**Определение оптимальной пористости среды для оптического датчика давления в различных конфигурациях с помощью численного моделирования распространения света методом Монте-Карло.**

**Фадеев Н.А.1**

1Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,физический факультет, Москва, Россия

E–mail: fadeev.na21@physics.msu.ru

Во многих современных инженерных задачах, например, в робототехнике и при создании функциональных протезов, существует необходимость точного измерения давления, оказываемого на ту или иную часть устройства, механизма. Широко распространены датчики, в основе которых лежит изменение различных параметров используемой в устройстве электрической цепи, пьезоэлектрический эффект, но они не лишены недостатков. Первые не обладают высокой чувствительностью [1], для пьезоэлектрических датчиков ограничен рабочий диапазон.

Возможным методом решения поставленной задачи может послужить оптический датчик давления на основе оптически прозрачного пористого вещества. При деформации пористого вещества изменяются взаимное расположение и форма пор, вследствие чего происходит изменение оптических свойств пористой среды. Изменение интенсивности детектируемого излучения позволяет оценить степень деформации пористого материала, и при известных механических свойствах используемого материала становится возможным установить связь между изменением интенсивности детектируемого излучения и прикладываемым к датчику давлением.

Существуют приближенные способы аналитического описания прошедшего через сильно рассеивающие среды излучения, такие как уравнение диффузии [2]. Их использование затруднено в общем случае необходимостью в решении интегродифференциальных уравнений. Для решения данной задачи оправдано использование приближенных численных методов моделирования.

Классическим подходом в моделировании распространения излучения в сложных неоднородных средах является метод Монте-Карло, предложенный Пралем в 1989 году [3] и успешно применяемый при исследовании параметров рассеяния и поглощения биотканей, кожи, подкожных слоев [4, 5]. Данный метод позволяет описывать оптические свойства относительно сложных структур без необходимости теоретического анализа. Развитие вычислительной техники и алгоритмов параллельных вычислений позволило существенно ускорить метод Монте-Карло [6].

Одним из широко применяемых улучшений описанного метода для описания сложных геометрических конфигураций является возможность представления образца через воксели - трехмерные единичные кубы вещества с заданными свойствами. Однако для ряда задач данный подход не применим, так как границы раздела различных веществ не будут обладать необходимой степенью гладкостью из-за их кубической структуры [7]. Среди прочих методов моделирования может быть использован рейтрейсинг [8], с помощью которого рассчитывается распространение луча света в среде по законам геометрической оптики, но данный метод не позволяет учесть спектральные характеристики среды, такие как спектр поглощения и рассеяния.

Примером оптимального решения проблемы с детализацией границ раздела веществ является метод SVMC (от англ. Split-Voxel Monte Carlo) [9]. В рамках данного метода заданные воксели заменяются на плоскости, разделяющие два типа среды. При попадании указанный воксель фотонный пакет будет взаимодействовать с плоскостью отдельно в соответствии с уравнениями геометрической оптики, после прохождения - по реализованному в программном пакете методу Монте-Карло. Такой способ позволяет относительно сгладить поверхности объектов, повышая степень детализации при относительно невысоких дополнительных затратах вычислительных ресурсов.

В рамках данной работы были проведены расчеты распространения света в пористой среде с использованием SVMC. Был проведен сравнительный анализ индикатрис рассеяния единичной поры классическом методе MC, SVMC и метода трассировки лучей как эталона. Далее исследуются характерные зависимости диффузно отраженного сигнала и коэффициента пропускания оптически прозрачной пористой среды при различных конфигурациях источника и детектора излучения в схемах диффузного отражения и диффузного пропускания, и определяются оптимальные параметры пористости, которые позволяют получить максимальный контраст при заданных размерах среды.

*Исследование Фадеева Николая поддержано грантом фонда «БАЗИС» № 24-2-1-7-1.*

**Литература**

1. Ruzhan Qin, et al. A new strategy for the fabrication of a flexible and highly sensitive capacitive pressure sensor // Mycrosystems & Nanoengineering. 2021. V. 7. Article № 100.
2. Irving J. Bigio, Sergio Fantini. Quantitative Biomedical Optics: Theory, Methods and Applications.
3. S. A. Prahl. A Monte Carlo model of light propagation in tissue // Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology. 1989. V. 10305, A. 1030509.
4. Leiming Yue, et al. Scalable and massively parallel Monte Carlo photon transport simulations for heterogeneous computing platforms // Journal of Biomedical optics. 2008. V. 23. Issue 1.
5. Janelle E. Bender, et al. A Robust Monte Carlo Model for the Extraction of Biological Absorption and Scattering In Vivo // IEE Transactions on Biomedical Engineering. 2009. V. 56. Issue 4.
6. Y. Hasegawa, et al. Monte Carlo simulation of light transmission through living tissues // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 4515–4520.
7. T. Binzoni, et al. Light transport in tissue by 3D Monte Carlo: Influence of boundary voxelization // Computer methods and programs in biomedicine. 2008. V. 89, P. 14–23.
8. L. Colleselli, et al. Optical simulations in life-sciences: Benefiting from ray-tracing in biotechnology and photobiology // Optics communications. 2024. V. 552, A. 130028.
9. Shijie Yan, Qianqian Fang. Hybrid mesh and voxel for accurate and efficient transport modelling in complex bio-tissues // Biomedcal Oprics Express. 2020. V. 11, Issue 11. P. 6262–6270.