

ПРОХОЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ ЧЕРЕЗ ГИБКУЮ ПОЛИАМИДНУЮ ТРУБКУ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Целью данной статьи является исследование особенностей прохождения ультразвуковых колебаний в жидкой среде через протяженную пластиковую трубку малого диаметра. В статье приведена конструкция исследовательского стенда и результаты исследований особенностей прохождения ультразвуковых колебаний в жидкой среде через полиамидные урологические стенты малых диаметров. Решаемыми при этом задачами являются определение влияния таких факторов, как плотность среды и размер сечения трубки, на уровень интенсивности ультразвуковых колебаний в трубке.

Показано, что при этом резко снижается скорость распространения ультразвуковой волны в жидкой среде. Кроме того, по длине трубки формируется волновая неоднородность интенсивности ультразвуковых колебаний, что необходимо учитывать при использовании ультразвуковой очистки внутренних поверхностей подобных трубок.

Ключевые слова: ультразвуковой волновод-инструмент, урологический стент, ультразвуковая чистка, скорость звука в среде, интенсивность звука, плотность среды.

Введение. Одна из проблем в области урологии состоит в том, что с каждым годом все большему количеству людей необходима установка наружных катетеров [1]. Основным недостатком данных стентов является необходимость постоянной смены катетера из-за отложения солей на внутренней и внешней поверхности стента и образование биопленок между поверхностью трубки и слизистой мочеточника, а значит, постоянного хирургического вмешательства.

Решением данной проблемы может стать ультразвуковая инвазивная санация катетеров [2]. Ультразвуковая очистка широко распространена в различных областях промышленности и медицине. Она используется как универсальный метод очистки различных металлических и неметаллических поверхностей от различных органических и неорганических загрязняющих частиц [3].

Особенностью рассматриваемого применения ультразвуковых колебаний является малый диаметр пластиковых (полиамидных) трубок ка-

тетеров или урологических стентов [4]. Эта особенность определяет специфику используемых ультразвуковых инструментов и должна влиять на прохождение ультразвуковых колебаний по длине стента.

Таким образом, целью данной статьи является исследование особенностей прохождения ультразвуковых колебаний в жидкой среде через протяженную пластиковую трубку малого диаметра.

Решаемыми при этом задачами являются определение влияния таких факторов, как плотность среды и размер сечения трубки на уровень интенсивности ультразвуковых колебаний, как в самой трубке, так и за ее пределами.

Теория. Интенсивность звука — средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени [5–8]. Интенсивность ультразвука — величина, которая выражает мощность акустического поля в точке.

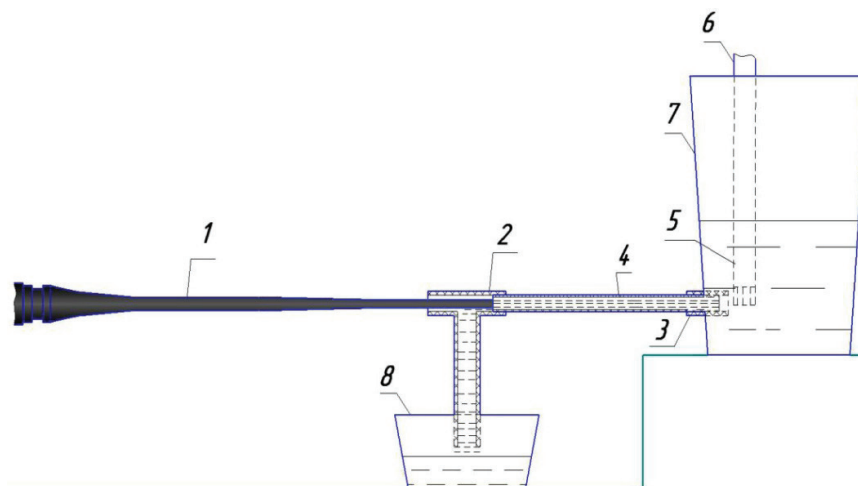


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — УЗ инструмент; 2 — тройник; 3 — переходник; 4 — трубка; 5 — микрофон прибора для измерения шума «Ассистент»; 6 — датчик (микрофон); 7 — резервуар подачи жидкости; 8 — резервуар для слива жидкости

Для излучателей, создающих плоскую волну, говорят об интенсивности излучения, понимая под этим удельную мощность излучателя, т. е. излучаемую мощность звука, отнесенную к единице площади излучающей поверхности [9]. Поскольку в данной работе предполагается исследование прохождения ультразвуковых колебаний в узкой протяженной трубке с помощью инструмента чуть меньшего диаметра с плоским рабочим торцом, допущение о плоской ультразвуковой волне представляется вполне обоснованным. В этом случае интенсивность излучения определяется по формуле

$$I = \frac{p v}{2} = \frac{p^2}{2 \rho c} = \frac{v^2 \rho c}{2}, \quad (1)$$

где p — амплитуда звукового давления, v — амплитуда колебательной скорости частиц, ρ — плотность среды, c — скорость звука.

Мощность звука — энергия, передаваемая звуковой волной через рассматриваемую поверхность в единицу времени:

$$P_a = S_a \rho_c c_c 2\pi^2 f^2 A_n^2, \quad (2)$$

где S_a — площадь излучающей поверхности; ρ_c — плотность технологической среды; c_c — скорость звука в технологической среде; f — резонансная частота пьезоэлектрического излучателя; A_n — амплитуда колебаний рабочего торца волновода-инструмента непосредственно в технологической среде [10].

Интенсивность звука в эксперименте оценивалась с помощью анализатора шума путем относительного сравнения уровней звука датчиком анализатора вблизи излучающего торца ультразвукового инструмента и на выходе узкой протяженной пластиковой трубки при перемещении инструмента внутри нее в сторону выхода.

Оборудование и эксперимент. Исследование проводилось в два этапа в форме стендового



Рис. 2. Прибор для измерения шума «Ассистент»

эксперимента на базе ультразвукового аппарата «Ярус-У» (ОАО «ЦКБА», г. Омск).

Первым этапом эксперимента была оценка изменения уровня звука, при воздействии на жидкость разной плотности в капельной трубке с внутренним диаметром 4 мм, длиной 90 мм на разных расстояниях (10, 20, 30...90 мм) от датчика (оценка изменения интенсивности звука по длине трубки). В качестве жидкой среды использовались вода и водные растворы хлористого натрия с концентрацией 9 % и 22 %.

Второй этап заключался в сравнительной оценке интенсивности звука при озвучивании трубок с различными внутренними диаметрами: 2 мм, 3 мм и 4 мм, длиной 90 мм в воде на разных расстояниях (10, 20, 30...90 мм) от датчика (аналогичная оценка изменения интенсивности по длине).

Ультразвуковое воздействие осуществлялось на жидкую среду в системе и, для обеспечения

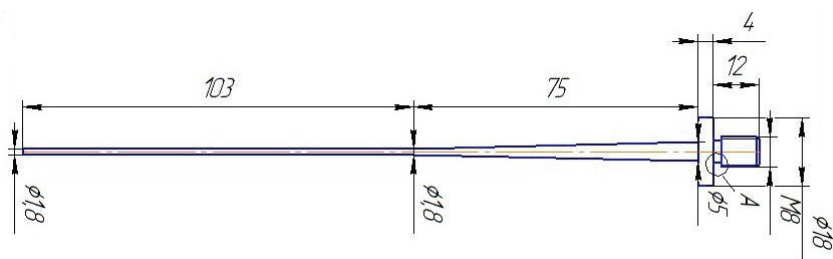


Рис. 3. Ультразвуковой инструмент

надежного акустического контакта УЗ инструмента с жидкостью в исследуемом сегменте стендового оборудования, обеспечивалось протекание жидкости из верхнего сосуда в нижний через систему трубок (рис. 1).

Для эффективной санации образцов, обеспечения ультразвуковой кавитации и безопасного применения аппарата, с точки зрения поверхности теплового выделения, была выбрана амплитуда колебаний рабочего торца инструмента для воздействия в трубке — 10 мкм, частота — 26 кГц, потребляемая мощность пьезокерамического излучателя — 30 Вт.

Интенсивность звука в каждой точке шага инструмента измерялась анализатором шума «Ассистент» S/U30 приборостроительной компании ООО «НТМ-Защита» (рис. 2).

Для проведения экспериментальной части исследования рассчитан, спроектирован и изготовлен ультразвуковой инструмент, длина рабочей части которого составляет 103 мм (рис. 3). Диаметр волновода для удобства введения в трубку разного внутреннего диаметра от 2 мм составляет 1,8 мм.

Конструктивно излучатель размещен в корпусе типа «пистолет» (рис. 4) как наиболее удобный для формирования инвазивного воздействия в урологических катетерах.

Результаты и обсуждение. Проведены замеры уровня звукового давления в образцах. По



Рис. 4. Излучатель аппарата «Ярус-У»

полученным данным уровня звука в каждой точке ультразвукового воздействия по длине трубки построены графики.

Полученная зависимость позволяет предположить существенную неодинаковость интенсивности ультразвукового воздействия по длине трубки, что связано со спецификой прохождения акустических волновых процессов в столбе жидкости, связанной с формированием узлов и пучностей акустической волны на расстояниях, кратных длине полуволны колебания в данной технологической среде (рис. 5). Для использованной в эксперименте частоты в 26 кГц и извест-

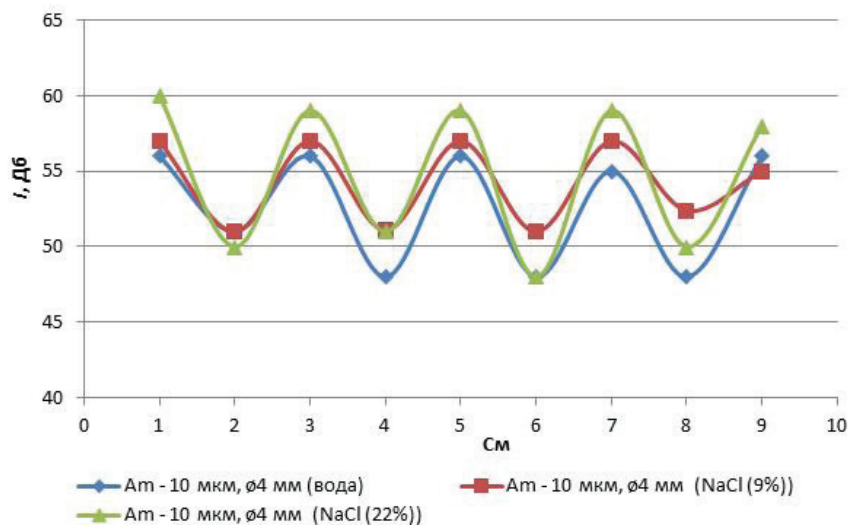


Рис. 5. Сравнительный анализ зависимости интенсивности звука от плотности среды

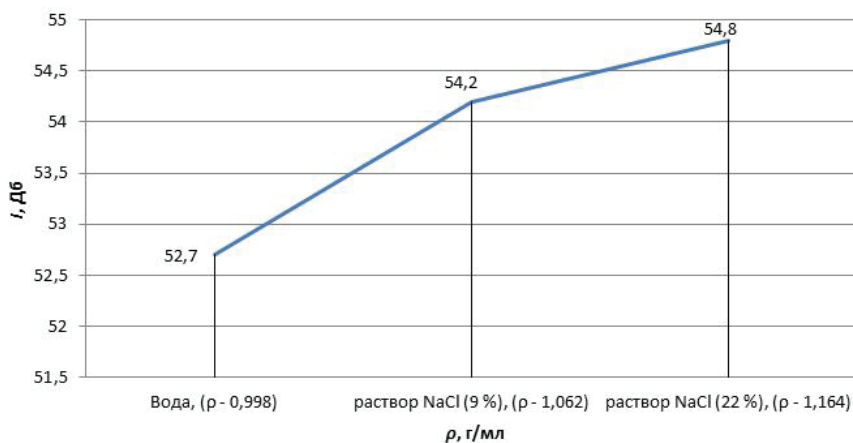


Рис. 6. Зависимость среднего значения интенсивности звука от плотности среды

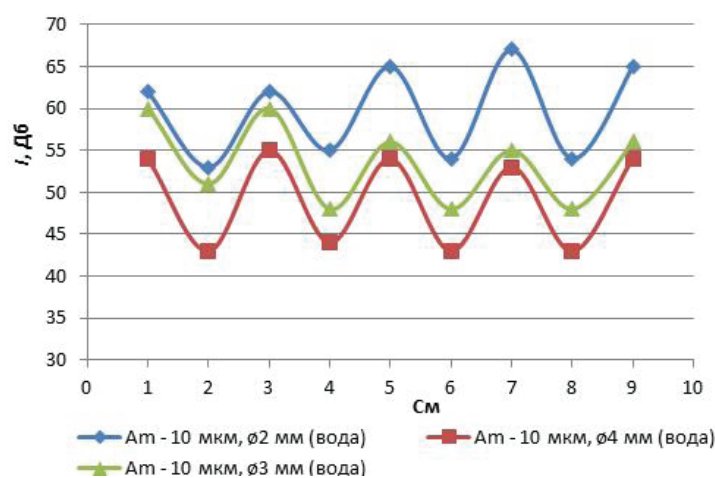


Рис. 7. Зависимость интенсивности звука от диаметра сечения трубки

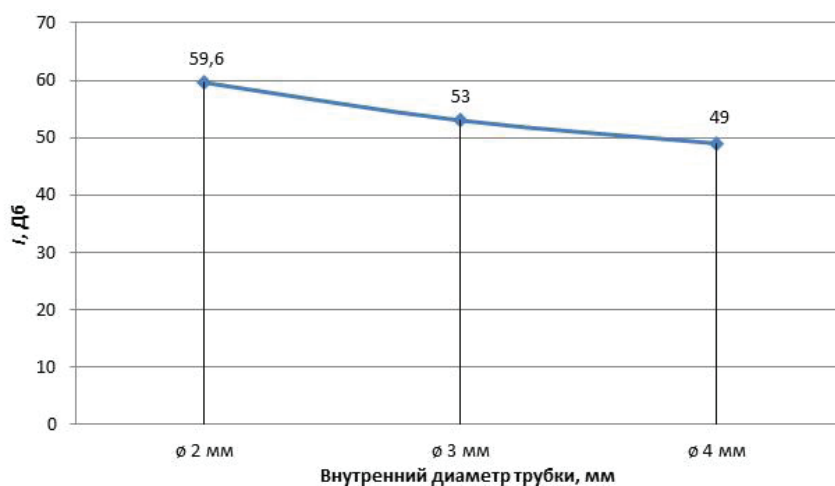


Рис. 8. Зависимость среднего уровня интенсивности звука от диаметра сечения трубки

ной скорости звука в воде (1450 м/с) несложно сделать вывод о том, что уменьшение диаметра водяного столба существенно снижает скорость распространения УЗ волны в жидкости (длина полуволны по расчету — 56 мм, а по эксперименту — 20 мм).

Это связано с возникающей турбулентностью в столбе жидкости при возникновении кавитации, что увеличивает потери при прохождении УЗ колебаний и приводит к снижению скорости распространения ультразвуковой волны в среде.

Из представленных показателей видно, что плотность жидкой среды, на которую осуществляется ультразвуковое воздействие, имеет прямо пропорциональное влияние на уровень звука в трубке, что соответствует формуле (1). Показатель интенсивности звука в 22 % растворе NaCl на 4 % выше, чем в 9 % растворе NaCl и на 8 % выше, чем в воде (рис. 6).

Результаты второго этапа эксперимента в виде зависимости интенсивности звука от диаметра трубки представлены на рис. 7 и рис. 8.

Аналогично зависимости, приведенной на рис. 5, график, полученный на рис. 7, также показывает неоднородность интенсивности по длине трубки, имеющую волновой характер, и также указывает на значительное снижение скорости распространения акустической волны внутри трубки.

Увеличение диаметра трубки практически не сказывается на скорости распространения акустической волны. (Возможно, это связано с тем, что внутренний диаметр трубки даже при своем максимальном размере много меньше длины волны.) В то же время следует отметить, что неоднородность интенсивности по длине трубки снижается с увеличением ее диаметра.

Анализируя график (рис. 8), можно сделать вывод о том, что показатель интенсивности звука в трубке по мере увеличения ее диаметра снижается, хотя в данной ситуации, при постоянстве акустической мощности, отдаваемой рабочим торцом излучателя в трубку, увеличение ее диаметра требует для сохранения прежнего уровня интенсивности увеличения отдаваемой излучателем мощности, чего в эксперименте не предусмотрено. Этот момент и отражен на рис. 8 в виде снижения интенсивности ультразвуковых колебаний при увеличении диаметра протяженной полиамидной трубки.

Выводы.

1. При прохождении ультразвуковых колебаний через протяженные трубки малого диаметра резко снижается скорость распространения ультразвуковой волны в жидкой среде.

2. По длине трубки формируется волновая неоднородность интенсивности ультразвуковых колебаний, что необходимо учитывать при использовании ультразвуковой чистки внутренних поверхностей таких трубок.

3. При увеличении диаметра протяженной пластмассовой трубки необходимо увеличивать отдаваемую в технологическую среду акустическую мощность для сохранения качества чистки внутренних поверхностей, либо, соответственно, увеличивать диаметр рабочего торца волновода-инструмента.

Библиографический список

1. Шустер Я. Б., Хлебов О. П., Басок С. М., Новиков А. А. Неинвазивная ультразвуковая санация мочеочниковых стентов // Актуальные вопросы урологии: сб. науч. тр. V Конгресса урологов Сибири с междунар. участием, Красноярск, 13–14 мая 2016. Красноярск: КАСС, 2016. С. 264–266.
2. 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). P. 173–176. DOI: 10.1007/s10527-018-9807-y.

3. Awad S. B. Ultrasonic cavitations and precision cleaning // Precision Cleaning Magazine. 1996. P. 1–6.

4. Vanderbrink B. A., Rastinehad A. R., Ost M. C. [et al.]. Encrusted urinary stents: evaluation and endourologic management // Journal of Endourology. 2008. Vol. 22 (5). P. 905–912. DOI: 10.1089/end.2006.0382.

5. Квашнин С. Е. Научные основы проектирования ультразвуковых колебательных систем терапевтических и хирургических аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 356 с.

6. Скворцов С. П., Нажем А. Исследование влияния параметров среды на интенсивность ультразвуковой кавитации // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: сб. тр. XIII Междунар. науч. конф. с науч. молодеж. шк. им. И. Н. Спиридонова. В 2-х кн. 2018. Кн. 2. С. 204–208. ISBN 978-5-905527-27-2.

7. Бахтин Б. И., Ивашов А. И., Кузнецов А. В. [и др.]. Формирование зон с максимальной интенсивностью ультразвуковой кавитации в однокомпонентных и многокомпонентных средах // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 3. С. 662–669.

8. Хмелёв В. Н., Хмелёв С. С., Голых Р. Н. [и др.]. Экспериментальное определение условий ультразвукового воздействия для обеспечения максимальной интенсивности кавитации в среде // Южно-Сибирский научный вестник. 2015. № 4 (12). С. 50–55.

9. Liatsikos E. N., Karnabatidis D., Katsanos K. [et al.]. Ureteral metal stents: 10-year experience with malignant ureteral obstruction treatment // Journal of Urology. 2009. Vol. 182 (6). P. 2613–2617. DOI: 10.1016/j.juro.2009.08.040.

10. Смородов Е. А., Галиахметов Р. Н., Ильгамов М. А. Физика и химия ультразвука. М.: Наука, 2008. 226 с. ISBN 978-5-020-366268.

НОВИКОВ Алексей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 9669-2202

AuthorID (РИНЦ): 684463

ResearcherID: P-6308-2016

Адрес для переписки: yarus952@mail.ru

НЕГРОВ Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», заведующий секцией «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 4888-7947

AuthorID (РИНЦ): 684462

AuthorID (SCOPUS): 54959361600

Адрес для переписки: Negrov_d_a@mail.ru

ПУТИНЦЕВА Александра Рустамовна, инженер кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 4041-6295

AuthorID (РИНЦ): 927818

AuthorID (SCOPUS): 57203907870

Адрес для переписки: asya.mulyukova@mail.ru

ПУТИНЦЕВ Виталий Юрьевич, ассистент кафедры «Машиностроение и материаловедение»,

секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 7304-5954

AuthorID (РИНЦ): 8272

AuthorID (SCOPUS): 57203584921

Адрес для переписки: putintsev_vit@mail.ru

СИДОРЕНКО Дарья Дмитриевна, инженер кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Адрес для переписки: dashked8@mail.ru

КРУТЬКО Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», секция «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

SPIN-код: 6202-2690

Адрес для переписки: krutko@omgtu.tu

Для цитирования

Новиков А. А., Негров Д. А., Путинцева А. Р., Путинцев В. Ю., Крутько А. А., Сидоренко Д. Д. Прохождение ультразвуковых колебаний в жидкой среде через гибкую полиамидную трубку малого диаметра // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-62-67.

Статья поступила в редакцию 19.02.2019 г.

© А. А. Новиков, Д. А. Негров,

А. Р. Путинцева, В. Ю. Путинцев,

А. А. Крутько, Д. Д. Сидоренко