

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 536.37: 678.744.388

Моделирование тепловых процессов в биоматериалах с использованием метода Монте-Карло

Борис Иналович Кунижев¹, Мариям Тахировна Хаджиева², Азамат Асланович Жамбеков³, Зарета Хизировна Гайтукиева⁴, Жамал Жабраилович Жабоев⁵

^{1,2,3,5}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

⁴Ингушский государственный университет, Магас, Россия

¹b.kunizhev51@mail.ru

²khadzhiieva2000@mail.ru

³ajambekov_4@mail.ru

⁴zareta.amatxanova@mail.ru

⁵akylman_07@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию взаимодействия лазерного излучения с полимерами (на примере полиметилметакрилата, с помощью метода Монте-Карло. Рассмотрены ключевые процессы взаимодействия: поглощение, рассеяние света и теплопередача. Приведены принципы построения численных моделей для описания распространения света в многослойных средах, что важно для приложений в медицинских процедурах, лазерной литографии и обработке поверхностей.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, лазерное излучение, абсорбция света, рассеяние света, теплопередача, многослойные среды, метод Монте-Карло

Для цитирования: Кунижев Б. И., Хаджиева М. Т., Жамбеков А. А., Гайтукиева З. Х., Жабоев Ж. Ж. Моделирование тепловых процессов в биоматериалах с использованием метода Монте-Карло // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 21–24.

PHYSICS

Original article

Modeling of thermal processes in biomaterials using the Monte Carlo method

Boris I. Kunizhev¹, Mariam T. Khadzhiieva², Azamat A. Zhabekov³, Zareta K. Gaitukieva⁴, Zhamal Z. Zhaboev⁵

^{1,2,3,5} Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

⁴ Ingush State University, Magas, Russia

¹ b.kunizhev51@mail.ru

² khadzhiieva2000@mail.ru

³ ajambekov_4@mail.ru

⁴ zareta.amatxanova@mail.ru

⁵ akylman_07@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the study of the interaction of laser radiation with polymers such as polymethylmethacrylate using the Monte Carlo method. The key physical processes that occur during this interaction, including absorption, light scattering, and heat transfer, are considered. The principles of constructing numerical models for describing light propagation in multilayer media are presented, which is important for applications in medical procedures, laser lithography, and surface treatment.

Keywords: polymethylmethacrylate, laser radiation, light absorption, light scattering, heat transfer, multi-layer media, Monte Carlo method

For citation: Kunizhev B.I., Khadzhiyeva M.T., Zhambekov A.A., Gaitukieva Z.K., Zhaboev Z.Z. Modeling of thermal processes in biomaterials using the Monte Carlo method // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):21–24.

Введение

Метод Монте-Карло представляет собой статистический подход к решению сложных задач, основанный на использовании случайных чисел для моделирования процессов. Он был разработан в середине XX века в рамках Манхэттенского проекта для решения задач, связанных с ядерной физикой, что подчеркивает его значимость для научных исследований. В контексте теплопередачи метод Монте-Карло позволяет моделировать сложные процессы, такие как рассеяние и поглощение тепловой энергии, с учетом случайных факторов, что делает его незаменимым инструментом в исследованиях.

Полимеры, такие как полиметилметакрилат (ПММА), востребованы в различных областях науки и техники благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. ПММА отличается высокой прозрачностью и биосовместимостью. Взаимодействие лазерного излучения с полимерами включает несколько физических процессов, таких как поглощение, рассеяние света и теплопередача. Эти процессы зависят от свойств материала, длины волны лазерного излучения и его интенсивности. В результате лазерного воздействия в полимерах могут происходить структурные изменения, которые находят применение в таких областях, как лазерная литография и обработка поверхностей. В частности, в системе применяются два лазера, работающие в различных спектральных диапазонах и в различных режимах [1–3].

Используя концепцию многократного рассеяния в плотно-упакованной среде и опираясь на уравнения теории переноса, с помощью численного моделирования методом Монте-Карло возможно предсказать характер распределения света $I(x, z)$, где x – поперечная координата. Известные алгоритмы позволяют учесть многослойность биоткани, конечный размер падающего пучка, отражение света от границ раздела слоев.

Методика

Для построения модели расчета распространения лазерного излучения и нагрева биоткани (многослойной структуры с переменными оптическими и теплофизическими параметрами), принимается направление распространения лазерного луча перпендикулярно поверхности среды.

Распределение оптического излучения в биоткани рассчитывается с помощью модели, реализующей метод Монте-Карло и позволяющей учесть многослойность среды, конечные размеры падающего пучка, отражение и преломление света на границах между слоями и на внешней границе среды.

Каждый i -й слой биоткани характеризуется набором параметров: коэффициентами поглощения и рассеяния, толщиной образца и показателем преломления среды.

Полная освещенность в точке с координатами (x, y, z) получается путем интегрирования функции Грина, определяющей распределение полной освещенности в среде. При этом предполагается, что падающий пучок имеет радиальную симметрию.

При непосредственном математическом моделировании движения пакетов фотонов суммарная толщина выбирается так, чтобы часть излучения, попадающая за пределы изучаемого цилиндра, была пренебрежимо мала. Область разбивается на ячейки, а каждой ячейке сопоставляется значение полной освещенности.

При моделировании каждому пакету фотонов в точке входа в биоматериал присваивается исходный статистический вес. Направление движения пакета определяется углами θ, φ (θ отсчитывается от положительного направления оси x в плоскости xu , φ – от положительного направления оси z) (рисунок).

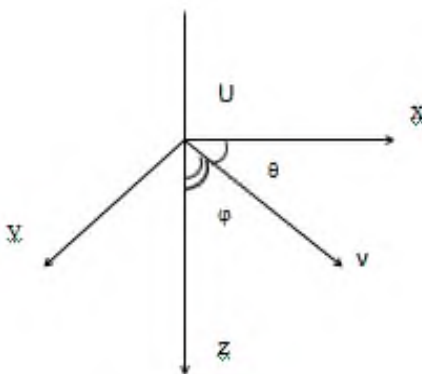


Рисунок – Схема направлений движения пакета фотонов

В некоторой точке объема происходит элементарный акт поглощения, т. е. определенная доля энергии пакета фотонов в этой точке поглощается. В этой же точке происходит акт рассеяния, т. е. пакету фотонов присваивается новое направления движения. Когда оно определено, вычисляется длина пробега пакета на данном шаге моделирования. Если точка, куда должен попасть пакет фотонов, находится в том же слое, что и исходная, то пакет перемещается в эту точку. В противном случае по формулам Френеля определяется вероятность отражения пакета от границы раздела слоев и события, состоящего в отражении пакета фотонов.

Обсуждение результатов

Применение метода Монте-Карло позволяет с высокой точностью моделировать тепловые процессы в полимерах под воздействием лазерного излучения. Данный метод учитывает влияние случайных процессов – рассеяния и поглощения света в неоднородной структуре полимеров. Используя метод Монте-Карло, можно моделировать распределение температуры внутри полимера, что особенно важно для понимания локальных тепловых эффектов. Миллионы итераций на современных вычислительных мощностях обеспечивает высокую точность и надежность получаемых результатов. Применение метода Монте-Карло в данном контексте открывает возможность для детального анализа тепловых процессов, что критически важно для разработки новых технологий обработки полимеров.

Моделирование тепловых процессов в полимерах методом Монте-Карло дает практически значимые результаты. Анализ температурных распределений помогает выявить критические зоны, где происходят наибольшие изменения структуры материала. Это особенно актуально для лазерной обработки поверхностей, где точность и контроль температуры играют ключевую роль. Важно отметить, что в [2] рассмотрены основные принципы построения математических моделей для расчета распределения интенсивности излучения и температуры в тканях кожи. Моделирование также позволяет оптимизировать параметры лазерного воздействия, включая интенсивность и длительность импульса, для достижения желаемых эффектов. Таким образом, метод Монте-Карло становится незаменимым инструментом для изучения и разработки технологий, связанных с лазерной обработкой полимеров.

Для проведения сравнительного анализа между результатами моделирования методом Монте-Карло и экспериментальными данными была разработана методология, включающая несколько этапов. На первом этапе были определены параметры лазерного излучения, такие как длина волны, мощность и длительность импульса, которые использовались как в моделировании, так и в эксперименте. На втором этапе для моделирования тепловых процессов в биотканях и полиметилметакрилате применялся метод Монте-Карло, который позволял учитывать случайное рассеяние света и теплопередачу в среде. Экспериментальная часть включала измерение температурных изменений с использованием тепловизионной камеры и термопар, размещённых в ключевых точках образцов. Такая методология позволила обеспечить сопоставимость данных и минимизировать погрешности.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных показало высокую степень совпадения температурных распределений в исследуемых материалах. Для биотканей характерно сложное распределение температуры, обусловленное их неоднородной структурой и спектром поглощения лазерного излучения. Что касается полиметилметакрилата, обладающего коэффициентом теплопроводности около 0,2 Вт/(мЖ), результаты моделирования продемонстрировали локальные нагревы в зонах рассеяния света, что также согласуется с экспериментальными данными. Это подтверждает не только корректность используемой модели, но и её способность точно воспроизводить тепловые процессы [3].

Заключение

Точность метода Монте-Карло была проанализирована на основе отклонений моделируемых температур от экспериментальных данных. Среднеквадратическое отклонение составило менее 5 % для большинства точек измерений, что указывает на высокую точность метода. Существенным аспектом является способность этого подхода учитывать случайные процессы, такие как рассеяние света и поглощение в неоднородных средах, что делает его особенно эффективным для моделирования сложных тепловых процессов. Авторы [4] отмечают, что метод Монте-Карло активно используется для моделирования прохождения фотонов через биоткань и расчета распределения поглощенных фотонов в среде. Таким образом, метод демонстрирует высокую надежность и применимость для исследования взаимодействия лазерного излучения с различными материалами.

Библиография

1. Ринкевичюс Б.С., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Исследование теплофизических процессов в жидкости методом лазерной рефрактографии // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63, № 1. С. 12–20.
2. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 103 с.
3. Антонов Е.Н., Баграташвили В.Н., Попов В.К., Попов, А.В., Бочкова С.А., Кротова Л.И. Разработка метода поверхностно селективного лазерного спекания для формирования матриц тканеинженерных конструкций // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Медицина. Фармация. 2023. № 1. С. 30–32.
4. Абдурахманова, Р.А., Магомедов М.А., Магомедова Л.К. Моделирование лазерного нагрева биологических тканей // Научные труды ДГУ. 2017. № 1. С. 297–298.