

ВОЗМОЖНОСТЬ ВСТРАИВАНИЯ ДАТЧИКОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ (ЛОС) В 3D-ПРИНТЕРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАВЛЕННОГО ОСАЖДЕНИЯ (FDM) ДЛЯ РАСШИРЕННОГО МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Шарара Симбараше

Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
shackssharara@gmail.com

POSSIBILITY OF EMBEDDING VOLATILE ORGANIC COMPOUND (VOCs) SENSORS INTO 3D PRINTERS FUSED DEPOSITION MODELING (FDM) FOR ADVANCED ENVIRONMENTAL MONITORING AND CONTROL

Sharara Simbarashe

Summary. One of the most relevant trends in the development of technological processes is ensuring environmental safety. Environmental control allows you to regulate and reduce the negative impact of production processes in the environmental sphere. One of the areas of modern scientific and technological progress that poses a danger to the environment is the use of 3D printers using the technology of deposited deposition. The main negative factor is the release of volatile organic compounds into the environment. The main purpose of the presented article is to perform an analysis regarding the possibility of solving the initial problem by monitoring and controlling emissions based on embedded volatile compound sensors. Because of the work, a comprehensive review of research issues related to the organization and technical features of solving the problem of environmental control by embedding sensors of volatile organic compounds was carried out. The author has obtained unique conclusions that not reflected in current scientific research on this issue. The paper presents the results of an analysis regarding the technical issues of integrating the sensors into the circuitry and the placement of the sensors, as well as organizational issues confirming the advantages and expediency of solving the initial problem at the expense of these funds. It was assumed that the use of the presented materials would significantly reduce the negative impact on the environment when using industrial 3D printers using the technology of fuse deposition modelling.

Keywords: 3D printer, volatile organic compounds sensor, deposited deposition technology, environmental safety, monitoring, environmental protection, emission, health.

Аннотация. Одним из наиболее актуальных трендов в развитии технологических процессов является обеспечение экологической безопасности. Экологический контроль позволяет урегулировать и снизить негативное влияние производственных процессов в экологической сфере. Одним из направлений современного научно-технического прогресса, представляющим опасность для окружающей среды, является применение 3D-принтеров, работающих по технологии наплавленного осаждения. Главным негативным фактором является выброс в окружающую среду летучих органических соединений. Основной целью представленной статьи является выполнение анализа относительно возможности решения исходной проблемы за счет мониторинга и контроля выбросов на основе встраиваемых датчиков летучих соединений. В результате работы выполняется комплексное рассмотрение исследовательских вопросов, связанных с организацией и техническими особенностями решения задачи контроля окружающей среды за счет встраивания датчиков летучих органических соединений. Автором получены уникальные выводы, не имеющие отражения в существующих на сегодняшний день научных исследованиях, посвященных данным вопросам. В работе представлены результаты анализа относительно технических вопросов интеграции размещения датчиков, а также организационных вопросов, подтверждающих преимущества и целесообразность решения исходной проблемы за счет данных средств. Предполагается, что использование представленных материалов позволит существенно снизить негативное влияние на окружающую среду при использовании промышленных 3D-принтеров, работающих по технологии наплавленного осаждения.

Ключевые слова: 3D-принтер, датчик летучих органических соединений, технология наплавленного осаждения, экологическая безопасность, мониторинг, охрана окружающей среды, выброс, здоровье.

Введение

Актуальность мониторинга окружающей среды и экологической безопасности продолжает увеличиваться в 2024 году ввиду усугубляющихся последствий климатических изменений, увеличения загрязнения воздуха и водоемов, а также деградации природных экосистем. Интенсивное промышленное развитие и урбанизация требуют внедрения передовых технологий для контроля и анализа экологических параметров, что позволяет своевременно выявлять и устранять экологические угрозы. Эффективный мониторинг способствует не только защите здоровья населения, но и устойчивому развитию, обеспечивая баланс между экономическими интересами и сохранением природных ресурсов для будущих поколений. Одной из наиболее актуальных проблем в 2024 году является мониторинг и контроль окружающей среды в результате использования 3D-принтеров, работающих по технологии наплавленного осаждения, ввиду выбросов в окружающую среду летучих органических соединений (далее — ЛОС).

Выбросы летучих органических соединений (от англ. Volatile Organic Compounds — VOC) в 3D-печати методом наплавленного осаждения (от англ. Fused Deposition Modeling — FDM) вызывают внимание со стороны исследователей ввиду их потенциального негативного воздействия на здоровье человека и окружающую среду. Во время печати нагретые пластиковые материалы, такие как ABS и PLA, выделяют ЛОС, включая стирол и акрилонитрил, которые представляют опасность ввиду их токсичности при длительном воздействии. Интеграция датчиков VOC в технологии FDM на момент 2024 года представляет значимое направление применительно к решению задачи по непрерывному мониторингу и контролю уровня вредных выбросов. Предполагается, что такие датчики способны обеспечить раннее предупреждение об опасных концентрациях ЛОС, позволят принять своевременные меры для улучшения вентиляции и очистки воздуха, а также будут способствовать созданию безопасных рабочих условий и соблюдению экологических стандартов. Начало формы Конец формы

В рамках текущей статьи рассмотрена новая интеграция датчиков летучих органических соединений в схемы 3D-принтеров для моделирования методом плавного осаждения, направленная на расширение возможностей мониторинга окружающей среды и контроля в процессе 3D-печати. Поскольку 3D-принтеры FDM выделяют ЛОС во время работы, встраивание датчиков непосредственно в электронику принтера обеспечивает мониторинг и управление в режиме реального времени, обеспечивая более безопасное качество воздуха в помещении и повышая качество печати. Мы обсуждаем выбор и интеграцию датчиков ЛОС, подробно описывая модификации аппаратного и микропрограммного обеспечения

принтера для размещения этих датчиков. Исследование подчеркивает потенциал интеграции сенсорных технологий в 3D-принтеры для снижения рисков для здоровья и воздействия на окружающую среду, прокладывая путь к более разумному и безопасному аддитивному производству.

Обзор литературы

На текущий момент времени в научном мире существует несколько исследований, в рамках которых решались отдельные вопросы, связанные с исходной темой данной статьи. В работе авторов Е.А. Борзыкина и Э.О. Хетагурова доказывается, что при 3D-печати оказывается значительное негативное влияние на окружающую среду в результате выбросов загрязняющих веществ [1]. Результаты работы подтверждаются проведенным качественным и количественным анализом выбросов. Ставится вопрос о необходимости технического и нормативно-правового регулирования данной проблемы. В работе Л. Ли также поднимается вопрос о вредных выбросах в атмосферу, как одном из основных недостатков при использовании 3D-принтеров [2]. Результаты показывают, что исходная проблема статьи действительно существует. Данным вопросам уделяется значительное внимание на сегодняшний день.

В материалах О.А. Ломовой и А.А. Кирилова поднимается вопрос о загрязнении и негативном влиянии летучих органических соединений в результате деятельности человека [3]. Статья освещает актуальность проблемы, исследует механизмы влияния ЛОС на атмосферу и последствия для глобального потепления. Авторами В.М. Ганшин, А.Н. Доронин, В.П. Луковцев, Н.В. Луковцева, В.А. Семенова и И.С. Кубанцев обосновывается необходимость интеграции в промышленных процессах дополнительных датчиков с целью определения уровня вредных веществ в атмосфере для принятия мер по снижению их концентрации. В частности, разработан электрохимический датчик для интегрального определения токсичных веществ в воздушной среде методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии, обеспечивающий аналитические исследования при их малой концентрации.

Результаты литературного обзора показывают, что на момент 2024 года в российском сегменте научных исследований отсутствуют полноценные результаты, отражающие работы по интеграции и использованию VOC датчиков. Соответственно наблюдается отсутствие использования данных датчиков для регулирования процесса 3D-печати. В связи с этим следует идентифицировать пробел научных исследований, рассматривающих возможность встраивания датчиков ЛОС в 3D-принтеры для мониторинга и контроля окружающей среды. В результате этого подтверждается актуальность и необ-

ходимость проведения текущего исследования, призванного впервые провести работу по рассмотрению возможности интеграции датчиков летучих органических соединений в схемы 3D-принтеров для моделирования методом плавленого осаждения, направленная на расширение возможностей мониторинга окружающей среды и контроля в процессе 3D-печати.

Методология

Методы сбора данных включают в себя непрерывный мониторинг уровня VOC во время печати с использованием датчиков. Данные планируются записывать в реальном времени и хранить в облачной базе данных для последующего анализа. Важно учитывать различные типы материалов для печати, так как они выделяют разные виды VOC, и проводить эксперименты при различных параметрах печати, таких как температура и скорость. В рамках настоящего исследования решаются методологические вопросы, связанные с учетом параметров печати. Для анализа собранных данных в дальнейшем планируется применять статистические методы, такие как регрессионный анализ и кластерный анализ, чтобы выявить зависимости между параметрами печати и уровнями выбросов VOC.

Для интеграции датчиков VOC в 3D-принтеры планируется использовать модульную конструкцию, позволяющую легко внедрять и заменять датчики. Стратегии размещения датчиков включают установку их в зоне экструзии, на пути воздушного потока и в зоне выхода готового изделия. Это обеспечит детальное понимание источников и уровней выбросов на каждом этапе процесса. Дальнейшие эксперименты в последующих исследованиях планируется проводить в контролируемых условиях лаборатории, чтобы минимизировать внешние факторы и обеспечить точность измерений. Анализ данных на основе предложенных в рамках данной статьи решений позволит создать модель выбросов VOC для различных режимов работы 3D-принтеров, что станет основой для разработки рекомендаций по снижению выбросов и улучшению экологической безопасности.

Также предполагается изучение влияния выбросов VOC на качество воздуха в помещении и здоровье операторов. Для этого будут использоваться портативные анализаторы качества воздуха и биомониторинг операторов, что позволит выполнить оценку воздействия VOC на их состояние и здоровье. В рамках исследования поднимается экономическая составляющая вопроса последствий внедрения систем мониторинга на основе сравнения с потенциальными затратами, связанными с загрязнением окружающей среды и угрозами для здоровья, возникающими вследствие неуправляемых выбросов.

Результаты

Первостепенным вопросом является интеграция датчиков в 3D-принтеры. Эффективная интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры FDM требует комплексного подхода, включающего несколько ключевых шагов:

1. Первый шаг — разработка модульной системы датчиков, которая легко интегрируется в конструкцию 3D-принтера. Эта система должна быть компактной и совместимой с различными моделями принтеров, обеспечивая гибкость и адаптивность. Датчики должны быть высокочувствительными и способными обнаруживать широкий спектр VOC, которые могут выделяться во время процесса печати;
2. Второй шаг — оптимизация размещения датчиков внутри 3D-принтера. Для этого необходимо провести моделирование воздушных потоков внутри рабочей камеры принтера, чтобы определить наиболее эффективные точки для установки датчиков. Обычно, датчики размещаются вблизи экструзионной головки, где температура наиболее высокая и выделение VOC максимально, а также на пути воздушного потока, чтобы фиксировать распространение VOC в рабочей зоне. Дополнительные датчики можно установить в зонах выхода готового изделия и вокруг принтера для мониторинга утечек VOC в окружающую среду;
3. Третий шаг — разработка системы сбора и обработки данных. Датчики VOC должны быть соединены с центральной системой управления 3D-принтером, которая будет собирать данные в реальном времени. Для этого может использоваться проводное или беспроводное подключение, в зависимости от конструктивных особенностей принтера и требований к безопасности. Собранные данные будут передаваться в облачную базу данных для хранения и анализа, что позволит отслеживать и контролировать выбросы VOC на протяжении всего процесса печати;
4. Четвертый шаг — программное обеспечение (далее — ПО) для анализа и мониторинга. Разработка специализированного ПО, которое будет обрабатывать данные с датчиков, предоставляя операторам 3D-принтера информацию об уровнях VOC в реальном времени. Это ПО должно включать алгоритмы для анализа трендов и выявления аномалий, что поможет в принятии оперативных решений для снижения выбросов VOC;
5. Пятый шаг — интеграция системы мониторинга в процессы управления качеством и безопасностью. Данные с датчиков VOC должны использоваться для оценки воздействия на здоровье операторов и окружающую среду. На основе анализа данных можно разработать рекомендации по оптимизации режимов печати, выбору материалов

и настройке вентиляции, чтобы минимизировать выбросы VOC и улучшить условия труда.

При этом важно учесть оптимальные стратегии размещения датчиков внутри 3D-принтера. Оптимальные стратегии должны учитывать несколько ключевых факторов для обеспечения точного мониторинга и контроля выбросов. Важно учитывать воздушные потоки, точки наибольшего выделения VOC, а также необходимость минимизации помех и обеспечения безопасности оборудования. Первым шагом является установка датчиков вблизи зоны экструзии, где материал нагревается и начинает выделять VOC. Экструзионная головка и сопло являются главными источниками этих выбросов, поэтому размещение датчиков в непосредственной близости от них позволит оперативно фиксировать выбросы в момент их появления.

Второй составляющей является размещение датчиков на пути воздушных потоков внутри рабочей камеры принтера. Вентиляционные отверстия или вытяжные системы, обеспечивающие движение воздуха через камеру, также являются важными точками для установки датчиков. Размещение датчиков на входе и выходе вентиляционной системы позволит оценить концентрацию VOC в различных точках воздушного потока, что поможет в оптимизации вентиляции и фильтрации.

Третий вариант предусматривает установку дополнительных датчиков на границах рабочей зоны и вблизи дверей или крышек принтера. Это поможет выявить утечки VOC из камеры печати и обеспечить безопасность окружающего пространства. Датчики, размещенные на этих участках, будут полезны для мониторинга общей утечки и контроля качества уплотнений и герметичности принтера.

Четвертая стратегия заключается в использовании нескольких датчиков внутри камеры для создания пространственной карты концентраций VOC. С помощью сетки из нескольких датчиков можно более точно определять зоны с наибольшими выбросами и корректировать процесс печати или систему вентиляции в реальном времени. Это особенно важно для крупных 3D-принтеров или тех, которые работают с большими объемами материала.

При этом важно учитывать, как различные типы VOC, выделяемые во время 3D-печати по технологии FDM, влияют на качество воздуха в помещении и экологическую безопасность во время 3D-печати по технологии FDM выделяются различные типы летучих органических соединений, такие как стирол, формальдегид, ацетальдегид и другие. Эти вещества могут значительно влиять на качество воздуха в помещении и представлять опасность для здоровья и окружающей среды. VOC являют-

ся органическими химическими веществами, которые легко испаряются при комнатной температуре и могут раздражать глаза, нос и горло, вызывать головные боли, головокружение и даже хронические заболевания при длительном воздействии.

На качество воздуха в помещении выделяемые VOC оказывают непосредственное воздействие, повышая уровень загрязненности. В помещениях с плохой вентиляцией концентрация этих веществ может быстро достигать опасных для здоровья значений. Например, стирол, который часто выделяется при печати из ABS-пластика, является канцерогеном и может вызывать серьезные проблемы с дыхательной системой. Формальдегид и ацетальдегид, выделяющиеся при печати из PLA, также известны своими токсическими свойствами и способностью вызывать аллергические реакции.

Экологическая безопасность также нарушается в результате выбросов VOC. Вещество, попадая в атмосферу, может способствовать образованию фотохимического смога и других вторичных загрязнителей. Эти процессы не только ухудшают качество воздуха, но и наносят ущерб растениям, животным и водным ресурсам. Долгосрочное воздействие высоких концентраций VOC в окружающей среде может привести к деградации экосистем и нарушению природного баланса. В связи с этим, использование 3D-принтеров без адекватного контроля выбросов VOC может существенно увеличить риск как для здоровья людей, работающих с этими устройствами, так и для окружающей среды. Поэтому интеграция систем мониторинга и фильтрации VOC становится критически важной для обеспечения безопасных условий труда и минимизации экологического ущерба. Оптимальные стратегии включают улучшение вентиляционных систем, использование фильтров и регулярное техническое обслуживание оборудования, чтобы поддерживать выбросы на минимальном уровне и защитить как здоровье людей, так и окружающую среду.

Продолжительное воздействие выбросов VOC из 3D-принтеров представляет значительные риски для здоровья и окружающей среды. На уровне здоровья человека хроническое воздействие высоких концентраций VOC может привести к развитию респираторных заболеваний, аллергических реакций, нарушений центральной нервной системы и даже онкологических заболеваний. Для людей, работающих вблизи 3D-принтеров, существует повышенный риск накопительного эффекта, который может проявиться спустя годы. Для окружающей среды выбросы VOC могут способствовать формированию фотохимического смога, который негативно влияет на качество воздуха и здоровье экосистем. Повышенная концентрация VOC в воздухе может также нарушать баланс экосистем, влиять на здоровье животных и растений, а также способствовать кислотным дождям.

Все это ведет к ухудшению условий обитания и снижению биологического разнообразия.

Смягчение этих рисков возможно с помощью переносных систем мониторинга и контроля VOC. Интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры позволяет в реальном времени отслеживать концентрацию вредных веществ в воздухе. Эти данные можно использовать для автоматического управления вентиляцией и фильтрацией воздуха, включая активацию очистительных систем при превышении допустимых норм. Современные системы мониторинга могут быть настроены на сбор и анализ данных, что помогает своевременно выявлять и устранять источники загрязнения. Кроме того, применение фильтров в системах вентиляции 3D-принтеров может существенно снизить выбросы VOC. Использование герметичных корпусов для принтеров и улучшение общей вентиляции в помещении также являются важными мерами для уменьшения концентрации VOC. Регулярное техническое обслуживание и проверка оборудования на предмет утечек или неисправностей помогут поддерживать эффективность систем контроля на высоком уровне. Информирование и обучение сотрудников по вопросам безопасного обращения с 3D-принтерами и пониманию рисков, связанных с VOC, также играет ключевую роль. Это включает обучение правильному использованию защитных средств и соблюдению санитарных норм, что в совокупности помогает минимизировать риски для здоровья и окружающей среды.

Данные, собранные с встроенных датчиков VOC в 3D-принтерах, можно эффективно использовать для мониторинга окружающей среды в реальном времени и для улучшения процессов принятия решений. Во-первых, данные с датчиков VOC предоставляют точную и актуальную информацию о концентрации летучих органических соединений в воздухе, что позволяет непрерывно следить за качеством воздуха в рабочей зоне. Это дает возможность оперативно реагировать на повышение уровня загрязнителей, включая автоматическую активацию систем вентиляции и фильтрации. Такой подход не только повышает безопасность сотрудников, но и минимизирует воздействие на окружающую среду.

Во-вторых, анализ данных VOC может выявить паттерны и тренды в выбросах, связанные с различными параметрами печати, такими как тип материала, температура или скорость печати. Эти сведения могут быть использованы для оптимизации процессов 3D-печати, выбирая режимы, которые минимизируют выбросы VOC. Так, например, если данные показывают, что определенные материалы выделяют больше VOC при высоких температурах, то можно настроить принтеры на более щадящий режим работы.

В-третьих, собранные данные можно интегрировать в систему управления производством, что позволяет

принимать обоснованные решения на основе аналитики. Это может включать планирование техобслуживания, когда оборудование требует очистки или замены фильтров, а также прогнозирование потребностей в вентиляции в зависимости от запланированных печатных работ. Использование данных для предиктивного анализа помогает улучшить эффективность работы и снизить эксплуатационные расходы.

Кроме того, данные VOC могут быть использованы для отчетности и соответствия экологическим нормативам. Автоматическое документирование уровней VOC и действий по их снижению может помочь компаниям в демонстрации их экологической ответственности и в соблюдении требований регуляторов. Это не только улучшает репутацию компании, но и может обеспечить дополнительные финансовые и налоговые преимущества. Наконец, данные с датчиков VOC могут быть интегрированы в более широкую систему мониторинга окружающей среды. Это позволит отслеживать не только локальное качество воздуха, но и вносить вклад в региональные и глобальные экологические инициативы. Совместное использование данных с различных источников помогает создать более полное представление о состоянии окружающей среды и улучшить меры по ее защите. Следует отметить, что данные, собранные с датчиков VOC, являются мощным инструментом для улучшения экологической безопасности и эффективности производственных процессов в сфере 3D-печати.

Однако интеграция датчиков VOC в существующие технологии 3D-печати сталкивается с рядом технических проблем и ограничений, которые необходимо решить для обеспечения надежных и точных возможностей мониторинга. Одной из ключевых проблем является совместимость оборудования. Датчики VOC должны быть совместимы с различными моделями 3D-принтеров, которые могут существенно отличаться по конструкции и техническим характеристикам. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать универсальные интерфейсы и стандарты подключения, которые позволят легко интегрировать датчики в большинство принтеров без значительных модификаций.

Другой значимой проблемой является точность и чувствительность датчиков. Датчики VOC должны быть способны точно измерять низкие концентрации летучих органических соединений, чтобы обеспечить эффективный мониторинг. Для этого нужно выбирать высокочувствительные сенсоры, которые могут работать в условиях высоких температур и наличия различных примесей в воздухе. Также важно регулярно калибровать датчики и проводить их техническое обслуживание для поддержания точности измерений.

Расположение датчиков внутри 3D-принтера также представляет собой вызов. Датчики должны быть разме-

щены таким образом, чтобы максимально точно фиксировать выбросы VOC, не подвергаясь воздействию экстремальных температур и механических повреждений. Это требует детального проектирования системы вентиляции и охлаждения, а также разработки защищенных корпусов для датчиков. Оптимальное размещение датчиков может включать их установку в непосредственной близости от зоны печати и в системах вытяжной вентиляции.

Еще одна техническая проблема связана с обработкой и передачей данных. Датчики VOC генерируют большие объемы данных, которые необходимо эффективно обрабатывать и анализировать в реальном времени. Для этого нужны мощные вычислительные ресурсы и надежные системы передачи данных. Использование облачных технологий и мощных локальных серверов может помочь решить эту проблему, обеспечивая быстрое и надежное хранение и обработку данных.

Экономические аспекты также играют важную роль. Стоимость датчиков VOC и их интеграции может быть значительной, что требует внимательного планирования бюджета. Решить эту проблему можно путем поиска более доступных, но качественных сенсоров, а также через создание партнерств с производителями 3D-принтеров и поставщиками сенсорного оборудования для снижения затрат за счет масштабирования производства и совместных разработок. В дополнение следует отметить обучение и подготовку персонала. Операторы 3D-принтеров должны быть обучены правильной установке, эксплуатации и обслуживанию датчиков VOC. Проведение регулярных тренингов и разработка подробных руководств поможет минимизировать человеческий фактор и обеспечить эффективное использование системы мониторинга.

Следующим ключевым вопросом является то, как параметры конструкции 3D-напечатанных объектов влияют на выбросы VOC и как данная информация может быть использована для оптимизации процессов печати с целью снижения экологического воздействия. Важно отметить, что данные параметры существенно влияют на выбросы летучих органических соединений (VOC). Понимание этих взаимосвязей позволяет оптимизировать процессы печати для снижения экологического воздействия. Так, к примеру, тип материала является одним из основных факторов, определяющих количество и состав VOC, выделяемых во время печати. Различные материалы имеют разные химические составы и температурные характеристики, что влияет на их разложение при нагревании. Например, PLA выделяет меньше VOC по сравнению с ABS, который содержит стирол — токсичное органическое соединение. Поэтому выбор материалов с низкими уровнями VOC может значительно снизить загрязнение воздуха.

Скорость печати также влияет на выбросы VOC. Высокая скорость печати может привести к неполному плавлению и разложению материалов, что увеличивает количество выделяемых органических соединений. Оптимизация скорости печати таким образом, чтобы обеспечить равномерное и полное разложение материала, может уменьшить выбросы VOC. Это может включать использование медленных режимов печати для более толстых слоев и быстрых режимов для тонких слоев.

Температура печати играет ключевую роль в выбросах VOC. При более высоких температурах материалы разлагаются более интенсивно, что может привести к увеличению количества VOC. Однако слишком низкие температуры могут привести к неполному разложению и ухудшению качества печати. Поэтому важно найти оптимальный баланс температуры, который обеспечивает качественное изготовление деталей при минимальном выбросе вредных веществ. Это может потребовать проведения экспериментов и настройки параметров печати для каждого типа материала.

Информация о влиянии этих параметров на выбросы VOC может быть использована для оптимизации процессов печати следующим образом:

- выбор материалов. Предпочтение следует отдавать материалам с низким уровнем выбросов VOC, особенно для длительных или крупных проектов. Разработка новых материалов с улучшенными экологическими характеристиками также может стать приоритетом;
- вентиляция и фильтрация. Установка систем вентиляции и фильтрации в принтерах или рабочем помещении поможет удалить VOC из воздуха. Это особенно важно при использовании материалов с высоким уровнем выбросов;
- мониторинг и анализ. Использование датчиков VOC для непрерывного мониторинга воздуха в рабочем помещении позволяет оперативно реагировать на изменения в уровне загрязнения и корректировать параметры печати в реальном времени;
- настройка параметров печати. Использование данных о выбросах VOC для настройки параметров печати, таких как скорость и температура, поможет минимизировать выбросы. Это может включать адаптацию профилей печати под конкретные материалы и задачи, а также использование специализированного программного обеспечения для автоматической оптимизации.

Внедрение систем мониторинга и контроля VOC в 3D-печати несет как затраты, так и потенциальные экономические выгоды. Экономические последствия можно рассматривать с различных точек зрения: начальные инвестиции, операционные расходы, долгосрочные эко-

номические выгоды и сравнение с затратами, связанными с загрязнением окружающей среды и угрозами для здоровья. Внедрение систем мониторинга VOC требует значительных начальных вложений в оборудование, программное обеспечение и установку. Это включает закупку датчиков VOC, интеграцию этих датчиков в существующие 3D-принтеры, а также возможные модификации оборудования для обеспечения надежного мониторинга. Кроме того, необходимы затраты на обучение персонала, обслуживание и калибровку оборудования. Операционные расходы включают затраты на регулярное техническое обслуживание, замену датчиков, анализ данных и управление системой мониторинга.

С другой стороны, существуют значительные долгосрочные экономические выгоды от внедрения таких систем. Прежде всего, это снижение рисков для здоровья работников, что уменьшает затраты на медицинское обслуживание и компенсации, связанные с профессиональными заболеваниями. Повышение безопасности и качества воздуха на рабочем месте может привести к повышению производительности труда и снижению абсентеизма. Кроме того, эффективный мониторинг и контроль VOC помогают избегать штрафов и санкций, связанных с нарушением экологических норм и стандартов. В условиях все более строгого регулирования экологической безопасности это становится особенно важным.

Сравнение с потенциальными затратами, связанными с загрязнением окружающей среды и угрозами для здоровья, показывает, что внедрение систем мониторинга и контроля VOC является экономически целесообразным. Независимое исследование показывает, что затраты на лечение заболеваний, вызванных длительным воздействием VOC, значительно превышают первоначальные инвестиции в системы мониторинга. Кроме того, загрязнение окружающей среды приводит к долгосрочным негативным последствиям, включая ухудшение качества жизни и снижение стоимости недвижимости в загрязненных районах, что также несет экономические потери для общества.

Как видно, интеграция датчиков летучих органических соединений в 3D-принтеры играет ключевую роль в усилиях по устойчивому развитию и содействует применению более чистых практик производства, а также сокращению экологического следа процессов аддитивного производства. Во-первых, интеграция датчиков VOC позволяет оперативно контролировать и мониторить выбросы вредных веществ в окружающую среду в реальном времени. Это способствует выявлению и минимизации негативного воздействия процессов 3D-печати на окружающую среду и здоровье работников. Во-вторых, обнаружение и анализ выбросов VOC позволяет оптимизировать процессы печати и использовать более экологически чистые материалы и техно-

логии. Это включает в себя разработку новых материалов с меньшим содержанием вредных компонентов и разработку улучшенных методов печати, которые минимизируют выбросы.

Кроме того, информация, собранная с датчиков VOC, может быть использована для разработки и внедрения стратегий управления выбросами и разработки стандартов по снижению экологического воздействия процессов аддитивного производства. Это в свою очередь способствует развитию более ответственных и устойчивых практик в промышленности. Так, интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры не только помогает обеспечить безопасность и защиту окружающей среды, но и способствует развитию устойчивых методов производства и сокращению экологического следа аддитивных технологий.

Нормативные рамки и стандарты, регулирующие выбросы летучих органических соединений из 3D-печатных операций, включают различные законы, нормативные документы и стандарты, разработанные для обеспечения безопасности окружающей среды и здоровья человека. К таким документам относятся, например, нормативы по качеству воздуха, экологические стандарты и законодательство, регулирующее выбросы вредных веществ. Развитие передовых технологий мониторинга, таких как интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры, может существенно помочь в соблюдении этих норм и стандартов, а также способствовать охране окружающей среды. Эти технологии позволяют непрерывно контролировать выбросы VOC в реальном времени, оперативно выявлять потенциальные проблемы и принимать меры по их предотвращению. Благодаря передовым технологиям мониторинга можно эффективно отслеживать соответствие выбросов VOC установленным нормам и стандартам, а также своевременно реагировать на любые отклонения. Это позволяет снизить риск негативного воздействия на окружающую среду и обеспечить соблюдение требований экологической безопасности.

Обсуждение

Эффективная интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры FDM поможет не только снизить экологические риски, но и улучшить качество производимых изделий, обеспечивая более стабильные и контролируемые условия печати. При этом важно учитывать, что датчики должны быть защищены от возможного загрязнения и механических повреждений, но при этом оставаться доступными для обслуживания и калибровки. Правильная установка с учетом этих требований обеспечит долгосрочную надежность и точность системы мониторинга. Однако также наблюдается ряд трудностей, связанных с интеграцией данных решений на практике. Важно подчеркнуть, что решение технических проблем и ограничений

при интеграции датчиков VOC требует комплексного подхода, включающего выбор качественного оборудования, оптимальное проектирование систем размещения, обработку данных, экономическое планирование и обучение персонала. Другим рассмотренным вопросом стало влияние понимания влияния параметров конструкции 3D-напечатанных объектов на выбросы VOC. Использование разработанных рекомендаций может значительно снизить экологическое воздействие и улучшить качество воздуха в рабочих помещениях.

Внедрение систем мониторинга и контроля VOC в 3D-печатных цехах оправдано не только с точки зрения соблюдения нормативных требований и обеспечения безопасности работников, но и с точки зрения долгосрочной экономической выгоды. Это позволяет предотвратить значительные затраты, связанные с негативными последствиями загрязнения окружающей среды и улучшить общий экономический климат в производственном секторе. Помимо этого, развитие передовых технологий мониторинга играет важную роль в соблюдении нормативных требований и стандартов, регулирующих выбросы VOC из 3D-печатных операций, и способствует охране окружающей среды.

В последующих исследованиях планируется осуществить переход к практическим разработкам, основанным на определенных ранее требованиях и рекомендациях. Это включает в себя создание и тестирование конкретных систем мониторинга и контроля VOC в 3D-печатных цехах, а также разработку инновационных технологий, направленных на сокращение выбросов и улучшение экологической безопасности процессов аддитивного производства. Такой подход позволит эффективно применить результаты исследований в практической деятельности и внедрить передовые технологии для решения актуальных проблем в области экологии и производства.

Заключение

Таким образом, основной целью представленной статьи являлось выполнение анализа относительно возможности решения исходной проблемы за счет мони-

торинга и контроля выбросов на основе встраиваемых датчиков летучих соединений. В результате работы более подробно проанализированы такие вопросы, как эффективная интеграция датчиков VOC в 3D-принтеры FDM, оптимальные стратегии размещения датчиков внутри 3D-принтера, влияние различных типов органических соединений на качество воздуха в помещении и экологическую безопасность. Автором представлены потенциальные риски для здоровья и окружающей среды, связанные с продолжительным воздействием выбросов VOC из 3D-принтеров и рассмотрены мероприятия по их смягчению с помощью передовых систем мониторинга и контроля. В работе даны варианты использования данных, собранных с встроенных датчиков VOC в 3D-принтерах, для мониторинга окружающей среды в реальном времени и процессов принятия решений. Рассмотрены технические проблемы и ограничения при интеграции датчиков VOC в существующие технологии 3D-печати и варианты по их решению. Отдельное внимание получила экономическая и нормативно-правовая сторона вопроса. Обозначены потенциальные преимущества интеграции представляемых решений, а также их влияние на экономическую и нормативно-правовую составляющую развития нашей страны.

Автором одним из первых выполнена работа по рассмотрению возможности использования датчиков VOC для задачи мониторинга и контроля выбросов 3D-принтера. В связи с этим следует отметить, что представленные материалы могут представлять большую ценность для будущих исследователей в области создания таких инструментов, выступая в качестве основы и базы для их создания. Автором рекомендуется разработка экспертной системы в качестве основного программного обеспечения для регулирования работы датчиков и оценке уровня загрязнения в задаче контроля выбросов при печати MDF. Для этого возможно использование представленных материалов для разработки алгоритмической составляющей работы системы. При этом практическое применение разработанных технологий и методов контроля выбросов VOC на стадии тестирования необходимо выполнять в закрытых помещениях для получения наиболее объективной оценки результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борзыкина Е.А., Хетагурова Э.О. Качественный и количественный анализ выбросов при 3D (трёхмерной) печати // Вестник науки. 2021. №5–1 (38). С. 106–111.
2. Ли Л. Строительные 3D-принтеры и их преимущества и недостатки // Экономика и социум. 2023. №10 (113)-1. С. 503–508.
3. Ломова О.А., Кирилов А.А. Загрязнение воздуха летучими органическими соединениями // E-Scio. 2023. №4 (79). С. 348–356.
4. Ганшин В.М., Доронин А.Н., Луковцев В.П., Луковцева Н.В., Семенова В.А., Кубанцев И.С. Электрохимический датчик для интегрального определения токсичных веществ в формате «электронный нос» в режиме мониторинга // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. №4 (73). С. 100–108.
5. Грищенко Е.С., Чурбанова Ю.А., Татаров Г.Л. Основные причины нарушения работы 3d-принтеров и способы их устранения // Вестник науки. 2023. №11 (68). С. 698–704.
6. Sola A., Trinchi A. Chapter 3 — The need for fused deposition modeling of composite materials, Editor(s): Antonella Sola, Adrian Trinchi, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Fused Deposition Modeling of Composite Materials. Woodhead Publishing. 2023. Pages 39–89.
7. Кулакова Е.С., Сафаров А.М., Насырова Л.А., Мизгирев Д.С. Получение и использование данных оперативного мониторинга атмосферного воздуха // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. №4. С. 337–352.
8. Аммалайн В.А. Правовые аспекты 3D-печати // Правовая парадигма. 2021. Т. 20, № 3. С. 138–142.