

Методи дослідження

УДК 519.8 76.5:616-006

В.М. Нагірняк

РОЗРАХУНОК ТЕРМАЛЬНОЇ ДОЗИ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ ГЕОМЕТРІЇ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОЇ ГІПЕРТЕРМІЇ ШІЇ

Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці

Резюме. Використання гіпертермії дозволяє знизити радіаційну дозу при лікуванні онкологічних хворих за допомогою променевої терапії. При проведенні гіпертермії ракової пухлини в м'яких тканинах важливо визначення термальної дози, що вона отримує. Одним із методів її визначення є числовий розрахунок з урахуванням термофізичних властивостей тканин. У роботі

знайдено розподіл температурного поля в циліндричній геометрії та визначена термальна доза в приповерхневій ділянці м'яких тканин шії.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, термодоза, гіпертермія.

Вступ. Дана робота присвячена комп'ютерному моделюванню температурного поля в циліндричній геометрії при проведенні поверхневої гіпертермії в ділянці шії. Використання гіпертермії є суттєво важливим за необхідності у зниженні радіаційної дози при лікуванні ракових пухлин, що знаходяться поблизу органів особливо чутливих до дії радіації (спинний мозок, щитоподібна залоза). Ефективність дії гіпертермії визначається термальною дозою, яку отримує тканина [2]. Контроль за термальною дозою може виконуватися безпосередньо за допомогою зовнішніх та внутрішніх температурних сенсорів або розраховуватися на основі термофізичних властивостей тканин, що знаходяться під дією гіпертермії. Числове моделювання дозволяє швидко визначити тривалість процедури і уникати використання внутрішньотканинних зондів, анестезії та створення дискомфорту пацієнта.

Мета дослідження. Визначити величину температури в кожній точці шії та тривалість її дії під час проведення поверхневої гіпертермії, та провести підрахунок теплової дози, що отримують м'які тканини шії.

Матеріал і методи. Комп'ютерний розрахунок проводився на комп'ютері TOSHIBA з операційною системою Windows XP. У роботі використовувалося програмне забезпечення MATLAB компанії MathWorks (Natick, MA, USA). Розглянуто випадок циліндричної геометрії для рішення рівняння біотеплового переносу з наступними граничними умовами: 1. Початкова температура м'яких тканин, включаючи центральну ділянку шії поблизу спинного мозку, дорівнювала 37 °С. 2. Температура шкіри на поверхні шії приймалась рівною 20 °С, а в ділянці дії гіпертермічного аплікатора - 41 °С. 3. Температура навколишнього середовища дорівнювала 20 °С. Гіпертермічний аплікатор прикладено до лівої передньої частини шії. Вибір циліндричної геометрії зумовлений типовою симетрією шії (рис. 1).

Для розв'язання задачі створено програмний код і розв'язано рівняння біотеплового переносу

Пене за допомогою методу кінцевих прирощень [3]:

$$\rho_t \cdot c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_t T) + \dot{Q}_m(r, t) + \dot{Q}_b(r, t), \quad (1)$$

$T(r, t)$ - температура м'якої тканини у точці з радіус-вектором r у момент часу t , c_t - питома теплоємність м'якої тканини, ρ_t - густина м'якої тканини, K_t - коефіцієнт теплопровідності м'якої тканини. При циліндричній симетрії і при постійних та однорідних термофізичних параметрах тканин, вид рівняння спрощується:

$$\rho_t c_t \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = K_t \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dT(r, t)}{dr} \right) + \dot{Q}_m(r, t) + \dot{Q}_b(r, t), \quad (2)$$

де $\dot{Q}_m(r, t)$ - об'ємна густина тепла, що виділяється внаслідок метаболізму в одиницю часу. Наступний член рівняння:

$$\dot{Q}_b = \rho_b c_b \cdot V(T_A - T_V), \quad (3)$$

це об'ємна густина тепла, що поглинається в одиницю часу завдяки перфузії крові, c_b , ρ_b - питома теплоємність та густина крові, T_A , T_V - температура артеріальної та венозної крові, V - об'ємний коефіцієнт перфузії крові. Останні два терміни в рівнянні (2) вносять несуттєві зміни до розподілу температури в ділянці шії порівняно з тепловим потоком, що йде від джерела гіпертермії і в даній моделі не розглядаються. Зокрема, при типовій базовій метаболічній активності людини в 1500 ккал/день (6279 kJ/day) і середньому об'ємі людського тіла у $7 \times 10^{-2} \text{ м}^3$, усереднена об'ємна густина тепла, що виділяється внаслідок метаболізму в одиницю часу $\dot{Q}_m(r, t)$ має порядок $10^3 \text{ J/s} \cdot \text{м}^3$, що значно менше за інші терміни у рівнянні (2). Шія відноситься до частини тіла, де різниця в температурі між артеріальною і венозною кров'ю незначна і, у першому наближенні, термін \dot{Q}_b у рівнянні (2) може бути проігнорований у рамках даної моделі. У результаті цих припущень рівняння теплопереносу приймає наступний вигляд:

$$\rho_t c_t \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = K_t \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dT(r, t)}{dr} \right) \quad (4).$$

Дані для термофізичних параметрів [1, 4], що використовувалися при розрахунках, наведені у таблиці.

Результати дослідження та їх обговорення. Визначена залежність розподілу температурного поля в середині м'яких тканин шиї від часу. Результати представлені на діаграмах, які відповідають різним проміжкам часу від початку гіпертермії (рис. 2). Як видно, зона підвищеної температури спочатку поширюється від поверхні гіпертермічного аплікатора до центральної ділянки шиї. З

часом, внаслідок теплових втрат через поверхню шиї, температура в м'яких тканинах знижується.

Проведено розрахунок величин температури в товщі м'яких тканин шиї при проведенні поверхневої гіпертермії. Отримані результати для залежності теплового поля від часу дають можливість підрахунку термальної дози, що отримує будь-яка ділянка шиї (рис. 3). Зокрема ділянка шиї у приповерхневому шарі (3,0 см у глибину) при типовій тривалості гіпертермії в 45 хвилин. Глибина 3 см є типово граничною для дії поверхне-

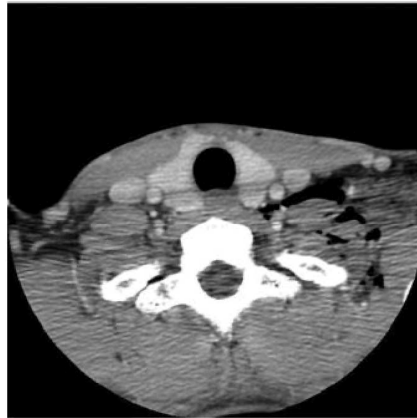


Рис. 1. Типова геометрія шиї. (Фото *BMJ Case Reports* 2012; doi:10.1136/bcr-2012-006538)

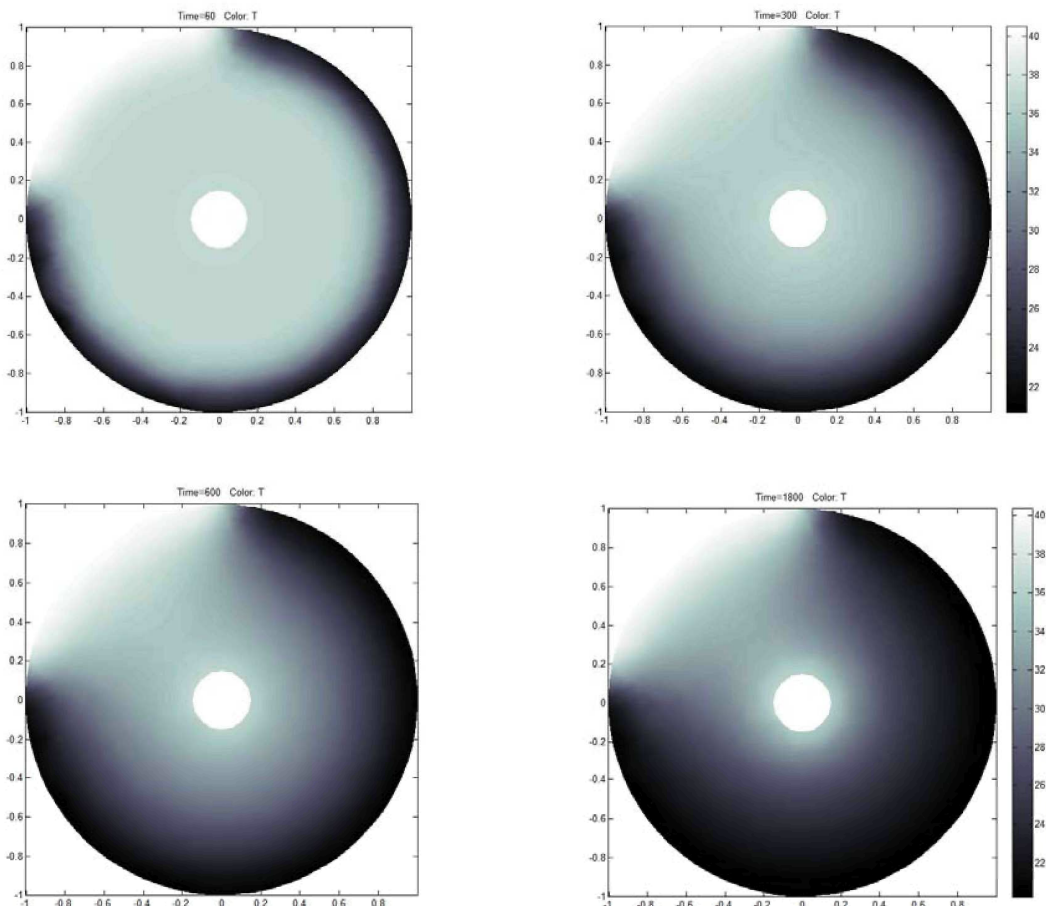


Рис. 2. Динаміка зміни розподілу температури всередині м'яких тканин шиї під час проведення поверхневого теплового опромінення. Діаграми відповідають 1, 5, 10, та 30-хвилинним інтервалам з початку проведення процедури. Темні ділянки відповідають нижчим температурам, світлі ділянки відповідають вищим температурам. Діапазон температур простягається від 20 °С до 41 °С.

Таблиця

Термофізичні параметри для різних типів тканин людини

Тип тканини	Тепло-провідність K_t , (W/m-K)	Густина ρ_t , (kg/m ³) $\times 10^3$	Питома теплота c_t , (J/kg-K) $\times 10^3$
М'язи, м'які тканини	0,38-0,54	1,01-1,05	3,6-3,8
Вода @ 37 °C	0,63	0,99	4,2
Ракова тканина	0,778	1,66	2,54
Жир	0,19-0,20	0,85-0,94	2,2-2,4

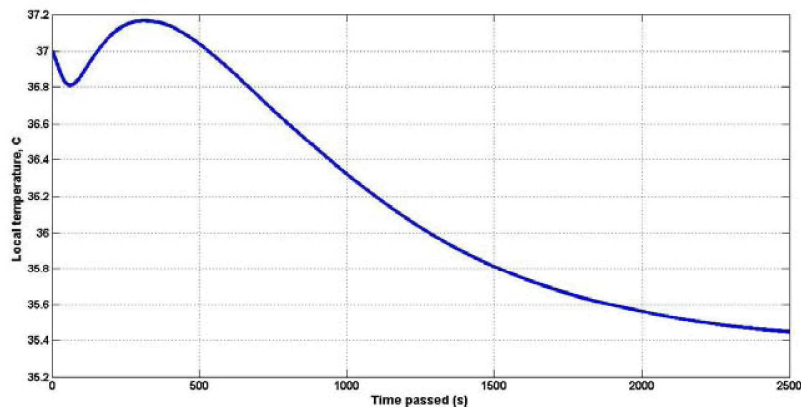


Рис. 3. Графік зміни температури (у градусах Цельсія) з часом (у секундах) у контрольній точці м'яких тканин шиї (на відстані 3,0 см від гіпертермічного аплікатора)

вої гіпертермії. Термальна доза, що отримує контрольна ділянка, дорівнює 0,29 еквівалент-секундам. Згідно з даними літератури, доза, необхідна для термальної коагуляції м'яких тканин, дорівнює 250 еквівалент-секундам [1].

Висновки

1. Як показують розрахунки, у межах запропонованої моделі, м'які тканини не отримують термальної дози достатньої для термальної коагуляції.

2. Упродовж курсу гіпертермії відбувається поступове зниження температури в референсній точці. Діаграми температурного поля показують, що суттєвий внесок у теплові втрати вносить тепловіддача через поверхню шиї.

3. Використання теплоізолюючого шару (бандажу) навколо шиї дозволило б значно підвищити термодозу, що отримують м'які тканини шиї.

Перспективи подальших досліджень. Напрямок подальшого дослідження може включати наближення комп'ютерної моделі до клінічних ситуацій з урахуванням кровообігу в основних кров'яних судинах шиї та неоднорідностях у вла-

стивостях тканин, анатомії пацієнта, електромагнітного або ультразвукового полів у разі використання відповідних аплікаторів, позиції та розміру пухлини на основі радіологічної томографії. Використання циліндричної геометрії, що була використана в даній роботі, можливе також для випадку гіпертермії верхніх та нижніх кінцівок.

Література

- Horsman M.R. Tissue physiology and the response to heat / M.R. Horsman // *Int. J. Hyperthermia*. – 2006. – Vol. 22. – P. 197-203.
- Moros E.G. *Physics of Thermal Therapy: Fundamentals and Clinical Applications. Imaging in Medical Diagnosis / E.G. Moros [editor]*. –N.Y.: Taylor & Francis, 2012. – P. 375.
- Real-time monitoring of radiofrequency ablation of liver tumors using thermal-dose calculation by MR temperature imaging: initial results in nine patients, including follow-up / M. Lepetit-Coiffé, H. Laumonier, O. Seror [et al.] // *Eur. Radiol.* – 2010. – Vol. 20. – P. 193-201.
- Shih T.-Ch. Effect of effective tissue conductivity on thermal dose distributions of living tissue with directional blood flow during thermal therapy / T.-Ch. Shih, H.-S. Kou, W.-L. Lint // *Int. Comm. Heat Mass Transfers.* – 2002. – Vol. 29. – P. 115-126.

РАСЧЁТ ТЕРМАЛЬНОЙ ДОЗЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ ВО ВРЕМЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ ШЕИ

В.М. Нагириак

Резюме. Использование гипертермии позволяет снизить радиационную дозу при лечении онкологических больных с помощью лучевой терапии. При проведении гипертермии раковой опухоли, важным является определение термальной дозы, которую она получает. Одним из методов её определения является числовой расчёт с использованием термофизических свойств ткани. В работе проведён расчёт теплового поля в цилиндрической геометрии и определена термальная доза в приповерхностной области мягких тканей шеи.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, термодоза, гипертермия.

**A CALCULATION OF A THERMAL DOSE IN CYLINDRICAL GEOMETRY DURING
SUPERFICIAL HYPERTHERMIA OF THE NECK**

V.M. Nahirniak

Abstract. Using hyperthermia enables to diminish the radiation dose, while treating oncologic patients by means of radiation therapy. While carrying out hyperthermia of a malignant tumor in the soft tissues it is important to determine thermal dose it undergoes. One of the methods of its determination is a numerical calculation, taking into account thermo-physical properties of tissue. The paper deals with a performance of a calculation of a thermal field in cylindrical geometry and a thermal dose determination in the superficial region of the soft tissues of the neck.

Key words: computer simulation, thermal dose, hyperthermia.

Bukovinian State Medical University (Chernivtsi)

Рецензент – доц. В.П. Унгурян

Buk. Med. Herald. – 2013. – Vol. 17, № 3 (67), part 2. – P. 111-114

Надійшла до редакції 31.05.2013 року