

УДК 616.7

А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, Д.О. Пахмурин, А.Ю. Хуторной

## Методика расчета температуры в произвольной точке зоны нагрева при реализации метода локальной гипертермии

Предложена методика расчета температуры в любой точке зоны нагрева при реализации метода локальной гипертермии. В общем виде выведена формула для расчета температуры в любой точке зоны нагрева. Проведено сопоставление полученных результатов с моделями, созданными в среде ANSYS®.

**Ключевые слова:** гипертермия, температура зоны нагрева, нагреватель.

В современной медицине хорошо известны и широко используются лечебные эффекты, обусловленные локальным умеренным тепловым воздействием на опухолевую ткань. Это воздействие носит название локальной гипертермии. При этом необходимо получить равномерно прогретую область воздействия. В связи с этим получение картины распределения температуры в любой точке зоны нагрева является очень важной задачей. Предлагаемая методика расчета температуры позволяет убедиться в равномерности нагрева локальной области при ее требуемом объеме.

Рассмотрим модель с расположением 20 игольчатых нагревателей по окружности диаметром 50 мм, условно разделенную на три цилиндрических слоя нагрева. На рис. 1 представлен срез нагреваемой области вдоль нагревателей.

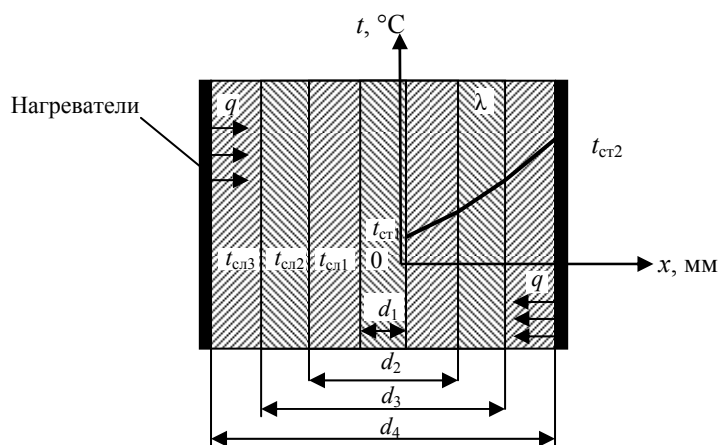


Рис. 1. Модель для расчета температуры внутри зоны нагрева

Нагревателями, а тепло распространяется по направлению к его вертикальной оси. Это допущение возможно, так как нагреватели равномерно расположены таким образом, что их температурные поля пересекаются. В этом случае можно говорить о многослойной цилиндрической стенке [1].

Предположим для определенности, что мы рассматриваем зону нагрева состоящую из трех слоев и внутреннего виртуального слоя  $d_1$ , т.е. можно говорить о модели, имеющей вид трехслойной цилиндрической стенки для центрального слоя (см. рис. 1). Температура внутренней поверхности стенки –  $t_{ст1}$ , температура наружной поверхности стенки –  $t_{ст2}$ , коэффициенты теплопроводности слоев равны между собой и равны  $\lambda$ , диаметры слоев  $d_1, d_2, d_3, d_4$  [2].

При этом внутренний слой имеет диаметр  $d_1$ , стремящийся к нулю, но он необходим, так как играет роль стока тепла, поглощающего тепловой поток  $q$ , идущий от нагревателей к центру рассматриваемого нами цилиндра.

Тогда температуры слоев  $t_{сл1}$  и  $t_{сл2}$  будут рассчитываться по формулам (1) и (2) соответственно [2]:

$$t_{сл1} = t_{ст1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (1)$$

Эта модель является измененной задачей, рассматриваемой в классической теплотехнике. Изменено направление нагрева, область нагревается снаружи окруженными нагревателями и обозначен центр области нагрева, стремящийся стабилизировать температуру на уровне 36 °С.

Для того чтобы получить картину распределения температур при выбранном количестве игольчатых нагревателей и диаметре зоны нагрева, можно рассматривать зону нагрева как цилиндр, у которого стенка образована нагревателями, а тепло распространяется по направлению к его вертикальной оси.

$$t_{\text{сл}2} = t_{\text{сл}1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}. \quad (2)$$

Здесь  $q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{t_{\text{ст}2} - t_{\text{ст}1}}{\ln \frac{d_4}{d_1}}$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м.

В более общем виде для любого слоя ткани температура  $t_{\text{сл}k}$  может быть рассчитана по формуле (3)

$$t_{\text{сл}k} = t_{\text{ст}1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_{k+1}}{d_1}, \quad (3)$$

где  $k$  – порядковый номер рассматриваемого слоя.

При этом необходимо сказать, что чем на большее количество слоев будет производиться разделение цилиндра, тем большая точность вычислений будет получена.

Применительно к нашим условиям  $t_{\text{ст}1}$  можно считать равным 36 °С, так как с этой температуры происходит нагрев ткани. В связи с тем, что организм стремится стабилизировать температуру на данном уровне, эта зона является выражением процессов термостабилизации в организме и ее температура всегда остается 36 °С. Температуру наружной стенки  $t_{\text{ст}2}$  нашего цилиндра можно приравнять к температуре нагревателей (45 °С). Это связано с тем, что между двумя соседними нагревателями расстояние незначительное (например, при окружности диаметром 40 мм оно составит около 7 мм по дуге и еще меньше по прямой). Следовательно, оба соседних нагревателя будут воздействовать на этот участок, доводя его температуру до практически равной температуре нагревателя (45 °С) [1, 3-5].

Кроме того, полученные результаты можно рассматривать для случаев любой ткани, так как коэффициент теплопроводности всех тканей организма, включая опухолевые (за исключением жировой ткани), отличается от среднего значения (0,5 Вт/м·К), взятого для расчетов, не более чем на 0,02–0,03 Вт/м·К.

Для проверки правильности выведенной формулы проведено сравнение с результатами, полученными в ANSYS®. Аналогичная модель с расположением 20 игольчатых нагревателей по окружности диаметром 50 мм выбрана для сравнения. Весь нагреваемый объем разделен на три слоя – первый ограничен цилиндром диаметром 17, второй – 34, а третий – 50 мм нагревателями. Тогда границы выбранных слоев совпадают с границами укрупненных слоев в модели ANSYS® (рис. 2).

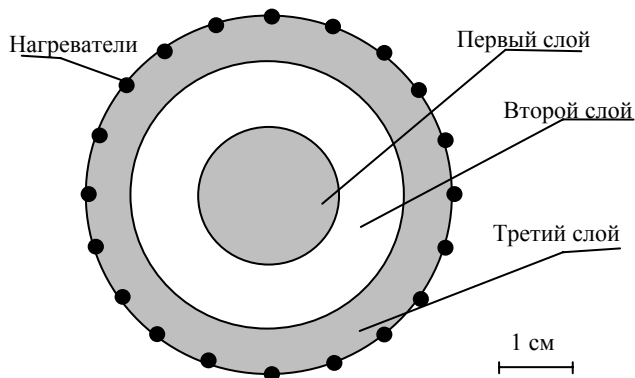


Рис. 2. Распределение по температуре при расположении 20 нагревателей по окружности диаметром 50 мм (укрупненные слои)

Далее проводится расчет температуры слоев по формуле (3). В результате:

$$t_{\text{сл}1} = t_{\text{ст}1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} = 36 + \frac{4,55}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5} \cdot \ln \left( \frac{17}{0,1} \right) = 43,611 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сл}2} = t_{\text{ст}1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_3}{d_1} = 36 + \frac{4,55}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5} \cdot \ln \left( \frac{34}{0,1} \right) = 44,442 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сл}3} = t_{\text{ст}1} + \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_4}{d_1} = 36 + \frac{4,55}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5} \cdot \ln \left( \frac{50}{0,1} \right) = 45 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, первый слой должен иметь температуру не выше 43,611 °С, второй – от 43,611 до 44,442 °С, а третий – от 44,442 до 45 °С. На картине распределения температур в модели

ANSYS® этим слоям соответствуют следующие диапазоны температур: 43,3–43,6 °С, 43,6–44,5 °С и 44,5–45 °С [1]. Результаты расчетов практически совпадают с данными моделирования.

Таким образом, приведенная выше формула может быть использована для расчета распределения температуры в зоне нагрева в горизонтальной плоскости с достаточно высокой точностью.

#### *Литература*

1. Пахмурин Д.О. Электронные устройства управления температурой в незамкнутом объеме живой ткани: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. – С. 75–78.
2. Скрыбин В.И. Курс лекций по теплотехнике: учеб. пособие – М.: Физматлит, МФТИ, 2000. – 83 с.
3. Пат. 2467720 РФ, МПК А61В 18/12. Способ реализации локальной гипертермии / А.В. Кобзев (РФ), В.Д. Семенов (РФ), Д.О. Пахмурин (РФ) и др. – № 2011132247; заявл. от 29.07.2011; опубл. 27.11.2012, бюл. № 33. – 1 с.
4. 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. 301–303.
5. A device for temperature stabilization in living tissues./ Pakhmurin D., Kobzev A., Semenov V.// Innovations in Information and Communication Science and Technology. September 10–13, 2012, Tomsk, Russia, Proceedings/Scientific publication. – Tomsk, TUSUR, 2012. – P. 52–61.

---

#### **Кобзев Анатолий Васильевич**

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: office@tusur.ru

#### **Семенов Валерий Дмитриевич**

Канд. техн. наук, проф., зам. зав. каф. ПрЭ по научной работе ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 413-918  
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

#### **Пахмурин Денис Олегович**

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

#### **Хуторной Александр Юрьевич**

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУРа, м.н.с. ЛИМЭС  
Тел.: 8-913-883-26-26  
Эл. почта: work.tusur@gmail.com

Kobzev A., Semenov V., Pakhmurin D., Khutornoy A.

#### **Method for temperature calculation in any point of heating area at local hyperthermia**

The paper presents a method for temperature calculation in any point of heating area at local hyperthermia. A formula for temperature calculation in any point is presented. The comparison of calculated temperature and results of ANSYS® modeling is shown.

**Keywords:** hyperthermia, heating area temperature, heater.