

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ЭКСТРУЗИИ КАК УПРАВЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

ASSESSMENT OF EXTRUSION TEMPERATURE AS A CONTROL PARAMETER FOR REDUCING VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS IN FUSION DEPOSITION MODELLING 3D PRINTING

Sharara Simbarashe

Summary. Fused deposition modelling 3D printing with common polymers like ABS and PLA releases volatile organic compounds, which raises notable environmental and health concerns. Adjusting extrusion temperature is a frequently attempted method for minimizing these emissions, but its actual effectiveness as a primary control strategy has not been thoroughly examined. In this study, sensitivity analysis, dynamic simulations, and hands-on experiments were conducted to evaluate temperature control's potential for reducing volatile organic compounds emissions. The results obtained show that temperature adjustments alone face some real limitations. Thermal inertia slows system responses, while inconsistent sensitivity across temperature ranges limits practical control. Even more, lowering the temperature too much can seriously undermine print quality. Ultimately, these findings suggest that simply relying on temperature adjustments is insufficient for effective emission reduction. Alternative approaches, like modifying extrusion speed or implementing active ventilation, should be considered for more sustainable emission management in fused deposition modelling printing.

Keywords: volatile organic compounds, three-dimensional printing, layer-by-layer deposition, Arrhenius equation, sensitivity analysis.

Шарара Симбараше

*Аспирант, Московский государственный
технологический университет «Станкин»
shackssharara@gmail.com*

Аннотация. Трёхмерная печать методом послойного наплавления с использованием обычных полимеров, таких как АБС и ПЛА, выделяет летучие органические соединения, что вызывает заметные проблемы для окружающей среды и здоровья. Регулировка температуры экструзии является часто используемым методом минимизации этих выбросов, но ее фактическая эффективность в качестве основной стратегии контроля не была тщательно изучена. В этом исследовании были проведены анализ чувствительности, динамическое моделирование и практические эксперименты для оценки потенциала контроля температуры для снижения выбросов летучих органических соединений. Полученные результаты показывают, что одни только регулировки температуры сталкиваются с некоторыми реальными ограничениями. Тепловая инерция замедляет реакцию системы, в то время как непостоянная чувствительность в диапазонах температур ограничивает практический контроль. Более того, слишком сильное снижение температуры может серьезно подорвать качество печати. В конечном счете эти результаты показывают, что просто полагаться на регулировки температуры недостаточно для эффективного сокращения выбросов. Альтернативные подходы, такие как изменение скорости экструзии или внедрение активной вентиляции, следует рассмотреть для более устойчивого управления выбросами при трёхмерной печати методом послойного наплавления.

Ключевые слова: летучие органические соединения, трёхмерная печать, послойное наплавление, Уравнение Аррениуса, анализ чувствительности.

Введение

Трёхмерная печать методом послойного наплавления (FDM) — это широко Трёхмерная печать методом послойного наплавления стала очень важной частью аддитивного производства, обеспечивая быстрое прототипирование и мелкосерийное производство в различных отраслях промышленности. Однако этот процесс печати выделяет летучие органические соединения, такие как стирол, формальдегид и этилбензол, особенно во время высокотемпературной экструзии термопластиков, таких как АБС и ПЛА [1]. Эти выбросы вносят огромный вклад в загрязнение воздуха

внутри помещений, создавая риски для здоровья, включая раздражение дыхательных путей и потенциальные канцерогенные эффекты [2]. Органы по регулированию окружающей среды часто подчеркивают необходимость решения проблемы выбросов летучих органических соединений от новых технологий для защиты профессиональной и бытовой среды [3]. Замена материалов, улучшенная вентиляция и оптимизация параметров процесса являются одними из некоторых из изученных стратегий. Регулирование температуры экструзии часто предлагается из-за ее прямого влияния на скорости термического разложения, как указано в уравнении Аррениуса [4]. Тем не менее, практическая эффективность

контроля температуры как реального времени или основного механизма минимизации летучих органических соединений остается плохо изученной. Предыдущие исследования количественно определяли выбросы летучих органических соединений при трёхмерной печати методом послойного наплавления [5], но лишь немногие критически оценивали температуру как управляющую переменную в динамическом реальном контексте. Чтобы устранить этот пробел в исследованиях, в этом исследовании используется мультифизический подход, объединяющий анализ чувствительности, динамическое моделирование и экспериментальную проверку для оценки ограничений температуры экструзии для смягчения летучих органических соединений.

Методология исследования

Поскольку термическое разложение материала считается химической реакцией. Уравнение Аррениуса может быть использовано для описания взаимосвязи между скоростью термического разложения и температурой

$$E_{voc}(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

где A — предэкспоненциальный коэффициент, E_a — энергия активации реакции разложения, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура (K). $E_{voc}(T)$ — скорость выделения летучих органических соединений при температуре T (K).

Модель демонстрирует, что скорость выделения летучих органических соединений настолько чувствительна к температуре, что даже незначительные колебания могут существенно повлиять на выбросы летучих органических соединений. Эта выраженная чувствительность усложняет идею использования температуры экструзии в качестве переменной для контроля выбросов, поскольку поддержание выбросов ниже безопасных пороговых значений потребует поддержания очень узкого температурного диапазона. Это трудно сделать, не столкнувшись с проблемами с потоком материала или адгезией слоев. Для этого исследования параметры модели были выбраны для качественного отражения выбросов из нитей ABS, которые, как известно, выделяют такие соединения, как стирол, во время термического разложения.

Динамическое моделирование управления температурой

Тепловая динамика экструдера была аппроксимирована как линейная система первого порядка, инвариантная во времени (LTI), при условии ступенчатого изменения заданного значения температуры. Этот подход широко принят в инженерной литературе, поскольку он

эффективно фиксирует доминирующую тепловую инерцию и основную постоянную времени, регулирующую теплопередачу в таких системах. Соответствующая математическая модель выглядит следующим образом:

$$T(t) = T_{set} + (T_0 - T_{set})e^{-t/\tau} \quad (2)$$

$T(t)$ — температура экструдера в момент времени t , — новая целевая температура (K), T_0 — начальная температура до изменения (K), τ — постоянная времени, характеризующая скорость тепловой конвергенции

Это уравнение предполагает, что система имеет одну доминирующую теплоемкость и незначительные временные задержки, что является допустимым приближением для многих коммерческих экструдеров технологии послойного наплавления. Постоянная времени τ инкапсулирует комбинированные эффекты теплового сопротивления и теплоемкости системы. Затем динамический профиль $T(t)$ использовался в качестве входных данных для модели выбросов летучих органических соединений $E_{voc}(T)$ для оценки того, как выбросы развиваются в реальном времени после регулировки температуры.

Анализ чувствительности

Чтобы количественно оценить, как выделение летучих органических соединений реагируют на корректировки температуры экструзии, был проведен анализ чувствительности. В этом контексте чувствительность относится к частной производной скорости выделения по температуре, то есть она измеряет, насколько резко меняется скорость выброса даже при небольшом изменении температуры.

$$S(T) = \frac{dE_{voc}}{dT} \quad (3)$$

Эта производная выступает в качестве ключевого показателя для оценки как стабильности, так и управляемости выбросов при терморегулировании. Когда значения чувствительности высоки, даже незначительные изменения температуры могут вызвать значительные изменения выбросов, что усложняет точное управление выбросами только посредством температурного контроля.

$$S(T) = \frac{dE_{voc}}{dT} = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \left(-\frac{E_a}{RT^2}\right) \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Температура экструдера не достигает нового заданного значения мгновенно; вместо этого она приближается к целевому значению постепенно, демонстрируя экспоненциальное замедление. Это явление иллюстрирует концепцию тепловой инерции: экструдер не может

немедленно реагировать на изменения входного сигнала управления. В результате любая система управления на основе температуры будет изначально испытывать задержку, которая ограничивает как точность, так и скорость управления выбросами.

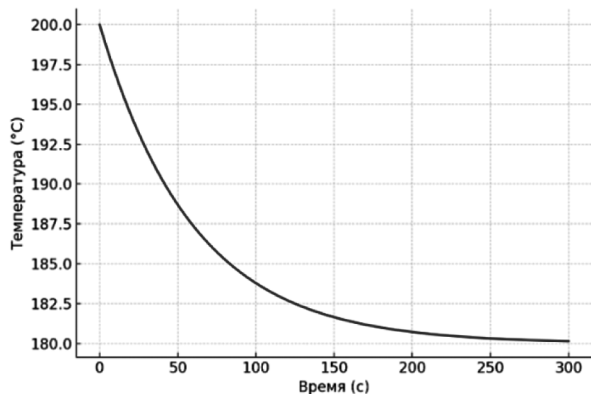


Рис. 1. Переходная характеристика температуры во времени

Несмотря на небольшое изменение температуры, выбросы летучих органических соединений резко уменьшаются. Это объясняется экспоненциальной чувствительностью скорости выброса к температуре. Даже небольшие изменения температуры вызывают большие изменения выбросов.

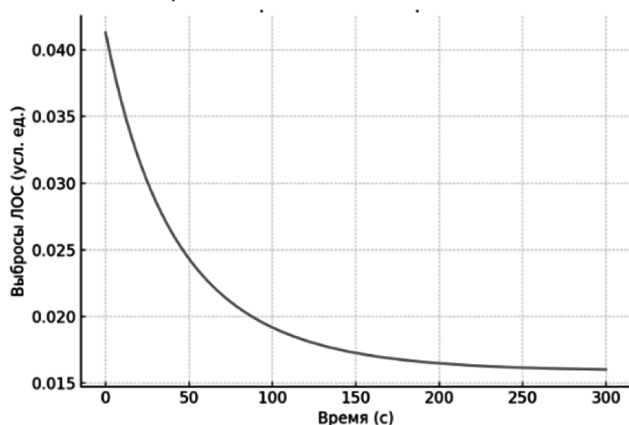


Рис. 2. Переходная характеристика выбросов летучих органических соединений

График выбросов летучих органических соединений и температуры (Рисунок 3) демонстрирует, что выбросы резко возрастают с ростом температуры. В диапазоне всего 10–15°C выбросы увеличиваются в несколько раз, что указывает на крайне нелинейную и нестабильную систему. Эта нестабильность представляет значительный риск: даже незначительные отклонения от обозначенной безопасной температуры могут легко привести к случайному превышению установленных пределов выбросов.

При понижении температуры чувствительность резко возрастает — особенно заметно в диапазоне 170–

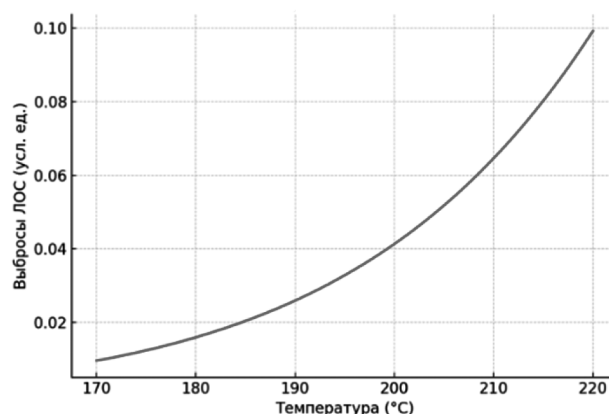


Рис. 3. Чувствительность скорости выделения летучих органических соединений к изменениям температуры

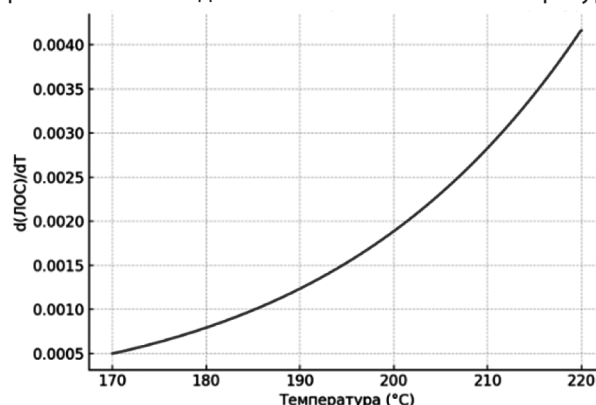


Рис. 4. Чувствительность выбросов летучих органических соединений к изменениям температуры (170–190°C)

190°C. Даже незначительное изменение всего на 1°C может вызвать значительный скачок выбросов. В этом диапазоне низких температур система становится крайне нестабильной, что делает точный и безопасный контроль практически невозможным.

Выводы

Результаты показывают, что скорость выброса летучих органических соединений имеет высокую экспоненциальную корреляцию с температурой экструзии. Однако, несмотря на очевидный эффект генерации выбросов из-за температуры, исследование показывает, что температура экструзии не является подходящей переменной для активного регулирования выбросов.

Температура экструзии также находится на переднем крае, чтобы служить двойной цели: она регулирует не только скорости термической деградации, но и физические и механические явления в процессе печати, такие как плавление нити, межслойная адгезия и стабильность потока. Меры, направленные на стабилизацию снижения температуры для смягчения выбросов летучих органических соединений, могут вызывать недоэкструзию, расслоение и механические дефекты напечатанной де-

тали. Таким образом, рабочее окно регулирования температуры по своей сути ограничено термопластичной природой материала.

Во-вторых, тепловая динамика регулировки температуры ограничена тепловой инерцией экструдера. Медленный тепловой отклик подразумевает, что любая схема реактивного управления, основанная на температуре как управляющей переменной, будет страдать от запаздывания и, таким образом, не будет подходить для противодействия кратковременным всплескам выбросов чрезвычайно короткой продолжительности. Таким образом, управление выбросами с обратной связью в реальном времени с использованием температуры экструзии по своей сути ограничено медленной тепловой динамикой системы.

Кроме того, исследование обнаруживает, что в идеальных условиях, таких как внезапные изменения заданного значения и идеальная реакция системы, максимальное подавление выбросов, достигаемое за счет падения температуры, ограничено, если находится в пределах безопасного диапазона рабочих температур нити. Например, для нити АБС снижение температуры

экструзии до уровня ниже 200 °C приведет к значительному снижению выбросов летучих органических соединений, но одновременно увеличит риск засорения сопла и плохой адгезии слоя. Эти результаты подчеркивают противоречивые требования между снижением выбросов и качеством печати, которые ограничивают применение температуры в качестве полезного и автономного входного сигнала управления.

В заключение, хотя очевидно, что температура экструзии является доминирующим регулятором скорости эмиссии летучих органических соединений во время трёхмерной печати, она не очень подходит для снижения эмиссии в динамических или работающих в реальном времени приложениях. Тесное взаимодействие между температурой и пригодностью к печати, экспоненциальный характер ее влияния на эмиссию и присущая латентность тепловых систем — все это делает температуру плохим кандидатом для управления эмиссией в замкнутом контуре. Эти ограничения означают, что управление температурой необходимо рассматривать как параметр времени проектирования, а не как динамически настраиваемую переменную при печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбросы ультрадисперсных частиц и летучих органических соединений (ЛОС) от коммерчески доступных 3D-принтеров / П. Азими, Д. Чжао, К. Пузе, Н.Э. Крейн, Б. Стивенс // *Environmental Science & Technology*. — 2016. — Т. 50, № 3. — С. 1260–1268.
2. Выбросы ультрадисперсных частиц настольными 3D-принтерами / Б. Стивенс, П. Азими, З. Эль Орч, Т. Рамос // *Atmospheric Environment*. — 2013. — Т. 79. — С. 334–339.
3. Потенциальные риски для здоровья человека и окружающей среды, связанные с технологиями 3D-печати / Агентство по охране окружающей среды США (EPA). — 2021. — URL: <https://www.epa.gov/sciencematters/potential-human-health-and-environmental-risks-associated-3d-printing> (дата обращения: 26.05.2025).
4. Безопасна ли 3D-печать? Анализ термической обработки термопластов: ABS, PLA, PET и нейлон / С. Войтыла, П. Клама, Т. Баран // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. — 2017. — Т. 14, № 6. — С. 80–85.
5. Характеристика химических загрязнителей, образующихся при работе настольного 3D-принтера, использующего ABS и поликарбонатные филаменты / А.Б. Стефаняк, Р.Ф. Лебуф, Т. Нюркевич, Д. Швейглер-Берри, Б.Т. Чен // *Journal of Chemical Health & Safety*. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 19–30.

© Шарара Симбараше (shacksshara@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»