

Оригинальное практическое исследование
УДК 620.172.2
DOI 10.46418/3033-7852_2026_1_1_8-18

ГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕМЕНТА 3D-МИКРОСТРУКТУРЫ В ПРОГРАММЕ BLENDER

Елизавета Артёмовна Портнягина, Николай Петрович Мидуков,
Дмитрий Владиславович Худницкий

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Портнягина Е. А., Мидуков Н. П., Худницкий Д. В., 2026

Автор-корреспондент: Н. П. Мидуков, e-mail: mnp83@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена визуализации полученной микроструктуры картона в 3D-формате. Для этого использовались функции выдавливания по поверхностям в графических редакторах согласно запатентованному ранее методу. Области, которые являлись базой для создания 3D-модели фрагмента микроструктуры, были получены на основе изображений поперечного среза плоского слоя гофрокартона. Результатом графической обработки изображений областей среза стала твердотельная модель фрагмента микроструктуры, которая была экспортирована в формат STL. Результатом исследований стала графическая обработка STL модели в программе Blender для визуализации в VR-режиме. С этой целью были использованы дополнительные ресурсы программы Blender, в частности, была загружена ресурсная библиотека «аддон Blenderkit», что позволило подобрать необходимую текстуру 3D-модели микроструктуры для лучшего восприятия в VR-режиме. 3D-модель микроструктуры состоит из волокон, которые соединяются между собой, контактируя поверхностями. Для того чтобы определить наличие контактирующих поверхностей между двумя соседними волокнами в программе Blender, был выбран режим «рентгена», при котором объекты становятся прозрачными, но при этом визуализируются их контуры. Установленный масштаб, который был ранее определен по размерной шкале изображений срезов, полученных сканирующим электронным микроскопом, позволяет ориентироваться в размерах волокнистого материала и проводить корректные сравнительные измерения. Представленное исследование открывает новые знания о структуре и свойствах волокнистого композиционного материала, а настроенный VR-режим позволил оказаться «внутри» бумаги с использованием очков виртуальной реальности, обеспечивая возможность пространственного исследования микроскопических особенностей, недоступных при традиционных методах анализа.

Ключевые слова: микроструктура бумаги и картона, графическая обработка, волокна, свойства бумаги и картона, волокнистый целлюлозно-содержащий композиционный материал

Для цитирования: Портнягина Е. А., Мидуков Н. П., Худницкий Д. В. Графическая обработка элемента 3D-микроструктуры в программе Blender // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 8–18. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_8-18

GRAPHICAL PROCESSING OF A 3D MICROSTRUCTURE ELEMENT IN BLENDER SOFTWARE

Elizaveta Artyomovna Portnyagina, Nikolai Petrovich Midukov,
Dmitry Vladislavovich Khudnitsky

St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: N. P. Midukov, e-mail: mnp83@mail.ru

ABSTRACT

This article focuses on the 3D visualization of the previously obtained cardboard microstructure. For this purpose, surface extrusion tools in graphics editors were used, following a previously patented method. The source data for



the 3D microstructure fragment model was obtained from cross-sectional images of the corrugated board liner. Following the graphical processing of slice images, a solid model of the microstructure fragment was generated and exported to the STL format. The research resulted in the graphical processing of the STL model in Blender to enable its visualization in virtual reality (VR). To achieve this, the Blenderkit add-on resource library was employed, allowing us to find a suitable texture for the 3D microstructure model to improve its visualization in virtual reality. The 3D model of the microstructure consists of fibers that interconnect through surface contact. In order to identify contacting surfaces between neighboring fibers in Blender, we enabled the X-Ray view mode. This mode makes objects transparent but keeps their outlines visible. The scale, calibrated using the scale bar from SEM slice images, provides a reference for the fiber material's dimensions and allows for correct comparative measurements. This study provides new insights into the structure and properties of a fibrous composite material. The configured VR mode enabled users to be «inside» the paper using virtual reality headsets, allowing for the spatial exploration of microscopic features inaccessible to conventional analysis methods.

Keywords: microstructure of paper and cardboard, graphic processing, fibers, properties of paper and cardboard, fibrous cellulose-containing composite material

For citation: Portnyagina E. A., Midukov N. P., Khudnitsky D. V. (2026) Graphical processing of a 3d-microstructure element in Blender software, Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 8–18. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_1_1_8-18

ВВЕДЕНИЕ

Волокнистые целлюлозосодержащие композиционные материалы, к которым относятся бумага и картон, являются основой упаковки и печатной продукции. Их эксплуатационные свойства во многом определяются особенностями внутренней микроструктуры, формируемой на уровне отдельных волокон и контактирующих между собой поверхностей. Известно, что механическая прочность бумаги, способность выдерживать изгибающие и растягивающие нагрузки, а также пористость и влагопрочность целлюлозных материалов напрямую связаны с тем, как волокна распределены в объёме, и насколько развиты их межволоконные контакты. Однако изучение пространственного расположения волокон представляет собой сложную исследовательскую задачу, поскольку традиционные методы анализа дают лишь двумерную картину поперечного среза.

Многие научные центры в мире занимаются сегодня вопросами формирования 3D-модели микроструктуры бумаги и картона для прогнозирования и оценки её свойств. По наблюдениям скандинавских и немецких ученых [1, 2] волокна представляют собой правильную форму цилиндра, хотя из микроскопических снимков видно, что волокна имеют форму изогнутых лент.

В период пандемии были представлены результаты 3D-моделирования микроструктуры маски на основе волокнистого материала, которая должна была фильтровать частицы, сопоставимые с размерами вирусов [3]. Подобное представление волокон, конфигурация которых геометрически упрощена, встречается в работах [4, 5]. Результатами этих исследований стали тематические модели для расчёта и прогнозирования прочностных характеристик материалов. В работе [6],

несмотря на представление волокон в виде правильных цилиндров, выделены поверхности контакта, от которых в том числе зависит прочность бумаги и картона. Известно, что в зонах контакта образуются водородные связи, которые во многом определяют механические свойства указанных материалов. Кроме того, научная группа представила 3D-модели микроструктуры с учётом ориентации волокон, что, безусловно, является существенным шагом к отражению реальной микроструктуры в трёхмерном формате [7]. Среди важных достижений в области 3D-моделирования микроструктуры бумаги и картона в России можно выделить работы учёных из Архангельского университета [8]–[12]. Твёрдотельная модель микроструктуры бумаги была воссоздана с помощью программы, которая позволила учесть направления осей волокон, однако реальный размер и геометрия волокон в ней не отражены.

Наиболее близкая к реальной микроструктуре бумаги 3D-модель микроструктуры волокнистого материала была создана австрийскими исследователями (г. Грац) для оценки его воздухопроницаемости при различных условиях прессования [13, 14].

Развитие вычислительных технологий, совершенствование сканирующей электронной микроскопии, появление специализированного программного обеспечения открывают путь к более точному анализу структуры волокнистых материалов.

Известен метод цифровой сегментации, векторизации изображения микроструктуры бумаги при помощи программы Adobe Illustrator [15] и последующей 3D-реконструкции на основе векторизованных областей. На основании микроснимков поперечных срезов можно выделить отдельные

области, соответствующие волокнам, и сформировать STL-модели с помощью функции «выдавливание по сечениям» [16]. Полученные 3D-модели позволяют визуально оценить характер распределения волокон, пористость и наличие межволоконных контактов. Использование программы Blender и специализированных аддонов обеспечивает настройку материалов, масштабирование, прозрачность и визуализацию в режиме VR, что выводит восприятие микроструктуры бумаги и картона на новый уровень. В работе отмечено, что ранее была получена твердая трёхмерная модель фрагмента микроструктуры бумаги, экспортированная в формате STL, однако для корректного восприятия она нуждается в дополнительной графической обработке средствами Blender [17].

Визуализация волокон в пространстве позволяет не только формировать представление о структуре

листа, но и демонстрировать будущим инженерам, исследователям и студентам принципы межволоконного взаимодействия бумаги и картона. Благодаря внедрению VR-режима появляется возможность буквально «оказаться внутри бумаги» и наблюдать процессы формирования материала на микроуровне, что является одним из ключевых преимуществ подобного подхода.

Таким образом, необходимость комплексного изучения микроструктуры бумаги и картона, а также разработка визуальных методов её отображения в трёхмерном пространстве является актуальной задачей и соответствует современным направлениям развития отрасли. Проведённые исследования позволяют не только создавать реалистичные 3D-модели волокнистого материала, но и повышают понимание взаимосвязи структуры и эксплуатационных свойств целлюлозных композиционных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является фрагмент микроструктуры плоского слоя гофрокартона, состоящего из двух слоёв, один из которых покровный. Покровный слой представляет собой целлюлозный композиционный материал, содержащий волокна сульфатной белёной хвойной и лиственной целлюлозы, а также химико-термомеханической массы. Значительная часть волокон проходит вторичную переработку, вследствие чего материал относится к категории макулатурных и соответствует марке МС-7.

Для экспериментальной части исследования был использован гофрокартон, произведённый на фабрике АО «Каравасов» (Московская область, Ногинский район, дер. Каравасов). Масса квадратного метра данного картона составляла 120 г/м². Указанный материал применялся как плоский слой для гофрокартона с белым покровным слоем, что предопределяло требования к качеству его поверхности и к структуре.

Для изучения внутреннего строения материала был подготовлен поперечный срез фрагмента волокнистого композиционного материала. Образец был получен по запатентованному методу, основанному на поэтапной механической полировке и фиксации структуры. Такой подход позволяет избежать разрушения волокон и сохранить реальную геометрию микроструктуры. Визуализация микроструктуры поперечного среза осуществлялась ранее в Центре коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» — КМ «Прометей» с использованием сканирующего электронного микроскопа [16]. Указанное оборудование обеспечивает получение высокодетализированных изображений

с возможностью регистрации геометрии отдельных волокон и пор, что было продемонстрировано в предыдущих исследованиях авторов.

На основе ранее полученных электронно-микроскопических изображений была сформирована трёхмерная модель фрагмента микроструктуры картона. Процесс 3D-моделирования включал выделение областей, соответствующих волокнам на микроснимке, и их последующее преобразование методом выдавливания по поверхностям. Формирование 3D-модели осуществлялось в соответствии с методикой, представленной в запатентованной разработке [16], что обеспечивает воспроизводимость процедуры и корректность геометрии микроструктуры. Итоговый фрагмент 3D-микроструктуры был экспортирован в формат STL для последующей графической обработки и визуализации в профессиональном графическом редакторе.

Полученная модель содержит информацию о расположении волокон, характере их сопряжения, степени уплотнения и о наличии мезо- и микропустот, что позволяет комплексно оценивать физическую структуру покровного слоя картона и исследовать взаимосвязь геометрических параметров с механическими свойствами материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные ранее в работах изображения микроструктуры поперечного среза были использованы для формирования трёхмерной модели волокон покровного слоя картона. По своей геометрии волокна бумаги и картона представляют собой вытянутые плоские ленты, которые



соприкасаются между собой и формируют сложную, пространственно развитую волокнистую сеть. В более ранних исследованиях авторами была сформирована база микроснимков, полученных в результате последовательной полировки зафиксированных образцов, что обеспечило высокое качество визуализации внутренней структуры волокон.

Исследования проводились в рамках совместного научного проекта Санкт-Петербурга и Республики Беларусь¹. Одним из ключевых результатов данного проекта стала трёхмерная модель микроструктуры волокнистого материала, представлявшая собой твердотельную реконструкцию фрагмента внутреннего слоя картона. После построения 3D-геометрии модель была экспортирована в программный векторный формат и сохранена в формате STL, что позволило использовать её для дальнейшей графической обработки и визуализации в профессиональном редакторе.

Загруженная в программу Blender модель оказалась трудной для визуального восприятия в исходном виде, поскольку представляла собой сложную совокупность пересекающихся элементов без выделенных контуров и визуальных акцентов. Поэтому для корректного анализа микроструктуры потребовались дополнительные графические преобразования, включая настройку цвета и прозрачности волокнистого материала, толщины линий и геометрических параметров отображения. Эти действия позволили улучшить визуальное восприятие микроструктуры и повысить понимание процессов взаимодействия между отдельными волокнами.

На рисунке 1 представлен фрагмент микроструктуры покровного слоя гофрокартона, загруженный в программу Blender в формате STL, до выполнения этапов графической обработки.

Для повышения качества визуализации микроструктуры и формирования реалистичного графического представления поверхности волокон в программу Blender был дополнительно загружен специализированный аддон (дополнительный программный модуль) BlenderKit, содержащий библиотеку материалов и текстур. Его установка осуществлялась из локального каталога с последующей активацией в разделе «Add-ons», что обеспечило доступ к расширенному набору материалов, в том числе к текстурам, позволяющим имитировать поверхность волокнистого картона. На рисунке 2 представлено окно настроек программы Blender с подтверждением установки и активации аддона.

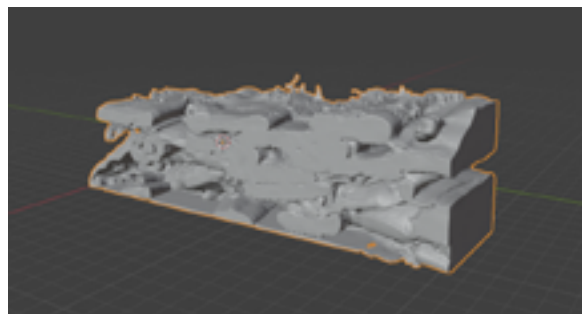


Рисунок 1. 3D-модель микроструктуры фрагмента покровного слоя гофрокартона

Figure 1. 3D model of the microstructure of a corrugated cardboard top liner fragment

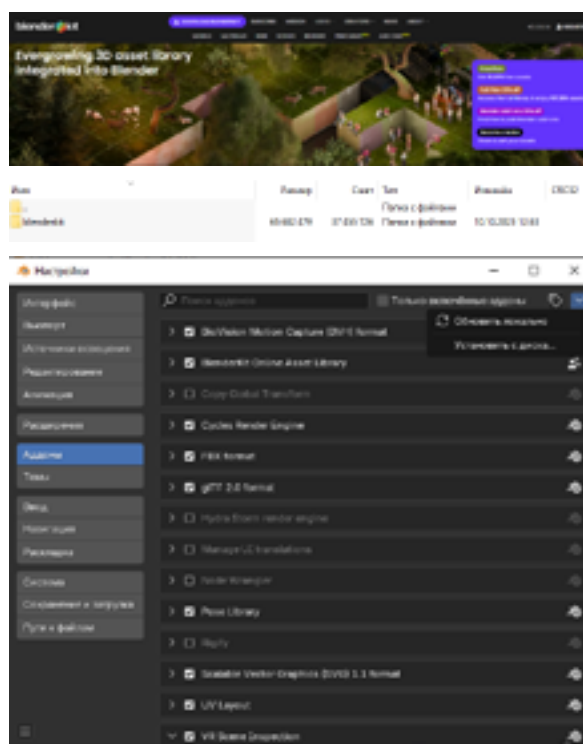


Рисунок 2. Окно настроек скачанного аддона Blender

Figure 2. Settings window for the downloaded Blender add-on

После активации аддона BlenderKit был выполнен подбор графических материалов, визуально соответствующих структуре волокнистого композиционного материала. В библиотеке аддона представлены различные текстуры поверхностей целлюлозных, древесных и композиционных материалов, из которых была выбрана текстура, визуально наиболее приближённая к поверхности картона. Поиск текстуры осуществлялся

¹ Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, на тему: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах».

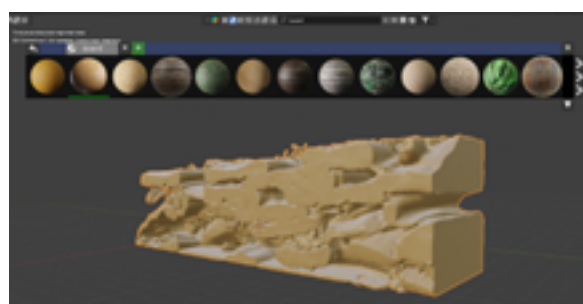
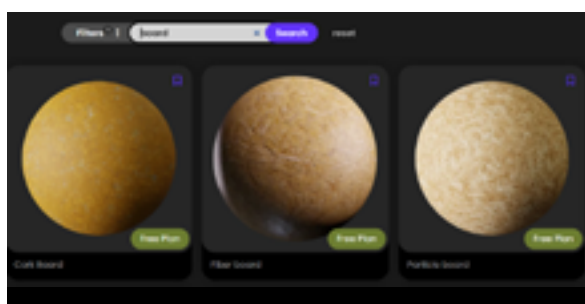
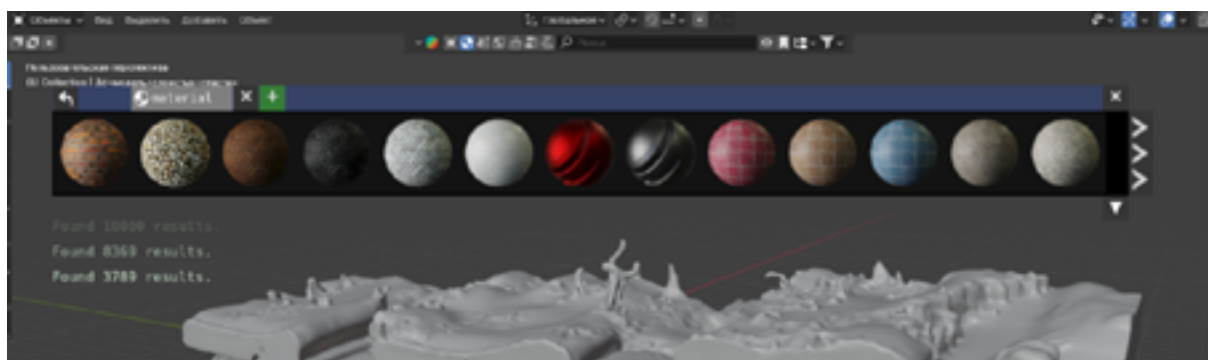


Рисунок 3. Трёхмерная модель микроструктуры покровного слоя картона после применения выбранного текстурного материала
Figure 3. A 3D model of the cardboard top layer microstructure after applying the selected texture material

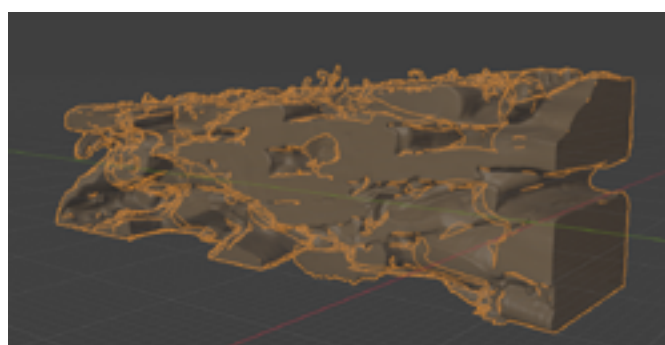
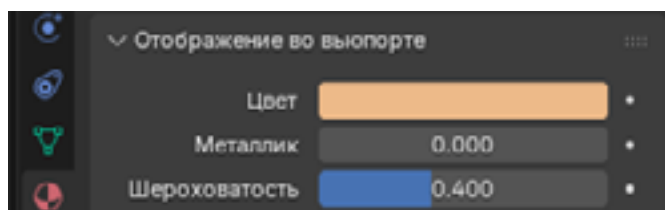
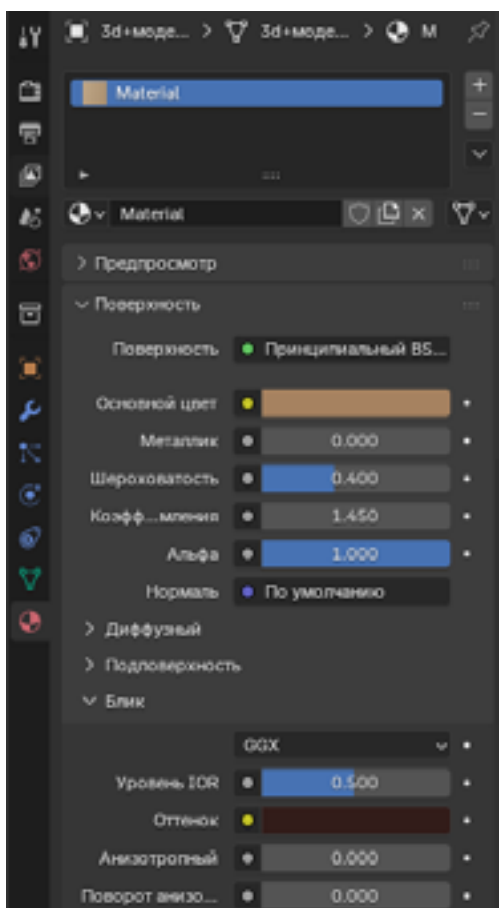


Рисунок 4. Визуализация граней волокон в целлюлозном композиционном материале в программе Blender
Figure 4. Visualization of fiber edges in a cellulose composite material using Blender

по ключевым словам, характеризующим древесноволокнистые материалы (например *board*, *fiber*, *paper*), что позволило выделить подходящие варианты для дальнейшей визуализации.

На рисунке 3 приведён интерфейс выбора материалов в аддоне BlenderKit, а также варианты доступных текстур, соответствующих волокнистым плитным материалам (*fiber board*, *particle board* и др.). В нижней части рисунка представлена трёхмерная модель микроструктуры покровного слоя картона после применения выбранного текстурного материала. Наложение текстуры позволило существенно улучшить визуальную интерпретируемость структуры модели и повысить наглядность межволоконного взаимодействия.

Волокнистый целлюлозный композиционный материал представляет собой совокупность переплетённых между собой волокон, образующих устойчивую пространственную структуру. В процессе формирования материала между соседними волокнами возникают области контакта, по поверхности которых вероятнее всего формируются водородные связи, а также силы механического сцепления. Чем больше площадь таких областей контактов, тем выше прочностные и эксплуатационные характеристики конечного материала.

Визуализация микроструктуры бумаги и картона позволяет сформировать целостное представление о характере межволоконного взаимодействия. В программе Blender для этой цели предусмотрен специальный режим предварительного просмотра материалов, включающий отображение контуров и граней трёхмерной модели. В дополнение ко всему Blender позволяет настроить прозрачность исследуемого объекта, что облегчает восприятие внутренней структуры и пространственных взаимосвязей между волокнами [17].

На рисунке 4 представлен пример визуализации граней волокон в трёхмерной модели микроструктуры. Подобное графическое отображение позволяет визуально оценить контактирование волокон друг с другом, а также определить участки с недостаточным прилеганием поверхностей волокон. Такой подход особенно полезен при анализе структуры материала студентами и исследователями, поскольку позволяет сформировать корректное представление о процессах, проходящих внутри слоя, недоступных при двухмерном наблюдении.

Очевидно, что более развитые межволоконные контакты способствуют увеличению механической прочности картона. Кроме того, визуальный анализ позволяет выявить распределение пор в структуре материала, оценить их размеры и конфигурацию, что имеет важное значение для таких свойств, как воздухопроницаемость, впитываемость и др.

Для повышения наглядности микроструктуры волокнистого композиционного материала в программе Blender была выполнена настройка параметров визуализации модели в режиме просмотра. В частности, были изменены характеристики отображения материалов, такие как цвет, «коэффициент металличности» и шероховатость поверхности. Данные параметры позволяют акцентировать внимание на ключевых структурных элементах модели, выделить отдельные волокна и облегчить визуальное различение контактов между ними.

Внесённые изменения способствовали улучшению визуального восприятия пространственной формы волокон, что особенно важно на этапе предварительного анализа структурных особенностей материала.

Настройка цвета и текстуры позволили усилить визуальный контраст между твердотельными элементами микроструктуры, облегчая выявление дефектов, разрывов, пор и участков неплотного контакта близлежащих волокон. Таким образом, корректировка параметров отображения являлась необходимым этапом подготовки 3D-модели к дальнейшему анализу [18].

При создании трёхмерной модели на основе изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, важным этапом являлась корректная передача масштаба реального объекта. На каждом микроснимке в нижней части присутствовала масштабная линейка, определяющая размер исследуемой области. Она была использована в качестве основы для моделирования масштабной шкалы в Blender. Такой подход позволил обеспечить соответствие геометрических размеров трёхмерной модели фактическим размерам волокон бумаги и картона.

Для формирования масштабного индикатора в Blender были задействованы специальные инструменты добавления геометрических примитивов и текстовых объектов. На основании данных масштабной линейки был создан графический элемент — шкала длиной 50 мкм, окрашенная в контрастный красный цвет для обеспечения высокой видимости на фоне модели микроструктуры. Данный элемент представлен на рисунке 5. Наличие масштабной шкалы позволяет наглядно оценить пространственный объём изучаемого фрагмента микроструктуры покровного слоя гофрокартона.

Кроме того, масштабная линейка была размещена непосредственно в рабочем трёхмерном пространстве модели, в её нижней части, как показано на рисунке 5. Такое расположение наиболее удобно при визуальном анализе, а также при последующих графических преобразованиях и настройках визуализации объекта.



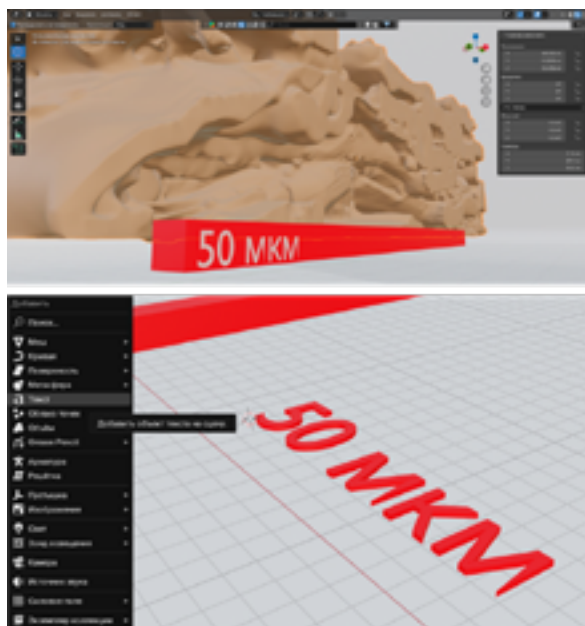


Рисунок 5. Масштабирование 3D-модели микроструктуры бумаги и картона

Figure 5. Scaling the 3D model of paper and cardboard microstructure

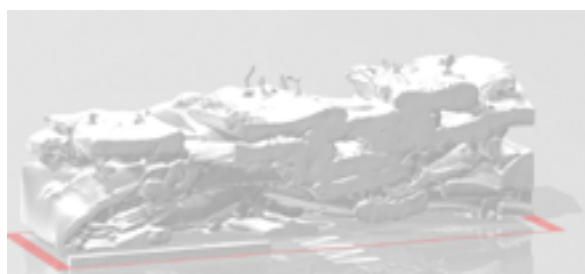


Рисунок 7. Результат графической обработки фрагмента микроструктуры

Figure 7. The result of graphical processing of a microstructure fragment

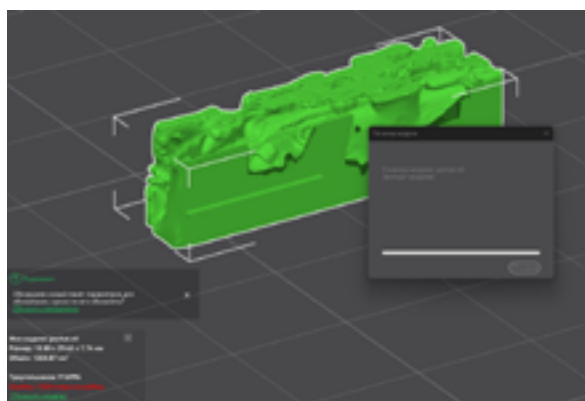


Рисунок 8. Процедура «починки» STL-модели фрагмента микроструктуры бумаги

Figure 8. Procedure for «repairing» an STL model of a paper microstructure fragment

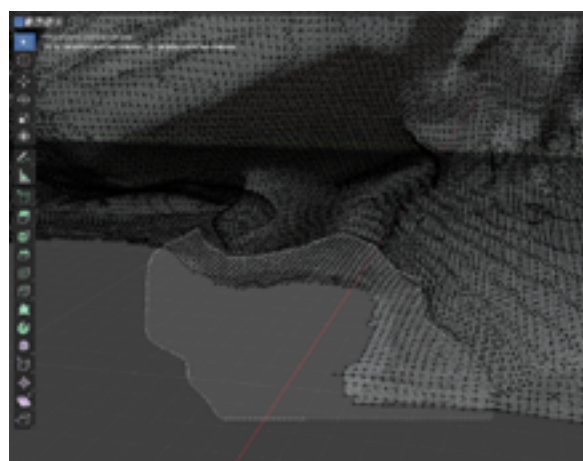
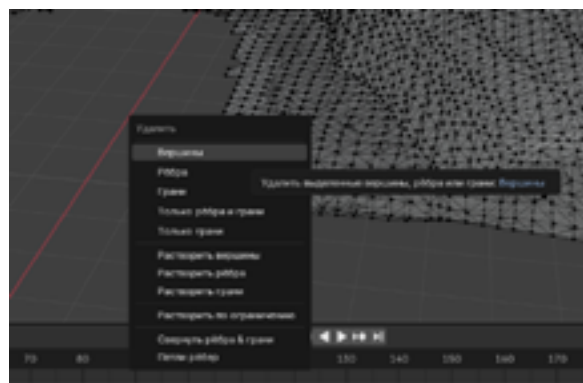


Рисунок 6. Удаление избыточных полигонов

Figure 6. Deleting excess polygons

Отредактированная в Blender STL-модель может содержать ряд геометрических дефектов, среди которых наиболее распространёнными являются локальные отверстия и разрывы в объёме волокнистого материала. Подобные дефекты возникают вследствие удаления отдельных полигонов в процессе корректировки модели и приводят к нарушению её целостности (см. рисунки 6–7). Кроме того, в ходе последующего экспорта STL-файла из Blender возможно изменение масштаба трёхмерной модели, что требует дополнительной проверки и уточнения размеров.

Для устранения выявленных ошибок и подготовки модели к физическому изготовлению была применена специализированная программа Creahty Print, предназначенная для написания управляющего кода (G-code) и анализа корректности геометрии стериолитографического файла. В рабочую область Creahty Print была загружена STL-модель, полученная после графической обработки в Blender. Программа позволяет автоматически проверить целостности поверхности, определить наличие разрывов и устранить их. Данная процедура представлена на рисунке 8.

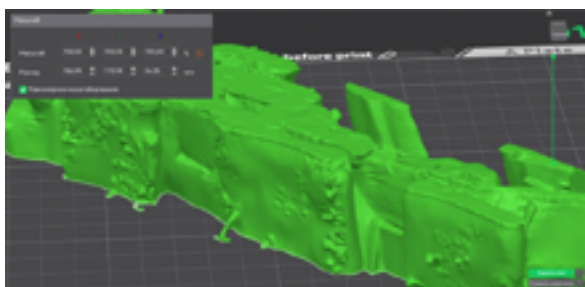


Рисунок 9. Увеличение масштаба фрагмента микроструктуры поверхности картона

Figure 9. Magnification of a cardboard surface microstructure fragment

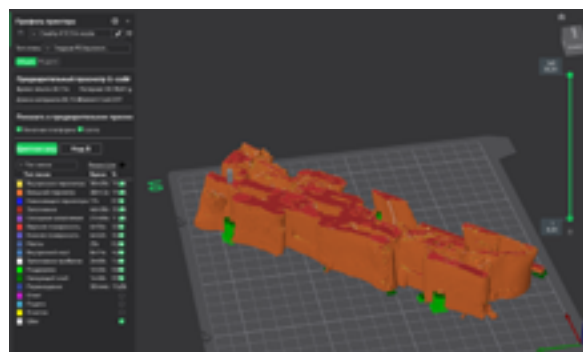


Рисунок 10. Нарезка стола печати на слои

Figure 10. Print Bed Slicing



Рисунок 11. Процесс изготовления фрагмента микроструктуры картона

Figure 11. Manufacturing process of a cardboard microstructure fragment



Рисунок 12. Готовая 3D-модель фрагмента микроструктуры покровного слоя гофрокартона

Figure 12. Completed 3D microstructure model of the corrugated board top liner

После проверки целостности STL-модели в программной среде Creality Print была выполнена подготовка объекта к физическому изготовлению с помощью 3D-принтера. На первом этапе осуществлялось масштабирование трёхмерной модели с сохранением пропорций и последующая корректировка её ориентации в рабочем пространстве. На рисунке 9 показан процесс увеличения размеров модели и её поворота, что позволило более подробно рассмотреть геометрию микроструктуры, оценить практически значимые элементы и убедиться в корректности их воспроизведения перед печатью.

Следующим этапом стала подготовка модели к слоистому изготовлению методом экструзионной (FDM) 3D-печати [19]. В рабочей среде были заданы параметры печати, соответствующие выбранному 3D-принтеру, и активирована функция автоматического формирования поддержек для участков с недостаточной площадью опоры. После этого была выполнена нарезка модели на слои (slicing), что позволило сгенерировать предварительный G-code, содержащий траекторию движения печатающей головки, скорость нанесения материала и параметры заполнения объёма [20]. На рисунке 10 представлен предварительный результат нарезки, включающий визуализацию слоевого построения модели и расчёт ожидаемого времени печати.

Таким образом, оба этапа — масштабирование и ориентация модели, а также формирование поддержек и получение управляющего кода — являются ключевыми этапами подготовки трёхмерной модели микроструктуры к последующему физическому изготовлению методом 3D-печати.

Заключительным этапом работы стала 3D-печать трёхмерной модели микроструктуры на 3D-принтере Creality K1C. После подготовки управляющий G-код был загружен в устройство для послойного изготовления фрагмента микроструктуры из полимерного материала. На рисунке 11 представлен вид рабочей зоны 3D-принтера в процессе формирования модели. В ходе печати происходило последовательное нанесение пластика с заданной толщиной слоя и заполнением внутренних областей, что позволило воспроизвести основные геометрические элементы микроструктуры.

Полученная печатная форма представляет собой увеличенную копию участка микроструктуры покровного слоя гофрокартона, на которой визуальны различимы детали внутреннего строения, включая каналы, области контактов и неровности поверхности [21]–[23]. Реализация физического образца позволяет проводить

дальнейшие исследования не только в цифровой среде, но и на материальном объекте, включая учебные демонстрации, экспериментальные измерения и сравнительный анализ результатов виртуальной и физической реконструкции (см. рисунок 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования была выполнена комплексная реконструкция микроструктуры покровного слоя гофрокартона на основе электронно-микроскопических изображений. По полученным микроснимкам была сформирована трёхмерная модель волокнистого композиционного материала, отражающая характер пространственного расположения волокон, контактных поверхностей и пор. Для повышения информативности визуализации в программе Blender были выполнены дополнительные графические процедуры, включающие настройку текстуры материалов, прозрачности, масштабирование, что позволило существенно повысить наглядность модели.

С использованием специализированного программного обеспечения была осуществлена подготовка модели к физическому изготовлению, откорректирована геометрия полигональной 3D-модели, сформированы поддержки и сгенерирован управляющий G-код. Заключительным этапом стал процесс трёхмерной печати фрагмента микроструктуры, что позволило получить образец и провести визуальную оценку реальных геометрических параметров структуры. Итоговый вид полученной физической модели представлен на рисунке 12.

Полученные результаты подтверждают возможность применения современных инструментов 3D-графики для анализа и визуализации структуры волокнистых композиционных материалов. Реализованный подход позволяет моделировать и исследовать внутренние элементы материала, изучать характер межволоконных взаимодействий, а также использовать созданные модели в образовательных и исследовательских целях. Таким образом, работа демонстрирует перспективность сочетания методов электронно-микроскопического анализа, трёхмерного моделирования и аддитивных технологий для изучения структуры бумаги и картона.

Список литературы

1. Tojaga V., Kulachenko A., Östlund S., Christian T. Modeling multi-fracturing fibers in fiber networks using elastoplastic Timoshenko beam finite elements with embedded strong discontinuities — Formulation and staggered algorithm // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021. No. 384. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.cma. 2021.113 964.
2. Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via μ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper // *Microscopy and Microanalysis*. 2021. No. 27. Pp. 1305–1315. DOI: 10.1017/S1431 927 621 012 563.
3. Wenjia Du, Iacoviello W., Du F., Fernandez T., Loureiro R., Brett D. J. L., Shearing P. R. Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection // *Communications materials*. 2021. No. 2. Pp. 69–79. <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00160-z>.
4. Afrookhteh S. S., Jamali J., Shakeric M., Baniassadi M. Stochastic reconstruction of carbon fiber paper gas diffusion layers of PEECs: A comparative study // *Energy Equimen and System*. 2018. No. 1 (6). Pp. 51–59. DOI: 10.22 059/ees. 2018.30 612.
5. Borodulina S., Kulachenko A., Tjahjanto D. D. Constitutive modeling of a paper fiber in cyclic loading applications // *Computational Materials Science*, 2015. No. 110. Pp. 227–240. [https://doi.org/10.1016/j. commatsci. 2015.08.039](https://doi.org/10.1016/j.commatsci. 2015.08.039).
6. Wicht D., Schneider M., Böhlke T. Anderson-accelerated polarization schemes for fast Fourier transform-based computational homogenization // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021. No. 122. Pp. 287–231.
7. Lin B., Bai Y., Xu B.-X. Data-driven microstructure sensitivity study of fibrous paper materials // *Materials and Design*, 2021. No. 197. Pp. 1–10. [https://doi.org/10.1016/j. matdes. 2020.109 193](https://doi.org/10.1016/j.matdes. 2020.109 193).
8. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования. // *Хвойные бореальной зоны*. 2016. Том XXXVII. № 5–6. С. 333–337.
9. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Моделирование структуры бумажного листа. // *Лесной журнал*. 2017. № 2/356. С. 160–172 (Изв. высш. учеб. заведений).
10. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Методы анализа волокнистых структур с применением численных методов 3D моделирования. / *Макулатура как основополагающее сырье в развитии производства бумажно-картонной, гофрокартонной продукции. Новые технологии, оборудование, экология на производствах ЦБП: мат. и докл. 14-й Междун. науч.-техн. конфер. 23–24 мая 2013 г. Караваево*. С. 98–104.
11. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Алгоритмы создания 3D модели целлюлозного волокна. / В сб. «Использование и разработка инновационных экологически безопасных технологий переработки макулатуры при производстве всего спектра бумажно-картонной продукции»: матер. и докл. 15-й Междун. науч.-техн. конфер. 29–30 мая 2014 г. Караваево. С. 59–67.
12. Kazakov Yakov, Lebedev Ivan, Guriev Timur. 3D-modelling of cellulose fibers. *Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings*, Darmstadt, 2016, pp. 189–192.
13. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper // *Chemical Engineering Science*. 2024. No 285. 12 p.



14. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics-Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems // *Transport in Porous Media*. 2022. No 1 (145), 589–612 pp.
15. Литвинов М. А., Григорьева П. А., Портнягина Е. А. Разработка алгоритмов для анализа пористости волокнистых целлюлозных материалов на основе обработки изображений микроструктуры // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна*. Серия 4. 2025. № 2. С. 90–92.
16. Патент № 2 795 190 Российская Федерация. Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала Бюл. № 17. Оpubл. 02.05.2023. / Мидуков Н. П., Куров В. С., Литвинов М. А., Зильберглейт М. А. 15 с.
17. Jason van Gumster. Blender Secrets: A Comprehensive Guide to Blender's Hidden Features. Amsterdam: Blender Foundation, 2023. 320 p.
18. Светлолобов А. Ю., Мидуков Н. П., Куров В. С., Колосова М. В. Метод и устройство для подготовки образцов бумаги и картона для визуализации микроструктуры поперечного среза // *Вестник СПбГУПТД*. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 3. С. 104–108.
19. Коротцов И. Г., Казанкова А. А. Сравнительный анализ программного средства Blender для 3d-моделирования // *Компьютерные и информационные науки*. 2022. № 4. С. 78–85.
20. Измайлов Д. В., Дрыгин Д. А., Ежова К. В. Анализ дефектов поверхности изделия при 3D-печати по их изображениям с использованием методов машинного обучения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 4. С. 552–559. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-552-559>.
21. Богаткин М. А. Особенности FDM 3D-печати: от идеи до готового изделия // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2021. № 2. С. 45–52.
22. Давиденко А. Ю., Рязанова А. А. G-CODE для 3D-принтеров // *Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых*. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. Т. 4. С. 56–59.
23. Yibo Liao, Wenhao Li, Ziheng Zhan, Huigao Duan, Peng Liu, Yiqin Chen, Zhaolong Wang. 3D-Printed Complex Microstructures with a Self-Sacrificial Structure Enabled by Grayscale Polymerization and Ultrasonic Treatment // *ACS Omega* 2021 6 (28), 18 281–18 288. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177.
2. Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via μ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper. // *Microscopy and Microanalysis*. 2021;27:1305–1315. DOI: 10.1017/S1431927621012563.
3. Iacoviello W., Du F., Fernandez T., Loureiro R., Brett D. J. L., Shearing P. R. Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection. // *Communications Materials*. 2021;2:69–79. <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00160-z>.
4. Afrokhteh S. S., Jamali J., Shakeric M., Baniassadi M. Stochastic reconstruction of carbon fiber paper gas diffusion layers of PEFCs: A comparative study. // *Energy Equipment and System*. 2018; 1 (6):51–59. DOI: 10.22059/ees.2018.30612.
5. Borodulina S., Kulachenko A., Tjahjanto D. D. Constitutive modeling of a paper fiber in cyclic loading applications. // *Computational Materials Science*. 2015;110:227–240. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.08.039>.
6. Wicht D., Schneider M., Böhlke T. Anderson-accelerated polarization schemes for fast Fourier transform-based computational homogenization. // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2021;122:287–231.
7. Lin B., Bai Y., Xu B. X. Data-driven microstructure sensitivity study of fibrous paper materials. // *Materials and Design*. 2021;197:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109193>.
8. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Characteristics of structural-dimensional properties of coniferous sulfate cellulose fibers using statistical modeling // *Conifers of the Boreal Zone*. 2016;37 (5-6):333–337. (In Russ.)
9. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Modeling the structure of a paper sheet // *Forest Journal*. 2017;2 (356):160–172. (In Russ.)
10. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Methods for analyzing fibrous structures using numerical methods of 3D modeling. In: Waste paper as a fundamental raw material in the development of paper and cardboard, corrugated cardboard production. New technologies, equipment, ecology in the pulp and paper industry: materials and reports of the 14th International Scientific and Technical Conference, May 23–24, 2013. Karavaevo; 2013. p. 98–104. (In Russ.)
11. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Algorithms for creating a 3D model of cellulose fiber. In: Use and development of innovative environmentally friendly technologies for processing waste paper in the production of the entire range of paper and cardboard products: materials and reports of the 15th International Scientific and Technical Conference, May 29–30, 2014. Karavaevo; 2014. p. 59–67. (In Russ.)
12. Kazakov Y., Lebedev I., Guriev T. 3D-modelling of cellulose fibers. In: Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings. Darmstadt; 2016. p. 189–192.
13. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper // *Chemical Engineering Science*. 2024;285:1–12.

References

1. Tojaga V., Kulachenko A., Östlund S., Christian T. Modeling multi-fracturing fibers in fiber networks using elastoplastic Timoshenko beam finite elements with embedded strong discontinuities — Formulation and staggered algorithm. // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021; 384:1–18. DOI: 10.1016/j.cma.2021.113964.



14. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems // *Transport in Porous Media*. 2022;145 (1):589–612.
15. Litvinov M. A., Grigorieva P. A., Portnyagina E. A. Development of algorithms for analyzing the porosity of fibrous cellulose materials based on microstructure image processing // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Series 4*. 2025;2:90–92. (In Russ.)
16. Midukov N. P., Kurov V. S., Litvinov M. A., Zilbergleit M. A. Method for preparing microstructure for controlling parameters of fibrous cellulose-containing material. Patent RF, no. 2 795 190, 2023. (In Russ.)
17. Van Gumster J. *Blender Secrets: A Comprehensive Guide to Blender's Hidden Features*. Amsterdam: Blender Foundation; 2023.
18. Svetolobov A. Y., Midukov N. P., Kurov V. S., Kolosova M. V. Method and device for preparing paper and cardboard samples for visualization of cross-section microstructure // *Bulletin of SPbSUITD. Series 4: Industrial Technologies*. 2023;3:104–108. (In Russ.)
19. Korotstov I. G., Kazankova A. A. Comparative analysis of Blender software for 3D modeling // *Computer and Information Sciences*. 2022;4:78–85. (In Russ.)
20. Izmailov D. V., Drygin D. A., Ezhova K. V. Analysis of product surface defects during 3D printing based on their images using machine learning methods // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;20 (4):552–559. (In Russ.)
21. Bogatkin M. A. Features of FDM 3D printing: from idea to finished product // *Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem*. 2021;2:45–52. (In Russ.)
22. Davidenko A. Y., Ryazanova A. A. G-CODE for 3D printers. In: *Youth and Science: Step to Success: collection of scientific articles of the 4th All-Russian Scientific Conference of promising developments of young scientists*. Kursk: South-west State University; 2020. Vol. 4. p. 56–59. (In Russ.)
23. Liao Y., Li W., Zhan Z., Duan H., Liu P., Chen Y., Wang Z. 3D-Printed Complex Microstructures with a Self-Sacrificial Structure Enabled by Grayscale Polymerization and Ultrasonic Treatment // *ACS Omega* 2021; 6 (28), 18 281–18 288. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177.

■ Информация об авторах

Портнягина Елизавета Артёмовна, студентка Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-код: 6338–9305.

Мидуков Николай Петрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного

университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266.

Худницкий Дмитрий Владиславович, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-код: 3086–9764.

■ Information about the authors

Portnyagina Elizaveta Artyomovna, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN- code: 6338–9305.

Nikolai Petrovich Midukov, Dr. Sci in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technologies of the Higher School

of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code 1021–6266.

Khudnitsky Dmitry Vladislavovich, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095

