

УДК 65.011.56:330.35:502.131.1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ MATERIAL FLOW ANALYSIS (MFA) ДЛЯ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРЕАТИВНЫХ ИНДУСТРИЙ¹Е.С. Косоногова, ²С.П. Гнатюк, ³Д.А. Ефименко¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, email: ekaterina.koc@mail.ru² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург³ Сервисно-производственное объединение «САНПРИНТ», Санкт-Петербург, email: defimenko@yandex.ru

Аннотация. Исследование посвящено теоретико-методологическому обоснованию применения анализа материальных потоков (MFA) для изучения и проектирования технологической инфраструктуры креативных индустрий в межотраслевом контуре, включающем лесопромышленный комплекс, целлюлозно-бумажную отрасль, полиграфические и аддитивные технологии. Показано, что MFA обеспечивает анализ и количественную реконструкцию потоков сырья и материалов, выявление технологических разрывов и формирование моделей согласования ресурсных циклов. Полученные результаты позволяют использовать методологию MFA при разработке устойчивых технологических решений, модернизации производственных цепочек и формировании платформенных моделей межотраслевого взаимодействия. Область применения результатов включает стратегическое планирование технологической инфраструктуры, создание цифровых систем мониторинга потоков и развитие материаловедения для креативных индустрий.

Ключевые слова: анализ материальных потоков; технологическая инфраструктура; креативные индустрии; лесопромышленный комплекс; полиграфия; аддитивные технологии; межотраслевые взаимодействия; устойчивое развитие; платформенные модели.

APPLICATION OF MATERIAL FLOW ANALYSIS (MFA) TO THE MAPPING AND OPTIMIZATION OF MATERIAL FLOWS IN THE TECHNOLOGICAL INFRASTRUCTURE OF CREATIVE INDUSTRIES¹E.S. Kosonogova, ²S.P. Gnatyuk, ³D.A. Efimenko¹ St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, email: ekaterina.koc@mail.ru² Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg³ SANPRINT Service and Production Association, Saint Petersburg, email: defimenko@yandex.ru

Abstract. The study provides a theoretical and methodological justification for applying Material Flow Analysis (MFA) to investigate and design the technological infrastructure of creative industries operating within an intersectoral system that includes the forest industry, pulp and paper production, printing technologies, and additive manufacturing. MFA enables quantitative reconstruction of material flows, identification of technological gaps, and development of models for coordinating resource cycles. The results demonstrate the potential of MFA for supporting sustainable technological solutions, modernizing production chains, and forming platform-based models of intersectoral integration. The findings can be applied in strategic planning, development of digital monitoring systems for material flows, and advancement of material science for creative industries.

Keywords: material flow analysis; technological infrastructure; creative industries; timber industry; printing; additive technologies; intersectoral interactions; sustainable development; platform models.

Дата поступления статьи в редакцию: 20.11.2025

Дата принятия статьи в печать: 25.12.2025

Введение

Развитие технологической инфраструктуры креативных индустрий требует согласованного функционирования сырьевых, перерабатывающих и высокотехнологичных отраслей, включающих лесопромышленный комплекс, целлюлозно-бумажное производство, полиграфические технологии и аддитивные процессы. Эти сегменты образуют межотраслевую систему, обеспечивающую формирование материаль-

ного основания креативного продукта. Усложнение межотраслевых цепочек, повышение требований к экологической и технологической устойчивости, а также переход к более ресурсно-эффективным моделям производства усиливают необходимость применения инструментов, позволяющих проводить комплексный и количественно обоснованный анализ движения материалов.

Методология анализа материальных потоков (MFA – Material Flow Analysis, систематический количественный метод анализа входов, выходов и накоплений материалов в пределах заданной системы) выступает одним из наиболее значимых инструментов для изучения структуры и динамики материальных потоков. Применение MFA позволяет фиксировать параметры трансформации сырья, выявлять узлы технологических несогласованностей, определять направления оптимизации и моделировать сценарии устойчивого развития. В контексте креативных индустрий, где свойства материального носителя напрямую определяют художественную, функциональную и коммерческую ценность конечного продукта, аналитические возможности MFA приобретают особую значимость.

В условиях реализации национальных стратегий, направленных на повышение технологической независимости, развитие перерабатывающих отраслей, углубление циркулярных моделей и поддержку креативной экономики, возрастает необходимость использования методологических подходов, обеспечивающих создание научно обоснованных моделей управления материальными потоками. MFA позволяет интегрировать аспекты устойчивого развития, инновационного материаловедения и межотраслевой кооперации, формируя единый подход к анализу и проектированию технологических систем.

Цель исследования

Цель исследования состоит в теоретико-методологическом обосновании применения анализа материальных потоков для исследования и проектирования технологической инфраструктуры креативных индустрий в межотраслевом контуре «ЛПК – ЦБП – полиграфия – аддитивные технологии – креативные индустрии».

Предмет исследования включает закономерности и проблемы применения метода MFA при анализе движения, трансформации и согласования материальных потоков в технологической инфраструктуре креативных индустрий.

Объектом исследования является совокупность материальных потоков и процессов управления ими в рамках межотраслевой цепи создания стоимости, объединяющей лесопромышленный комплекс, включая целлюлозно-бумажную отрасль, полиграфическое производство, смежные с полиграфией аддитивные технологии и сегменты креативной экономики.

Материалы исследования охватывают научные, статистические и аналитические данные о потоках сырья, полуфабрикатов и конечных продуктов ЦБП, полиграфических материалов, композитов и материалов для аддитивного производства, а также данные об их участии в формировании материальной базы креативных индустрий.

Методологическая основа исследования включает структурно-функциональное моделирование, сравнительный анализ, обзор и обобщение.

Результаты исследования

А. Методология MFA: теоретические основы, функционал и исследовательский потенциал

Методология анализа материальных потоков (Material Flow Analysis, MFA) представляет собой фундаментальный инструмент системного исследования ресурсных и технологических процессов, основанный на принципе сохранения массы и количественной реконструкции движения материалов в пределах заданной системы. Теоретическая значимость метода заключается в его способности выявлять структурные связи между производственными стадиями, фиксировать динамику переработки материалов и определять степень согласованности ресурсных, технологических и организационных циклов [4].

В межотраслевых системах, объединяющих лесопромышленный комплекс, полиграфические технологии, аддитивные производственные процессы и креативные индустрии, MFA позволяет формировать целостное представление о движении материалов: от первичного сырья до материального носителя креативного продукта. Применение MFA обеспечивает научно обоснованное описание потоков, выявляет узловые технологические разрывы и показывает возможности для внедрения циркулярных моделей обработки и переработки ресурсов.

Международная исследовательская практика демонстрирует высокую эффективность методологии при анализе сложных ресурсных систем. Так, применение MFA для оценки каскадного использова-

ния древесины в Германии позволило обосновать систему переработки с последовательным снижением качества материала и задержкой высвобождения углерода. Аналогично в США анализ потоков древесной биомассы способствовал развитию биоэнергетики и определению потенциала переработки в химическом производстве. Эти примеры подтверждают универсальность методологии и её значимость для исследования межотраслевых комплексов [2].

Применение MFA в контексте технологической инфраструктуры креативных индустрий формирует основу для проектирования устойчивых материаловедческих, технологических и сервисных решений, согласованных с требованиями экономики цикла и культурно-ценностными характеристиками конечного продукта.

Таблица 1

Функциональная характеристика и методологический потенциал метода MFA в исследовании межотраслевых систем

Функциональная характеристика MFA	Методологическое содержание	Потенциал применения в межотраслевой системе «ЛПК – полиграфия/аддитивные технологии – креативные индустрии»
Диагностическая функция	Количественное описание всех входящих, выходящих, промежуточных потоков и потерь	Выявление несогласованностей между ЛПК и полиграфией; количественная фиксация нехватки материалов премиальных сортов; определение узких мест на стадиях подготовки подложек
Прогностическая функция	Моделирование будущих потоков на базе сценарного анализа	Прогноз потребностей креативных индустрий в дизайнерских материалах; моделирование нагрузки на производственные мощности ЛПК; оценка возможной замены импортных материалов
Проектировочная функция	Формирование ресурсных и технологических конфигураций системы	Разработка межотраслевой платформенной архитектуры; проектирование пилотных линий, сервисных центров и каскадных циклов обработки материалов
Интеграционная функция	Согласование процессов между разнородными технологическими подсистемами	Построение сквозной системы «сырьё – технология – материал – креативный продукт»; устранение разрывов между стадиями целлюлозно-бумажного, полиграфического и арт-производства
Экологическая функция	Оценка воздействия на окружающую среду; расчёт потерь, выбросов, потенциала переработки	Формирование замкнутых циклов; выявление потенциала повторной переработки подложек и покрытий; оценка экологичности дизайнерских и композиционных материалов
Инновационно-технологическая функция	Оценка технологичности новых материалов и процессов	Определение пригодности биополимеров, композитов, арт-покрытий; оценка взаимодействия материалов с технологиями аддитивного производства
Управленческая функция	Обоснование решений в ресурсной политике, регулировании и стратегическом планировании	Поддержка решений о модернизации ЛПК и полиграфии; формирование стандартов движения материалов; разработка регенеративных стратегий и показатели эффективности потоков

А. Методология MFA является теоретически обоснованным и универсальным инструментом анализа ресурсных систем, обеспечивающим количественную реконструкцию потоков и выявление их структурных характеристик.

Б. Применение MFA в межотраслевой конфигурации «ЛПК – полиграфия – аддитивные технологии – креативные индустрии» формирует возможность согласования сырьевых, технологических и производственных циклов на всех стадиях формирования материального носителя креативного продукта.

В. Метод позволяет выявить системные нарушения в движении ресурсов, определить направления технологической оптимизации, обосновать проектирование сервисных платформ и обеспечить основу для формирования замкнутых производственных циклов.

Г. Исследовательский потенциал MFA проявляется в его способности интегрировать данные, моделировать сценарии развития, оценивать инновационный потенциал материалов и поддерживать принятие решений в области устойчивого развития и технологической модернизации.

Б. Модели применения методологии MFA в анализе межотраслевых материальных потоков технологической инфраструктуры креативных индустрий

Применение методологии MFA в межотраслевых системах предполагает переход от статического описания потоков к построению моделей, отражающих последовательность трансформаций матери-

ала, взаимосвязь технологических процессов и структуру обмена ресурсами между сегментами системы. В контуре «ЛПК – ЦБП – полиграфический комплекс – аддитивные технологии – креативная индустрия» материальные потоки формируют основу производственного цикла, определяя доступность, качество и параметры материалов, необходимых для создания конечного продукта.

Моделирование материальных потоков с использованием MFA позволяет реконструировать полный жизненный цикл материалов – от первичной добычи древесины до получения высокохудожественных и функциональных носителей информации. Это обеспечивает научную основу для проектирования замкнутых контуров, оптимизации технологических маршрутов, разработки новых материалов и формирования платформенных решений, объединяющих технологическую инфраструктуру отраслей.

В межотраслевой конфигурации использование моделей MFA приобретает особое значение, поскольку материальные потоки проходят через различные режимы технологической обработки: химическое и механическое превращение в целлюлозно-бумажном производстве, структурирование поверхности и нанесение покрытий в полиграфии, синтез композитов и аддитивное формирование в 3D-производстве, а также художественно-технологическое преобразование на стадиях креативной индустрии. Каждая стадия генерирует собственные отходы, побочные материалы, обратные потоки и передаваемые ресурсы, что делает модель MFA эффективным инструментом, позволяющим количественно их сопоставить и интегрировать.

Таблица 2

Модели и схематические элементы применения MFA в межотраслевой системе

Элемент / модель MFA	Содержание	Прикладное значение для технологической инфраструктуры креативных индустрий
Модель полного цикла (Full MFA System Model)	Описание всех стадий: вход сырья → производственные трансформации → переработка → выход продукта	Выявление критических стадий в ЛПК и полиграфии, влияющих на качество дизайнерских материалов
Модель каскадного использования (Cascade Use Model)	Последовательное снижение качества материала при повторных циклах	Обоснование сценариев переработки бумаги, картонов, покрытий, 3D-композитов
Модель баланса массы (Mass Balance Model)	Фиксация входов, выходов и потерь	Выявление потерь при финишной обработке, UV-печати, ламинации
Матрица межотраслевых связей (Intersectoral MFA Matrix)	Количественная фиксация обмена ресурсами между отраслями	Построение сквозной схемы «ЛПК → ЦБП → Полиграфия → Креативная индустрия»
Декомпозиционная модель потоков (MFA Decomposition)	Разделение потока на подкатегории: основной продукт, отходы, побочные фракции	Оценка возможностей регенерации и возвратного использования материалов
Сценарная модель развития (Scenario MFA)	Моделирование будущих потоков при изменении технологий	Оценка влияния инноваций материаловедения на потребности полиграфии и креативного сектора
Санкей-диаграмма потоков	Визуализация количества и направлений потоков	Инструмент общения с регуляторами и проектирования платформенных решений
Модель циркуляции (Circular MFA)	Оценка потенциала замкнутых циклов	Формирование регенеративных решений в ЛПК и полиграфии
Интегрированная модель MFA+LCA	Объединение материальных потоков с оценкой жизненного цикла	Оценка экологичности дизайнерских материалов и креативных продуктов

А. Модели применения MFA создают основу для системного анализа межотраслевого движения материалов, позволяя количественно фиксировать и сопоставлять процессы, происходящие в технологических цепочках ЛПК, полиграфии, аддитивного производства и креативных индустрий.

Б. Моделирование позволяет переходить от статического анализа к проектированию динамических, циркулярных и инновационно ориентированных систем управления материальными потоками.

В. MFA выявляет потенциал переработки и каскадного использования материалов, служит инструментом формирования технологических платформ и обоснования межотраслевой координации.

Г. Интеграция MFA с экологическими и экономическими методами (LCA, TEA) формирует междисциплинарную основу для исследования устойчивости технологической инфраструктуры креативных индустрий.

Д. Применение моделей MFA способствует проектированию новых материалов, улучшению качества продуктов, сокращению потерь, повышению технологической автономности и формированию цифровых двойников производственных циклов.

Выводы

Проведённое исследование показало, что методология анализа материальных потоков (МФА) является ключевым инструментом системного исследования межотраслевой технологической инфраструктуры креативных индустрий. Метод обеспечивает аналитическую глубину при реконструкции движения материалов, выявляет структурные разрывы и формирует основу для согласования ресурсных и технологических циклов в системе «ЛПК – ЦБП – Полиграфия – Аддитивные технологии – Креативные индустрии». МФА позволяет объединять количественные параметры потоков с технологическими, организационными и инновационными характеристиками производства, создавая методологическую платформу для проектирования устойчивых, ресурсно-эффективных и интегрированных межотраслевых решений. В результате методология МФА выступает как теоретически обоснованная и практически значимая основа развития технологической инфраструктуры материального ядра креативных индустрий.

Научные результаты исследования:

1. Установлено, что МФА является универсальным инструментом количественного анализа межотраслевых потоков и позволяет выявлять структуру движения материалов, определять причины несогласованности и фиксировать критические точки ресурсных и технологических разрывов.

2. Определено, что методология МФА обеспечивает возможность построения моделей согласования материальных циклов между ЛПК, полиграфией, аддитивным производством и креативными индустриями, формируя базу для проектирования платформенных решений и повышения согласованности технологических процессов.

3. Показано, что МФА позволяет оценивать инновационный потенциал материалов, прогнозировать их технологическую пригодность для дальнейших стадий обработки и тем самым поддерживать развитие направлений материаловедения, ориентированных на потребности креативных индустрий.

4. Установлено, что МФА является эффективным инструментом построения циркулярных и регенеративных сценариев переработки материалов, обеспечивая повышение устойчивости технологической инфраструктуры, сокращение ресурсных потерь и формирование сбалансированных моделей повторного использования сырья.

Область применения результатов исследования

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологической инфраструктуры креативных индустрий, модернизации производственных цепочек ЛПК, целлюлозно-бумажной отрасли и полиграфического комплекса, а также при разработке платформенных моделей межотраслевого взаимодействия. Методология МФА применима в стратегическом планировании ресурсного обеспечения, формировании циркулярных моделей переработки, разработке отраслевых стандартов движения материалов и создании цифровых систем мониторинга. Результаты могут быть интегрированы в образовательные и исследовательские программы, ориентированные на устойчивое развитие, межотраслевую кооперацию и управление технологическими системами нового поколения.

Литература

1. Каштелян Т.В., Полянская О.А. Продвижение устойчивых цепочек добавленной стоимости (ЦДС) в инновационной экономике // Цифровизация: экономика и управление производством: Материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 03–18 февраля 2025 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2025. С. 79-82. EDN PBNAQS.
2. Исаян З.Р. Инновационные тенденции в области полиграфии // Проблемы и тенденции научных преобразований в условиях трансформации общества: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 28 апреля 2020 года. Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2020. С. 78-84. EDN WYKSAU.
3. Пакшина И.А. Трансформация дискурсивных практик типографики // Трансформация социальных отношений в региональном социуме. VI Сухаревские чтения: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Саранск, 12 октября 2016 года. Саранск: Государственное казенное учреждение Республики Мордовия «Научный центр социально-экономического мониторинга», 2016. С. 470-478. EDN WXPFGX.
4. Черная Н.В., Дубоделова Е.В., Деряго И.П. Состояние современного рынка бумажной и картонной продукции // Новейшие достижения в области инновационного развития целлюлозно-бумажной промышленности: технология, оборудование, химия: материалы докладов Международной научно-технической конференции технической конференции, Минск, 04–06 апреля 2017 года. Минск: БГТУ, 2017. С. 33-39. EDN AXBFYR.
5. Ваховская М. Ю., Леснецкая А. О. Анализ материальных потоков региона и элементов транспортно-логистической системы на примере Республики Крым // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2021. № 3. С. 26-34. DOI: 10.17586/2310-1172-2021-14-3-26-34.