

УДК 616-71

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

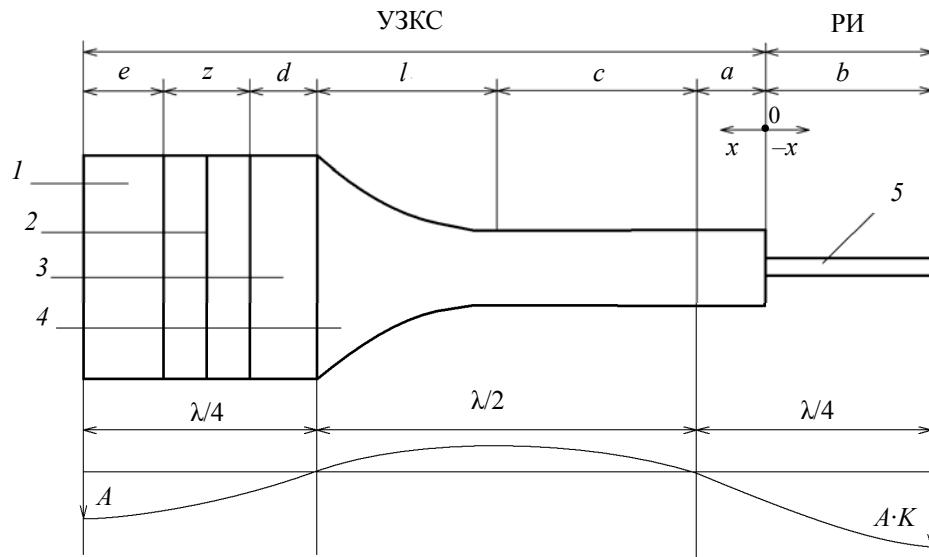


Рис. 1. УЗКС с РИ и распределение амплитуды колебания: 1 – отражающая накладка; 2 – пьезоэлементы; 3 – излучающая накладка; 4 – составной концентратор (экспоненциальный и линейный); 5 – РИ

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).

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

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

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

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

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 c 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:

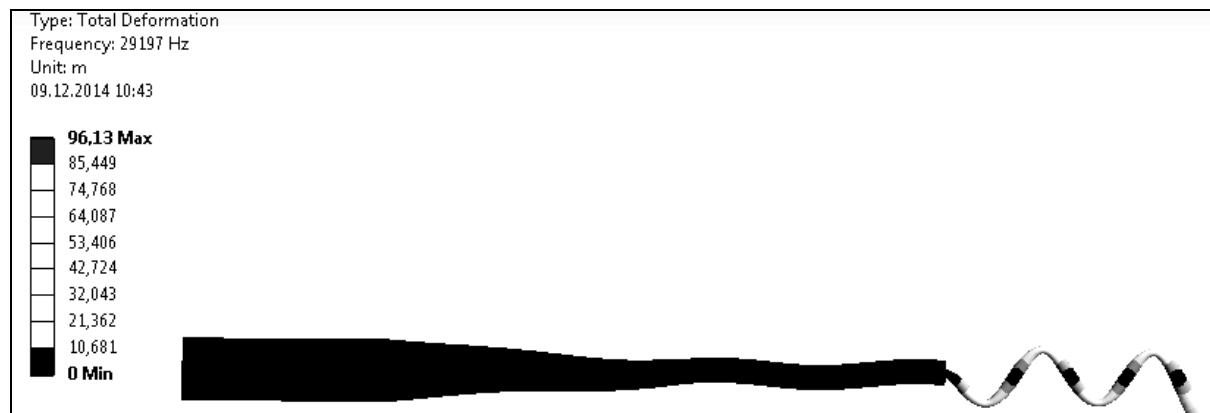


Рис. 3. Изгибные колебания УЗКС на частоте 29197 Гц

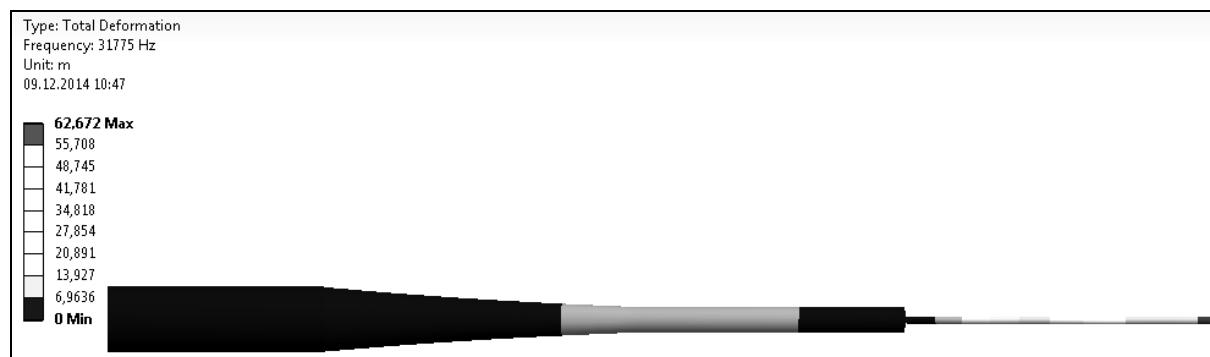


Рис. 4. Продольные колебания на частоте 31775 Гц

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. Учаев // 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. Акопян В.Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В.Б. Акопян, 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.