

3. Si H. Managing Innovation Portfolios: From Project Selection to Portfolio Design / H. Si, S. Kavadias, Ch. H. Loch // Social Science Research Network. – 2022. – DOI 10.2139/ssrn.4050940.
4. Ominde, D. Multilateral analysis of stakeholder integration, project complexity and project performance on information technology (IT) projects / D. Ominde, E. G. Ochieng, T. Zuofa // International Journal of Productivity and Performance Management. – 2024. – DOI 10.1108/ijppm-02-2024-0135.
5. Hybrid Simulation as a Key Tool for Socio-economic Systems Modeling / A. M. Gintciak, M. V. Bolsunovskaya, Z. V. Burlutskaya, A. A. Petryaeva // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 442 LNNS. – P. 262-272. – DOI 10.1007/978-3-030-98832-6_23.
6. Комплексное моделирование процессов нефтедобычи: аналитический обзор / М. В. Болсуновская, А. М. Гинцяк, Д. Э. Федяевская [и др.] // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 2(595). – С. 51-62. – DOI 10.33285/2782-604X-2023-2(595)-51-62.
7. Бекетов С. М. Принципиальный подход к оптимизации распределения трудовых ресурсов при иерархическом управлении портфелем проектов / С. М. Бекетов, М. В. Дергачев, А. М. Гинцяк // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0 (ЭКОПРОМ) : сборник трудов международной научно-практической конференции, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 01–02 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2024. – С. 557-562. – DOI 10.18720/IEP/2024.4/88.

УДК 662.6

doi:10.18720/SPBPU/2/id25-308

Рыбакова Юлия Викторовна

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

yulia.rybakova@spbpu.com

Научный руководитель:

Гинцяк Алексей Михайлович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ФАКТОРЫ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация. В статье рассмотрены ключевые факторы, влияющие на вариабельность производственных процессов в цветной металлургии, и предложена модель количественной оценки нестабильности на основе коэффициента вариации.

Ключевые слова: цветная металлургия, вариабельность процессов, сырье, оборудование, коэффициент вариации.

Julia V. Rybakova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

yulia.rybakova@spbpu.com

Supervisor:

Aleksei M. Gintciak

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

FACTORS OF VARIABILITY IN THE PRODUCTION PROCESS IN NON-FERROUS METALLURGY

Abstract. The article examines key factors influencing the variability of production processes in non-ferrous metallurgy and proposes a model for quantitative assessment of instability based on the coefficient of variation.

Keywords: Non-ferrous metallurgy, process variability, raw materials, equipment, coefficient of variation.

Введение

Производственные процессы в цветной металлургии представляют собой сложные, многоступенчатые циклы, где на качество конечной продукции и стабильность работы влияет множество взаимосвязанных факторов. Технологический цикл включает в себя этапы от подготовки исходного материала (сырья) до металлургических переделов (плавка, рафинирование, электролиз), каждый из которых чувствителен к отклонениям входных параметров. При идеальных условиях входные данные должны быть идентичными, однако на практике наблюдаются колебания, вызванные качеством сырья, техническим состоянием оборудования и человеческим фактором. Для повышения надежности и эффективности производства необходимо понимание источников этих факторов и механизмов их влияния на каждом этапе технологического цикла [1, 2].

Цель исследования – выявить основные источники нестабильности производственных процессов в цветной металлургии и оценить их вклад в общую вариабельность с помощью количественного анализа. Задачи исследования: определить основные факторы вариабельности и проанализировать их влияние; рассчитать коэффициент вариации и выделить наиболее критичные группы факторов. Исследование выполнено на основе комплексного анализа данных и выводов, представленных в научных публикациях и профильной литературе.

Результаты

Исследование позволило выделить пять основных групп факторов, формирующих вариабельность технологических процессов: сырьевые, технические, технологические, человеческие и организационно-управленческие.

Для количественной оценки степени нестабильности технологических параметров введена модель, представляющую собой совокупность ключевых параметров процесса в виде вектора наблюдаемых величин:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

где каждый элемент X_i – конкретный параметр процесса.

Для каждого параметра необходимо вычислить коэффициент вариации CV:

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \times 100\%, \quad (1)$$

где μ_i – среднее значение параметра, σ_i – стандартное отклонение.

Коэффициент вариации для группы рассчитывается как средневзвешенное значение коэффициентов вариации отдельных параметров группы факторов.

Данный подход позволяет ранжировать источники нестабильности по степени их влияния на процесс: если CV превышает 30 – 35 %, считается что данный параметр обладает высокой вариабельностью и способен существенно ухудшать качество продукции и эффективность производства [3].

Рассмотрим каждую группу факторов подробнее.

Сырьевые факторы. Цветная металлургия в значительной степени зависит от природных характеристик сырья, прежде всего металлической руды. Химический состав руды варьируется в зависимости от геологических условий месторождения, что усложняет поддержание стабильности технологических параметров на последующих этапах переработки. На физические свойства руды дополнительно воздействует способ добычи. Контроль гранулометрии на этапе добычи снижает затраты и повышает эффективность переработки. Все эти вариации приводят к неравномерному прогреву и различным скоростям восстановительных реакций [4].

В работе [5] приведены результаты ситового анализа руды месторождения Северный Джилау. Среднее содержание золота в пробе составляло 0,82 г/т. Результаты анализа показали, что около 75 % золота сосредоточено в фракции минус 8 мм, из них 63 % – в фракции минус 1 мм. Степень извлечения золота из руды из фракции минус 38 мм составила, более 70% высокое значение (90,97 %) зафиксировано при выщелачивании руды крупностью минус 1 мм. Таким образом, более мелкие фракции содержат большее количество металла и дают высокую степень извлечения по сравнению с более крупными фракциями.

Технологические факторы. Многие производственные процессы в металлургии очень чувствительны к изменению технологических параметров, таких как температура, расход восстановителя, давление, а также состав реагентов.

Малейшие отклонения от оптимальных значений этих параметров могут существенно повлиять на эффективность процесса [6].

В работе Самихова Ш.Р. и Зинченко З.А. [5] показано, что температурный режим влияет на эффективность извлечения золота из руды. Экспериментальные данные демонстрируют, что повышение температуры выщелачивающего раствора от 10 °С до 30 °С существенно увеличивает извлечение золота: за 10 суток – 51,3 % при $t = 10$ °С, в то время как при 30 °С скорость реакции увеличивается до 70,5 %, а за 25 суток до 76,7 %. Дальнейший рост температуры до 40 °С незначительно изменяет прирост, но значительно увеличивает расход цианида. Так, при 10 °С за 25 суток расход цианида составил 0,380 кг/т, при 30 °С – 0,740 кг/т., а при 40 °С – 1,185 кг/т. Авторы приходят к выводу, что оптимальный температурный режим при извлечении золота из руды необходимо выдерживать в диапазоне 20 – 30 °С.

Оборудование и техническое состояние. В металлургии оборудование эксплуатируется в экстремальных условиях: высокие температуры, агрессивные химические вещества и механические нагрузки. Надежность и точность работы агрегатов непосредственно влияют на стабильность процессов [6]. Стоит учесть, что в металлургии преобладает непрерывный тип производства. Оборудование функционирует круглосуточно, что ускоряет износ и снижает его эффективность.

Исследования [5] по соблюдению температурного режима выщелачивающего раствора при извлечении золота показали, что отклонения от оптимального диапазона приводят к снижению скорости растворения золота. В этом контексте низкая точность или неисправность приборов может привести к росту вариабельности, за счет несвоевременного управленческого воздействия, что, в свою очередь, снижает эффективность процесса и увеличивает расход реагентов.

Человеческий фактор. В производственных процессах цветной металлургии важным элементом является квалификация и опыт работников [6]. Своевременное реагирование на штатные и нештатные ситуации обеспечивает бесперебойность производства. Также необходимо учитывать физическое и психологическое состояние персонала. Работа в тяжелых условиях, таких как высокие температуры и контакт с опасными веществами, может снижать концентрацию работников и ухудшать их производительность.

В исследовании [6] показано, что повышение квалификации операторов на медеплавильном заводе позволило увеличить выход продукции на 20 % и сократить количество брака. На сталелитейном заводе внедрение предиктивных систем мониторинга и обучение персонала позволило сократить внеплановые простои на 40 %.

Организационно-управленческие факторы. Задержка обратной связи и несогласованность действий между технологическими участками способствуют росту вариабельности. Несвоевременное поступление информации может тормозить принятие оперативных решений по корректировке процессов, что отражается на эффективности производства. Нелинейный отклик производственной системы приводит к тому, что изменения одного из параметров не приводят к пропорциональным изменениям в других. Это усложняет управление процессами и требует от специалистов глубокого понимания взаимосвязей между различными параметрами.

Для комплексной оценки влияния был рассчитан коэффициент вариации по формуле (1). Расчет выполнен только для тех факторов, по которым имеются количественные данные. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Количественная оценка вариабельности ключевых параметров
технологических процессов в цветной металлургии**

Группа факторов	Параметр	Среднее значение (μ_i)	Стандартное отклонение (σ_i)	CV, %	CV для группы, %
Сырьевые	Среднее содержание золота в пробе, г/т	0,82	0,78	95,10	122,75
	Содержание золота по фракциям, %	14,30	21,49	150,40	
Технологические	Расход цианида при 10 – 30 °С, кг/т	0,56	0,18	32,14	23,95
	Извлечение золота при температуре 10 – 30 °С, %	60,90	9,60	15,76	

На основании рассчитанных коэффициентов вариации для отдельных показателей была рассчитана средневзвешенная вариабельности для каждой группы факторов. Проранжировав рассмотренные группы по величине среднего коэффициента вариации можно сделать вывод, что сырьевые факторы демонстрируют наибольшее влияние. Внутри каждой группы также возможно ранжировать влияние параметров на основе индивидуальных значений коэффициента вариации. Такой подход позволит точно выявлять источники нестабильности.

Для применения единого методического подхода для всех групп факторов требуется определить количественные показатели, отражающие влияние на нестабильность производственных процессов.

Заключение

Комплексный анализ факторов вариабельности производственных процессов в цветной металлургии позволил выделить пять ключевых групп: сырьевые, технологические, технические, человеческие и управленческие. Коэффициент вариации позволяет ранжировать параметры по степени риска и сосредоточить усилия на стабилизации наиболее чувствительных участков. Он служит универсальным инструментом для объективного сравнения относительного разброса параметров, независимо от их физических единиц и средних значений. На основе приведенных примеров наиболее критичными, с точки зрения нестабильности, оказались параметры, связанные с дозированием реагентов и составом сырья.

Рассмотренные факторы тесно взаимосвязаны друг с другом, поэтому для повышения стабильности и эффективности производства необходимо учитывать их комплексное воздействие. Изменение одного параметра может напрямую или косвенно влиять на другие. Перспективным направлением дальнейших исследований является анализ взаимосвязей параметров и их комплексное влияние на вариабельность производственной системы.

Библиографический список

1. Рыбакова, Ю. В. Практические проблемы управления непрерывными производственными процессами / Ю. В. Рыбакова, А. М. Гинцяк // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий : Сборник тезисов докладов VI Международного форума, Санкт-Петербург, 15–16 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – С. 72-77. – EDN YPFMXO.
2. Ефимов В. В., Барт Т. В. Статистические методы в управлении качеством продукции: учебное пособие. / В. В. Ефимов, Т. В. Барт. – М.: КНОРУС, 2006.
3. Сизова Т.М. Статистика: учебное пособие. – СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2013.
4. Маринин М. А., Евграфов М. В., Должиков В. В. Производство взрывных работ на заданный гранулометрический состав руды в рамках концепции "Mine-to-Mill": современное состояние и перспективы // Известия ТПУ. – 2021. – № 7.
5. Самихов Ш. Р., Зинченко З. А. Влияние температуры на процесс выщелачивания золота // Золото Добыча. – 2021.
6. Controlling Metallurgical Processes: Optimizing Smelting and Refining Operations [Электронный ресурс]. – Diverse Daily. – Доступно по ссылке: <https://diversedaily.com/controlling-metallurgical-processes-optimizing-smelting-and-refining-operations/>.