

ОЦЕНКА РИСКА АВАРИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ

О.М. Зиновьева¹, А.М. Меркулова¹, Н.А. Смирнова¹, Д.А. Чадин¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: anna-merkulova@yandex.ru

Аннотация: Важную роль в работе обогатительных фабрик играют системы автоматизированного и автоматического управления, которые не только повышают эффективность производства, но и способствуют повышению безопасности работы, снижению воздействия на окружающую среду и оптимизируют использование ресурсов. Поэтому при идентификации опасностей, оценке рисков и управлении ими в целях обеспечения безопасности технологических процессов необходимо учитывать наличие и работоспособность таких систем. Идентифицированы опасности, присущие всем автоматизированным процессам обогащения полезных ископаемых, а также опасности, характерные для отдельных процессов обогащения – дробления, измельчения, флотации и сушки. Показано, что выявленные опасности связаны с техническими аспектами функционирования предприятия, организационной культурой и психологией персонала. На основе функциональных схем автоматизации построены деревья отказов для процессов дробления, измельчения и флотации. Приведен пример реестра опасных событий, составленного с помощью деревьев отказов, матричным методом проведена оценка рисков и установлен уровень промышленной безопасности. На основе проведенного анализа выявлено, что при автоматизации процессов обогащения полезных ископаемых важно уделять внимание наличию систем автоматического включения резерва на случай выхода из строя оборудования, программного сбоя или потери электропитания. Приведены рекомендации для минимизации рисков при автоматизации процессов обогащения полезных ископаемых.

Ключевые слова: оценка риска, авария, дерево отказов, автоматизация, обогащение полезных ископаемых, дробление, измельчение, флотация, технологический процесс, обогатительная фабрика.

Для цитирования: Зиновьева О. М., Меркулова А. М., Смирнова Н. А., Чадин Д. А. Оценка риска аварий при автоматизации процессов обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_156.

Accidental risk assessment in mineral processing automation

O.M. Zinovieva¹, A.M. Merkulova¹, N.A. Smirnova¹, D.A. Chadin¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: anna-merkulova@yandex.ru

Abstract: Automated and automatic control takes an important part of operation of processing factories as it enhances production safety and efficiency, reduces the environmental impact and optimizes utilization of mineral resources. For this reason, when identifying hazards and assessing risks toward safety of production processes, it is necessary to take into account the availability and operability of automated and automatic control systems. This study identifies risks intrinsic to all automated operations in mineral processing, as well as risk peculiar to in-

dividual processes of crushing, milling, flotation and drying. The revealed risks are connected with technical aspects of operation, organizational culture and personnel's psychology of a mineral processing factory. Based on the functional charts of automation, the fault trees are plotted for the processes of crushing, milling and flotation. The list of risky events is given; it is composed using a fault tree. With the help of the matrix method, the risk assessment is carried out and the level of industrial safety is determined. The implemented analysis shows that during automation of mineral processing operations, it is important to pay attention to the availability of systems of automatic load transfer in case of equipment and program failures, or loss of power. The recommendations are given for the risk minimization in automation of mineral processing operations.

Key words: risk assessment, accident, fault tree, automation, mineral processing, crushing, milling, flotation, technological process, processing factory.

For citation: Zinovieva O. M., Merkulova A. M., Smirnova N. A., Chadin D. A. Accidental risk assessment in mineral processing automation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):156-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_5_0_156.

Введение

Обогатительные фабрики играют важную роль в обработке и подготовке сырья для горнодобывающей, металлургической, химической и других отраслей промышленности. Однако аварийность, как свидетельствуют статистические данные, все еще является актуальной проблемой, и может приводить не только к нарушению производственного процесса, но и к травматизму на предприятии, загрязнению окружающей среды.

Согласно данным Ростехнадзора, на начало 2024 г. в государственном реестре числится 2496 опасных производственных объектов горнорудной и нерудной промышленности, 10% которых составляют обогатительные фабрики, при этом все они относятся к III классу опасности.

С 2014 г. на дробильно-обогатительных фабриках произошло две аварии, причинами которых явились неудовлетворительная организация работ, низкий уровень производственного контроля, эксплуатация комплекса сооружений, не соответствующих требованиям промышленной безопасности и проведение экспертизы промышленной безопасности

без оценки остаточного ресурса несущей способности конструкций и пригодности объекта к дальнейшей эксплуатации. На рис. 1 представлена динамика травматизма со смертельным исходом на дробильно-обогатительных фабриках за период 2014–2023 гг. Как видно из гистограммы, несмотря на то, что количество несчастных случаев в отдельные года то увеличивается, то уменьшается, имеет место общая тенденция их роста.

Важную роль в работе обогатительных фабрик играют системы автоматизированного и автоматического управления, способствующие оптимизации технологических процессов, снижению операционных расходов, улучшению качества конечной продукции и, в результате, повышению эффективности производства [1]. Такие системы ориентированы на повышение безопасности работы и снижение воздействия на окружающую среду, минимизацию потерь и оптимизацию использования ресурсов [2–5]. За период с 2015 по 2025 гг. доля горнодобывающих предприятиях России, внедривших автоматизированные системы управления, увеличилась с 10 до 68% [6–8]. Однако вместе с преимуществами

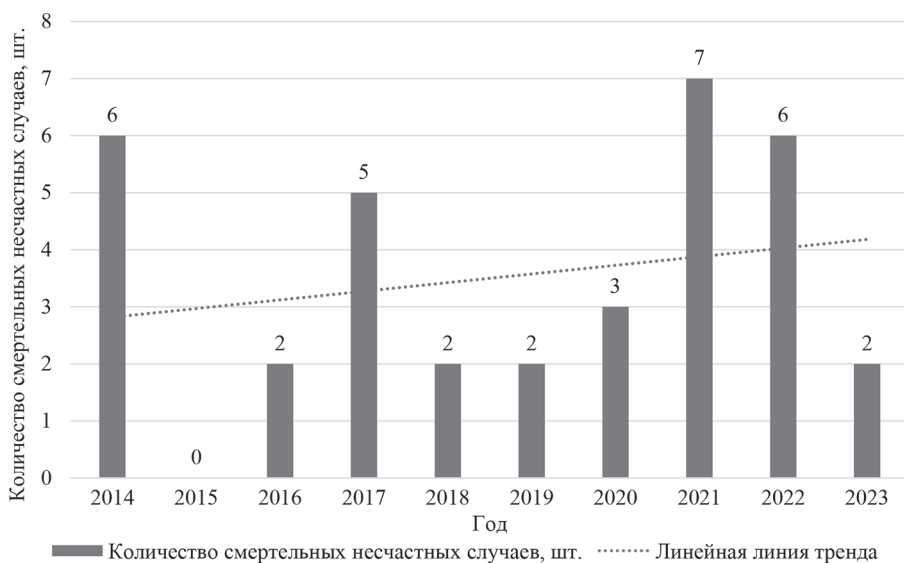


Рис. 1. Количество несчастных случаев на дробильно-обогатительных фабриках в 2014–2023 гг.
 Fig. 1. The number of accidents at crushing and processing plants in 2014–2023.

ми автоматизации возникает необходимость учета и оценки рисков, связанных с работой систем автоматизированного и автоматического управления, с последующим управлением этими рисками для обеспечения безопасности технологических процессов [9].

Идентификация опасностей, связанных с процессом автоматизации

Обогащение полезных ископаемых, направленное на повышение концентрации ценных минералов и удаление нежелательных примесей, включает в себя последовательные технологические процессы дробления, измельчения, флотации и сушки. Все эти процессы сегодня оснащены системами автоматизированного и автоматического управления и контроля, которые в режиме реального времени контролируют ключевые параметры процесса и корректируют их для достижения оптимальной производительности [10, 11].

Так, для процесса дробления реализуется автоматизированный контроль ко-

личества и гранулометрического состава перерабатываемого материала, наличия посторонних металлических предметов, верхнего и нижнего уровней материала в оборудовании, аварийного порыва конвейерных лент, температуры подшипников, обмоток электродвигателей и системы централизованной смазки, а также регулирование производительности дробилки путем стабилизации нагрузки на нее [12]. Автоматизация процесса измельчения включает стабилизацию потока и гранулометрического состава продукта измельчения, распределение нагрузки между стадиями измельчения и обеспечение максимальной производительности всего процесса. Для процесса флотации предусмотрены автоматизированный контроль за подачей реагентов, мониторинг качества пены и концентрата, регулирование времени удержания, управление параметрами флотационных ячеек. Автоматизация процесса сушки включает управление процессами подогрева и подачи продукта в сушилки, контроль за температурой и влажностью, контроль за скоростью движения продук-

та через сушильное оборудование. Кроме того, автоматизация процессов дробления, измельчения, флотации и сушки включает управление установками и оборудованием поточно-транспортной системы с целью обеспечения их безопасного запуска и останова [13], а также профилактики их безаварийной работы в режиме реального времени [14, 15].

Автоматизация технологических процессов обогащения влечет за собой определенные опасности, которые необходимо учитывать, оценивая и минимизируя риски. Автоматизация технологических процессов оказывает влияние на технические аспекты функционирования предприятия, организационную культуру и психологию персонала. К опасностям, связанным с техническими аспектами, можно отнести технические отказы и нарушения в работе автоматизированного оборудования, ошибки калибровки датчиков, ошибки в программировании или управлении системами (человеческий фактор), уязвимости в обеспечении информационной безопасности (хищение данных, порча репутации компании, коммерческие убытки), зависимость от электропитания и стабильности сети [16]. А к опасностям, связанным с организационной культурой и психологией персонала, можно отнести сопротивление изменениям, стресс из-за боязни потери работы или невозможности адаптации к новым условиям, недостаток высококвалифицированных операторов и техников, управляющих сложными автоматизированными системами [17 – 19]. Кроме того, когда система становится слишком сложной и дорогостоящей в обслуживании, может появиться риск избыточной автоматизации.

Помимо перечисленных выше опасностей, присущих всем автоматизированным процессам обогащения полезных ископаемых, для отдельных технологических процессов возможно возникно-

вание и других опасностей. Так, в процессах дробления и измельчения могут возникать опасности, связанные с отказом в работе систем:

- автоматизированной подачи руды в дробильные и мельничные установки, контролирующие объем загружаемого материала и скорость его перемещения. Отказ такой системы ведет к возникновению опасных ситуаций, таких как переполнение бункеров, застревание материала в транспортерах или блокировка оборудования, что приводит к аварийным ситуациям и/или несчастным случаям на производстве;

- мониторинга состояния оборудования, отслеживающих такие параметры, как уровень шума и вибрации и др. Сбои в работе этой системы не позволят оперативно обнаруживать отклонения параметров от нормы, предупреждать поломки и предотвращать негативное воздействие на персонал.

Для процесса флотации важным является учет опасностей, связанных с отказом в работе систем:

- автоматизированного дозирования реагентов, приводящий к нарушению химического состава (к недостаточному высвобождению ценных компонентов или, наоборот, к избыточному расходу химических веществ);

- автоматического контроля ионного состава пульпы, такой отказ способен привести к увеличению концентрации вредных веществ или образованию токсичных соединений, что может представлять угрозу для здоровья работников;

- автоматического контроля и регулирования уровня пульпы во флотационных машинах, что может привести к переливу или недоливу пульпы и, как следствие, к повреждению оборудования, остановке производственного процесса, ухудшению качества продукции и загрязнению окружающей среды. Переливы пульпы могут представлять опасность для пер-

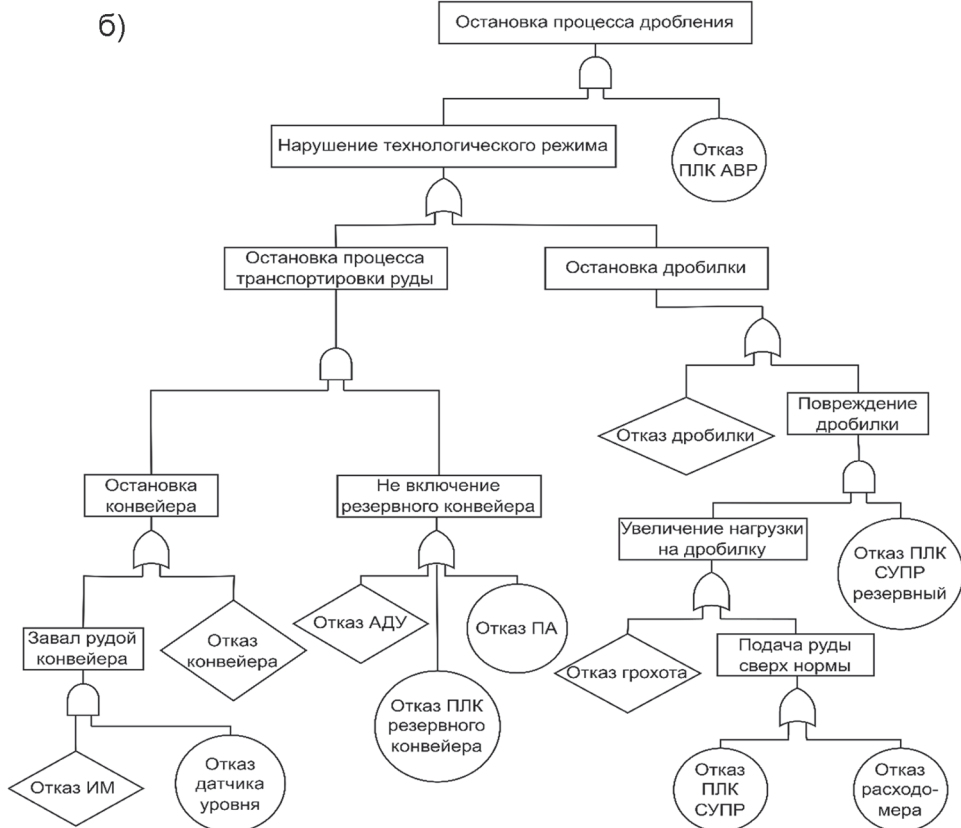
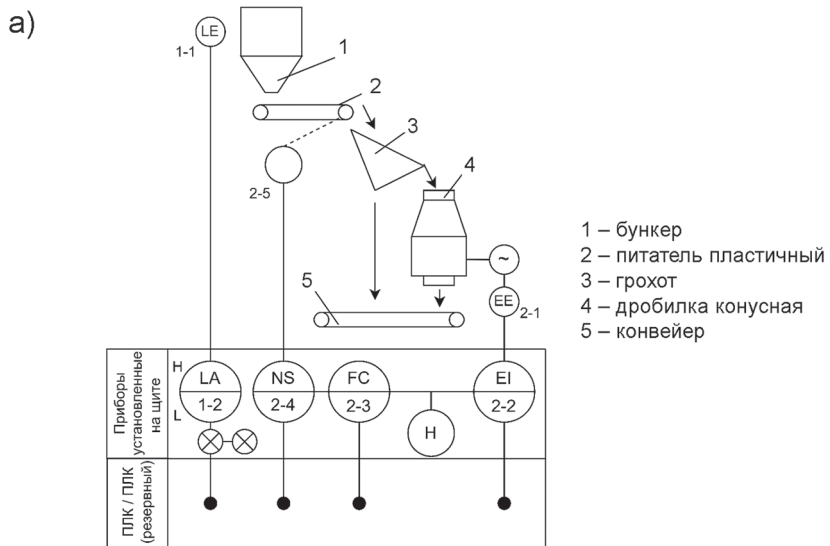


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации процесса дробления по потребляемой мощности (обозначения на схеме в соответствии с ГОСТ 21.208-2013) (а); дерево отказов для процесса дробления (б)
Fig. 2. Functional scheme for automating the crushing process by power consumption (designations on the diagram in accordance with GOST 21.208-2013) (a); a failure tree for the crushing process (b)

сонала, создавая скользкую поверхность вокруг оборудования, увеличивая риск падений и травмирования работников;

- автоматического контроля толщины слоя пены в процессе флотации, это может привести к тому, что пена начнет выходить за пределы флотомшины, создавая проблемы с эксплуатацией оборудования и загрязняя окружающую среду, а в случае неконтролируемого роста слоя пены возможны аварии, такие как перелив пены через края флотомшины с последующим повреждением оборудования и остановкой технологического процесса и др.

Для процесса сушки необходимо принимать во внимание опасности, связанные с отказом в работе:

- автоматизированной системы, регулирующей температурный режим процесса, скорость теплоносителя и влаж-

ность материала (отказ может привести к пересушиванию продукта и риску его возгорания);

- системы безопасности, включающей защиту от опасных ситуаций, таких как перегрев, повышение давления, утечка газа и пр., путем подачи сигнала тревоги при достижении критического значения параметра и последующей остановки процесса. Отказ такой системы может привести к реализации различных опасностей, в том числе к авариям и травмированию персонала.

Построение деревьев отказов возможных аварий при обогащении

Для анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах в настоящее время применяются различные методы [20]. В данной

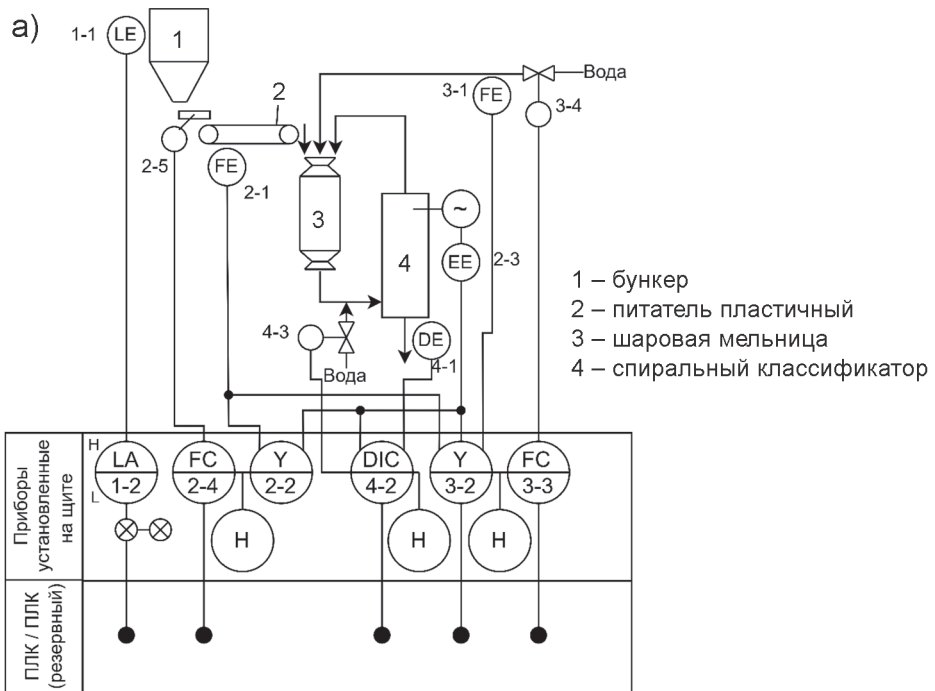


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации процесса измельчения (обозначения на схеме в соответствии с ГОСТ 21.208-2013) (а); дерево отказов для процесса измельчения (б)

Fig. 3. Functional scheme of automation of the grinding process (designations on the diagram in accordance with GOST 21.208-2013) (a); a failure tree for the shredding process (b)

б)

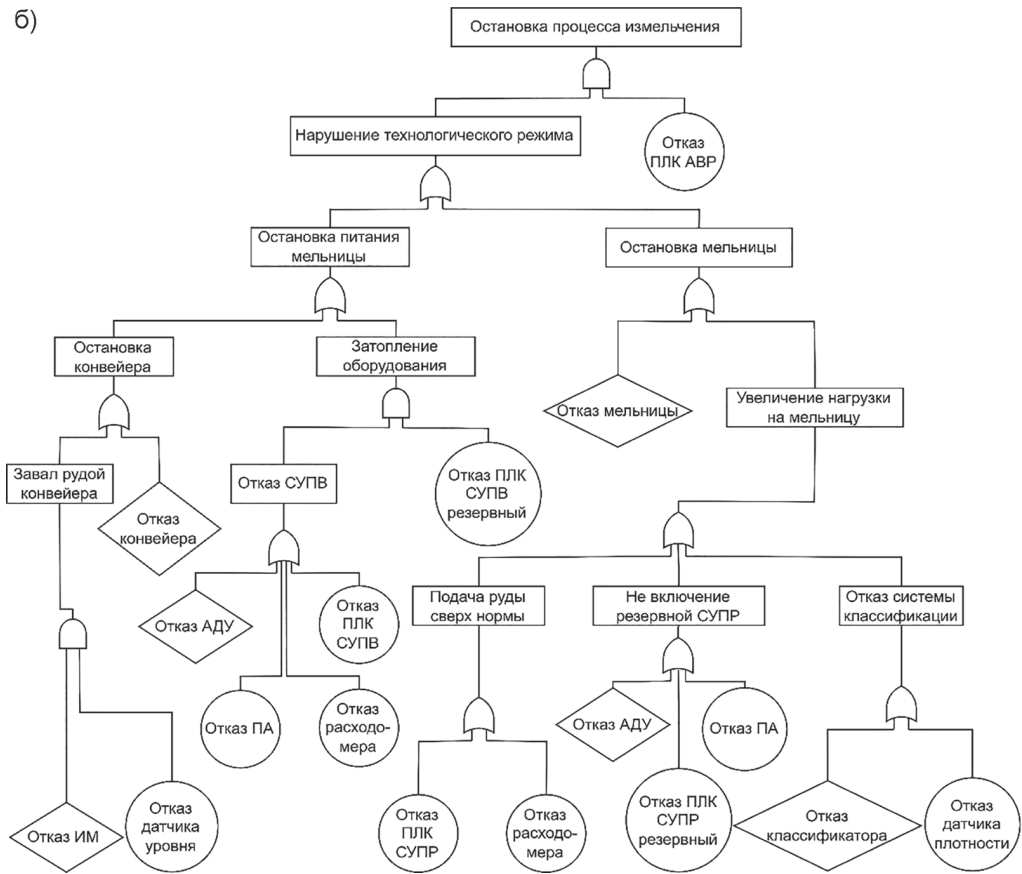


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации процесса измельчения (обозначения на схеме в соответствии с ГОСТ 21.208-2013) (а); дерево отказов для процесса измельчения (б)

Fig. 3. Functional scheme of automation of the grinding process (designations on the diagram in accordance with GOST 21.208-2013) (a); a failure tree for the shredding process (b)

работе анализ опасностей и оценки риска аварий на обогатительной фабрике проводился с помощью широко применяемых метода дерева отказов и матричного метода.

На рис. 2 представлено дерево отказов для процесса дробления исходного материала, построенное на основе функциональной схемы автоматизации процесса дробления по потребляемой мощности. Как видно из дерева отказов, к реализации головного события «Остановка процесса дробления» приводят 10 основных путей, включающих следующие исходные события: отказ программируе-

мого логического контроллера (ПЛК) автоматического включения резерва (АВР), отказ датчика уровня, отказ исполнительного механизма (ИМ), отказ конвейера, отказ аппаратуры дистанционного управления (АДУ), отказ ПЛК резервного конвейера, отказ пусковой аппаратуры (ПА), отказ ПЛК системы управления подачи руды (СУПР), отказ расходомера, отказ грохота, отказ ПЛК СУПР резервный, отказ дробилки. На основе анализа набора минимальных сечений установлен минимальный путь, приводящий к возникновению нежелательного головного события — одновремен-

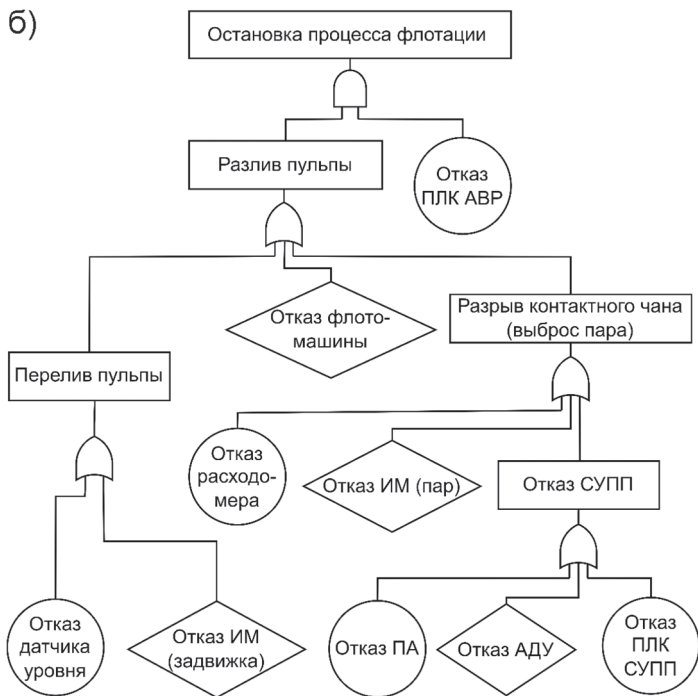
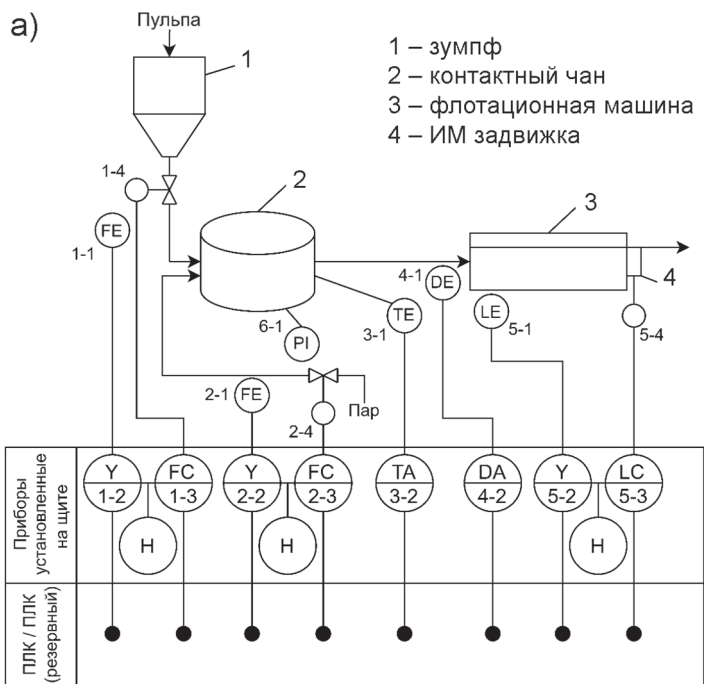


Рис. 4. Функциональная схема автоматизации процесса флотации (обозначения на схеме в соответствии с ГОСТ 21.208-2013) (а); дерево отказов для процесса дробления (б)

Fig. 4. Functional diagram of the automation of the flotation process (designations on the diagram in accordance with GOST 21.208-2013) (a); failure tree for the crushing process (b)

ной реализации двух событий — отказа дробилки и отказа ПЛК АВР.

На рис. 3 и 4 показаны функциональные схемы автоматизации и дерева отказов процессов измельчения и флотации соответственно (на рисунках СУПВ — система управления подачи воды, СУПП — система управления подачи пара). Как следует из рисунков, к реализации головного события «Остановка процесса измельчения» приводят 14 основных путей, при этом минимальный путь включает одновременную реализацию со-

бытий — отказ мельницы и отказ ПЛК АВР, а к реализации головного события «Остановка процесса флотации» — 7 основных путей, минимальный путь — отказ флотомшины и отказ ПЛК АВР.

На основе построенных деревьев отказов составлен реестр опасных событий, с помощью матричного метода оценены риски, проранжированы опасности и определен уровень промышленной безопасности для процесса обогащения. Согласно выбранному матричному методу значения весовых коэффициентов, веро-

Характерные опасные события, оценка рисков и уровень промышленной безопасности для процессов обогащения

Characteristic dangerous events, risk assessment and industrial safety level for enrichment processes

Опасное событие	Вероятность происшествия	Степень тяжести последствия	Риск	Уровень промышленной безопасности
Процесс дробления исходного материала				
Остановка процесса транспортировки руды	3	2	6	средний
Остановка дробилки	2	2	4	высокий
Отказ ПЛК АВР	1	3	3	высокий
Остановка процесса транспортировки руды при отсутствии системы АВР	3	4	12	низкий
Остановка дробилки при отсутствии системы АВР	3	4	12	низкий
Процесс измельчения материала				
Остановка питания мельницы	3	2	6	средний
Остановка шаровой мельницы	2	2	4	высокий
Отказ ПЛК АВР	1	3	3	высокий
Остановка питания мельницы при отсутствии системы АВР	3	4	12	низкий
Остановка мельницы при отсутствии системы АВР	3	4	12	низкий
Процесс флотации				
Перелив пульпы	4	2	8	средний
Разрыв контактного чана	2	3	6	средний
Отказ флотомшины	2	1	2	высокий
Отказ ПЛК АВР	1	3	3	высокий
Отказ флотомшины при отсутствии системы АВР	3	4	12	низкий
Разрыв контактного чана при отсутствии АВР	3	4	12	низкий
Перелив пульпы при отсутствии АВР	3	4	12	низкий

ятности происшествия находятся в диапазоне от 1 до 4 баллов, а тяжести последствий — от 1 до 3 баллов. Уровень риска лежит в диапазоне от 1 до 12 баллов, где 1–4 балла — низкий уровень риска, 5–8 баллов — средний, 9–12 баллов — высокий. Таким образом, низкий уровень риска соответствует высокому уровню промышленной безопасности, а высокий уровень — низкому.

В таблице представлен пример характерных опасных событий, оценки рисков и уровня промышленной безопасности для процессов дробления, измельчения и флотации.

Как видно из приведенной таблицы, для процесса дробления при наличии системы АВР событием с наибольшим значением риска является остановка процесса транспортировки руды, это соответствует среднему уровню промышленной безопасности. В то же время при отсутствии системы АВР для данного события риск существенно увеличивается, и уровень промышленной безопасности становится низким. Аналогичная ситуация наблюдается для процессов измельчения и флотации, где отсутствие резервной системы также приводит к значительному снижению уровня промышленной безопасности.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о том, что особое внимание при автоматизации процессов обогащения полезных ископаемых следует уделять наличию систем, включающих резерв на случай выхода из строя оборудования, программного сбоя или потери электропитания. К сожалению, такие системы в настоящее время имеются далеко не на всех обогатительных

фабриках, что существенно снижает безопасность.

Для минимизации рисков при автоматизации процессов обогащения также необходимо проводить регулярную калибровку и техническое обслуживание датчиков и контрольных систем, осуществлять мониторинг параметров процессов и состояния оборудования, актуализировать план действий на случай аварийных ситуаций, внедрять современные решения по кибербезопасности, своевременно обучать и повышать квалификацию персонала.

Заключение

По результатам анализа причинно-следственных связей между возможными авариями/инцидентами на обогатительных фабриках и неисправностями систем автоматизированного и автоматического управления установлено, что при определенных сочетаниях ряда нештатных событий возможно возникновение аварии/инцидента.

Результаты оценки риска методом «Анализа дерева отказов» выявили, что работоспособность ПЛК АВР, а также наличие самой системы резервирования во многом определяют безаварийность процессов обогащения.

Практическая значимость результатов проведенного исследования заключается в возможности проводить оценку уровня промышленной безопасности посредством матричного метода оценки риска на основе балльной оценки возможных опасных событий. Ранжирование таких событий, в свою очередь, позволяет выявлять наиболее уязвимые элементы автоматизированных технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Г. В., Куранов А. А., Фрицлер М. В. Сулимова А. А. Опыт внедрения систем автоматического управления технологическими процессами обогащения угля // Уголь. — 2024. — № 8. — С. 67–70. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-67-70.

2. *Firoozi A. A., Tshambane M., Firoozi A. A., Sheikh S. M.* Strategic load management: Enhancing eco-efficiency in mining operations through automated technologies // *Results in Engineering*. 2024, vol. 24, article 26. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102890.

3. *Баловцев С. В.* Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // *Горные науки и технологии*. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 350–359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.

4. *Соколов А. А., Мирошников А. С., Соколова Е. А.* Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса — внешняя среда» // *Горный журнал*. — 2016. — № 12. — С. 83–86. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

5. *Sokolova E. A., Aslanov G. A., Sokolov A. A.* A modern approach to storing of 3D geometry of objects in machine engineering industry // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 177, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012036.

6. *Еремин С. Г., Капитанец Ю. В., Зубенко А. В., Бартошевич И. А., Кущёв Н. П.* Анализ влияния внедрения автоматизированных систем управления горным производством на эффективность и безопасность работы горнодобывающих предприятий России // *Горная промышленность*. — 2024. — № 5. — С. 101–107. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-101-107.

7. *Кабилов М. П., Леттиев О. А., Агафонов В. В.* Система контроля и предотвращения нахождения работников в зоне круговых опрокидывателей // *Уголь*. — 2023. — № 1. — С. 40–45. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-1-40-45.

8. *Оганесян А. С., Агафонов В. В., Яхеев В. В., Варыгин С. О., Пикалов В. А.* Цифровая трансформация технологических систем угольных шахт // *Уголь*. — 2022. — № 1. — С. 39–42. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-1-39-42.

9. *Klimecka-Tatar D., Ulewicz R., Ingaldi M.* Minimizing occupational risk by automation of the special processes — based on occupational risk assessment // *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 217, no. 2, pp. 1145–1152. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.313.

10. *Friederich J., Lazarova-Molnar S.* Reliability assessment of manufacturing systems. A comprehensive overview, challenges and opportunities // *Journal of Manufacturing Systems*. 2024, vol. 72, pp. 38–58. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.11.001.

11. *Герцог В. Х.* Автоматизация технологических процессов и измерительные технологии — основа эффективности современного производства // *Газовая промышленность*. — 2021. — № S2 (818). — С. 6–7.

12. *Бочкова К. В., Потапов В. Я., Комиссаров А. П., Бочков В. С., Потапов В. В.* Повышение эффективности дробильного оборудования // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2024. — № 6 (176). — С. 15–25. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25, EDN: DGTUXA.

13. *Грачев В. В., Мышляев Л. П., Курышев Е. В., Кулюшин Г. А., Макаров Г. В., Свицков М. М., Загидулин И. Р.* Внедрение системы автоматизации управления поточно-транспортными системами обогатительной фабрики полиметаллов «Рубцовская» как способ повышения эффективности автоматизированного промышленного комплекса // *Системы управления и информационные технологии*. — 2024. — № 4 (98). — С. 81–84.

14. *Блюденев А. П., Макушев С. Ю., Черепанов Д. В., Шнайдер Д. А.* Цифровизация обогатительной фабрики // *Горная промышленность*. — 2023. — № 3. — С. 15–18.

15. *Осипова Н. В.* Обзор проектов и решений по цифровым двойникам для обогатительных фабрик // *Автоматизация в промышленности*. — 2023. — № 7. — С. 37–42. DOI: 10.25728/avtprom.2023.07.05.

16. *Каленов О. Е.* Цифровизация в горнодобывающей промышленности // *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. — 2021. — Т. 18. — № 5 (119). — С. 184–192. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-184-192.

17. *Prell B., Wilbers S., Günther N., Reiff-Stephan J.* Will my job be automated? Fathoming current and persisting impediments for automation / *Smart Technologies for a Sustainable Future*. STE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2024, vol. 1027, pp. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-031-61891-8_15.

18. *Peruzzinia M., Pratib E., Pellicciari M.* A framework to design smart manufacturing systems for Industry 5.0 based on the human-automation symbiosis // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2024, vol. 37, no. 10–11, pp. 1426–1443. DOI: 10.1080/0951192X.2023.2257634.

19. *Кабанов Е. И.* Анализ риска аварий на угольных шахтах с учетом человеческого фактора // *Горный журнал*. — 2023. — № 9. — С. 48–54. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

20. Кобзев В. В. Совместный учет отказов и ошибок при оценке надежности автоматизированных систем и процессов // Системы управления и обработки информации. — 2024. — № 3(66). — С. 24–29. [VIAS](#)

REFERENCES

1. Ivanov G. V., Kuranov A. A., Fritzier M. V., Sulimova A. A. Experience in the implementation of automatic control systems for technological processes of coal enrichment. *Ugol'*. 2024, no. 8, pp. 67–70. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-67-70.
2. Firoozi A. A., Tshambane M., Firoozi A. A., Sheikh S. M. Strategic load management: Enhancing eco-efficiency in mining operations through automated technologies. *Results in Engineering*. 2024, vol. 24, article 26. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102890.
3. Balovtsev S. V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 350–359. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
4. Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Sokolova E. A. Control algorithms for mining and metallurgical plant-ambient environment system stability. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 83–86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.
5. Sokolova E. A., Aslanov G. A., Sokolov A. A. A modern approach to storing of 3D geometry of objects in machine engineering industry. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 177, no. 1, article 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012036.
6. Eremin S. G., Kapitanets Yu. V., Zubenko A. V., Bartoshevich I. A., Kushchev N. P. Analyzing the impact of introducing automated mining process control systems on the efficiency and safety of mining enterprises in Russia. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5, pp. 101–107. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5-101-107.
7. Kabirov M. P., Lettiev O. A., Agafonov V. V. Personnel access control and prevention system for rotary dumpers. *Ugol'*. 2023, no. 1, pp. 40–45. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-1-40-45.
8. Oganesian A. S., Agafonov V. V., Yakheev V. V., Varygin S. O., Pikalov V. A. Digital transformation of technological systems of coal mines. *Ugol'*. 2022, no. 1, pp. 39–42. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-1-39-42.
9. Klimecka-Tatar D., Ulewicz R., Ingaldi M. Minimizing occupational risk by automation of the special processes — based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 217, no. 2, pp. 1145–1152. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.313.
10. Friederich J., Lazarova-Molnar S. Reliability assessment of manufacturing systems. A comprehensive overview, challenges and opportunities. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024, vol. 72, pp. 38–58. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.11.001.
11. Herzog V. H. Automation of technological processes and measurement technologies are the basis for the efficiency of modern production. *Gas industry*. 2021, no. S2 (818), pp. 6–7. [In Russ].
12. Bochkova K. V., Potapov V. Ya., Bochkov V. S., Potapov V. V. Increasing the efficiency of crushing equipment. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024, no. 6 (176), pp. 15–25. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25, EDN: DGTUXA.
13. Grachev V. V., Myshlyaev L. P., Kuryshv E. V., Kulushin G. A., Makarov G. V., Svintsov M. M., Zagidulin I. R. Implementation of automation system of control of flow-transportation systems at Rubtsovskaya polymetals concentrator as a way to improve the efficiency of automated industrial complex. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2024, no. 4 (98), pp. 81–84. [In Russ].
14. Bludenov A. P., Makushev S. Yu., Cherepanov D. V., Schneider D. A. Digitalization of the enrichment plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 3, pp. 15–18. [In Russ].
15. Osipova N. V. Review of projects and solutions for digital twins for enrichment plants. *Automation in Industry*. 2023, no. 7, pp. 37–42. [In Russ]. DOI: 10.25728/avtprom.2023.07.05.
16. Kalenov O. E. Digitalization in the mining industry. *Vestnik of the Plekhanov Russian university of economics*. 2021, vol. 18, no. 5 (119), pp. 184–192. [In Russ]. DOI: 10.21686/2413-2829-2021-5-184-192.
17. Prell B., Wilbers S., Günther N., Reiff-Stephan J. Will my job be automated? Fathoming current and persisting impediments for automation. *Smart Technologies for a Sustainable Future. STE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham, 2024, vol. 1027, pp. 155–166. DOI: 10.1007/978-3-031-61891-8_15.

18. Peruzzinia M., Pratih E., Pellicciari M. A framework to design smart manufacturing systems for Industry 5.0 based on the human-automation symbiosis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2024, vol. 37, no. 10–11, pp. 1426–1443. DOI: 10.1080/0951192X.2023.2257634.

19. Kabanov E. I. Analysis of accidents risk in coal mines taking into account human factor. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 48–54. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.07.

20. Kobzev V. V. Joint accounting of failures and errors in assessing the reliability of automated systems and processes. *Control and information processing systems*. 2024, no. 3(66), pp. 24–29. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зиновьева Ольга Михайловна*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент, e-mail: ozinovieva@yandex.ru,

*Меркулова Анна Михайловна*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент, e-mail: anna-merkulova@yandex.ru,

*Смирнова Наталья Андреевна*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент, e-mail: natalyaas@bk.ru,

*Чадин Дмитрий Алексеевич*¹ — студент, e-mail: chadindmitriy08072000@mail.ru,

¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Меркулова А.М., e-mail: anna-merkulova@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*O.M. Zinovieva*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, e-mail: ozinovieva@yandex.ru,

*A.M. Merkulova*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, e-mail: anna-merkulova@yandex.ru,

*N.A. Smirnova*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, e-mail: natalyaas@bk.ru,

*D.A. Chadin*¹, Student, e-mail: chadindmitriy08072000@mail.ru,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.M. Merkulova, e-mail: anna-merkulova@yandex.ru.

Получена редакцией 04.01.2025; получена после рецензии 11.02.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 04.01.2025; received after the review 11.02.2025; accepted for printing 10.04.2025.

