

СИНЕРГИЗМ ОБЛУЧЕНИЯ И НАГРЕВА ПРИ ВЕРТЕБРОПЛАСТИКЕ

Ю.Г. Забарянский¹, Н.К. Вознесенский², С.Л. Дорохович³,

Ю.А. Кураченко¹, Н.Н. Вознесенская⁴

рук. Ю.А. Кураченко, д.ф.-м.н., доц.; Н.К. Вознесенский, д.м.н., проф.

¹ФГУП ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт, Обнинск

²Обнинский институт атомной энергетики – филиал МИФИ, Обнинск

³ЭНИМЦ «Моделирующие системы», Обнинск

⁴Городская клиническая больница №8, Обнинск

chessmaster89@mail.ru

Для новой операции – радионуклидной вертебропластики создано программное обеспечение для расчёта как дозного поля, определяемого введённым в костный цемент радионуклидом, так и поля температуры, обусловленной полимеризацией костного цемента. Это программное обеспечение использует прецизионную воксельную 3D модель позвонка для расчёта доз и температур до и/или после операции, что позволяет оценить синергетический эффект процедуры вертебропластики.

Ключевые слова: радионуклидная вертебропластика, программное обеспечение, доза, температура, 3D воксельная модель позвонка, синергетический эффект

For radionuclide vertebroplasty the software for dose (provided by the implanted radionuclide) calculation and temperature estimation, which caused by bone cement polymerization is produced. The software applied the precise voxel 3D model of a vertebra for dose and temperature computation before and/or after operation that enables to estimate the synergistic effect of a procedure.

Key words: radionuclide vertebroplasty, software, dose, temperature, 3D voxel vertebra model, synergistic effect

В настоящее время одним из самых эффективных методов паллиативного лечения метастатических поражений в позвоночнике

является вертебропластика. Она заключается во введении костного цемента, состоящего из полиметилметакрилата, в полости тела позвонка, образованные вследствие поражения. При полимеризации введённого цемента выделяется значительная энергия, так что центр цементного ядра может нагреваться до 120 °С. Это позволяет укрепить позвонок, а также частично подавить рост метастазов. Однако, несмотря на большую мгновенную эффективность такой операции [1], примерно через полгода у пациентов возникают новые очаги поражения в тех же локализациях. Это вызвано неполным уничтожением клеток опухоли при введении цемента в результате термического и механического воздействия. Поэтому было предложено добавлять в цемент радионуклиды (преимущественно β -излучатели).

Таким образом, к восстановлению опорной функции присоединяется не только радиационное воздействие (поражающее метастазы в окрестности цементного ядра и снимающее болевой синдром), но и возникает синергетический эффект от сочетания локального нагрева при полимеризации и облучения [2].

В течение нескольких лет в ЭНИМЦ (г. Обнинск) проводились расчётно-экспериментальные исследования по оценке возможных эффектов от внесения в костный цемент радионуклидов. Были выполнены серии расчетов по переносу излучения, термогидравлике и проанализирован синергетический эффект.

В расчётах характеристик поля излучения вблизи костного цемента применялся код MCNP [3], основанный на методе Монте-Карло. Для определения характеристик температурных полей в позвонке применялись 2D и 3D версии термогидравлического кода [4], причём в расчётах учитывался кровоток в теле позвонка. Синергетический эффект определялся по методикам, описанным в [5–7] с опорой на полученные нами экспериментальные результаты.

На основе полученных результатов и формулы Овергарда (1) [5] была построены диаграммы (Рис. 1), на которых показаны возможные

эффекты от введения костного цемента с радионуклидом в полость позвонка в зависимости от объема полости и расстояния до поверхности цемента:

$$КТУ = 1 + \tau \times \exp(0.966t - 44.79), \quad (1)$$

где КТУ – коэффициент теплового усиления; τ – время теплового воздействия, с; t – температура костной ткани, °С. КТУ показывает, во сколько раз можно уменьшить дозу облучения за счет теплового воздействия на ткань для достижения такого же эффекта, как и в случае, когда тепловое воздействие отсутствует.

Результаты этих расчетов были систематизированы и объединены с программным продуктом, который создан для работы с томографическими изображениями. Созданное программное обеспечение позволяет в режиме реального времени рассчитывать активность вводимого радионуклида, обеспечивающую требуемую дозу в заданной локализации вблизи метастатического очага («полости», заполняемой цементом), получить распределения дозы и температуры при операции, а также оценивать эффект от уже проведенных операций. Такой подход позволяет врачу наметить дальнейший план мероприятий, так как от степени подавления позвоночных метастазов во многом зависит последующее лечение.

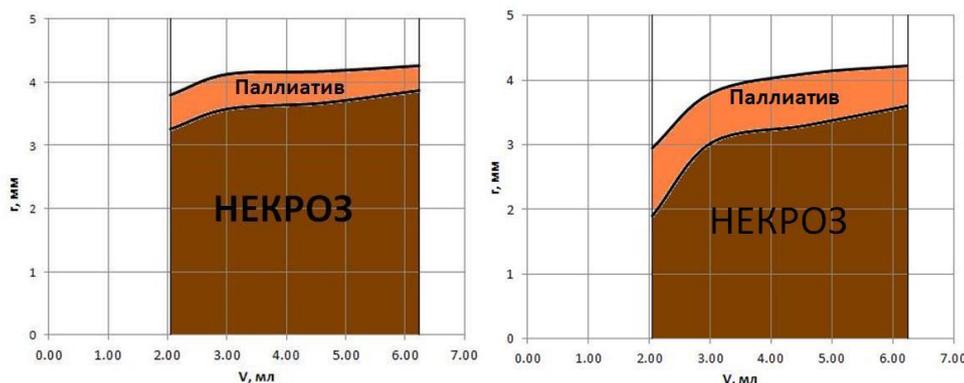


Рис.1. Эффекты от синергетического воздействия облучения и нагрева в зависимости от объема введенного костного цемента и расстояния от границы цементного ядра (слева источник – ^{188}Re , справа – ^{153}Sm)

Отметим, что уже полученный в клинике №8 (г. Обнинск) опыт вертебропластики с последующим облучением позвонка свидетельствует о

существенном эффекте сочетания облучения и нагрева, не ограниченном только снятием болевого синдрома. У облучённых после вертебропластики пациентов улучшается качество жизни и объективные показатели.

При построении диаграмм рассматривались две величины дозы: 60 Гр и 20 Гр. Первая обеспечивает некроз, а вторая паллиативный эффект. В тех местах, где доза < 20 Гр, считалось, что никакого эффекта не наблюдается. Хотя на практике и применяются дозы менее 20 Гр, предполагалось, что в конкретном случае такие дозы не окажут какого-либо влияния.

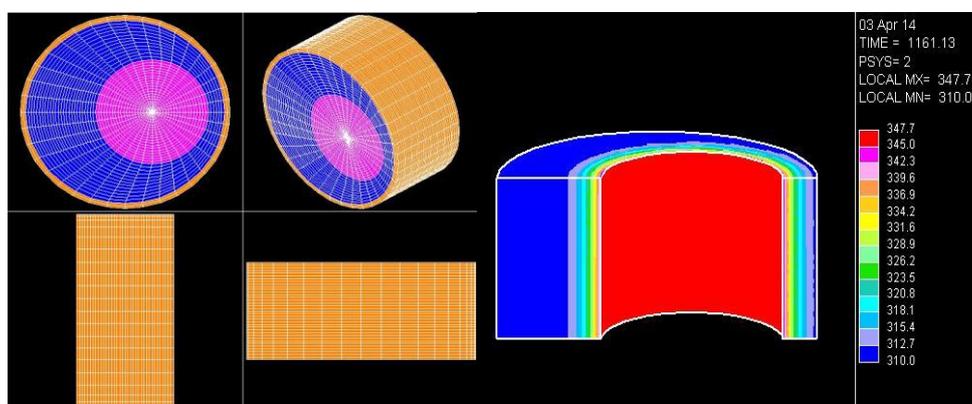


Рис. 2. Пример расчетной области (слева) и графического представления результатов расчёта по коду OpenFOAM

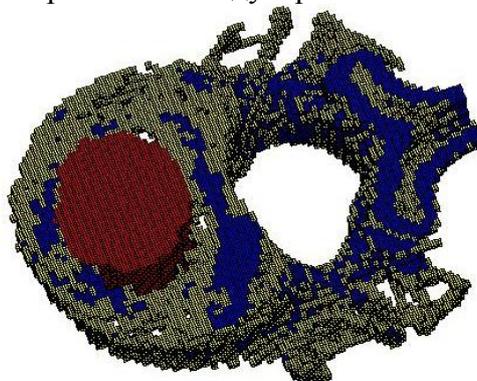


Рис 3. Воксельная модель позвонка с полостью (3D реконструкция расчётной модели, созданной на основе КТ-снимков)

Эффект от комбинированного (радиационного и теплового) воздействия рассчитан как для ^{153}Sm , так и для ^{188}Re , при этом изотоп ^{188}Re выглядит предпочтительней для применения при радионуклидной вертебропластике. Однако ^{188}Re менее широко распространен, чем ^{153}Sm , и

технологии по его получению не так хорошо отработаны. Поэтому вопрос о выборе радионуклида остается открытым.

Итак, в результате расчётно-экспериментальных исследований

- разработан и апробирован расчетный аппарат, позволяющий с достаточной для практического применения точностью прогнозировать разогрев костной ткани на различном удалении от границы костного цемента;
- его применение для прогноза тепловыделения и теплопереноса в костной ткани позволяет осуществлять дозиметрическое планирование при комбинированной дистанционной лучевой и интервенционной радионуклидной терапии;
- получены оценки синергетического эффекта для радионуклидной вертебропластики с использованием ^{153}Sm и ^{188}Re .

Литература

1. Anselmetti G.C., Bonaldi G., Carpegiani P., Manfrè L., Masala S., Muto M. Vertebral augmentation: 7 year experience //Acta Neurochir Suppl. 2011;108:147-61
2. Overgaard J. The current and potential role of hyperthermia in radiotherapy // Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys. 1989, 16, P. 535 – 549
3. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. Authors: X-5 Monte Carlo Team //LA-UR-03-1987.April 24, 2003.
4. <http://www.openfoam.com/>
5. Overgaard J. Simultaneous and sequential hyperthermia and radiation treatment of an experimental tumor and its surrounding normal tissue *in vivo* // International Journal of Radiation Oncology * Biology * Physics 1980, Volume 6, Issue 11, Pages 1507-1517, 1980
6. Borrelli M.J.,Thompson L.L., Cain C.A., Dewey W.C. Time-temperature analysis of cell killing of BHK cells heated at temperatures in the range of 43.5 degrees C to 57.0 degrees C // Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1990 Aug;19(2):389-99.

7. Petin V.G., Komarov V.P. Mathematical description of synergistic interaction of hyperthermia and ionizing radiation // *Math Biosci.* 1997 Dec;146(2):115-30.