

УДК 616-71

В.Н. Учаев, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, Д.О. Пахмурин, А.Ю. Хуторной, А.В. Литвинов

## Согласование рабочего инструмента с ультразвуковой колебательной системой для введения иглы в биологическую ткань при реализации локальной гипертермии

Предложена методика расчета ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) с рабочим инструментом (РИ) на одну длину волны ультразвуковых колебаний в материале, получена формула зависимости части длины УЗКС от длины РИ. Получена 3D модель УЗКС с учетом размеров РИ, рассчитанных по формуле, предложенной авторами. Проведен модальный анализ рассчитанной конструкции в среде ANSYS®.

**Ключевые слова:** ультразвук, колебания, модальный анализ, пьезоэлемент.

Для реализации способа управляемой локальной гипертермии с применением игольчатых нагревателей, далее РИ [1], необходимо их введение в биологическую ткань под действием ультразвуковых колебаний (УК). Исходя из медицинских требований, амплитуда УК должна лежать в пределах от 3 до 30 мкм, частота – в пределах от 25 до 35 кГц. Применение УК для введения РИ необходимо, чтобы уменьшить усилия ввода при прохождении тканей, кровопотерю и болевые ощущения, а также для ускорения заживления раневых каналов. Эти положительные эффекты связаны с нагревом за счет ультразвука и коагулированием тканей раневого канала, кроме того при таком введении имеет место раздвигание крупных кровеносных сосудов, что, в свою очередь, снижает вероятность возникновения кровотечений [2, 3].

Для того чтобы вводимый РИ имел продольные колебания с заданными параметрами, необходимо согласовать его с ультразвуковой колебательной системой (УЗКС) с учетом того, что длина и диаметр РИ могут меняться в широких пределах. Согласование необходимо чтобы по всей длине УЗКС с РИ помещалась одна длина волны ультразвуковых колебаний либо ее половина, это достигается применением отражающей и излучающей накладок с концентратором, от них и РИ зависят размеры рис.1,

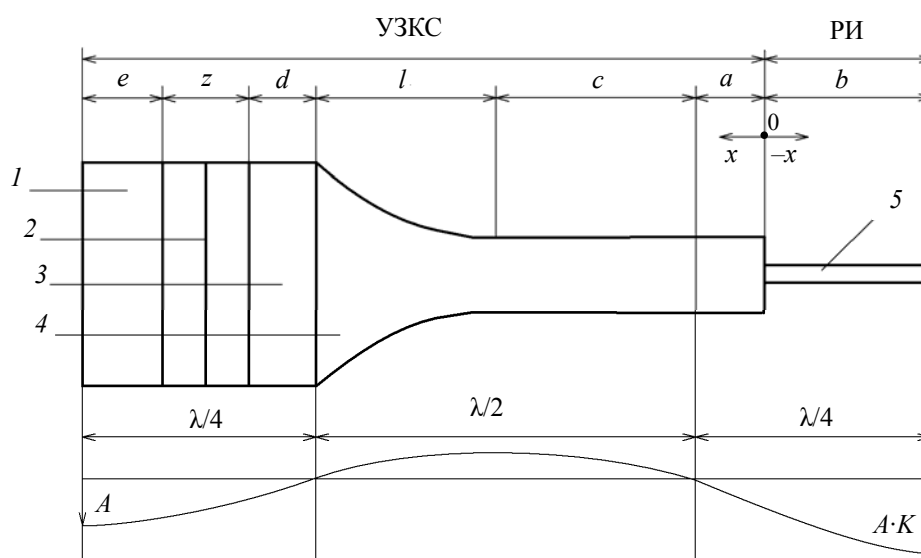


Рис. 1. УЗКС с РИ и распределение амплитуды колебания: 1 – отражающая накладка; 2 – пьезоэлементы; 3 – излучающая накладка; 4 – составной концентратор (экспоненциальный и линейный); 5 – РИ

В общем виде уравнение продольных колебаний может быть представлено дифференциальным уравнением в частных производных (1) [4]:

$$S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения;  $U$  – перемещение РИ;  $c$  – скорость звука в материале.

Рассмотрим общее решение этого уравнения для участка  $(a, b)$  (см. рис.1), (2), (3) [4]:

$$U_1(x, t) = \left( A \cdot \cos \frac{\omega}{c_1} \cdot x + B \cdot \sin \frac{\omega}{c_1} \right) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (2)$$

$$U_2(x, t) = \left( C \cdot \cos \frac{\omega}{c_2} \cdot x + D \cdot \sin \frac{\omega}{c_2} \right) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3)$$

где  $A, B, C, D$  – неизвестные коэффициенты полученные в результате решения уравнения (1).

Граничные условия здесь записываются следующим образом, с учетом того, что  $U_1$  – это перемещение по длине  $a$ ,  $U_2$  – по длине  $b$ :

$$\text{При } x = a, U_1 = 0; \text{ при } x = 0 U_2 = U_1, E_2 \cdot S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} = E_1 \cdot S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x}; \text{ при } x = -b, \frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \text{ [4].}$$

Используя граничные условия и зная что  $a + b = \frac{\lambda}{4}$ ,  $\omega_1^* = \frac{\omega_i}{c_i}$  можно получить выражение зависимости длины участка УЗКС  $a$  от размера РИ  $b$  (4):

$$a = \frac{\arctg \left( \frac{E_1 \cdot S_1 \cdot \omega_1^*}{E_2 \cdot S_2 \cdot \omega \cdot \tg(b \cdot \omega_2^*)} \right)}{\omega_1^*}, \quad (4)$$

где  $S_1, S_2$  – это площади соприкосновения участка УЗКС с РИ;  $E_1, E_2$  – модули Юнга металла УЗКС и РИ;  $c_1, c_2$  – скорости звука в УЗКС и РИ.

Для длины участка  $s$  УЗКС можно воспользоваться уравнением, формула (5) [4]:

$$s = \frac{n \cdot c_i}{2 \cdot f}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество полуволн, помещающихся в концентраторе;  $f$  – заданная частота работы 30 кГц.

Для длины участка  $l$  УЗКС можно воспользоваться формулами (6) и (7) [5]:

$$l = \frac{n \cdot c_i}{2 \cdot f} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\ln(K)}{\pi \cdot n} \right)^2}, \quad (6)$$

$$K = \frac{D_1}{D_2}, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент трансформации;  $D_1, D_2$  – диаметры большей и меньшей части концентратора.

Используя методику расчета, приведенную для длины  $b$  РИ и длины  $a$  УЗКС, можно определить размеры оставшихся участков:  $e = 1$  см,  $z = 1,5$  см,  $d = 0,8$  см. Участок  $e$  – это толщина отражающей накладки;  $z$  – толщина пьезоэлементов;  $d$  – толщина излучающей накладки [4].

Используя формулы (5)–(7), получим размеры участков:  $c = 4,15$  см,  $l = 4,8$  см. Если подставить длину РИ  $b = 4$  см в формулу (4), длина линейного участка УЗКС  $a$  будет составлять 1 см.

С использованием полученных размеров в среде SolidWorks была создана 3D-модель УЗКС с РИ, рассчитанная на 30 кГц (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид модели УЗКС с РИ

Для определения собственных частот колебаний данной модели УЗКС был проведен модальный анализ в среде ANSYS [6]. В данной модели материалом для излучающей и отражающей на-

кладок, экспоненциального и прямолинейного участков УЗКС был выбран титан – марки ВТ6. Материал РИ – медицинская сталь 12Х18Н10Т.

На рис. 3, 4 приведены результаты модального анализа:



Рис. 3. Изгибные колебания УЗКС на частоте 29197 Гц



Рис. 4. Продольные колебания на частоте 31775 Гц

Проведенный модальный анализ в среде ANSYS показывает, что в пределах заданной расчетной частоты 30 кГц УЗКС с РИ может иметь изгибные колебания на частоте 29197 Гц и продольные на частоте 31775 Гц. Необходим режим с продольными колебаниями, соответственно после конструирования и согласования УЗКС с генератором возбуждающих импульсов можно будет настроить ультразвуковое устройство на механический резонанс с продольными колебаниями РИ, их амплитуда будет зависеть от прикладываемого напряжения и суммарного коэффициента усиления УЗКС.

Полученная формула зависимости длины участка УЗКС  $a$  от длины РИ  $b$ , учитывающая площади соприкосновения и материалы, совместно с формулами для расчета участков УЗКС могут применяться для расчета различных видов УЗКС и РИ.

#### Литература

1. Управление электронными игольчатыми нагревателями при реализации метода локальной гипертермии и его экспериментальная проверка / А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, Д.О. Пахмурин, А.В. Литвинов, А.Ю. Хуторной, В.Н. Учайев // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22), ч. 2. – С. 300–302.
2. Миллер Э. Применение ультразвука в медицине / Э. Миллер, К. Хилл. – М.: Мир, 1989. – 568 с.
3. Аюпян В.Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В.Б. Аюпян, Ю.А. Ершов. – М.: МГТУ, 2005. – 224 с.
4. Кумабэ Д. Вибрационное резание. – М.: Машиностроение, 1985. – 182 с.
5. Гершгал, Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976. – 500 с.
6. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов, Д.Г. Красновский. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.

**Учаев Виктор Николаевич**

Инженер ООО «ПромЭл», г. Томск

Тел.: 8-923-423-17-00

Эл. почта: viktor\_86@sibmail.com

**Кобзев Анатолий Васильевич**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 51-05-30

Эл. почта: akobzev@ie.tusur.ru

**Семенов Валерий Дмитриевич**

Канд. техн. наук, профессор, зам. зав. каф. ПрЭ по научной работе

Тел.: (382-2) 413-918

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

**Пахмурин Денис Олегович**

Канд. техн. наук, доцент, зав. лаб. каф. ПрЭ

Тел.: 8-903-913-46-38

Эл. почта: mbasmt@gmail.com

**Хуторной Александр Юрьевич**

Аспирант каф. ПрЭ, мл. науч. сотрудник

лаборатории интеллектуально-модуляционных энергетических систем

Тел.: 8-913-883-26-26

Эл. почта: work.tusur@gmail.com

**Литвинов Александр Викторович**

Инженер ООО «ПромЭл»

Тел.: 8-923-414-13-33

Эл. почта: exet-@mail.ru

Uchaev V.N., Kobzev A.B., Semenov V.D., Pakhmurin D.O., Khutornoy A.Y. Litvinov A.V.

**Harmonization of the working tool with the ultrasonic vibrating system for insertion of the needle into the biological tissue in the implementation of local hyperthermia**

We propose the design procedure of ultrasonic oscillatory system (UOS) with a working tool (WT) at one wavelength of ultrasonic vibrations in the material obtained according to the formula of the length of the UOS from WT. We received a 3D model of UOS with allowance for the WT size, calculated according to the formula proposed by the authors. The modal analysis of the calculated structure designed in the ANSYS.

**Keywords:** ultrasound, vibrations, modal analysis, piezoelectric element.