

ОНЛАЙН-ОЦЕНКА ЗАПОЛНЕНИЯ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИИ ГАУССОВЫХ ПРОЦЕССОВ И БАЙЕСОВСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Темур Махкамов,

магистр, ведущий специалист Агентство «Узатом»,

Ташкент, Узбекистан

E-mail: t.makhkamov@uzatom.uz

Аннотация. Представлена воспроизводимая процедура онлайн-оценки угла пере-
сыпания (*toe*), плечевого угла и процента заполнения барабана / по двум каналам
— тензоболту и виброускорению корпуса. Методика соединяет детерминирован-
ную физическую часть (геометрия поперечного сечения, извлечение *toe/shoulder* на
обороте) со статистической частью: регрессией гауссовых процессов (GPR) и
байесовской оптимизацией гиперпараметров (BO). Апостериорная дисперсия GPR
калибруется по метрике Coverage и используется для простого контроля качества
прогноза. На DEM-треках и производственных рядах достигаются конкурентные
значения MAE при согласованных интервалах доверия, что важно для практики
предиктивного обслуживания.

Ключевые слова: барабанная мельница; угол *toe*; степень заполнения; GPR;
байесовская оптимизация; доверительные интервалы

Эффективность помола в барабанных мельницах чувствительна к геометрии
загрузки и режимам (*каскадный/водопадный*). Оперативная оценка *J, toe ishoulder*
затруднена шумами, пропусками и отсутствием прямых измерителей. Цель работы —
дать инженерно простой способ расчёта параметров на уровне оборота и короткого
прогноза с контролируемой неопределённостью. В качестве модели принята регрессия
гауссовых процессов (GPR), обеспечивающая совмест- но предсказание и
апостериорную дисперсию; подбор ядра и гиперпараметров выполняет байесовская
оптимизация (BO)

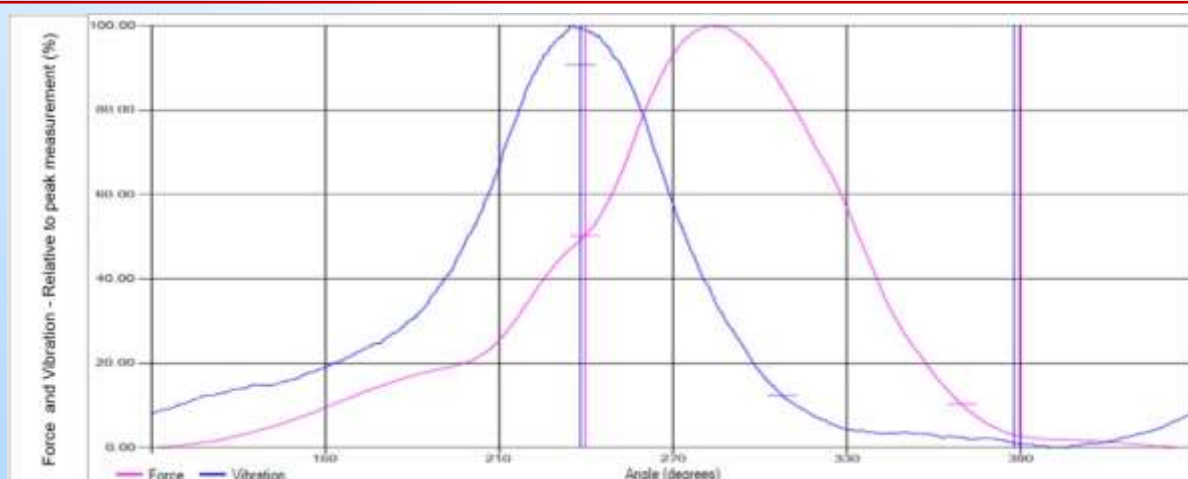


Рис. 1: Один оборот: инвертированный тензосигнал (SG) и виброскорость корпуса (Асс); вертикальными линиями отмечены найденные *toe* и *shoulder*

1 Физическая модель и наблюдаемые сигналы

1.1 Сигналы

Используются синхронные ряды: тензосигнал на болте футеровки (SG) и модуль виброускорения корпуса (Асс). Предобработка включает починку пропусков, инверсию SG, сглаживание, нормировку по обороту и отбраковку невалидных оборотов.

1.2 Геометрия и связь f -*toe*

Пусть *toe* определён согласованно по SG/Асс на обороте. Процент заполнения f вычисляется через площадь сегмента круга с учётом лифтера. Зависимость f (*toe*) используется далее, как физический якорь для проверки согласованности оценок

1 Режимы работы и DEM-проверки

Для интерпретации сигналов использован DEM-сценарий одного оборота в двух режимах. На рис. 3 показано различие динамики загрузки; это объясняет частотные и амплитудные особенности SG/Асс и влияет на робастность извлечения *toe*

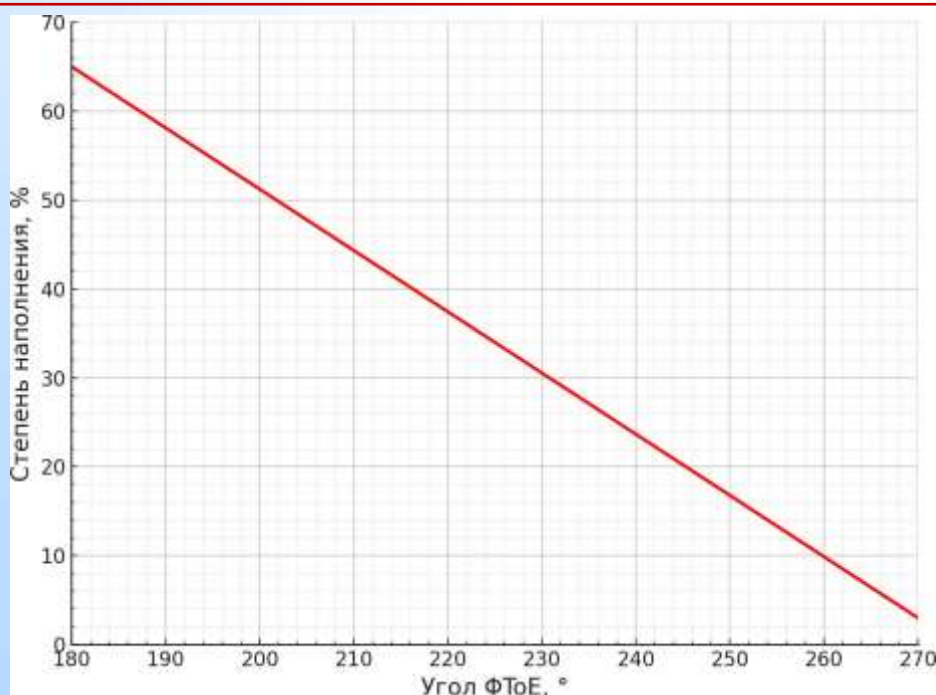


Рис. 2: Теоретическая связь процента заполнения $\angle$ с углом toe (калибровочная кривая для заданной геометрии барабана и лифтера).

2 Извлечение параметров на обороте и проверка согласованности

Алгоритм:

(i) поиск toe как резкого шага SG, подтверждённого локальным максимумом Асс в допустимом секторе, (ii) оценка $\angle$ по геометрии (см. рис. 2), (iii) валидация по физическим ограничениям (границы $\angle$, устойчивость между соседними оборотами). рис. 4 показывает типичный пример.

3 Краткосрочный прогноз: GPR и байесовская оптимизация

3.1 Постановка

Прогнозируются $\angle$ и/или производные показатели на горизонтах $H \in \{10, 30, 60\}$ минут по скользящему окну $W \in \{60, 120, 200\}$ минут

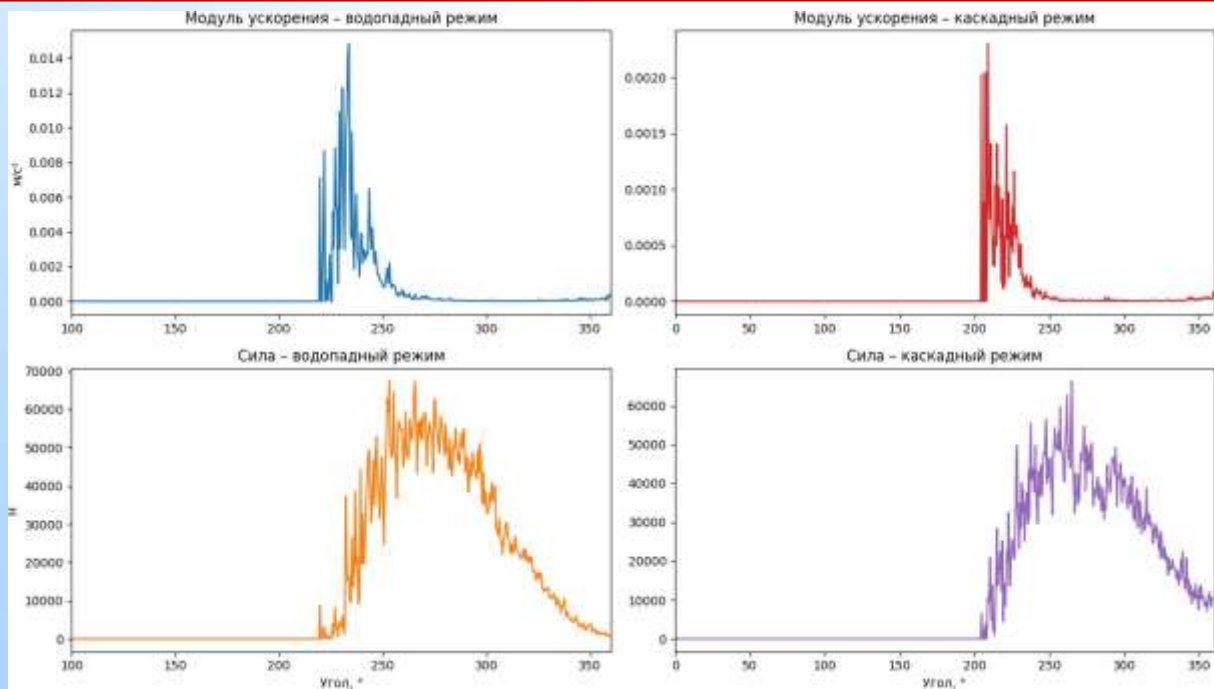


Рис. 3: Один оборот в DEM: слева — водопадный режим, справа — каскадный; различие траекторий частиц определяет характер SG/Асс.

3.2 Модели и обучение

Рассматриваются ядра Matern ($\nu = 1/2, 3/2, 5/2$), Rational Quadratic (RQ) и RBF+RQ. BO (Expected Improvement) выбирает ядро и гиперпараметры (ℓ, σ_f, μ) по валидационной MAE. Апостериорная дисперсия калибруется масштабированием для достижения номинальной Coverage.

4 Эксперимент и результаты

4.1 Данные и базовые сравнения

Оценка проведена на (i) DEM-данных и (ii) производственных отрезках. Для сравнения использованы ARIMA, ETS и компактная LSTM.

4.2 Метрики

Качество прогноза измерено по MAE; качество интервалов — по Coverage (доля наблюдений, попавших в $\pm k\sigma$ при номинале 90%). Для раннего предупреждения дополнительно считались AUROC и медианное опережение

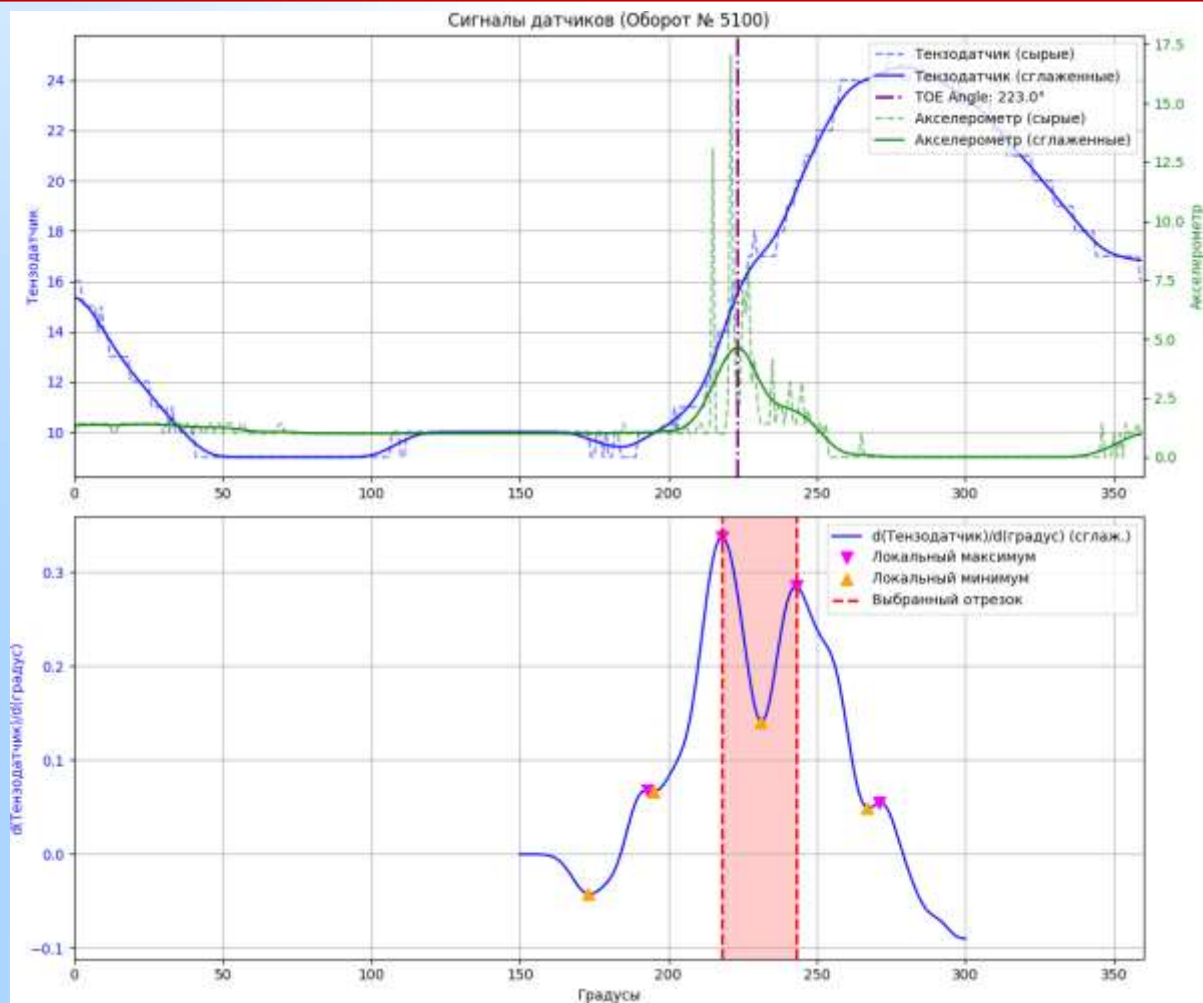


Рис. 4: Иллюстрация извлечения *toe* на обороте №5100: согласованный признак по SG и Асс.

4.3 Основные наблюдения

- Увеличение окна W до 120–200 минут стабилизирует Coverage без ущерба для MAE на горизонтах 10–30 минут.
- Лучшая пара «точность–надёжность» — ядра Matern и RQ; RBF+RQ обеспечивает компромисс при смене режима.

Калибровка дисперсии выравнивает эмпирическую Coverage до 88–91% при номинале 90%

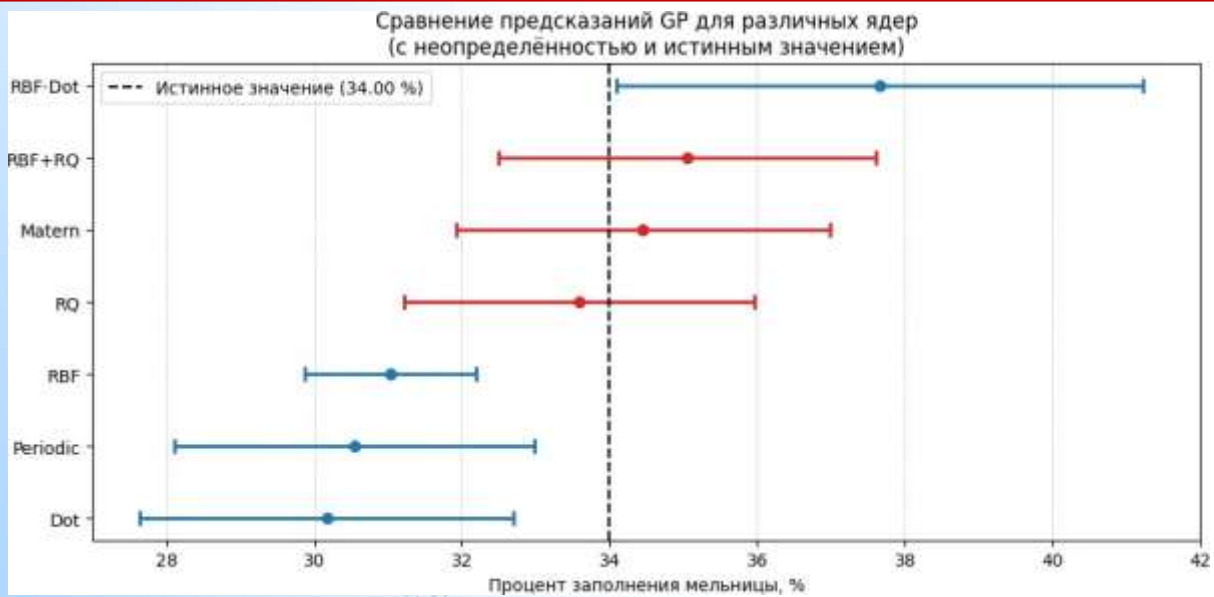


Рис. 5: Сводная оценка ядер: интервальные прогнозы $\mu \pm \sigma$ относительно эталона; Matern и RQ обеспечивают согласованное покрытие.

Таблица 1: Сводка по трём сегментам: MAE (п.п. /) и Coverage (номинал 90%)

Модель	MAE	Coverage	Примечание
	↓	↑	
ARIMA/ETS (база)	1.9–	65–78%	нет доверительных интервалов
	2.8		по конструкции
LSTM (комп.)	1.6–	60–75%	нестабильная калибровка
	2.2		
GPR+BO (Matern/RQ)	1.4–	88–91%	после калибровки $\hat{\sigma}$
	1.9		

4.4 Сводная таблица (пример формата)

5 Обсуждение

Практическая ценность подхода — прозрачная связка физики (геометрия, валидируемые углы) и статистики (апостериорные интервалы). BO снимает ручной тюнинг и отслеживает дрейф. Ограничения: кубическая сложность GPR по $\mathbf{X}$ чувствительность к смене режима; на практике используются индукционные точки и периодическая перенастройка

6 Заключение

Предложена воспроизводимая процедура: SG+Acc → извлечение $toe//$ на обороте → GPR-прогноз с BO и калибровкой Coverage. На DEM и реальных данных пока-

заны конкурентные МАЕ и согласованные интервалы. Метод готов к внедрению в контур предиктивного обслуживания.

Литература

1. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006.
 2. Snoek J., Larochelle H., Adams R.P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms // NIPS, 2012.
 3. Wills B.A., Finch J. Wills' Mineral Processing Technology. 8th ed., 2016.
 4. Powell M.S., Mainza A. Grind curves and mill optimisation // Minerals Engineering, 2009.
 5. Gretton A. et al. A Kernel Two-Sample Test // JMLR, 2012.
- ISO 13373-2:2016. Condition monitoring and diagnostics of machines—Vibration condition monitoring—Part 2