

УДК 616-71

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

Конструктивные особенности инструмента для реализации способа высокотемпературного воздействия на костную ткань

Предложена конструкция игольчатых нагревателей, позволяющая осуществлять высокотемпературное воздействие на костную ткань. Проведено моделирование процесса передачи тепла от нагревательного элемента к поверхности кожуха нагревателя в среде ANSYS®.

Ключевые слова: нагрев, кость, тепловая модель, нагреватель.

Применение системы нагрева и автоматической стабилизации температуры [1] для осуществления способа высокотемпературного разрушения опухоли ткани кости [2] требует разработки конструкции нагревателей, которая позволит проходить самый плотный слой кости. Нагреватели должны иметь форму иглы и возможность введения в организм под действием ультразвуковых колебаний – это облегчит саму процедуру введения нагревателей в кость, а также дополнительно обработает канал высокой температурой, что будет препятствовать кровотечению за счет прижигания кровеносных сосудов.

Для разработки и исследования опытного образца игольчатого нагревателя были сформулированы следующие технические и конструкторские требования:

- нагреватель должен состоять из нескольких частей для обеспечения механической прочности и возможности введения в кость под действием ультразвуковых колебаний;
- нагреватель должен быть изготовлен из медицинской стали и соответствовать токсикологическим нормам;
- активный элемент нагревателя должен быть выполнен из материала, обладающего высоким положительным температурным коэффициентом сопротивления;
- разборные части нагревателя должны быть выполнены из одного металла для исключения механического повреждения нагревателя в момент соединения;
- сопротивление готового нагревателя при комнатной температуре должно составлять $5 \pm 0,5$ Ом для обеспечения совместимости с мостом Уитстона системы нагрева и автоматической стабилизации температуры.

С учетом технических требований была разработана новая конструкция составного игольчатого нагревателя, устойчивого к механическим повреждениям (рис. 1).

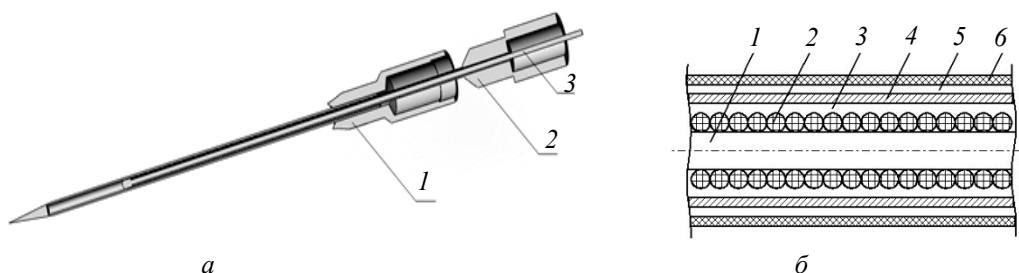


Рис. 1. Конструкция составного игольчатого нагревателя

На рис. 1, а представлена 3D-модель игольчатого нагревателя. Кожух нагревателя 1 представляет собой трубку. С одной стороны трубки приварено цилиндрическое основание, с другой стороны вставлен и приварен острый наконечник. Все соединения за счет сварки составных частей выдерживают ультразвуковые колебания. В результате кожух нагревателя под действием ультразвука может беспрепятственно проникать через кортикальный слой кости. Нагреватель 2 представляет собой нержавеющую трубку с нагревательным элементом 3 внутри в виде обмотки медного провода. На

рис. 1, б показан продольный разрез игольчатого нагревателя в увеличенном масштабе. Нагревательный элемент – основной функциональный узел игольчатого нагревателя, который изготавливается путем намотки медного провода 2 на стержень 1, помещенных в нержавеющую трубку 4 с внутренним диаметром 0,5 мм, для обеспечения устойчивости к внешним механическим повреждениям. Медь обладает высоким температурным коэффициентом сопротивления, что обеспечивает высокую точность стабилизации температуры. Улучшение теплопередачи между составными частями нагревателя достигается путем заполнения полости между обмоткой и трубкой нагревателя теплопроводящей пастой 3. Для обеспечения возможности ввода нагревателя в организм под действием ультразвука, а также для обеспечения прочности нагреватель помещен в нержавеющую трубку кожуха нагревателя 6 большего диаметра. Полость между кожухом и нагревателем заполнена теплопроводящей пастой 5. Нагреватели предложенной конструкции отвечают всем предъявляемым требованиям, обладают надежностью и относительной простотой использования.

С помощью программной среды ANSYS® было проведено моделирование процесса передачи тепла от поверхности нагревательного элемента к поверхности кожуха нагревателя. ANSYS® дает возможность пронаблюдать в динамике процесс теплопередачи от нагревательного элемента к поверхности нагревателя [3, 4].

Модель представляет собой составной многослойный нагреватель согласно рис. 1, помещенный в локальный объем, имеющий тепловые характеристики костной ткани (теплопроводность, теплоемкость). Теплопередача по всей длине нагревателя принята одинаковой, и моделирование процесса передачи тепла от нагревательного элемента к поверхности нагревателя можно произвести на небольшом участке нагревателя. Разработанная модель представлена на рис. 2.

Граничная температура расчетов установлена 36 °С, что соответствует температуре организма человека. Обмотка нагревательного элемента 2 для простоты построения модели имеет форму цилиндра поверх медного стержня 1. Температура стабилизации обмотки составляет 95 °С. Области 3 и 5 – термопаста марки Arctic MX-4; области 4 и 6 – сталь медицинская нержавеющая. Область 7 – эквивалент костной ткани. По всему объему биологической ткани задан конвекционный процесс – динамически изменяющиеся граничные условия второго рода по объему, что соответствует постоянству плотности теплового потока для каждой точки объема. На внешней поверхности модели задано граничное условие третьего рода, характеризующее закон конвективного теплообмена между поверхностью модели и окружающей средой. В этом случае количество тепла, передаваемого в единицу времени с единицы площади поверхности модели в окружающую среду, прямо пропорционально разности температур между поверхностью модели и окружающей средой. Температура окружающей среды равна 36 °С. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

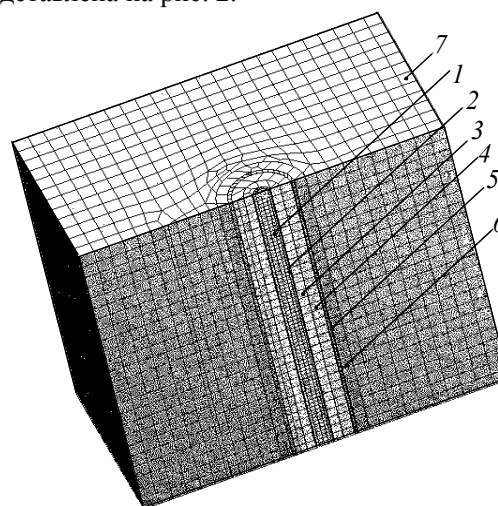


Рис. 2. Модель нагревателя в ANSYS®

Картина распределения температуры на составных частях нагревателя показывает, что температурное поле симметрично относительно оси x (рис. 3, а). Изотермы на плоскости yz представляют собой окружности, центром которых является нагревательный элемент. Температура в направлении от источника теплоты убывает согласно графику рис. 3, б.

ANSYS® позволяет в динамике рассмотреть процесс нагрева каждого слоя составного нагревателя. Кривая нагрева поверхности кожуха нагревателя до температуры стабилизации приведена на рис. 4. Из графика нагрева поверхности кожуха нагревателя видно, что при интенсивном теплоотводе температура стабилизации поверхности нагревателя составляет 84,5 °С, время выхода t на эту температуру составляет 1,6 с. С учетом того, что температура стабилизации нагревательного элемента 95 °С, а температура стабилизации поверхности нагревателя 84,5 °С, следует, что на тепловых переходах теряется порядка 10,5 °С.

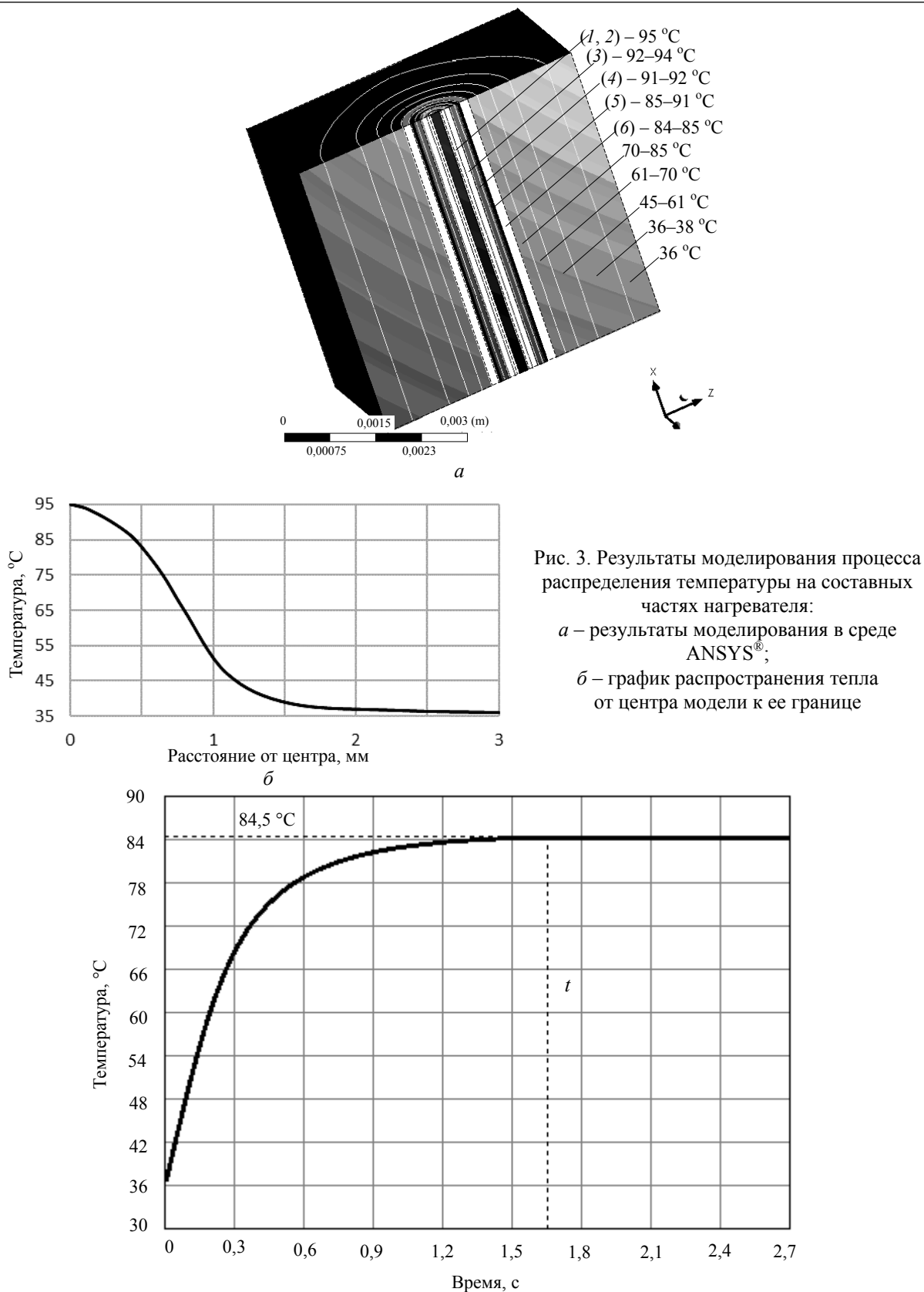


Рис. 3. Результаты моделирования процесса распределения температуры на составных частях нагревателя:

a – результаты моделирования в среде ANSYS®;

б – график распространения тепла от центра модели к ее границе

Рис. 4. Кривая нагрева поверхности кожуха нагревателя

Таким образом? для обеспечения температуры стабилизации 95 °C на поверхности нагревателя необходима калибровка нагревательного элемента на более высокую температуру, обеспечивающую компенсацию потерь на тепловых переходах, а система управления каналом нагрева и стабилизации

температуры должна плавно регулировать температуру стабилизации, уменьшая ее в зависимости от нагрева области. Представленную модель можно использовать для подбора более эффективного теплопроводящего материала между составными частями нагревателя, а также для исследования статических и динамических картин распределения тепла внутри нагревателя при динамически изменяющихся условиях внешнего охлаждения.

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), х. 2. – С. 300–302.
2. Патент 2527363 РФ МПК А61В18/12. Способ реализации термоабляции опухолей костей / А.В. Кобзев, А.Ю. Хуторной, В.Д. Семенов и др.; № 2013127554/14; заявл. 17.06.2013; опубликован 27.08.2014/ Бюл № 4. – 2 с
3. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: графт/ руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов, Д.Г. Красновский. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.

Хуторной Александр Юрьевич

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа, мл. науч. сотрудник
кабортации интеллектуально-модуляционных энергетических систем
Тел.: 8-913-883-26-26
Эл. почта: work.tusur@gmail.com

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ПрЭ
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) 41-39-18
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Пахмурин Денис Олегович

Канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией каф. ПрЭ
Тел.: 8-903-913-46-38
Эл. почта: mbasmt@gmail.com

Учаев Виктор Николаевич

Инженер ООО «ПромЭл», г. Томск
Тел.: 8-923-423-17-00
Эл. почта: viktor_86@sibmail.com

Литвинов Александр Викторович

Инженер ООО «ПромЭл»
Тел.: 8-923-414-13-33
Эл. почта: exet@mail.ru

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

Design features of the tool for carrying out the method of high-temperature effects on bone

In the paper we offer the design of the heater needle, which allows for high-temperature effect on bone. The simulation process of heat transfer from the heating element to the surface of the heater-housing in ANSYS® environment.

Keywords: heating, bone, thermal model, heater.