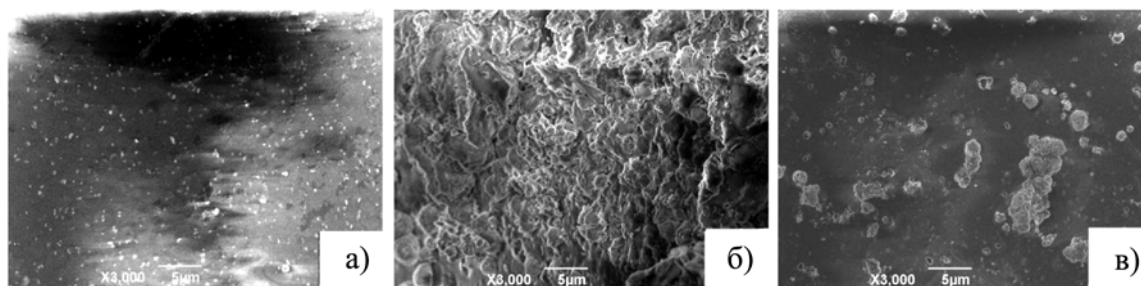


Рис. 4. Результаты растровой электронной микроскопии внутренней поверхности:
 а) нового катетера; б) интактного катетера; в) катетер после санации

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,
 РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!
 ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ
 «МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»
 НА 2020 ГОД.**

**В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.
 Стоимость подписки : 1500 руб. – за один номер,
 4500 руб. – на первое полугодие 2020 года (3 номера), 9000 руб. – на 2020 год (6 номеров).
 Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.**