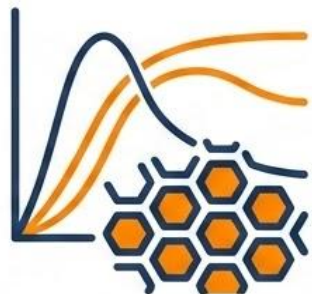




Ялта, 26–29 мая 2026



# Физически информированное моделирование кинетики спекания порошковых систем Ti-6Al-4V с байесовской идентификацией параметров и инверсным дизайном режимов

Контакты:

[fede.vv@phystech.edu](mailto:fede.vv@phystech.edu)

Репозиторий:

[github.com/FedeVas/](https://github.com/FedeVas/)

[sintering-pinn-ti64](#)

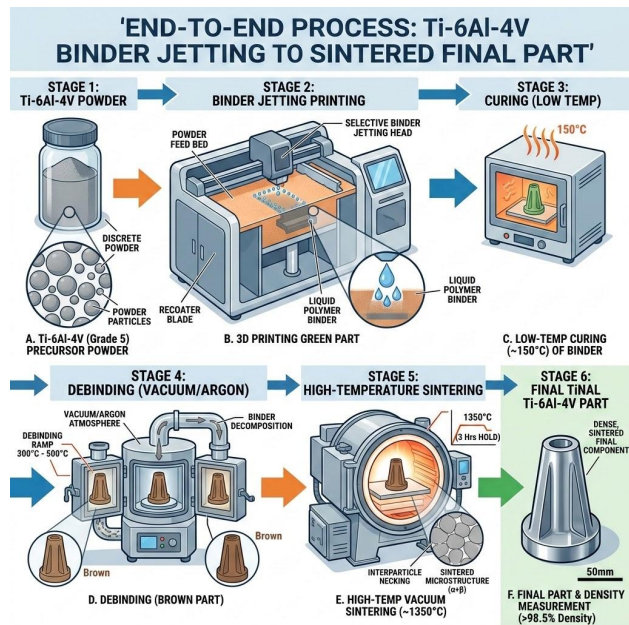
Авторы: Феде В.В.<sup>1</sup>, Сорокова С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ)

<sup>2</sup> Томский политехнический университет (ТПУ)



# Проблема и постановка задачи



- Выбор режимов спекания — эмпирический, дорогой, плохо переносится между партиями
- Классические модели — детерминированные, без оценки риска недобора плотности
- Переносимость между источниками данных в литературе системно не проверяется

**Цель:** разработать воспроизводимый физически информированный конвейер моделирования спекания Ti-6Al-4V с байесовской оценкой неопределённости и инверсным дизайном режимов.

# Модель и метод

$$\frac{d\rho}{dt} = k(T)(1 - \rho)^n \quad (1)$$

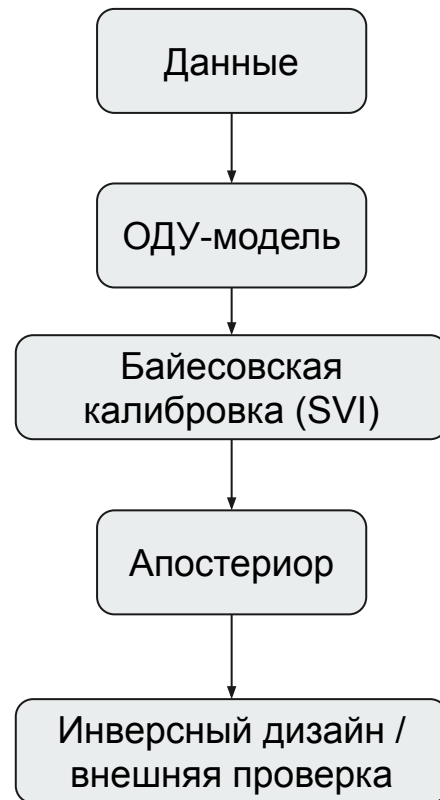
$$k(T) = k_{\text{ref}} \exp \left[ -\frac{Q}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \quad (2)$$

Калибруемые параметры:

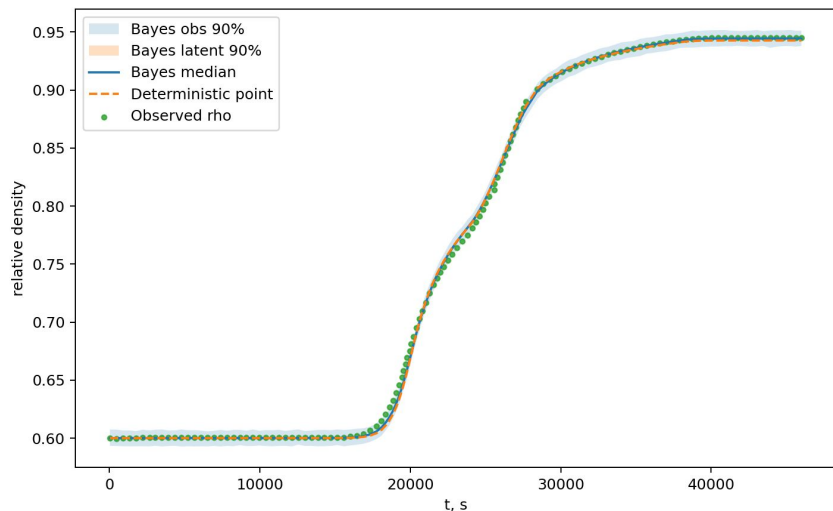
$$\theta = \{\log k_{\text{ref}}, n, Q, \sigma\},$$

Источники данных:

1. [Tischel et al. 2024](#) (обучение),
2. [Simchi et al. 2023](#) (внешний тест)



# Результаты внутренней калибровки

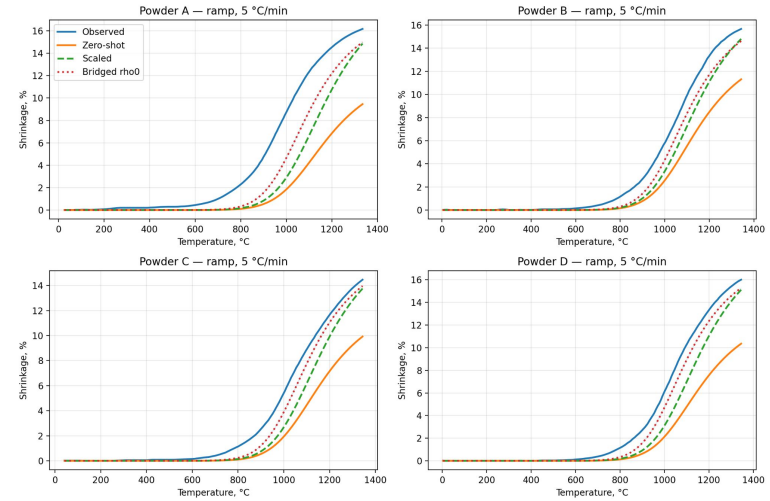
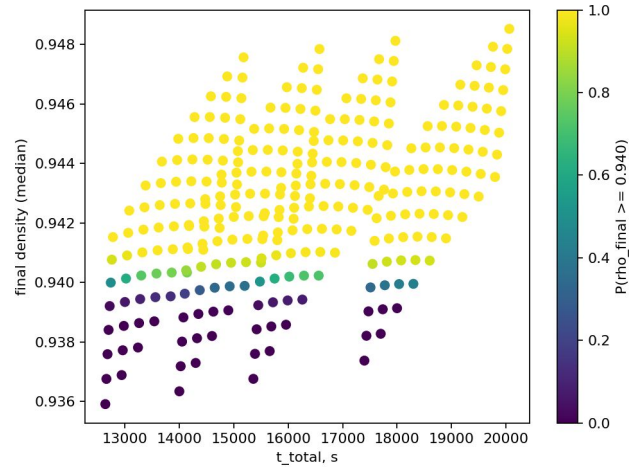


Сопоставление экспериментальной траектории относительной плотности с медианным прогнозом байесовской модели и детерминированной базовой моделью

RMSE по $\rho(t)$	0,0035
Покрытие 90% интервала	<b>0,901 (при номинале 0,90)</b>
Ошибка конечной плотности	0,0005

Байесовская модель превосходит детерминированную базу и обеспечивает корректную калибровку интервалов

# Инверсный дизайн и внешняя проверка



Парето-фронт для параметров “длительность спекания” и “конечная плотность”, из графика получаем 4 режима кандидата для апробации ( $T_{max}$ , скорость, выдержка,  $\rho_{final}$ )

RMSE прямого переноса 4,01 п.п. →  
масштабирование 1,66 → мостовая адаптация 0,99 п.п.

# Выводы и направления развития

1. Минимальная физически информированная модель + байесовская калибровка дают корректные интервалы и устойчивые оценки параметров
2. Инверсный дизайн в риск-ориентированной постановке выделил 4 режима-кандидата в области 1415–1420 °C
3. Прямой перенос между источниками не работает; кинетическая форма переносима, начальное состояние — нет
4. Минимальная мостовая адаптация ( $\rho_{0,bridge} + \delta_{src}$ ) восстанавливает предсказательную способность

Направления развития:

1. SPS-маршруты,
2. Явный учёт распределения частиц
3. Экспериментальная верификация режимов-кандидатов

Спасибо за внимание!