

5. Негативное влияние микропластика: системы-мишени организма человека / П. А. Ермачкова, А. Н. Кравченко, О. А. Залата, С. Э. Шибанов // Мотивационные аспекты физической активности : материалы V Всерос. междисциплинар. конф., Великий Новгород, 26 февр. 2021 г. / Новгор. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого ; редкол.: Р. Я. Власенко (отв. ред.) [и др.]. – Великий Новгород, 2021. – С. 23–28.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ УГЛЕВОЛОКНА

К. Ю. Савицкий

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научные руководители: П. Н. Гракович, С. Н. Целуева

На примере программного продукта, написанного на языке программирования Python, выполняющего по цифровым фотоснимкам группировку измельченных углеродных волокон по длине для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину углеродных волокон различного типа, показана эффективность использования систем автоматизации в лабораторном анализе.

Ключевые слова: углеродное волокно, композиционный материал, длина углеродного волокна, измельчение, структурирование экспериментальных данных, язык программирования Python.

Углеродное волокно (УВ) – искусственный материал, получаемый термической обработкой исходных химических или природных волокон (прекурсоров) и характеризующийся высоким содержанием (до 99,9 % по массе) углерода. Они представляют собой тонкие нити диаметром от 3 до 15 мкм, образованные преимущественно атомами углерода, которые объединены в микроскопические кристаллы, выровненные параллельно друг другу. Упорядочивание кристаллов придает волокну большую прочность на растяжение [1]. Характеризуются УВ высокой прочностью, низким удельным весом, низким коэффициентом температурного расширения и химической инертностью, что определяет столь широкое их применение в различных сферах деятельности. ОАО «СветлогорскХимволокно» является крупным производителем углеродных волокнистых материалов и композитов на их основе [2–4]. Выпускаемые в Светлогорске УВ широко используются в измельченном состоянии в антифрикционных композиционных материалах семейства «Флувис», разработанных в ИММС НАН Беларуси. Одним из важнейших показателей является качество измельчения УВ, выражающееся функцией распределения волокон по длинам.

Объекты исследования в данной работе – углеродные волокна на основе гидратцеллюлозы производства ОАО «СветлогорскХимволокно».

Цель работы – разработка на языке Python программы, выполняющей группировку измельченных УВ по длине, и применение ее для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину УВ различного типа.

Методика и порядок подготовки образцов для получения цифровых фотоснимков:

1. Выбор партии волокна.
2. Отбор необходимого количества волокна из партии.
3. Подготовка взвеси измельченных УВ в жидкости, например, в этиловом спирте.

4. Нанесение взвеси на предметное стекло. Часть взвеси наносится на предметное стекло, на котором находится в течение ~2 ч. За это время происходит полное испарение спирта.

5. Визуальная проверка стекла на наличие волокон.

6. Микроскопический анализ и получение цифровых фотоснимков. Для анализа применялся электронный цифровой микроскоп компании Carl Zeiss Jena, который позволяет выполнять цифровые фотоснимки. Пример фотоснимка представлен на рис. 1.

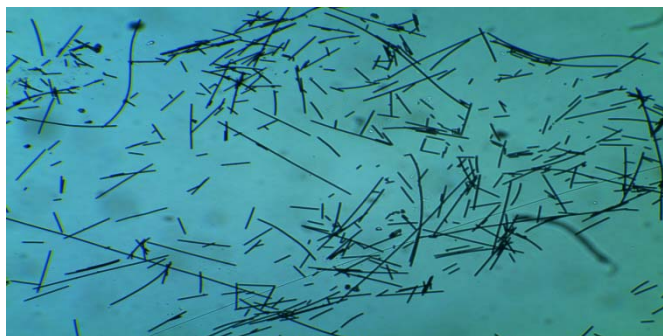


Рис. 1. Фото углеродных волокон под микроскопом

Полученные цифровые фотоснимки обрабатывались разработанной в ходе выполнения работы программой для анализа волокон по таким параметрам, как длина и площадь. Результаты анализа программа сохраняет в виде таблицы в табличном процессоре Excel, что удобно для последующего изучения влияния времени измельчения на фракционный состав и длину с целью оптимизации технологических параметров измельчения УВ, необходимых для получения композиционных материалов.

Алгоритм работы программы. Для повышения точности анализа необходимо отредактировать изображения, полученные на цифровых фотоснимках. Для этого программа содержит функционал изменения яркости и контрастности изображения.

В алгоритме распознавания волокон программы можно выделить несколько шагов:

1. Подготовка изображения, изменение его яркости и контрастности, чтобы функция threshold (позволяет получить черно-белое изображение с четкими линиями) сгенерировала наиболее четкий результат. Данная функция выполняется для каждого пикселя. Параметры яркости, контрастности и порога для threshold выведены в интерфейс и могут быть изменены и применены для предпросмотра результата и оптимизации параметров.

2. Обработка изображения функцией поиска контуров. Данная функция выделяет объекты на основе перепада значений в пикселях. После первого шага обработки волокна имеют четкие контуры на фоне. Контуры проходят проверку на наличие внутренних контуров, чтобы вычесть внутренний контур из общего объекта (рис. 2).

3. Выделение отдельных волокон из объекта путем рекурсивного прохождения по полученному объекту слева-направо. Программа запоминает посещенные места. После получения первой маски программа определяет наличие несканированных мест и, если таковые имеются, повторяет алгоритм до тех пор, пока все части объекта не будут просканированы. В конце в полученных масках волокон пускаются лучи в некотором диапазоне углов. Из точки, самой отдаленной от начальной, выпуска-

ются новые лучи. Алгоритм закончит работу, когда расстояние между начальной и конечной точкой будет меньше заданного. Программа не учитывает волокна, расположенные на краю рабочей области, выходящие за ее пределы. Полученная прямая будет являться длиной волокна. Из-за небольшого количества точек, из которых преимущественно состоят ломаные, аппроксимация излишняя.

Полученные таким образом значения обозначают длину волокна в пикселях (рис. 3).



Рис. 2. Внешние (зеленые) и внутренние (желтые) контуры

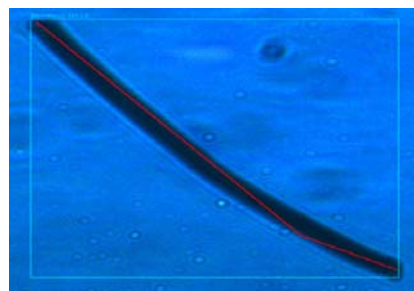


Рис. 3. Ломаная, определяющая длину

В настройках программы есть поле, которое соответствует количеству микрометров в пикселях. Таким образом, длина может быть рассчитана для фотографий разных размеров и масштабов. Единственным условие является то, что все фотографии, обрабатываемые при одном запуске программы, должны быть одинаковы по размерам и масштабу.

Для определения погрешности в программе создан функционал задания эталона и расчета погрешности на его основании. Эталон задается путем построения ломаной при помощи проставления точек на выбранном волокне. В качестве эталона можно указать любое из волокон. Эталон можно задавать для нескольких волокон сразу. При большем количестве эталонов точность определения погрешности будет выше.

При подсчете погрешности в статистике используют как средние числовые значения, так и медианные. В программе эти значения рассчитываются как для отдельных групп, так и для всех УВ в выборке. Если в конкретном диапазоне нет эталонных волокон, то для расчета относительной погрешности в данном диапазоне будет использовано значение погрешности по всем УВ. Программа сначала рассчитывает абсолютную погрешность для каждого УВ, у которого есть эталонное значение длины. В случае, если эталонное значение не найдено ни в одном из волокон, погрешность считается нулевой.

Абсолютная погрешность ΔL для волокна рассчитывается по формуле

$$\Delta L = |L_{\text{этал}} - L_{\text{прог}}|, \quad (1)$$

где $L_{\text{этал}}$ – длина, рассчитанная по введенному эталону; $L_{\text{прог}}$ – длина, полученная в результате работы программы.

Для расчета относительной погрешности волокна группируются по диапазонам в зависимости от длины. Относительная погрешность δ , %, вычисляется для диапазона на основании среднего значения абсолютной погрешности и среднего значения длины в данном диапазоне в соответствии с выражением:

$$\delta = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=0}^k (\Delta L_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (L_{\text{прог } i})} 100 \%, \quad (2)$$

где k – количество волокон с эталонными значениями; n – количество волокон в диапазоне.

По формуле (2) выполняется расчет как для отдельных диапазонов, так и для всех волокон сразу. Полученные данные сохраняются в табличном процессоре Excel в виде таблицы, шапка которой представлена на рис. 4.

Длина	Количество	% от общего	Средняя (числовая)	Погрешность (числовая)	Средняя (медианная) ±	Погрешность (медианная)
-------	------------	----------------	-----------------------	---------------------------	--------------------------	----------------------------

Рис. 4. Шапка таблицы с результатами распределения длин волокон по диапазонам

Разработанная программа демонстрирует высокую эффективность автоматизации процессов лабораторного анализа измельченных УВ. Реализованный алгоритм обработки цифровых изображений, включающий коррекцию яркости и контрастности, выделение контуров, а также рекурсивное разделение волокон с последующим определением их длины, обеспечивает точное структурирование экспериментальных данных. Интеграция с табличным процессором Excel упрощает анализ фракционного состава и зависимости длины волокон от времени измельчения, что способствует оптимизации технологических параметров производства.

Использование эталонных значений и расчет относительной погрешности (на основе формул (1) и (2)) позволили минимизировать погрешность измерений, обеспечив достоверность результатов. Программа соответствует требованиям ГОСТ Р 57407-2017 и может быть адаптирована для исследований других типов волокнистых материалов.

Таким образом, применение подобных программных решений в промышленности и научной практике сокращает время обработки данных, повышает воспроизводимость экспериментов и открывает перспективы для дальнейшего развития методов анализа микроструктур композиционных материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний : ГОСТ Р 57407-2017. – Утв. и введ. в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 6 марта 2017 г. № 101-ст.
2. Костюкевич, В. В. Перспективные направления развития предприятия / В. В. Костюкевич // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 нояб. 2021 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2021. – С. XXVI–XXXII.
3. Костюкевич, В. В. Производство спецволокон и нитей с функциональными свойствами в ОАО «СветлогорскХимволокно» / В. В. Костюкевич // Нефтехимия – 2018 : материалы I Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и по нефтепереработке, Минск, 27–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2018. – Ч. 1. – С. 39–47.
4. ОАО «СветлогорскХимволокно». – Светлогорск, 2025. – URL: <https://www.sohim.by/> (дата обращения: 01.04.2025).