

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБРЫВОВ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Б.С. Матвийчук¹, Д.А. Седых¹, С.П. Дудник¹, П.Д. Вытовтов¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье анализируются перспективы развития систем прогнозирования обрывов бумажного полотна на бумагоделательных машинах с применением методов машинного обучения. Решается проблема дисбаланса классов и обеспечению интерпретируемости моделей в условиях российских ЦБК. Предложена гибридная архитектура LSTM + XGBoost с использованием методов аугментации данных ADASYN, SMOTE и анализа SHAP.

Ключевые слова: предиктивное управление, прогнозирование обрывов, бумагоделательная машина, гибридные модели, дисбаланс классов, LSTM, XGBoost, машинное обучение.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF PAPER SHEET BREAKAGE PREDICTION SYSTEMS BASED ON MACHINE LEARNING METHODS

B.S. Matviychuk¹, D.A. Sedykh¹, S.P. Dudnik¹, P.D. Vytovtov¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The article analyzes the prospects for the development of systems for predicting paper breaks on paper machines using machine learning methods. The problem of the imbalance of classes and ensuring the interpretability of models in the conditions of the Russian CBC is solved. A hybrid architecture LSTM + XGBoost using data augmentation methods ADASYN, SMOTE and SHAP analysis is proposed.

Keywords: predictive control, paper breakage predicting, paper machine, hybrid models, class imbalance, LSTM, XGBoost, machine learning.

Введение

Производство бумаги и картона остаётся одной из ключевых отраслей промышленности Российской Федерации, однако в последние годы отрасль переживает структурный кризис. В 2023 году объём выпуска товарной продукции сократился на 4,6%, а крупнейшие предприятия («Илим», «Сегежа Групп», АЦБК) понесли убытки около 100 млн рублей каждое [4]. В таких условиях эффективность работы оборудования становится стратегической задачей. Наиболее ощутимые потери на бумагоделательной машине (БДМ) связаны с обрывами полотна в сушильной части, где время восстановления составляет 25–90 минут. Ущерб от часа простоя современной машины варьируется в диапазоне 400.000–1.800.000 рублей, превышая 1,5 млн рублей для высокопроизводительных агрегатов (>500 т/сутки). При 50 обрывах в месяц это даёт около 21 час простоя и потерю 85–500 т продукции в зависимости от мощности БДМ. С учётом доли сырья (40–70% себестоимости) и расхода пара (12–50 т/ч), реальная стоимость инцидента с учётом брака и перезапуска многократно возрастает [1, 4, 6]. Современные системы управления позволяют минимизировать последствия уже произошедшего обрыва, но не предотвратить его [3]. Проактивные меры снижают частоту инцидентов, однако не обеспечивают прогнозирования новых ситуаций [6, 7, 8]. В этом контексте наиболее перспективным направлением становится переход к предиктивному управлению на основе методов машинного обучения.

Целью данной работы является анализ перспектив развития систем прогнозирования обрывов бумажного полотна на основе методов машинного обучения, адаптированных к условиям российских целлюлозно-бумажных комбинатов. В работе рассматриваются гибридные архитектуры (LSTM + XGBoost), методы преодоления дисбаланса классов (ADASYN, SMOTE) и подходы к интерпретации моделей (SHAP), обеспечивающие упреждение события на 4–5 минут при частоте ложных срабатываний от 0,23/100 ч.

Причины обрыва бумаги в сушильной части

Обрыв бумажного полотна в сушильной части БДМ представляет собой результат системного нарушения устойчивости технологического процесса, а не случайное событие. Ключевым моментом является переход от фазы постоянной скорости сушки к фазе падающей скорости, сопровождающийся резким ростом внутренних напряжений при сухости полотна 65–85% [8, 9]. В этом диапазоне происходит интенсивное снижение пластичности волокнистой структуры, что делает полотно особенно уязвимым.

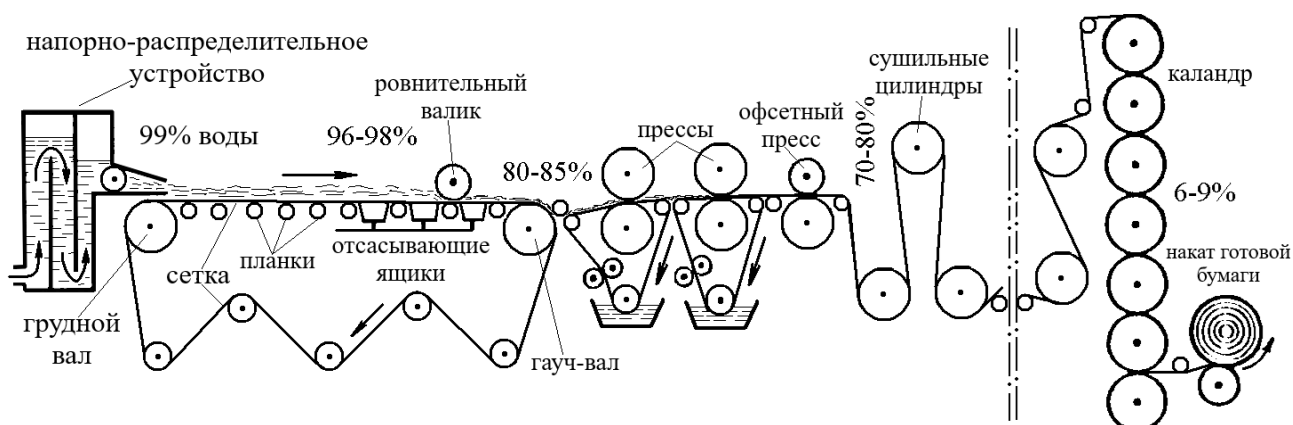


Рисунок 1 – Схема бумагоделательной машины

Наибольшие значения напряжений возникают в зонах локального пересушивания, где прочность может падать более чем на 40% по сравнению с соседними областями [8]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что прочность на разрыв в краевой зоне (до 25 мм от кромки) на 20-30% ниже, чем в центральной части. Именно по краям инициируется до 62% обрывов в сушильной секции. Большую роль играет работа паровоздушной системы: при нарушении вентиляции влажность в кармане цилиндра растёт, градиент испарения падает, что приводит к неравномерной сушке. Забивание цилиндров конденсатом снижает коэффициент теплоотдачи на 60-80%, вызывая скачок нагрузки на привод и возможный обрыв [8].

Эволюция методов прогнозирования

В настоящее время в целлюлозно-бумажной промышленности сформировались три подхода к управлению обрывами: реактивный, проактивный и предиктивный. Реактивные системы (оптические, пневматические датчики) фиксируют лишь свершившийся факт разрыва полотна, инициируя аварийную остановку [2]. Это не предотвращает ущерб, оцениваемый в 6,25 тонн продукции за 90 минут простоя [5]. Проактивные меры (стабилизация состава массы, регламентное обслуживание) снижают частоту инцидентов, но не способны предсказывать новые комбинации рисков факторов [6, 7, 8]. Например, предиктивное обслуживание подшипников по вибродиагностике требует капитальных затрат и не учитывает технологические параметры сушки.

Наиболее перспективным является предиктивный подход на основе машинного обучения (МО). Однако внедрение сдерживается «проклятием редко-

сти»: доля обрывов в промышленных данных составляет менее 0,6%. Стандартные метрики (accuracy > 99,9%) становятся некорректными, требуют устойчивых показателей (AUPRC, MCC). Зарубежные аналоги (например, Andritz Metris OPP) демонстрируют рост эффективности до 93%, но являются закрытыми системами без интерпретации решений. Отечественные разработки часто ограничиваются статистическими методами (контрольные карты Шухарта), обеспечивающими упреждение не более 2-3 минут [6].

В работе оценена эффективность различных архитектур МО на промышленном датасете (18 399 записей, 124 события обрыва). Сравнение проводилось по робастным метрикам и прагматическим показателям (время упреждения, частота ложных срабатываний).

Таблица 1 – Сравнение моделей по критериям

Модель	AUPRC	F1	MCC	G-Mean	T_1 , мин	FAR, %
LSTM+XGBoost	0.818	0.782	0.592	0.689	4.0	0.23
LSTM (базовая)	0.541	0.512	0.418	0.501	2.8	0.68
XGBoost (только статистические признаки)	0.632	0.630	0.517	0.624	3.4	0.52
PCA+SVM	0.489	0.467	0.384	0.452	3.6	0.61
Random Forest	0.203	0.181	0.135	0.210	2.1	1.92

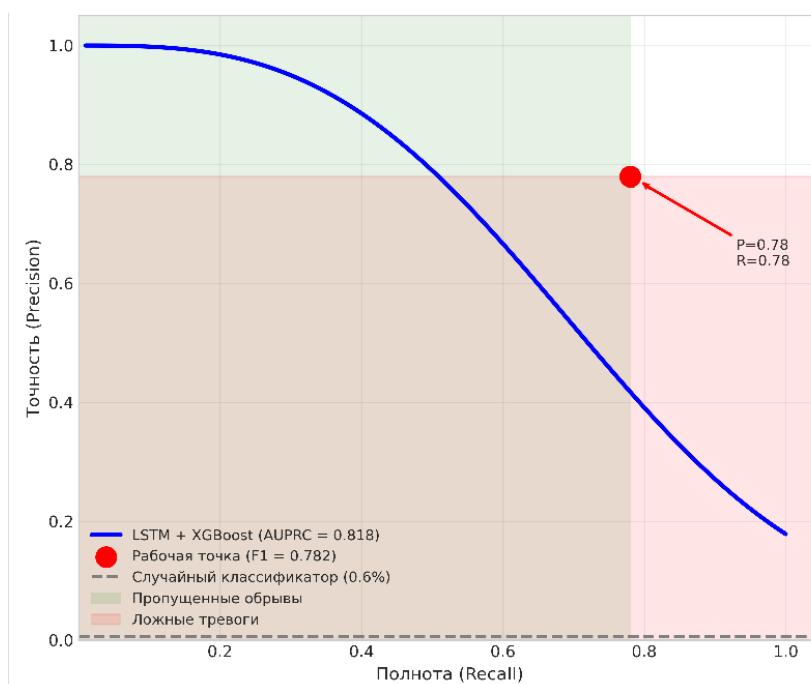


Рисунок 2 – Кривая Precision-Recall для гибридной модели

Гибридная архитектура превосходит аналоги по AUPRC на 29-45% (табл. 1). Время упреждения 4,0 мин превышает требуемый минимум (3 мин), позволяя оператору скорректировать параметры (скорость, давление пара) до наступления критической ситуации [6]. Частота ложных срабатываний (0,23/100 ч) находится в пределах операционной терпимости, что критично для доверия персонала.

Направление развития

Ключевой этап – формирование целевой переменной; простая фиксация обрыва бесполезна для прогноза. Данные размечаются с временным сдвигом: момент обрыва перемещается на интервал упреждения. Валидация на промышленных данных показала возможность стабильного предсказания за 4 минуты до события, что достаточно для базовой реакции оператора. Стратегическая цель – увеличение горизонта до 5-10 минут, что позволит автоматизировать корректирующие действия, такие как снижение скорости и перераспределение давления пара, и перейти к полуавтономному управлению участком сушки.

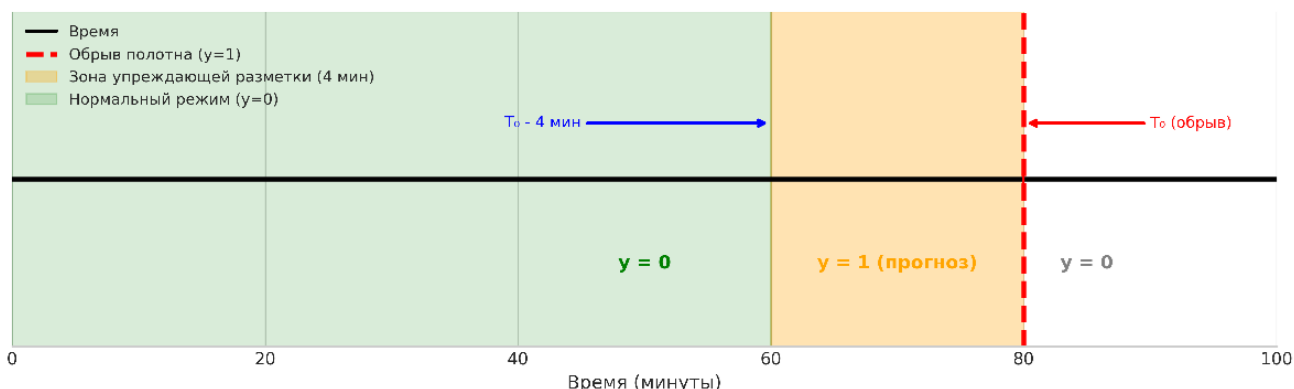


Рисунок 3 – Принцип формирования целевой переменной со сдвигом на 4 минуты

Превосходство гибридной архитектуры открывает перспективы промышленного внедрения, но требует решения трёх ключевых задач: преодоления дисбаланса классов, обеспечения интерпретируемости моделей и их интеграции в существующую инфраструктуру целлюлозно-бумажных комбинатов. Основной проблемой остаётся «проклятие редкости» данных: доля обрывов не превышает 0,6%. В работе применена комбинированная стратегия балансировки, включающая синтетическую аугментацию методов ADASYN и SMOTE, а также калибровку параметра `scale_pos_weight` в XGBoost. Это сместило акцент на робастные показатели – площадь под кривой (AUPRC = 0,818) и коэффициент Мэтьюса (MCC = 0,592), адекватно отражающие качество предсказаний редких событий. Важным аспектом является обеспечение доверия операторов. «Чёрный ящик»

без объяснений причин не будет принят персоналом. Интеграция SHAP-анализа позволяет оператору видеть не только вероятность обрыва, но и вклад каждого фактора. Например, значение x_{60_max} (вертикальное положение устройства) на верхней границе диапазона увеличивает вероятность обрыва на 12-15%.

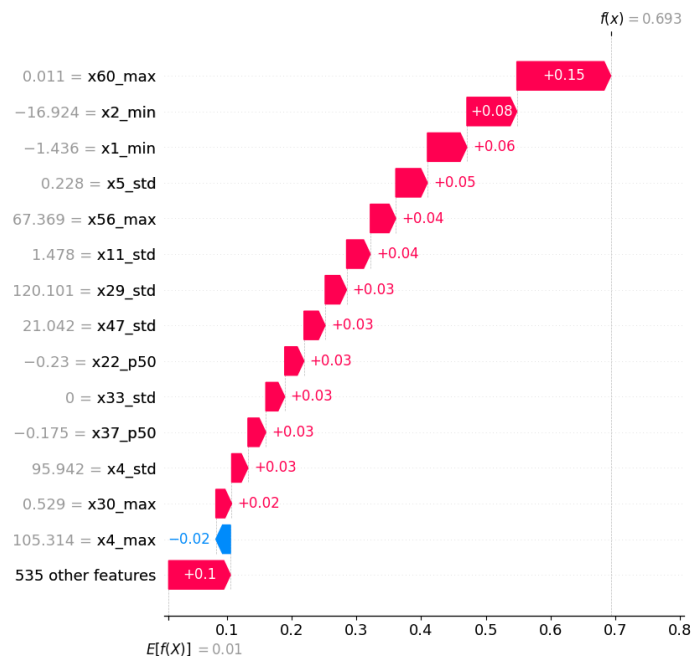


Рисунок 4 – Диаграммы водопада метода SHAP с влиянием каждого признака

Заключение

Основным трендом развития становится переход к предиктивному управлению на основе машинного обучения, что позволяет существенно снизить экономические потери от простоев оборудования. Гибридные архитектуры (LSTM + XGBoost) в сочетании с методами балансировки данных демонстрируют высокую эффективность даже в условиях дисбаланса классов.

Современные подходы должны создавать симбиоз рекуррентных сетей для анализа временных рядов, методов аугментации (SMOTE, ADASYN) и объяснимого ИИ (SHAP), чтобы обеспечить точность прогноза и доверие персонала.

Будущие исследования в данной сфере должны быть направлены на увеличение горизонта прогнозирования до 5–10 минут, внедрение полуавтономного управления участком сушки, а также глубокую интеграцию с существующей инфраструктурой ЦБК для минимизации ручного вмешательства.

Список литературы

1. Ковалева, О. П. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. Бумажная фабрика : учебное пособие для студентов / О. П. Ковалева. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2022. – 76 с. – ISBN 978-5-9239-1290-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/257846> (дата обращения: 30.05.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. О бумажном производстве – URL: <https://bumpro.narod.ru/about.html>.
3. Ajayi, O.O.; Kurien, A.M.; Djouani, K.; Dieng, L. A Proactive Predictive Model for Machine Failure Forecasting. *Machines* **2025**, *13*, 663. DOI 10.3390/machines13080663
4. Crisis looms over Russian pulp and paper industry amidst sanctions and plummeting Chinese demand – URL: https://www.lesprom.com/en/news/Crisis_looms_over_Russian_pulp_and_paper_industry_amidst_sanctions_and_plummeting_Chinese_demand_108802/.
5. Сушка бумаги - Технология бумаги (Химия) – URL: <https://studizba.com/lectures/himija/tehnologija-bumagi/26633-sushka-bumagi.html>.
6. H. Linnal, P. Moilanenl, J. Koskimies WEB TENSION MEASUREMENTS IN THE PAPER MILL – URL: <https://openresearch.okstate.edu/server/api/core/bitstreams/1fb0b6ab-5421-4e3c-a149-eb79c63bef15/content>.
7. Институт «Крона»: 6 вопросов экспертам – URL: <https://gofromagazine.com/6-voprosov-ekspertam.html>.
8. Samrachana Adhikari, Sharon-Lise Normand, Jordan Bloom, David Shahian, Sherri Rose, Revisiting Performance Metrics for Prediction with Rare Outcomes, 2021 Sep 1;30(10):2352–2366. doi: 10.1177/09622802211038754
9. G. Srinivasa Prasad, V.V. Raghavendra Rao Experience on Paper Machine Condition Monitoring A Case Study Highlighting Drying Cylinder Bearing Failures – URL: <https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/IPPTA-153-37-44-Experience-on-Paper.pdf>.
10. M. Parola, S. Vuorinen, H. Linna, T. Kaljunen and N. Beletski. Modelling the Web Tension Profile in a Paper Machine. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 759–781, FRC, Manchester, 2018. DOI: 10.15376/frc.2001.1.759.

References

1. Kovaleva, O. P. Pulp and paper production equipment. Paper factory : a textbook for students / O. P. Kovaleva. – Saint Petersburg : St. Petersburg State Technical University, 2022. – 76 p. – ISBN 978-5-9239-1290-6. – Text : electronic // Lan : electronic library system. – URL: <https://e.lanbook.com/book/257846> (date of request: 05/30/2026). – Access mode: for authorization. users.
2. About paper production – URL: <https://bumpro.narod.ru/about.html>
3. Ajayi, O.O.; Kurien, A.M.; Djouani, K.; Dieng, L. A Proactive Predictive Model for Machine Failure Forecasting. *Machines* 2025, 13, 663. DOI 10.3390/machines13080663
4. Crisis looms over Russian pulp and paper industry amidst sanctions and plummeting Chinese demand – URL: https://www.lesprom.com/en/news/Crisis_looms_over_Russian_pulp_and_paper_industry_amidst_sanctions_and_plummeting_Chinese_demand_108802/
5. Paper Drying - Paper Technology (Chemistry) – URL: <https://studizba.com/lectures/himija/tehnologija-bumagi/26633-sushka-bumagi.html>
6. H. Linnal, P. Moilanenl, J. Koskimies WEB TENSION MEASUREMENTS IN THE PAPER MILL – URL: <https://openresearch.ok-state.edu/server/api/core/bitstreams/1fb0b6ab-5421-4e3c-a149-eb79c63bef15/content>
7. The Krona Institute: 6 questions for experts – URL: <https://gofromagazine.com/6-voprosov-ekspertam.html>
8. Samrachana Adhikari, Sharon-Lise Normand, Jordan Bloom, David Shahan, Sherri Rose, Revisiting Performance Metrics for Prediction with Rare Outcomes, 2021 Sep 1;30(10):2352–2366. doi: 10.1177/09622802211038754
9. G. Srinivasa Prasad, V.V. Raghavendra Rao Experience on Paper Machine Condition Monitoring A Case Study Highlighting Drying Cylinder Bearing Failures – URL: <https://ippta.co/wp-content/uploads/2021/01/IPPTA-153-37-44-Experience-on-Paper.pdf>
10. M. Parola, S. Vuorinen, H. Linna, T. Kaljunen and N. Beletski. Modelling the Web Tension Profile in a Paper Machine. In *The science of papermaking*, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 759–781, FRC, Manchester, 2018. DOI: 10.15376/frc.2001.1.759.