

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ

Шарара Симбараше

Аспирант,

Московский государственный университет «СТАНКИН»

shackssharara@gmail.com

## MATHEMATICAL MODEL OF THE CONCENTRATION DISTRIBUTION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN 3D PRINTING

Sharara Simbarashe

*Summary.* The present study is devoted to the analysis of the distribution of harmful emissions of polymer volatile organic compounds arising in the process of three-dimensional printing. The relevance of this study is due to the development of this technology, which in several areas replaces the casting and stamping of polymer products, being at the same time more economical in terms of energy and resource costs. At the same time, due to the novelty of the technology, the effect of the volatile organic compounds formed on the human body and the environment has not been sufficiently studied. In connection with the above, there is a need to preventatively minimize the concentration of harmful emissions. The conducted research uses mathematical and simulation modeling methods used to build a predictive dynamic model that allows for operational control with the ability to compensate for the inertia of concentration sensors. As a result of the study, it is shown that the concentration of emissions decreases exponentially as a function of the distance from the place of application of the melt (extruder head) to the workpiece. It has been established that the maximum concentration has a minimum at an ambient temperature of 20 °C. The discussion of the results led to the formulation of a hypothesis about the feasibility of a closed system of predictive control of the concentration of harmful emissions, suitable for use as one of the contours of the print parameter control system.

*Keywords:* volatile organic compounds, 3d printing, concentration, diffusion, simulation, predictive management.

*Аннотация.* Настоящее исследование посвящено анализу распределения вредных выбросов полимерных летучих органических соединений, возникающих в процессе трехмерной печати. Актуальность настоящего исследования обусловлена развитием данной технологии, в ряде областей заменяющей литье и штамповку изделий из полимеров, являясь одновременно и более экономичной с позиций затрат энергии и ресурсов. При этом ввиду новизны технологии влияние образующихся летучих органических соединений на организм человека и окружающую среду в достаточной мере не изучено. В связи с вышесказанным возникает необходимость превентивной минимизации концентрации вредных выбросов. В проведенном исследовании использованы методы математического и имитационного моделирования, использованные для построения прогнозной динамической модели, позволяющей осуществлять оперативный контроль с возможностью компенсации инерционности датчиков концентрации. В результате исследования показано, что концентрация выбросов экспоненциально снижается в функции расстояния от места нанесения расплава на заготовку. Установлено, что максимальная концентрация имеет минимум при температуре окружающей среды 20 °C. Обсуждение результатов привело к постановке гипотезы о реализуемости замкнутой системы прогнозного управления концентрацией вредных выбросов, пригодной для использования в качестве одного из контуров системы управления параметрами печати.

*Ключевые слова:* летучие органические соединения, 3d-печать, концентрация, диффузия, имитационное моделирование, прогножное управление.

## Введение

На текущем этапе развития народного хозяйства как в РФ, так и в мире в целом, существует тенденция к замене операций литья и штамповки пластиковых изделий операцией послойной наплавки или напыления, получившей название трехмерной (3D) печати. Данный процесс, ввиду его большой временной продолжительности и высокой температуры, сопровождается постоянным испарением части наплавляемого материала в форме летучих органических соединений (ЛОС). Данные соединения могут оказывать негативное влияние на здоровье человека за счет прямой токсичности, инертности и абразивных свойств при осаждении.

Соответственно, необходимо принимать меры по контролю концентрации ЛОС в рабочей зоне оператора 3D-печати.

## Литературный обзор

Проблема выбросов ЛОС при выполнении технических операций трехмерной печати является темой многих исследований, проводимых как отечественными, так и современными авторами. В работе [1] рассмотрены физико-химические процессы образования ЛОС и их количественного состава в зависимости от типа применяемого материала. Задача измерения концентрации ЛОС в окружающем воздухе подробно рассмотрена в работе

[2]. В данном исследовании рассмотрены основные типы датчиков ЛОС в воздухе и показано, что общей проблемой измерения информации о концентрациях является брутто-измерение количества летучих частиц в пробах воздуха, что приводит к значительной инерционности и погрешности, что затрудняет возможность формирования оптимальной стратегии организации процесса печати. В исследовании [3] рассмотрены подходы к математическому моделированию выбросов в атмосферу ЛОС в процессе печати. При этом учитываются показатели температуры и влажности воздуха в помещении, а также интенсивность приточно-вытяжной вентиляции. Проблемы влияния ЛОС на организм человека рассмотрены в работе [4].

На основании проведенного анализа литературных источников можем сделать вывод о необходимости формирования механизма обратных связей — наблюдателя — для применения в системе планирования процесса трехмерной печати.

**Материалы и методы**

При проведении исследования использованы методы математического и имитационного моделирования концентрации компонентов смесей в процессе изготовления деталей методом трехмерной печати. Анализ проводился на основе математической модели, структура которой приведена на рис. 1.

Предложенная на рис. 1 структурная схема отражает процесс динамического моделирования процесса диффузии на границе раздела расплав — атмосфера. При моделировании принято допущение, что компоненты ЛОС подчиняются закону Дальтона — общее давление, и как следствие, концентрация ЛОС в объеме атмосферного газа определяется суммой давлений отдельных компонентов. Соответственно, моделирование проводилось для отдельных компонентов, при этом, ввиду инертности большинства циклических углеводородов, входящих в состав материалов для 3D-печати, взаимными реакциями между компонентами можно пренебречь.

Из закона Фика следует, что скорость диффузии пропорциональна градиенту концентрации. Для одномер-

ного случая данный закон может быть записан в виде соотношения (1):

$$J = -C(P,T) \frac{dQ}{dx}, \tag{1}$$

где  $C(P,T)$  — параметр скорости диффузии;

$\frac{dQ}{dx}$  — градиент концентрации на границе наплавленного слоя.

Скорость диффузии в общем случае является параметром, нелинейно зависящим от температуры окружающего воздуха и атмосферного давления в помещении. В случае приточно-вытяжной вентиляции, в общем случае можно считать зависимость линейной, поскольку в данном случае концентрации компонентов ЛОС поддерживаются на практически постоянном уровне.

Предложенная модель может быть проинтегрирована при различных начальных условиях с использованием различных численных методов, например, с помощью метода трапеций, реализованного, например, в среде моделирования Matlab/Simulink и использована для формирования выводов по распределению концентраций.

**Результаты**

Проведя моделирование при различных значениях температуры воздуха в помещении, в котором производится 3D-печать, получим динамические характеристики изменения концентрации ЛОС на расстоянии 0,5 м от места нагрева (на границе рабочей зоны 3D-принтера), показанные на рис. 2.

Как видим из результатов, приведенных на рис. 2, концентрация ЛОС достигает установившегося значения через 100 мин после начала процесса печати и нелинейно зависит от температуры. Минимум концентрации достигается при температуре 20 °С и составляет 0,016 ppm (частиц в кубическом метре объема). Данный эффект во многом обусловлен физико-химическими процессами на границе расплава, имеющими минимум активности

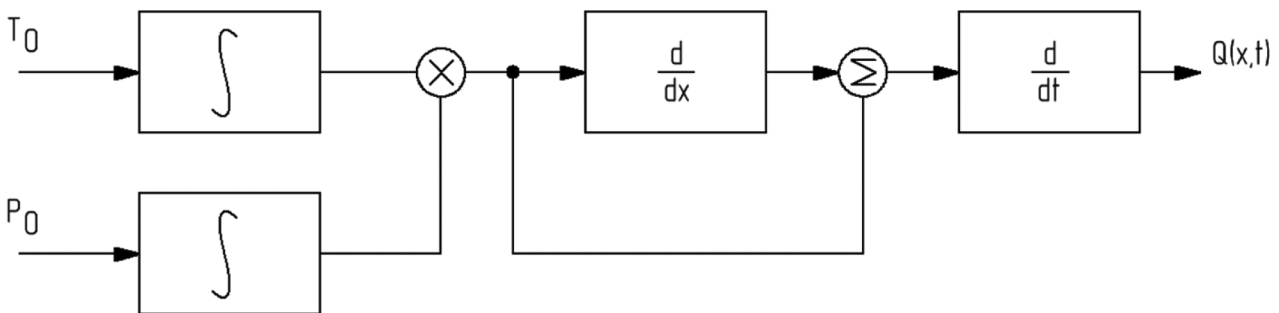


Рис. 1. Структурная схема модели распределения концентрации

при разности температур окружающей среды и поверхности расплава порядка 230 °С.

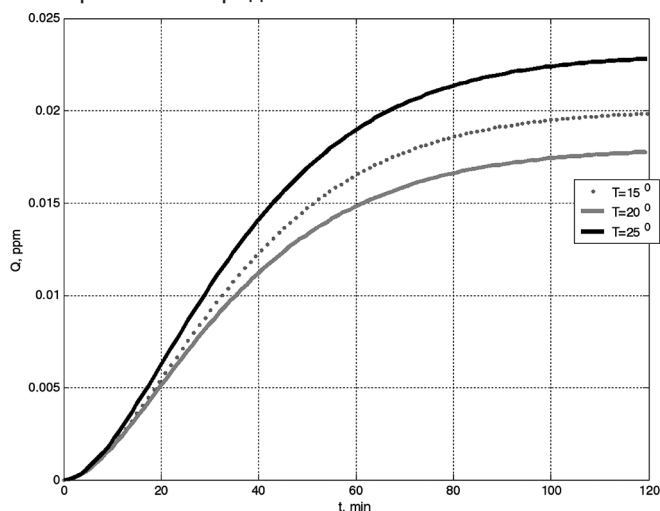


Рис. 2. Динамические характеристики изменения концентрации ЛОС

Распределение концентрации ЛОС в функции расстояния от границы плавления имеет экспоненциальный характер, что демонстрируется графиком рис. 3. Как видим из кривой распределения, на расстоянии 3 метра от места расплава концентрация ЛОС снижается до 0,0008 ppm, практически не оказывающей влияния на организм человека.

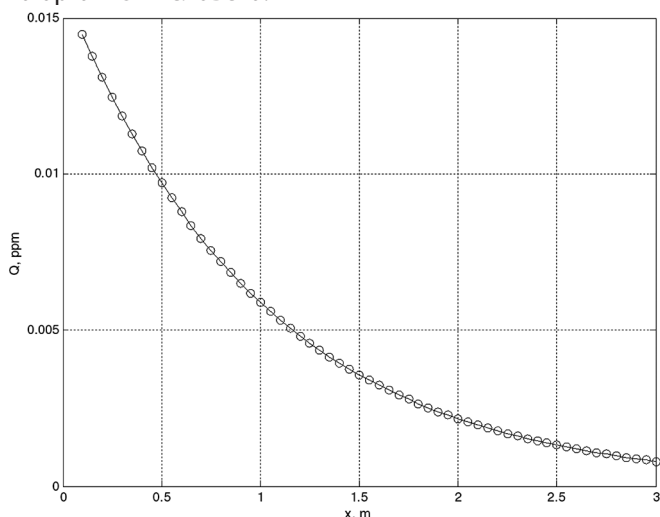


Рис. 3. Зависимость концентрации ЛОС от расстояния до места расплава

### Обсуждение

Результаты проведенного исследования показывают, что на концентрацию ЛОС в окружающем воздухе оказывают влияние температура и расстояние до по-

верхности плавления. Соответственно, задача снижения концентрации может быть решена, помимо организации приточно-вытяжной вентиляции, путем стабилизации температуры в технологических помещениях. Необходимо отметить, что время установления концентрации составляет десятки минут в то время, как измерение параметров окружающего воздуха производится лабораторными методами, занимающими большее время, чем время изменения концентрации ЛОС. Соответственно, актуальной задачей является разработка замкнутых следящих систем стабилизации концентрации ЛОС, из которой вытекает задача разработки датчиков с малыми постоянными времени. Другим вариантом решения задачи снижения вредных выбросов является построение прогнозной системы адаптации параметров печати, в структуру которой вводится динамическая модель, аналогичная приведенной на рис. 1, позволяющая оценивать значение концентрации ЛОС в воздухе без непосредственного измерения. Управляющим воздействием в данном случае будет являться расход полимера для печати — изменение коэффициента заполнения заготовки. Снижение расхода полимера приводит к снижению общего количества расплава, таким образом, снижая концентрацию вредных выбросов. При этом необходимо учитывать, что снижение заполнения детали может приводить к недопустимому снижению прочности, в связи с чем выбор оптимального расхода полимера является оптимизационной многопараметрической задачей.

### Заключение

В ходе настоящего исследования предложена имитационная модель распределения концентрации ЛОС в функции времени и расстояния до места расплава. Полученные результаты могут быть использованы при построении замкнутой системы оптимизации параметров печати, позволяющей контролировать концентрацию вредных выбросов в заданных условно-безопасных пределах. Также, приведенные в исследовании теоретические положения и практические результаты могут быть использованы для проектирования помещений для выполнения рассматриваемой технологической операции. Необходимо отметить, что результаты исследования не являются полностью исчерпывающими и требуют продолжения, связанного, в том числе, с исследованием влияния параметров печати и производительности работы системы приточно-вытяжной вентиляции, как управляющих параметров для концентрации ЛОС в помещении. Также, более детальному рассмотрению подлежат вопросы влияния качественного состава ЛОС на распределения концентраций и, как следствие, здоровье обслуживающего персонала.

---

ЛИТЕРАТУРА

1. Борзыкина Е.А. Качественный и количественный анализ выбросов при 3D (трёхмерной) печати / Е.А. Борзыкина, Э.О. Хетагурова // Вестник науки. — 2021. — Т. 5, № 5–1(38). — С. 106–111. — EDN CJPCP.
2. Чернышева Л.А. Обзор исследований влияния 3D-технологий на экологию / Л.А. Чернышева, И.Б. Пугачева // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кострома, 04 апреля 2019 года. — Кострома: Костромской государственный университет, 2019. — С. 291–294. — EDN OQDTBR.
3. Влияние 3D-печати на человека и на окружающую среду / К.В. Гаршин, С.М. Некрасов, П.С. Белов, Д.Ю. Никифоров // Проблемы современной науки и инновации. — 2023. — № 4. — С. 66–70. — EDN DZXUQL.
4. Борзыкина Е.А. Оценка воздействия технологии 3D (трехмерной) печати на здоровье человека / Е.А. Борзыкина, Е.С. Навасардян // Будущее машиностроения России : тринадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) : сборник докладов : в 2 т., Москва, 22–25 сентября 2020 года / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). Том 1. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. — С. 338–340. — EDN CVIWGK.

---

© Шарара Симбараше (shacksshara@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»