

Программные системы и вычислительные методы*Правильная ссылка на статью:*

Дамдинова Т.Ц., Дамдинов З.Ш., Прудова Л.Ю., Бубеев И.Т. Моделирование пор нерегулярной формы по яркости пикселей цифрового изображения // Программные системы и вычислительные методы. 2024. № 4. DOI: 10.7256/2454-0714.2024.4.72014 EDN: JPDKMT URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72014

Моделирование пор нерегулярной формы по яркости пикселей цифрового изображения**Дамдинова Татьяна Цыбиковна**

ORCID: 0000-0002-3597-3262

кандидат технических наук

доцент; кафедра "Инженерная и компьютерная графика"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670000, Россия, республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ dtatyanac@mail.ru**Дамдинов Зоригто Широпович**

ORCID: 0009-0002-1614-3746

магистр; кафедра «Программная инженерия и искусственный интеллект»; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В

✉ vdzorigto@mail.ru**Прудова Людмила Юрьевна**

кандидат технических наук

доцент; кафедра "Инженерная и компьютерная графика"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, Бурятия область, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в

✉ prudova456@mail.ru**Бубеев Иннокентий Трофимович**

кандидат технических наук

доцент; кафедра "Инженерная и компьютерная графика"; Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в

✉ it_bubeev@mail.ru[Статья из рубрики "Компьютерная графика, обработка изображений и распознавание образов"](#)**DOI:**

10.7256/2454-0714.2024.4.72014

EDN:

JPDKMT

Дата направления статьи в редакцию:

17-10-2024

Аннотация: Одним из актуальных направлений в области материаловедения является исследование и моделирование процессов, происходящих в капиллярно-пористых телах. Эти объекты играют важную роль в таких областях, как нефтедобыча, медицина, строительство, производство фильтров и аккумуляторов, создание новых материалов, где требуется точное понимание и контроль процессов, происходящих в пористых средах. Современные методы моделирования с использованием компьютерного зрения и высокие вычислительные мощности компьютеров позволяют значительно повысить точность и эффективность исследований капиллярно-пористых тел и процессов в них. Для пористых тел нерегулярной структуры точная визуальная фиксация процессов, происходящих внутри объектов, затруднительна, но потребность в этом имеется особенно для многоуровневых процессов, которые влияют на состояние пористого тела. Предлагаемые симуляторы и модели структуры таких объектов с использованием упрощений и абстрактных моделей для оценки взаимодействия веществ (процессов диффузии, перколяции и т.д.) непригодны в неоднородных и нерегулярных структурах.

Для получения геометрической модели пор произвольной формы предлагается использовать методы обработки цифровых изображений. Создан массив точек, описывающий геометрию поры. Выбран способ поверхностного моделирования на основе сплайн-интерполяции выделенных точек. Для получения поверхностной модели поры нерегулярной формы разработана методика формирования массива точек по уровням яркостей пикселей его цифрового изображения. Уровни яркостей для группировки исходных точек поры определены на основе локальных максимумов гистограммы яркостей. Разработан алгоритм построения поверхностной модели поры нерегулярной формы методами сплайн-интерполяции массивов точек. Представлен результат программной реализации разработанного алгоритма моделирования поверхности пор нерегулярной формы. По разработанной методике геометрического моделирования пор нерегулярной формы можно получить дальнейшую информацию для анализа о размере и объеме пор, пористости объекта в целом, а также проводить анализ процессов в пористых объектах. При необходимости для повышения точности формы количество уровней яркости для группировки точек можно увеличить.

Ключевые слова:

пористые материалы, пористость, обработка цифровых изображений, сплайн-интерполяция, поверхностное моделирование, нерегулярная форма, геометрическое моделирование, массив точек, гистограмма, уровень яркости пикселей

Статья написана при поддержке гранта "Молодые ученые ВСГУТУ-2024"

Введение

Одним из актуальных направлений в области материаловедения является исследование

и моделирование процессов, происходящих в капиллярно-пористых телах. Эти объекты играют важную роль в таких областях, как нефтедобыча, медицина, строительство, производство фильтров и аккумуляторов, создание новых материалов, где требуется точное понимание и контроль процессов, происходящих в пористых средах.

Современные методы моделирования и существующие модели представления пористых объектов часто не учитывают нерегулярность структур, что приводит к снижению точности моделирования и ограничивает их применение. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых методов и инструментов для моделирования процессов в нерегулярных структурах капиллярно-пористых тел.

Постановка задачи

Капиллярно-пористые тела – это материалы, характеризующиеся наличием множества пор, заполненных жидкостью или газом. Эти материалы широко применяются в различных областях, таких медицина (с точки зрения проникания медикаментозных средств в ткани), производство фильтров (для определений размеров пор, влияющих на качество фильтрации), создание новых строительных материалов с заданными свойствами (например, влагопроницаемость и теплоотдача), создание новых композиционных высокопрочных, легких материалов. Понимание и моделирование процессов, происходящих в пористых структурах, является важной задачей, поскольку это позволяет улучшить характеристики и эффективность данных материалов при их использовании [1].

Пористость материала определяется как соотношение объема пор к общему объему материала и является важной характеристикой, влияющей на его физические и механические свойства [2]. Пористые системы могут значительно различаться по форме, размеру и распределению пор. По геометрическим признакам пористые тела подразделяются на регулярные пористые структуры с правильным чередованием в объеме тела отдельных пор или полостей и соединяющих их каналов, а также на структуры, со случайными формами, размерами, ориентацией и взаимным расположением. В зависимости от геометрических и топологических характеристик, поры можно классифицировать на несколько типов: открытые, закрытые, тупиковые и сквозные [3].

Методы исследования пористых структур рассмотрены в работе [4]. Здесь представлена классификация пористой структуры материалов по происхождению и размерно-геометрическим признакам. Авторы подчеркивают, что «Известно более 60 аналитических методов исследования пористой структуры твёрдых тел, систематизированных по физическим принципам определения её характеристик». Нерегулярные структуры капиллярно-пористых тел имеют сложные геометрические формы, что затрудняет их анализ и моделирование процессов в них [5]. Известны инструментальные методы определения пористости, которые являются трудоемкими и материалоемкими [6]. Эти методы требуют значительных затрат времени и ресурсов для проведения экспериментов и последующей обработки данных. В результате, процесс исследования капиллярно-пористых тел становится крайне затратным, что ограничивает возможности для проведения обширных исследований. Основной проблемой является отсутствие универсальных методов, которые могли бы точно описывать и прогнозировать состояние таких материалов. Существующие модели часто основаны на упрощенных допущениях, что приводит к снижению точности моделирования и оценки для получения адекватного представления о способе или принципах работы исследуемых объектов.

Современные методы моделирования включают использование хорошо разработанных методов компьютерного зрения [7, 8], вычислительных методов для анализа изображений пористых структур и создания соответствующих моделей [9]. Решение современных научных задач, например, таких как создание новых материалов с необходимыми характеристиками, требуют более точных данных, которые можно получить на основе анализа их цифровых изображений. Методы обработки цифровых изображений позволяют автоматизировать процесс сбора данных и их обработки, что значительно сокращает время на проведение исследований.

Отметим, что традиционно при моделировании пор используются упрощенные модели, представляющие вместо них фигуры известных форм [9-11] – круги, сферы, квадраты, кубы и т.д., а структура пористого объекта задается в виде решеток, клеток и т.п. (рис.1, рис.2)

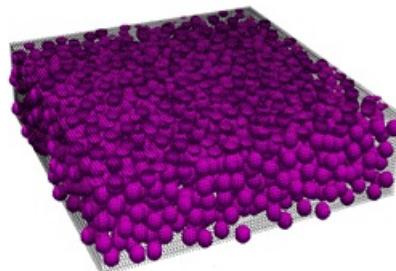


Рисунок 1 – Трехмерная модель пористого тела в сферической форме

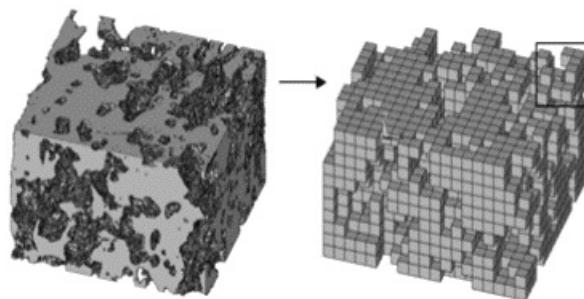


Рисунок 2 – Упрощенная модель пористого тела в виде вокселей

Основные направления современных методов моделирования пористых материалов можно представить на программах компьютерного моделирования – PoreSpy и OpenPNM. (рис.3, рис.4). Приложение PoreSpy описывает поры на плоскости, а OpenPNM – структуру пористого объекта в 3D.

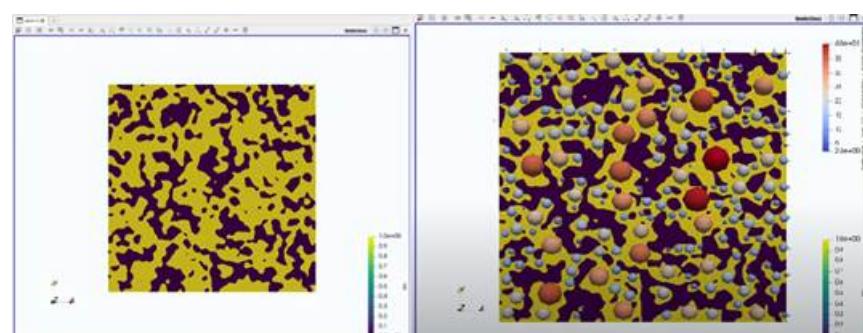


Рисунок 3 – Пример обработки пористого тела проектом PoreSpy

OpenPNM – проект с открытым исходным кодом, который также направлен на

моделирование пористых материалов. В отличие от PoreSpy, в OpenPNM пористая структура представляется в виде связанных сфер (рис.4). Такой подход является более реалистичным с точки зрения моделирования пористых материалов, так как сферы могут более точно соответствовать форме и размеру пор в пористых структурах. Однако такое представление также является абстрактным, поскольку сферы, представляющие поры связываются между собой прямыми линиями, что приводит к ограничениям в точности моделирования, особенно для пористых материалов нерегулярной формы.

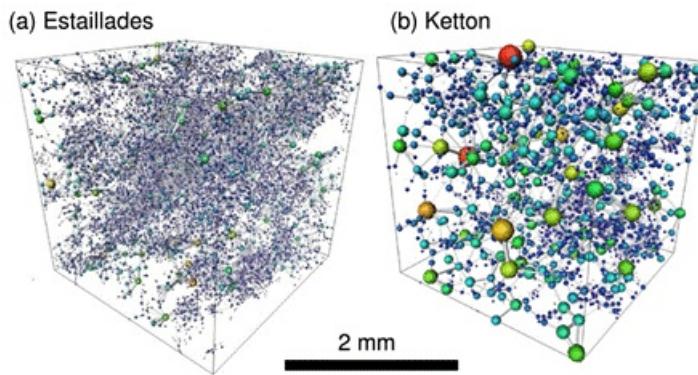


Рисунок 4 – Пример обработки пористого тела проектом OpenPNM

Алгоритм моделирования пор нерегулярной структуры

Программное решение моделирования пор нерегулярной структуры представляет собой ввод пользователем изображений срезов пористого тела, аналогично [12, 13]. По обработанному изображению поры выделяются границы срезов на основе информации по яркости пикселей, с последующим построением 3D модели по выделенным граничным точкам срезов.

Для моделирования реальных процессов в первую очередь требуется получить наиболее приближенное представление о форме пористого объекта. Одним из основных способов при моделировании пористых объектов являются методы поверхностного моделирования для создания гладких и непрерывных поверхностей, что позволяет более точно описывать форму пор и их распределение в материале. Отметим, что аппарат поверхностного моделирования достаточно хорошо разработан [14, 15].

Для построения поверхностных моделей имеются различные методы, каждый из которых имеет свои особенности и области применения [16, 17]. Метод с использованием аналитических моделей предполагает создание поверхностей на основе уравнений, описывающих известные геометрические формы - цилиндрические, канонические, сферические и эллиптические поверхности. Также поверхности могут быть построены на базе кривых. Кривые, полученные из поперечных сечений объекта, могут быть использованы для создания трехмерной модели путем метода экструзии или вращения. Поверхности могут быть также построены по существующим поверхностям, используя методы интерполяции и экстраполяции. Например, для создания модели поверхности из нескольких известных поверхностей можно использовать метод билинейной интерполяции, который позволяет плавно переходить между заданными поверхностями. Такой подход применяется для моделирования сложных объектов.

Другим подходом к построению поверхностей является использование данных на базе массива точек. Массив точек для построения поверхности может быть обработан методами, которые включают создание полигональных сеток, биноминальных

поверхностей, бикубических поверхностей Кунса, а также четырехугольных и треугольных поверхностей Безье [15]. На практике многие кривые и поверхности составляются из относительно простых гладких частей - отрезков (кривых) или фрагментов поверхностей, каждый из которых можно с достаточной точностью описать элементарной функцией одной или двух переменных. Эти методы подходят для решения задачи восстановления объектов неправильной формы, где в качестве исходных данных используется массив точек.

Результаты

Для решения задачи моделирования трехмерной модели поры нами был выбран, как и ранее [12], самый доступный пористый объект – сыр, с порами неправильной формы (рис.5). После этапа бинаризации исходного цифрового изображения среза выделены наиболее выраженные поры, из которых была выбрана одна крупная пора для создания его объемной модели.

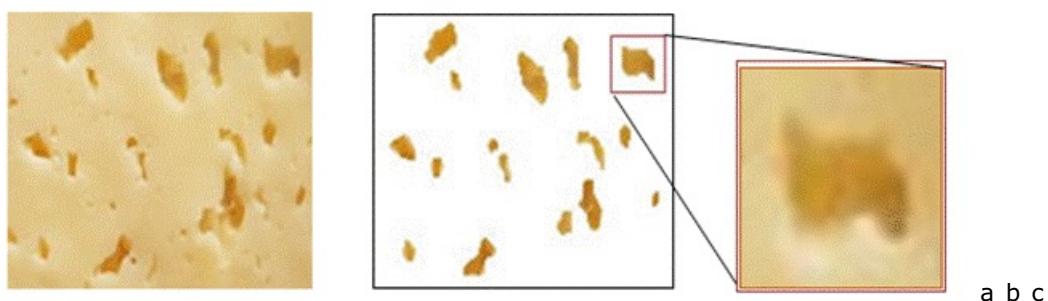


Рисунок 5 – Цифровое изображение среза сыра с порами модель поры нерегулярной формы а – исходное изображение, б – поры, выделенные после бинаризации, с – пора для создания 3D-модели

По яркости пикселей выбранной поры можно предположить предполагаемый размер поры в глубину [18]. Для этого по полутооновому изображению поры построена гистограмма яркостей, на которой программно определены глобальные и локальные максимумы (рис.6).

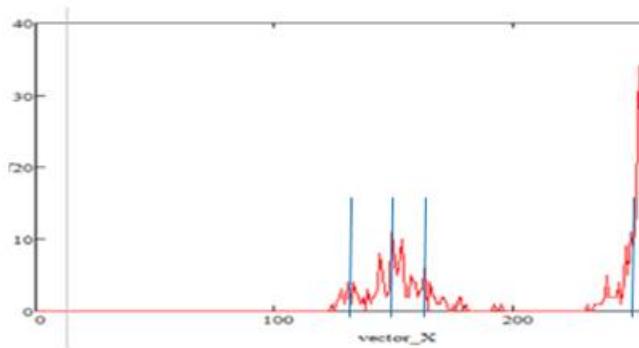


Рисунок 6 - Гистограмма яркости пикселей поры с максимумами

Из точек пор, сгруппированных на уровне этих яркостей, получены массивы граничных точек срезов поры (рис. 7).

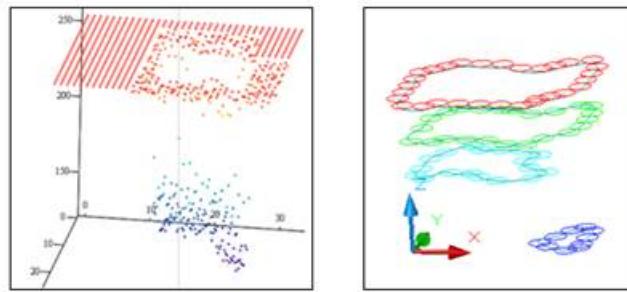
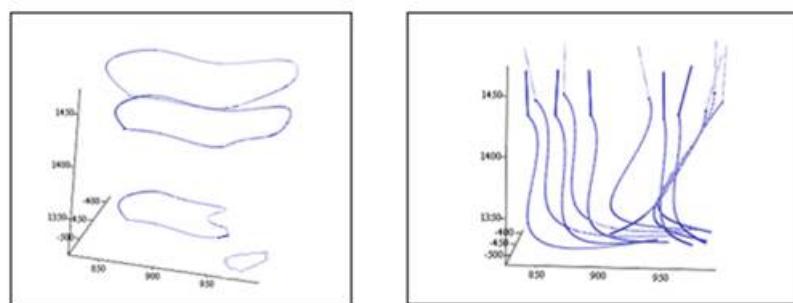


Рисунок 7 – Группировка точек на уровнях выбранных яркостей

Далее по каждому из массивов граничных точек была выполнена интерполяция кубическим сплайном, поперечные и продольные срезы которых представлены на рисунке 8. (Отметим, что для удобства визуального представления результата моделирования самая нижняя часть поры была пропущена.) Затем, на следующем шаге, на основе вычисленных сплайнов выполнено поверхностное моделирование (рис.9).



a b

Рисунок 8 – Сплайн-интерполяция граничных точек поры сыра

а – поперечные сечения, б – продольные сечения

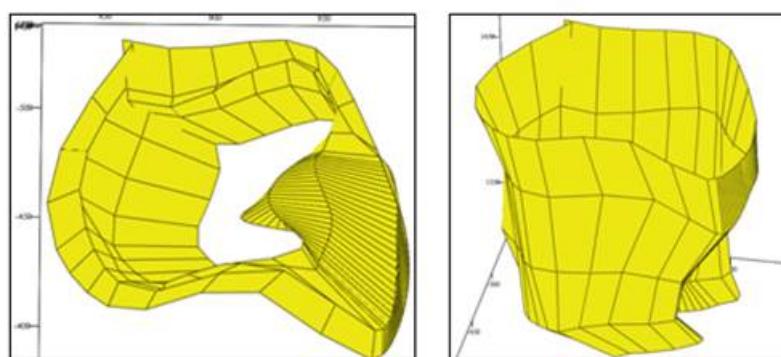


Рисунок 9 – Поверхностная модель поры нерегулярной формы

По разработанной методике геометрического моделирования пор нерегулярной формы можно получить дальнейшую информацию для анализа о размере и объеме пор, пористости объекта в целом, а также проводить анализ процессов в пористых объектах [19, 20]. При необходимости для повышения точности формы количество уровней яркости для группировки точек можно увеличить.

Заключение

Решение задачи по моделированию пор объектов с нерегулярной структурой показало, что вычислительные мощности современных компьютеров и современные методы

геометрического моделирования позволяют получить адекватную трехмерную модель поверхности поры реального объекта. Применение этого решения позволит с высокой степенью точности воспроизводить сложные геометрические структуры, характерные для пористых материалов, что позволит развивать данное направление дальше для анализа пористых тел с нерегулярной структурой и процессов в них.

Библиография

1. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых тела / А. В. Лыков. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 296 с.
2. А.В. Медведева, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов. Классификация методов контроля пористости материалов // Вестник ТГТУ. 2012. Том 18. № 3.
3. Беркман, А. С. Структура и морозостойкость стеновых материалов / А. С. Беркман, И. Г. Мельникова. – М.: Госстройиздат, 1962. – 166 с.
4. Фандеев, В. П. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, № 4.
5. Хейфец, Л. И. Многофазные процессы в пористых тела / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
6. А. Г. Анисович, А. С. Буйницкая. Стандартные методы определения пористости материалов (обзор). // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, 2015. № 2. URL: <https://vestift.belnauka.by/jour/article/view/103/104>
7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
8. Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2024, № 3. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16.
9. Тарасевич, Ю. Ю. Перколяция: Теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2002.
10. Левандовский, А. Н. Моделирование разрушения пористого материала / А. Н. Левандовский, Б. Е. Мельников, А. А. Шамкин // Инженерно-строительный журнал. – 2017. – № 1 (69). – С. 3-22.
11. Алексеев, М. В. О расчете исходных данных для моделирования радиационно-индуцированных эффектов в материалах пористого типа / М. В. Алексеев [и др.] // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 208. – 21 с. – DOI: 10.20948/prer-2018-208.
12. Дамдинова Т.Ц., Аюшеев Т.В., Бальжинимаева С.М., Абатнин А.А. Моделирование тел со сферическими порами методом обобщенной линейной интерполяции // Программные системы и вычислительные методы. 2022. № 2. С. 42-51. DOI: 10.7256/2454-0714.2022.2.38262 EDN: ZTFTKU URL: https://e-notabene.ru/itmag/article_38262.html
13. Бальжинимаева С.М., Дамдинова Т.Ц., Аюшеев Т.В., – Моделирование тел со сферическими порами методом обобщенной линейной интерполяции. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022663716 от 19.07.2022. Заявка № 2022662918 от 08.07.2022 г.
14. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование / Н. Н. Голованов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 472 с.
15. Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
16. Поверхностное моделирование: основы, применение и преимущества // Научные Статьи.Ру – портал для студентов и аспирантов. – URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/poverhnostnoe-modelirovanie>
17. Косников, Ю. Н. Поверхностные модели в системах трехмерной компьютерной

графики: учебное пособие / Ю. Н. Косников. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2007. – 60 с.

18. Грузман, И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2000. – 168 с.

19. Дамдинова Т.Ц., Мосоров В.И., Дамдинов З.Ш., Коробков К.С.. Исследование параметров диффузионных слоев в процессах химико-термической обработки металлов по цифровым изображениям микроструктур. //Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2024613959 опубл.19 февраля 2024 г. Заявка № 2024612459 от 09 февраля 2024 г.

20. Дамдинова Т.Ц., Раднаева В.Д., Шалбуев Д.В., Советкин Н.В., Дерябин М.А. Способ визуализации процесса пропитки капиллярно-пористых объектов //Пат. №2817553 опубл.16/04/2024 заявка №2023126423/28.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Представленная на рецензирование статья посвящена моделированию пор нерегулярной формы в материалах, характеризующихся наличием множества пор, заполненных жидкостью или газом, по яркости пикселей цифрового изображения.

Методология исследования базируется на изучении и обобщении литературных источников по теме работы, применении графики, методов обработки изображений и компьютерного информационного моделирования.

Актуальность работы авторы статьи связывают с тем, что процессы, происходящие в капиллярно-пористых телах играют важную роль в таких областях, как нефтедобыча, медицина, строительство, производство фильтров и аккумуляторов, создание новых материалов, а современные методы и модели пористых объектов часто не учитывают нерегулярность структур, что приводит к снижению точности моделирования и ограничивают их применение, поэтому ощущается необходимость разработки новых методов моделей процессов в нерегулярных структурах капиллярно-пористых тел.

Научная новизна рецензируемого исследования, по мнению рецензента заключается в выводах о том, что вычислительные мощности современных компьютеров и современные методы геометрического моделирования позволяют получить адекватную трехмерную модель поверхности поры реального объекта и с высокой степенью точности воспроизводить сложные геометрические структуры пористых материалов.

В статье структурно выделены следующие разделы: Введение, Постановка задачи, Алгоритм моделирования пор нерегулярной структуры, Результаты, Заключение и Библиография.

Авторы, ссылаясь на опубликованные ранее работы, говорят о наличии более чем 60 аналитических методов исследования пористой структуры твёрдых тел, систематизированных по физическим принципам определения её характеристик. Сложные геометрические формы нерегулярных структур капиллярно-пористых тел затрудняют их анализ и моделирование происходящих в них процессов. Авторы считают, что для решения современных научных задач, таких как создание новых материалов с необходимыми характеристиками, необходимы точные данные, которые можно получить на основе анализа их цифровых изображений, такой подход значительно сокращает время на проведение исследований. В публикации рассмотрены традиционные для моделирования пор упрощенные модели, в которых в качестве образов пор

используются фигуры известных форм – круги, сферы, квадраты, кубы, а структура пористого объекта задается в виде решеток, клеток и т.п. Изложение сопровождается наглядными визуализациями. Современные методы моделирования пористых материалов рассмотрены в статье на примере программ компьютерного моделирования PoreSpy и OpenPNM, в которых на основе изображений срезов пористого тела по обработанному изображению выделяются границы срезов на основе информации по яркости пикселей с последующим построением 3D модели по выделенным граничным точкам срезов. Рассмотрение подходов к построению поверхностных моделей сопровождается примером решения задачи моделирования трехмерной модели поры самого доступного пористого объекта – сыра с порами неправильной формы, по яркости пикселей по полутоновому изображению поры построена гистограмма яркостей, программно определены глобальные и локальные максимумы, по каждому из массивов граничных точек выполнена интерполяция кубическим сплайном.

Библиографический список включает 20 источников – публикации отечественных ученых по теме статьи, а также патенты и программы для ЭВМ. В тексте имеются адресные ссылки на литературные источники, подтверждающие наличие апелляции к оппонентам. Рецензируемый материал соответствует направлению журнала «Программные системы и вычислительные методы», подготовлен на актуальную тему, содержит теоретические обобщения, элементы научной новизны и практической значимости. Статья рекомендуется к опубликованию.