

Научная статья

УДК 622.64

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-172-184

ЖИВУЧЕСТЬ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**Кузин Евгений Геннадьевич^{1,2}**

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
филиал в г. Прокопьевске

² Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения
Российской академии наук

* для корреспонденции: kuzinegen@gmail.com

Аннотация.

В настоящей работе предложено новое определение термина «живучесть» применительно к горнотехническим и транспортным системам угольных шахт. Ключевым отличием терминологии является представление живучести как способности выполнять главную функцию системы в результате непредвиденного вредного воздействия в ненормативных, запредельных условиях. Приводится анализ научных работ в области обеспечения надежности, безопасности и устойчивости горнотехнических и других технических систем. Важным отличием предложенного подхода является обеспечение живучести техническими средствами и конструкционными материалами и внутрисистемными связями компонентов горных и транспортных машин. Приведена краткая история развития концепции живучести и подходов к ее реализации. Дальнейшее совершенствование геотехнологии неразрывно связано с развитием и совершенствованием горных машин и оборудования, которое в свою очередь базируется на совершенствовании отдельных компонентов системы. Показано, что системный подход позволяет минимизировать последствия отказов и аварий, предотвращая катастрофическое развитие повреждений. Рассмотрена методология живучести, являющаяся надсистемой управления надежностью горнотехнической системы. Методология раскрывает структурные взаимосвязи различных подсистем и при детальном анализе позволяет увидеть слабые звенья, требующие первоочередной защиты. Для проектировщиков и технологов важно иметь эффективную обратную связь о вероятных и маловероятных событиях, способных принести значительный ущерб. Расследования крупных аварий и катастроф показывают, что для минимизации их последствий в большинстве случаев не требовалось крупных материальных затрат. При этом лица, принимающие решения, посчитали эти затраты необоснованными. В настоящей работе показано, что надо иметь защиту от неправильных непреднамеренных действий собственного персонала и от целенаправленных организованных диверсий, что представляет особую актуальность в настоящее время. Введение понятийного аппарата живучести давно реализовано на стратегически важных объектах. Достаточно хорошо проработан математический аппарат. Однако для опасных производственных объектов ограничиваются аппаратом надежности, риска и безопасности. Считаем, что созрели предпосылки ввести понятийный аппарат живучести для горнотехнической системы и реализовать высокий уровень техническими и технологическими средствами. В работе сделан вывод, что при всей сложности и многообразии

**Информация о статье**

Поступила:

19 сентября 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

10 октября 2025 г.

Принята к публикации:

13 октября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

горнотехническая система,
транспортная система,
живучесть, безопасность,
надежность, риск, горные
машины, подземные
выработки, устойчивость

поставленных проблем обеспечение высокой живучести горнотехнических и транспортных систем необходимо начинать на стадии проработки проекта, чтобы исключить применение неэффективных технологических решений.

Для цитирования: Кузин Е.Г. Живучесть горнотехнических и транспортных систем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 172-184. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-172-184, EDN: XDLKDU

Введение

В сообществе горных инженеров до настоящего времени нет сложившегося и четко однозначного понятия живучести. Некоторые исследователи делают упор на выживаемость горной индустрии в целом в условиях политической и рыночной конъюнктуры, то есть оценивают экономические аспекты [1-4]. Несомненно, эти важные направления исследований рассматривают серьезные вопросы существования горнодобывающей промышленности и особенно угольной отрасли, терпящей в настоящее время глубокий кризис. Но в русскоязычной литературе это более соответствует терминам «развитие угольной отрасли», «устойчивость функционирования» и т. п.

Следующий ряд исследований под понятием живучести (в горном деле) понимает безопасность горного производства, предотвращение загазованности, взрывов и пожаров, затоплений, обрушений, спасение персонала [5-7]. Часть вопросов в данном секторе исследований, несомненно, совпадает с темой настоящей работы. Однако этому актуальному направлению в полной мере соответствует термин «безопасность горного производства». Данное поле исследований, посвященных чрезвычайным ситуациям, как показано в работе [6], привело в разработке и внедрению новых технологий. Так, в работах ученых [8, 9] разработана методология обеспечения безопасности горнодобывающих предприятий. При этом в работе И.Л. Кравчука [9] предложен концептуальный подход к обеспечению безопасности, учитывающий социальные и экономические выгоды работников идти на производственный риск. Там же сделано важное замечание, что в различных регламентирующих документах фактически отсутствуют правила безопасного поведения в опасной (предшествующей аварийному событию) ситуации.

Другое направление исследований посвящено надежности и повышению ресурса работы горно-шахтного оборудования и горных машин. В этом направлении можно выделить отдельно исследования, направленные на снижение износа контактирующих поверхностей [10], мониторинга технического состояния горной

техники [11], совершенствование систем технического обслуживания горных машин [12].

Надежность горных машин и оборудования обеспечивается методами технической диагностики, как отмечено в работах [13-15]. Так, в работе [14] обоснована важность оценки вибрационных параметров для обеспечения надежности подшипников. Исследования, выполненные и представленные в работе [15], расширяют возможности вибрационной диагностики для частотно-управляемых приводов ленточных конвейеров. Работы [16, 17] посвящены исследованиям параметров смазочных материалов, эксплуатируемых в горных и транспортных машинах.

Широкую область безопасности и производительной деятельности горнодобывающих предприятий представляют исследования, направленные на поддержание горных выработок [18-20].

Бесспорно представленные и другие работы, которые не представляется возможным описать в одной статье, охватывают весьма важный слой задач обеспечения надежности, а параллельно и безопасности эксплуатации горных машин в составе горнотехнических и транспортных систем. Научным сообществом достигнуто понимание, что горные машины и геотехнология тесно и неразрывно связаны, что выразилось в объединении научных специальностей в номенклатуре направлений подготовки кадров высшей квалификации. Однако большинство исследователей детально и глубоко погружаются в свою тематику и пытаются решить локальные задачи и проблемы. Важным отличием настоящей работы является попытка охватить большинство аспектов безопасности, надежности, безотказности и устойчивости функционирования горнотехнических и транспортных систем, учитывая естественные ограничения системного подхода.

На одном из научных семинаров был предложен термин «живучесть транспортной системы». Специалистам не совсем было понятно, для чего вводить новый термин, когда прекрасно работают понятные горнякам термины «надежность», «работоспособное состояние», «безотказность» и т. п. Проведенный детальный обзор публикаций, использующих термин «живучесть», позволил сформировать четкое отличие. Все термины в области надежности

рассматривают поведение систем в рамках проектных воздействий, с учетом прогнозируемых факторов по горнотехническим условиям, нагрузке, вмешательству персонала. Исследования же в области живучести систем рассматривают запроектные, существенно превышающие расчетные нагрузки, повреждения, вызванные чрезвычайными ситуациями природного или техногенного характера [21-23]. Важное отличие живучести от надежности заключается в возможности выполнять заданные функции в ситуациях, не предусмотренных нормами и правилами.

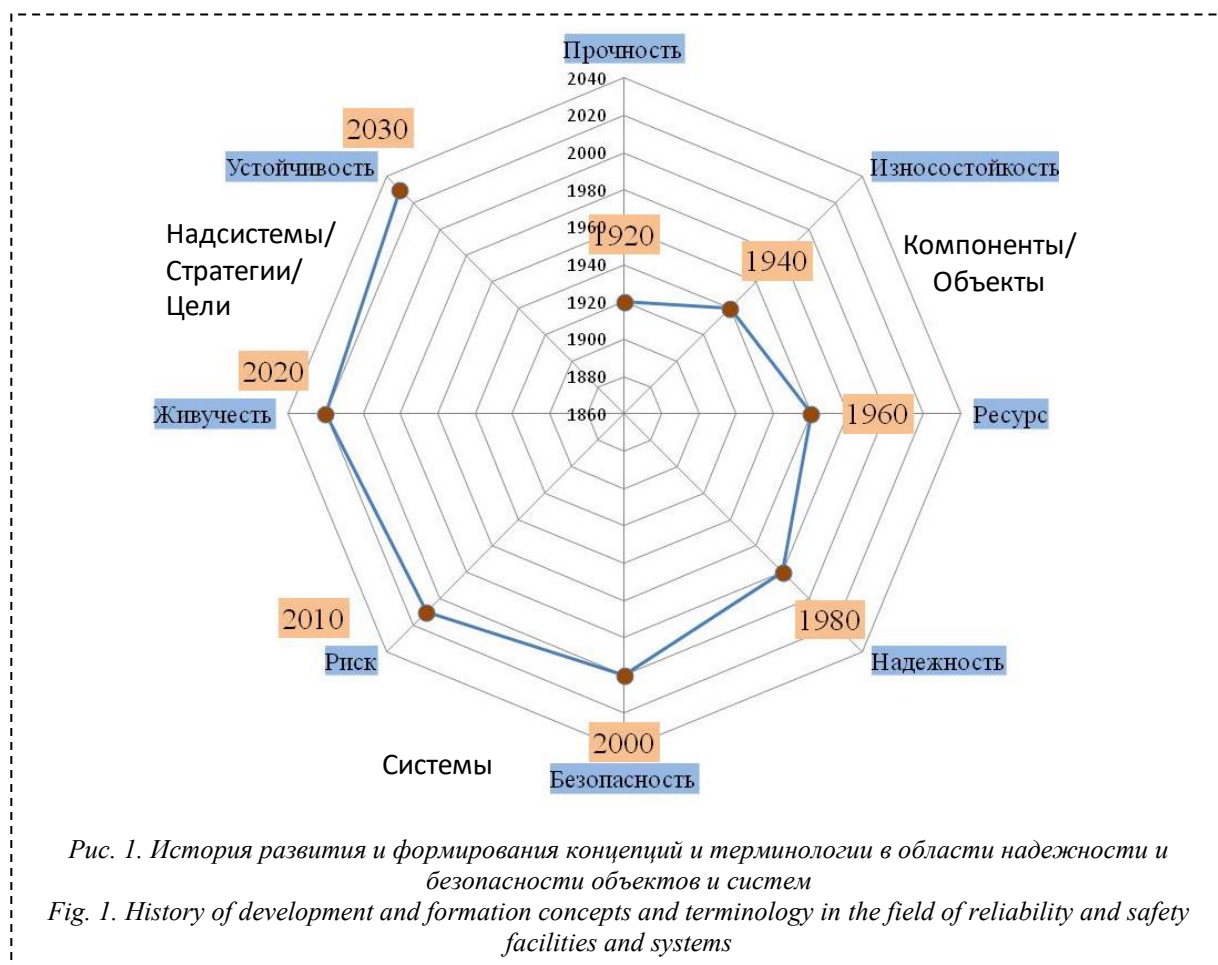
Для ответственных сложных технических систем понятие живучести раскрыто более полно и характеризует способность сопротивляться внезапному разрушению и при этом выполнять основные функции (в минимальном объеме) в результате экстремальных (катастрофических) воздействий от локальных повреждений [22]. При этом рассмотренная в работе [22] структура защищенности технической системы не включает блоки, оценивающие повреждения, наносимые собственным персоналом в попытке уйти от наказания за нарушения правил охраны труда или в погоне за планом (премией), либо в результате недостаточной квалификации.

История развития концепции живучести

объектов

Краткая история развития и формирования концепций и терминологии в области надежности безопасности машин (объектов) и систем представлена на Рис. 1, не претендуя на всеобъемлющую полноту исторических сведений, так как термины «риск», «живучесть», «устойчивость» возникали на разных этапах развития, несколько отличаясь по смысловой нагрузке и областям применения. Схема отображает обширное развитие методов и терминологии применительно к обеспечению длительного функционирования как отдельных деталей, узлов и сборочных единиц до сложных систем и стратегических целей.

Анализ исторических предпосылок и развития теоретической базы показывает, что прочность, износостойкость (а также близкие понятия трещиностойкость, хладостойкость и т. п.), ресурс применимы к отдельным компонентам или объектам. Понятия надежность и безопасность (пожалуй, самое многофункциональное понятие) применимы как к отдельным объектам, так и к системам. Понятия риска и живучести в первую очередь применимы к системам. А также понятия живучести, устойчивости, иногда встречается еще термин «защищенность», подходят



надсистемам, формирующим цели и стратегии сложным техническим системам и их компонентам. Различные технические системы создаются для достижения определенных целей, решения возникающих при этом задач и реализуются компонентами, выполняющими определенные функции.

Таким образом, применительно к горнотехническим системам основным назначением является добыча полезного ископаемого, для горнотранспортных систем – доставка полезного ископаемого к пунктам его переработки или потребления. Стратегическими же целями является устойчивое развитие и комфортные условия существования человеческой цивилизации.

Следует заметить, что развитие терминологической базы и понятийного аппарата возможно в двух взаимосвязанных направлениях: 1 – построение строгой теории с использованием математического аппарата; 2 – реализация основных положений техническими и технологическими средствами. Автору ближе второй подход, отражающий практический и прикладной характер.

В области обеспечения безопасности, живучести и эксплуатационной надежности Н.А. Махутовым и коллегами получены важные результаты, сформулированы критерии, при которых технические системы переходят из штатных в аварийные и катастрофические состояния в результате накопления критических предельных уровней поврежденности [24, 25].

Отмеченные результаты достигнуты в первую очередь для критически и стратегически важных объектов. А сам подход содержит строгие математические выкладки, при этом особое внимание уделяется физическим явлениям возникающих в материалах при воздействии предельных и критических нагрузок.

Методология

Практика эксплуатации горных предприятий по добыче полезных ископаемых подземным способом показывает высокую травмоопасность работников, несмотря на широкое внедрение многофункциональных систем безопасности, разнообразных систем мониторинга производственных параметров, рудничной атмосферы, наличие датчиков газов и пыли, внедрение видеомониторинга, «умных» светильников и касок, а также систематически проводимым обучению и аттестации персонала. Введение риск-ориентированного подхода к стратегиям обеспечения безопасности и дополнительные предметы для преподавания студентам горных вузов призваны улучшить ситуацию на производстве [26]. Но при всем этом полностью исключить аварии на горных предприятиях не удастся. Невозможно исключить внешние события: экстремальные погодные условия, стихийные бедствия, акты диверсии. Существенную долю риска вносит человеческий фактор, который также нельзя полностью исключить – человек склонен ошибаться.

Принимая во внимание сложности с

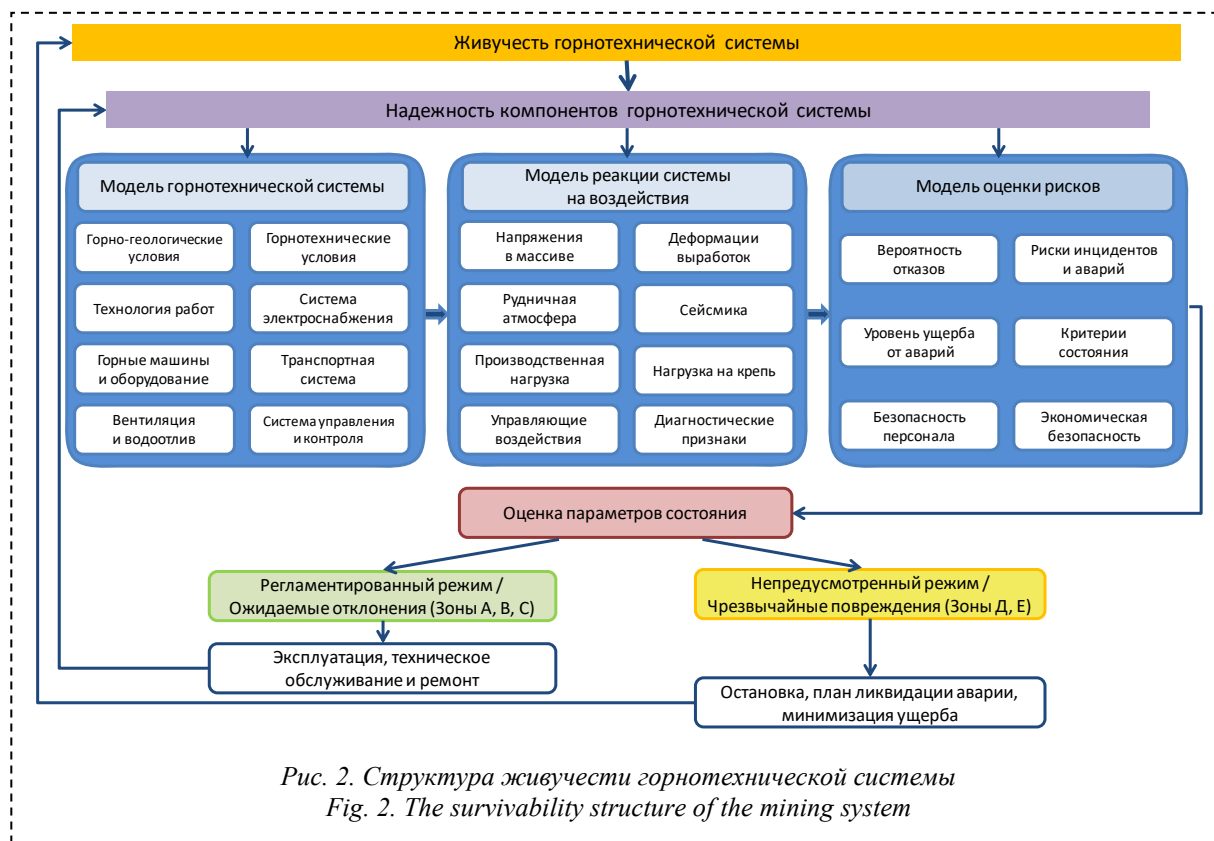


Рис. 2. Структура живучести горнотехнической системы

Fig. 2. The survivability structure of the mining system

поставками оборудования и запасных частей, снижение спроса на энергоносители и текущую экономическую и геополитическую ситуацию, в настоящей работе сделана попытка рассмотреть живучесть горнотехнической и транспортной систем применительно к опасному производственному объекту – угольной шахте. Важное отличие предлагаемого подхода заключается в подходе к описанию живучести как надсистеме управления надежностью, см. Рис. 2.

При данном подходе понятийный аппарат надежности подразумевает выполнение функций в строго оговоренных (регламентированных) условиях. Нештатные ситуации, запредельные нагрузки как понятия никак не рассматриваются. Любое отклонение – неисправное состояние, которое рекомендуется устранить в кратчайшие сроки.

Понятия живучести рассматривают запредельные нагрузки на компоненты системы и чрезвычайные повреждения. Главная цель такого подхода – минимизировать ущерб и тяжесть последствий после нанесения локальных повреждений компонентам системы.

В структуре, представленной на Рис. 2, транспортная система является подсистемой горнотехнической системы, позже мы уделим ей отдельное внимание. Описание зон от А до Е подробно рассмотрено в работе [13], здесь же поясним: зона А – отличное техническое состояние (новый объект); зона В – хорошее техническое состояние (оперативного вмешательства не требуется); зона С – удовлетворительное техническое состояние (ограниченно годен, но нет риска внезапного разрушения или отказа). Работа оборудования при нахождении параметров в указанных зонах попадает в регламентированный режим, при этом зоны А и В соответствуют исправному состоянию, а зона С – работоспособному. Зона D – недопустимое техническое состояние, при котором авария может произойти в любой момент. При попадании объекта (или, вернее, диагностических признаков, характеризующих состояние объекта) в зону D меры должны приниматься незамедлительно, путем полной остановки и вывода оборудования в ремонт. Однако нередко случаи, когда оборудование продолжает работать, иногда месяцами. При этом на специалиста в области диагностики, выдавшего такое заключение, смотрят с недоверием. Когда же внезапно возникает авария или серьезная катастрофа, начинают анализировать причины и искать виновных. При этом часто последствия подобных аварий и отказов несут гораздо больший ущерб, чем если бы остановка оборудования была осуществлена незамедлительно на основании оценки. Ведь утвержденный план ликвидации аварии на

опасном производственном объекте не предусматривает никаких согласований, а требует неукоснительного выполнения определенной последовательности действий. Зона Е – представляет собой уже возникший отказ или аварию, в большинстве нормативных документов отсутствует. Вводится для того, чтобы оперативно ликвидировать последствия аварии и минимизировать ущерб. Применяя хорошо зарекомендовавший себя и применяющийся на практике метод светофора, можно сказать, что зоны А и В – зеленые зоны, зона С – желтая, D – красная, а Е – черная. Для некоторых критических объектов нахождение в зоне Е (при условии, что отказ еще не возник), характеризует катастрофические последствия с колоссальным ущербом и длительными сроками ликвидации последствий.

Рассмотрим компоненты структурной модели и их влияние на надежность и живучесть.

Анализ серьезных аварий на газовых шахтах показывает, что катастрофическое развитие событий происходит из-за неправильной работы аэрологических систем. При этом в работах Н.О. Калединой [27, 28] показано, что в силу высокой изменчивости горнотехнических факторов методы оценки рисков на основе теории надежности не дают требуемых результатов. При этом предлагается оценивать риски отказов технических систем, на основе индикаторов определяющих надежность горных машин. Такой подход соответствует основной идее автора. Так, даже для одной шахты в различные периоды значительно изменяются аэрологические характеристики горных выработок, при этом накопить существенный объем статистических данных и провести вероятностные оценки безотказности работы систем пылеподавления, дегазации и проветривания не представляется возможным [28]. Работа же технологического оборудования менее подвержена изменчивости, накопленный опыт оценки технического состояния оборудования, как показано в работах [29-31], показывает достоверные результаты определения ресурса горных машин и возникновение опасных состояний. При этом в работе [29] авторами сделан вывод, что для выявления дефектов на начальной (зарождающейся) стадии требуется установка стационарных систем диагностики с встраиваемыми датчиками непосредственно в контролируемые узлы.

Таким образом, мониторинг параметров состояния горнотехнической системы с учетом моделей реакции системы на воздействия позволяет непрерывно контролировать ответственные компоненты и уровни их повреждений.

Следует заметить, что рассматриваемая методология оценки живучести

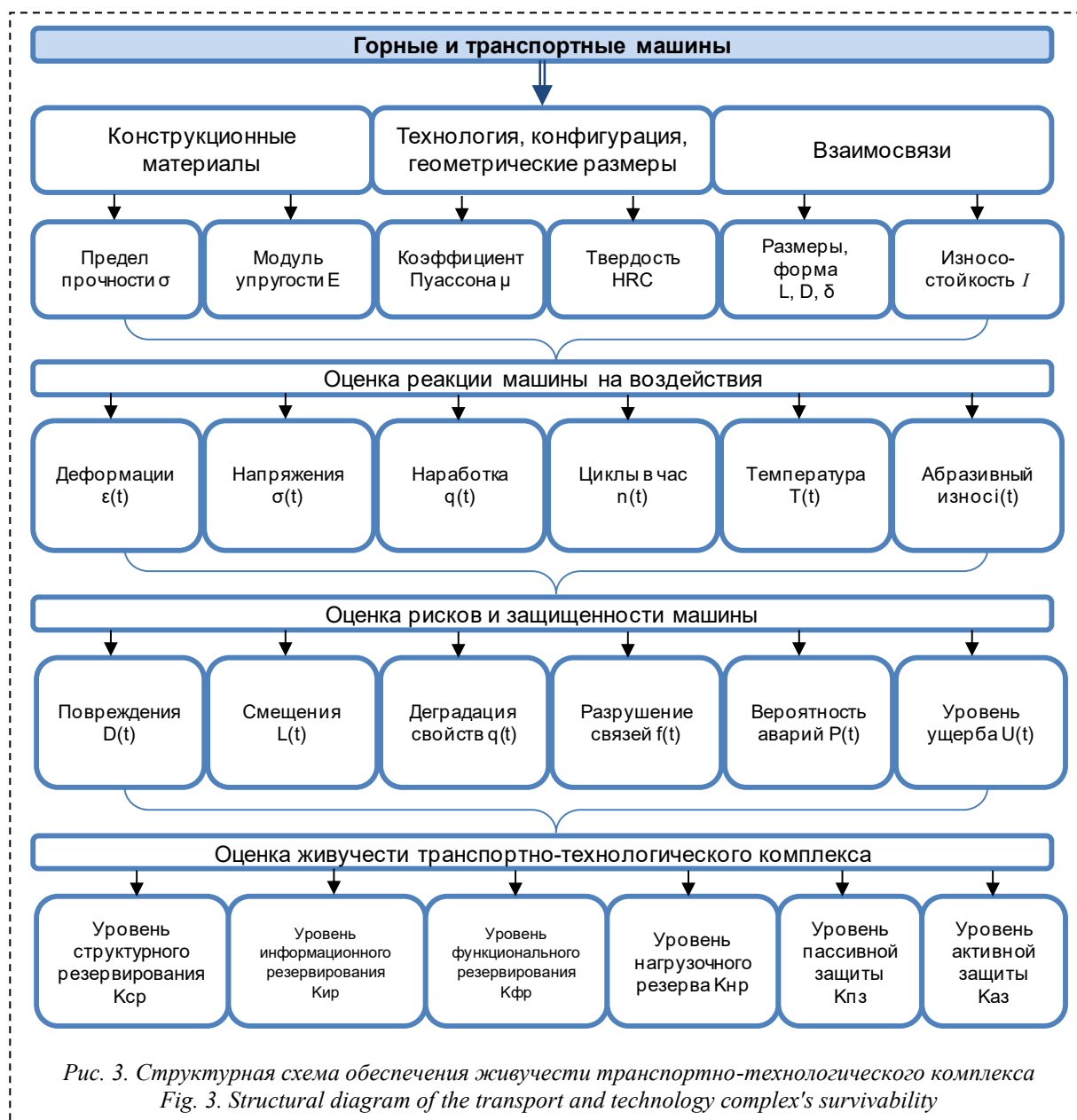
горнотехнической системы должна учитывать даже маловероятные вмешательства собственного персонала, это так называемая защита от «глупого дурака», внешние угрозы природного и техногенного характера, а также целенаправленные диверсии (защита от «умного дурака»).

Предлагается следующее определение живучести (применительно к горнотехническим и транспортным системам): живучесть – способность системы противостоять непредвиденным вредным воздействиям (НВВ), выполняя главную функцию с минимизацией прямого и косвенного ущерба. Вредные воздействия могут быть нанесены собственным персоналом (по неопытности, по халатности); внешними природными явлениями (обрушения, затопления, ураган); внешними сознательными действиями людей (военные действия, теракты).

Живучесть горнотехнических систем реализуется путем адаптации режимов работы компонентов, введения защитных элементов, рассеивающих энергию НВВ. Повышение живучести достигается введением технологической, структурной, функциональной, нагрузочной, временной и информационной избыточности, повышением надежности функциональных компонентов, использованием демпфирующих и предохранительных компонентов исключающих появление вторичных отказов.

Представим структурную схему обеспечения живучести горных и транспортных машин, образующих транспортно-технологический комплекс, базирующуюся на анализе и оценке характеристик компонентов (Рис. 3).

Структурная схема, представленная на Рис. 3, показывает подход к оценке живучести в связке с

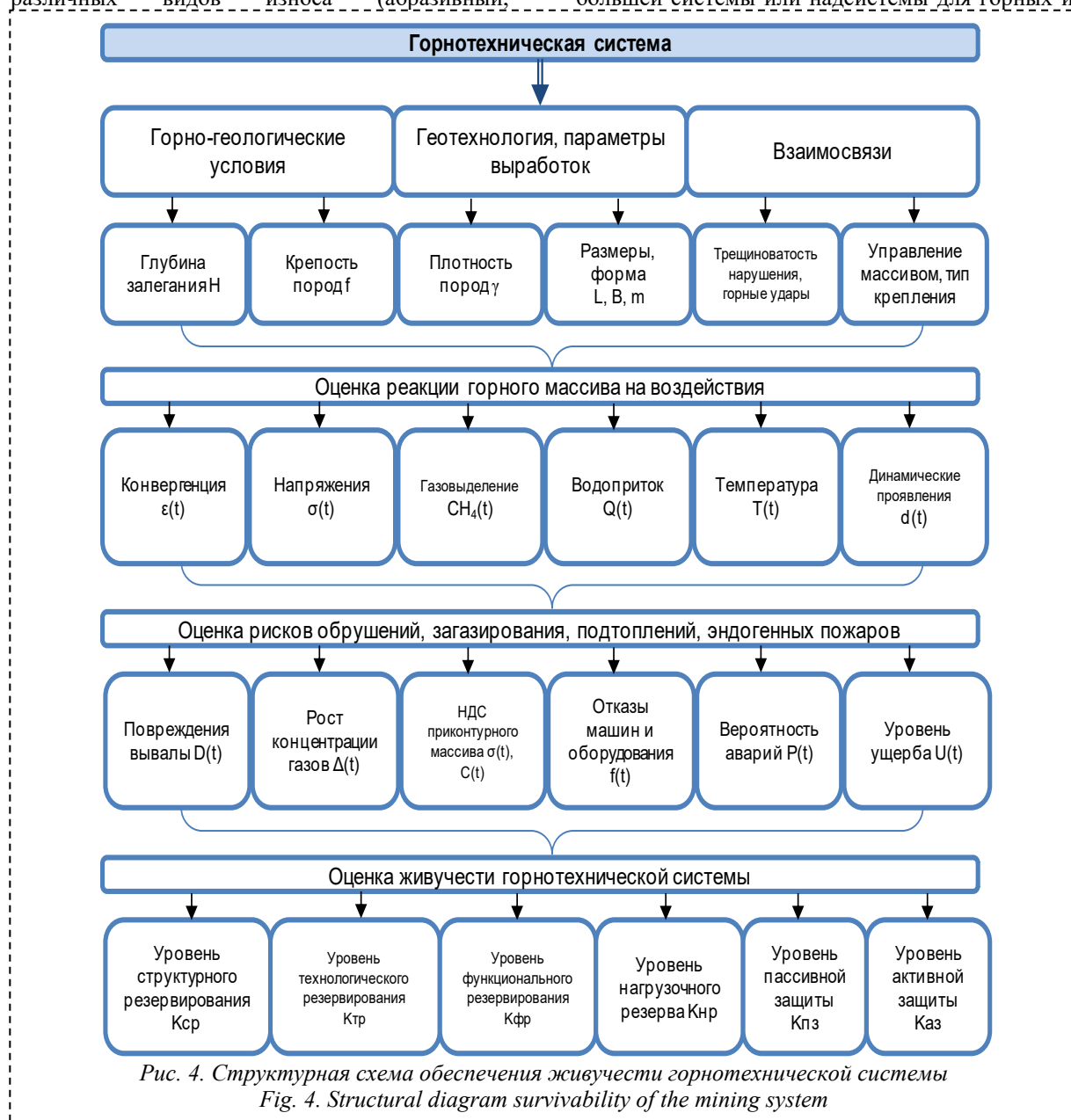


этапами жизненного цикла горных и транспортных машин. На стадии проектирования задаются параметры конструкционных материалов, размеры и формы узлов, а также их взаимосвязи. Оценка реакции машины на внешние возмущающие воздействия ранее проводилась только на стадии испытания машины. С развитием современных цифровых технологий появилась возможность базовые реакции оценить уже на стадии проектирования и внести необходимые изменения. Полностью отказываться от испытания в условиях эксплуатации не имеет смысла (как и просчитать все на цифровых моделях) поскольку различные материалы имеют существенно различающуюся природу и механизмы даже для одного абразивного изнашивания. Совокупность материалов с различными свойствами, наличие различных видов износа (абразивный,

усталостный, адгезионный, коррозионный и т. п.), делают моделирование малоинформативным и недостаточно достоверным. Поэтому любые модели и методики должны проходить подтверждение в результате физического моделирования и натурных испытаний.

Результаты рассчитанных (измеренных) реакций на внешние воздействия, а также возникающие (вероятные) повреждения, смещения геометрических размеров, деградация свойств материалов служат базой для оценки рисков. Риски включают вероятность отказов и аварий, тяжесть последствий (уровень ущерба), позволяют оценить защищенность системы и выявить слабые места.

Структурная схема обеспечения живучести горнотехнической системы представляет уровень большей системы или надсистемы для горных и



транспортных машин, тем не менее, содержит такие же основные блоки, но другой набор базовых параметров оценки состояния и реакции на воздействия (см. Рис. 4). Подход к оценке рисков такой же, как и в предыдущей схеме, однако использует другие технологические решения и имеет гораздо более высокий уровень и тяжесть последствий.

Одним из важнейших факторов обеспечения живучести горнотехнической системы является устойчивость подземных выработок, основанная на законах геомеханики. Подземная геомеханика существенно отличается от обычной строительной механики. Принцип проектирования в строительной механике говорит, что нагрузка, приложенная к конструкции, не должна превышать прочность конструкции. Данные принципы действуют только до небольшой глубины. На большой глубине свыше 400 метров главным фактором пониженной устойчивости горных выработок является уже не выпадение разупрочненных пород, а внезапное разрушение породы, вызванное напряжением. Высокие напряжения могут привести к двум последствиям в подземных выработках: большая деформация в мягких и слабых породах и горным ударам в скальных и крепких породах [32].

При обеспечении устойчивости горных выработок требуется, чтобы система крепи, с одной стороны, обладала высоким сопротивлением для предотвращения смещения горных пород, а с другой стороны, должна была быть податливой для рассеивания определенного количества энергии деформации. Следовательно, все опорные устройства в системе крепи должны быть упругими (деформируемыми), а упрочняющие несущие элементы, такие как анкеры, должны быть прочными [33, 34].

В работе [35] рассмотрены многослойные крепи, использующие принцип демпфирования импульсного воздействия волн динамических напряжений на контуре выработок за счет амортизирующего слоя упругих элементов. Иными словами, «гору ничем не удержишь», надо делать разгрузку при сохранении минимально приемлемого контура выработки.

Другим фактором обеспечения живучести является контроль параметров рудничной атмосферы и в первую очередь метана и оксида углерода. Перечисление работ в этой области займет размер серьезной монографии. Задача данной работы – представить проблему в целостности и предложить комплексный системный подход.

Многообразие горно-геологических условий представляет сложность в увязывании многочисленных параметров и не позволяет провести большой объем натурных исследований поведения горных пород. При этом

на помощь приходят цифровые модели, позволяющие получить эффективные результаты и обеспечить безопасность эксплуатации в сложных горно-геологических исследованиях [36].

Высокий риск с тяжелыми последствиями требует рассмотрения и оценки уровней (коэффициентов) обеспечения живучести системы. Системы, обладающие большим уровнем живучести, отказывают постепенно, не приводя к нарушению главной функции. При недостаточной живучести в результате непредвиденных вредных воздействий происходят катастрофические разрушения смежных компонентов и узлов, возникает значительный ущерб.

При обнаружении на стадии испытания недостаточной живучести требуется вернуться на стадию проектирования и увеличить уровни резервирования или защиты. В некоторых случаях целесообразно изменить конструктивные параметры, применить другие материалы или другую технологию.

Анализ крупных аварий и катастроф показывает, что применение защитных или резервных элементов при признанных маловероятными стечениями факторов позволило бы при минимальных дополнительных вложениях значительно уменьшить последствия этих аварий. Дополнительные материальные затраты должны закладываться не только в проект, но и в эксплуатационные расходы на поддержание дополнительных резервных и защитных элементов.

Выводы

При всей сложности и многообразии поставленных проблем обеспечение высокой живучести горнотехнических и транспортных систем необходимо начинать на стадии проработки проекта, чтобы исключить применение неэффективных технологических решений. Повысить живучесть системы до приемлемого уровня можно только с использованием физической защиты (наличия специальных компонентов в системе). Базовыми компонентами являются первичные детали горных машин и оборудования, от качества и прочности применяемых материалов в большой мере зависит коэффициент запаса живучести. Однако при повышении прочности увеличиваются вес и габариты горных машин, что является недостатком. Живучесть и надежность увеличиваются при этом незначительно.

Применение резервирования давно и широко внедрено для стационарных горных машин и оборудования. Однако транспортно-технологическая схема пока остается в единственном числе, и крупная поломка не

только приводит к длительному простоя, но и вызывает изменения напряжений в горном массиве, перераспределение опорного давления.

Термин «живучесть» необходим при описании явлений и процессов, происходящих не только в транспортной, но и в горнотехнической системах, позволяет оценить уровень ущерба и последствий в результате непредвиденных внешних воздействий. Учет уровня живучести позволит рассмотреть новые технологические решения при ведении горных работ на угольных предприятиях. Введение защитных компонентов уменьшает риск вторичных разрушений соседних устройств, минимизирует ущерб в результате разрушения какого-либо устройства или выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калмыков В. Н., Петрова О. В., Мамбетова Ю. Д. Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы при подземной разработке медно-колчеданных месторождений // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2017. № 3. С. 5–11.
2. Rentsen Enkhbat, Jamsranjav Enkhbayar, Natsagdorj Tungalag, Battogtokh O., Enkhtuvshin, L. Application of survival theory in Mining industry // Numerical Algebra, Control & Optimization. 2019. № 11. DOI: 10.3934/naco.2020036.
3. Кондратьев В. Б. Горная промышленность, промышленная политика и апгрейд экономики. Горная промышленность. 2022. № 3. С. 61–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-61-68.
4. Эрикссон М., Леф О. Роль горнодобывающей промышленности в экономике отдельных стран в период с 1996 по 2016 год. Горная промышленность. 2019. № 6. С. 84–93. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-84-93.
5. Einicke G. The Survivability of Underground Communication Systems Following Mine Emergency Incidents. 1997. https://www.researchgate.net/publication/259743611_The_Survivability_of_Underground_Communication_Systems_Following_Mine_Emergency_Incidents/citation/download.
6. Moshood O., Khadija O. S., Amtenge P. Sh. Safe mining operations through technological advancement // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 175. Pp. 251–258. ISSN 0957-5820. DOI: 10.1016/j.psep.2023.05.052.
7. Чемезов Е. Н. Принципы обеспечения безопасности горных работ при добыче угля // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 649–653. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.649.
8. Яковлев В. Л. [и др.] Методологические принципы управления риском на горнодобывающих предприятиях в условиях неопределенности среды // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 10. С. 27–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-10-27-36. EDN BBVUYG.
9. Кравчук И. Л. Концептуальный подход к повышению безопасности производства на горнодобывающих предприятиях: его возможности при обеспечении технологического суверенитета // Проблемы недропользования. 2024. № 2(41). С. 40–49. EDN GFECFW.
10. Андреева Л. И., Данилкин А. А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 4 (168). С. 20–27. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27
11. Андреева Л. И. Мониторинг технического состояния горных машин как метод определения экономической целесообразности ее эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2(172). С. 59–64. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-59-64. EDN VZFPQJ.
12. Андреева Л. И. Рекомендации по совершенствованию системы ТОиР в изменяющихся условиях функционирования горнодобывающих предприятий // Проблемы недропользования. 2024. № 1(40). – С. 81–88. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.081. EDN FMTTMA.
13. Кузин Е. Г. Оценка технического состояния редукторов шахтных ленточных конвейеров методами неразрушающего контроля: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузин Евгений Геннадьевич. Кемерово, 2020. 141 с. EDN LOCCJL.
14. Герике Б. Л., Дрозденко Ю. В., П. Б. Герике [и др.] // Распознавание дефектов подшипников качения в редукторах горных машин по параметрам вибрационного сигнала // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 5(132). С. 43–48. EDN ZDMVIZ.
15. Kuzin E., Gerike B. L., Mamaeva M., Singh K. Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks // E3S Web of Conferences : IVth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, 14–16 октября 2019 года. EDP Sciences: EDP Sciences, 2019. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503011. EDN YQFIFS.
16. Кузин Е. Г., Мамаева М. С., Комаров Д. С. Прогнозирующий технический сервис приводов ленточных конвейеров на основе анализа параметров смазочного масла // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3(179). С. 48–60. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-48-60. EDN LUGDAH.
17. Mamaeva M., Kuzin E. Development of Innovative Methods for the Assessment of the Technical Condition of the Gearboxes of the Mine Belt Conveyors in the Parameters of the Lubricating Oil // MATEC Web of Conferences : The conference proceedings (ISPCIME-2019), Kemerovo. Vol. 297. Kemerovo: EDP Sciences; 2019. P. 03006. DOI : 10.1051/mateconf/201929703006. EDN ECHHRC.
18. Pudov E. [et al.] Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods // IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCMET2020, Veliky Novgorod, 25–26 июня 2020 года. Vol. 939. Veliky Novgorod : IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012063. EDN FWVJTS.
19. Бакин В. А., Пудов Е. Ю., Кузин Е. Г., Ремпель К. К. Анализ обследований состояния горных

выработок закрепленных анкерной крепью с применением георадара // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 10. С. 172–178. EDN UQFPZN.

20. Разумов Е. А. [et al.] Повышение эффективности анкерного крепления горных выработок путем применения «активных» методов управления состоянием массива горных пород // Горный журнал. 2021. № 1. С. 27–30. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.05. EDN PMSCGM.

21. Махутов Н. А. Гаденин М. М. Анализ, контроль, диагностика и мониторинг прочности, ресурса, надежности, живучести, рисков, безопасности и защищенности от аварий и катастроф объектов нефтегазового комплекса // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2024. № 5. С. 25–51. DOI: 10.36535/0869-4176-2024-05-3. EDN VFYZS.

22. Махутов Н. А. [и др.] Критерии и определяющие уравнения для оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности несущих элементов подвижного состава железнодорожного транспорта // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта : Сборник трудов международной научной конференции, Коломна, 22 июня 2021 года. Коломна : Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», 2021. С. 94–107. EDN CIUTDC.

23. Tamrazyan Ashot. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities // Reinforced concrete structures. 2023. № 3. P. 62–74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74.

24. Махутов Н. А. Комплексность запасов в прочностном, ресурсном и риск-ориентированном обосновании безопасности опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 1. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-7-14. EDN JWSRFE.

25. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Спектральный анализ параметров состояния технических систем в штатных и поврежденных состояниях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2025. Т. 91. № 1. С. 51–59. DOI: 10.26896/1028-6861-2025-91-1-51-59. EDN OMZIMK.

26. Каледина Н. О. Риск-ориентированный подход в обеспечении промышленной безопасности горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 6–1. С. 5–14. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-5-14. EDN WYZXUA.

27. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Резервы

повышения эффективности подземной дегазации угольных пластов с целью улучшения условий труда шахтеров // Горный журнал. 2017. № 6. С. 86–89. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.17. EDN ZAXIXF.

28. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 553–561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8. EDN RASFAD.

29. Герики Б. Л. [и др.] Разработка системы мониторинга технического состояния вентиляторов главного проветривания // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 1(177). С. 65–74. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-65-74. EDN GIWPCX.

30. Кузин Е. Г. [и др.] Модели предельного состояния приводных станций ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 8. С. 92–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_92. EDN RQBASS.

31. Gerike B. [et al.] Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes // E3S Web of Conferences : 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 03–05 октября 2018 года. Vol. 41. Kemerovo : EDP Sciences, 2018. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103011. EDN XVTPBB.

32. Насыров Р. Ш. [и др.] Технологические решения адаптации системы разработки с блочным самообрушением для условий рудных тел Донского ГОКа // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2024. № 4. С. 60–68. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-60-68. EDN PZVYLJ.

33. Неугомонов С. С. [и др.] Обоснование схемы нагружения и методики расчета напряжений в стержне анкера с фрикционным закреплением // Горный журнал. 2024. № 1. С. 74–82. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.12. EDN YYGIQM.

34. Qingmiao L. [et al.] Experimental study on the evolution law of mining-induced fractures and deformation rock mass structure of gently inclined layered slope // Energy Science & Engineering. 2022. Vol. 10. № 9. Pp. 3667–3688. DOI: 10.1002/ese3.1216. EDN CVCBKM.

35. Вохмин С. А. [и др.] Технологии крепления горных выработок глубоких горизонтов Октябрьского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 45–52.

36. Zhang P. D. [et al.] Study on overburden failure characteristics and displacement rule under the influence of deep faults // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/feart.2024.1388612. EDN NTZABR.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Кузин Евгений Геннадьевич^{1,2}, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевске, Россия, г. Прокопьевск, Кемеровская область 653039, ул. Ноградская, 19а, Институт угля Федерального исследовательского центра

угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, e-mail: kuzinegen@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Кузин Евгений Геннадьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, формулировка терминов, разработка методологии, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SURVIVABILITY OF MINING AND TRANSPORTATION SYSTEMS

Evgeny G. Kuzin^{1,2}

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk

² Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

* for correspondence: kuzinegen@gmail.com

Abstract.

In this paper, a new definition of the term survivability is proposed in relation to mining and transportation systems of coal mines. The key difference in terminology is the representation of survivability as the ability to perform the main function of a system as a result of unforeseen harmful effects in abnormal, exorbitant conditions. The analysis of scientific papers in the field of reliability, safety and stability of mining and other technical systems is presented. An important difference between the proposed approach is the provision of survivability by technical means and structural materials and the intra-system connections of mining and transport machinery components. A brief history of the development of the concept of survivability and approaches to its implementation is given. Further improvement of geotechnology is inextricably linked with the development and improvement of mining machinery and equipment, which in turn is based on the improvement of individual components of the system. It is shown that a systematic approach makes it possible to minimize the consequences of failures and accidents, preventing the catastrophic development of damage. The methodology of survivability, which is a supersystem for managing the reliability of a mining engineering system, is considered. The methodology reveals the structural relationships of various subsystems and, with a detailed analysis, allows you to see weak links that require priority protection. It is important for designers and technologists to have effective feedback on likely and unlikely events that can cause significant damage. Investigations of major accidents and catastrophes show that in most cases no large material costs were required to minimize their consequences. At the same time, the decision makers considered these costs unjustified. This paper shows that it is necessary to be protected from the wrong unintended actions of one's own personnel and from targeted organized sabotage, which is of particular relevance at the present time. The introduction of the conceptual apparatus of survivability has long been implemented at strategically important facilities. The mathematical apparatus is quite well developed. However, for hazardous production facilities, they are limited by the reliability, risk and safety apparatus. We believe that the prerequisites have matured to introduce a conceptual framework of survivability for the mining and technical system and to realize a high level of technical and technological means. The paper concludes that, despite the complexity and variety of the problems posed, ensuring high survivability of mining and transportation systems must begin at the stage of project development in order to eliminate the use of inefficient technological solutions.



Article info

Received:

19 September 2025

Accepted for publication:

10 October 2025

Accepted:

13 October 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: mining engineering system, transport system, survivability, safety, reliability, risk, mining machinery, underground workings, stability.

For citation: Kuzin E.G. Survivability of mining and transportation systems. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):172-184. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-172-184, EDN: XDLKDU

REFERENCES

1. Kalmykov V.N., Petrova O.V., Mambetova Y.D. Assessment of the stability of the mining system in the underground mining of copper-pyrite deposits. *Bulletin of the Moscow State Technical University named after G. I. Nosov*. 2017; 3:5–11.
2. Rentsen Enkhbat, Jamsranjav Enkhbayar, Natsagdorj Tungalag, Battogtokh O., Enkhtuvshin, L. Application of survival theory in Mining industry. *Numerical Algebra, Control & Optimization*. 2019;11. DOI: 10.3934/naco.2020036.
3. Kondratiev V.B. Mining industry, industrial policy and economic upgrade. *Mining industry*. 2022; (3):61–68. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-61-68.
4. Eriksson M., Lef O. The role of the mining industry in the economy of individual countries in the period from 1996 to 2016. *Mining industry*. 2019; (6):84–93. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-6-84-93.
5. Einicke G. The Survivability of Underground Communication Systems Following Mine Emergency Incidents. 1997. https://www.researchgate.net/publication/259743611_The_Survivability_of_Underground_Communication_Systems_Following_Mine_Emergency_Incidents/citation/download.
6. Moshood O., Khadija O.S., Amtenge P.Sh. Safe mining operations through technological advancement. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023; 175:251–258. ISSN 0957-5820. DOI: 10.1016/j.psep.2023.05.052.
7. Chemezov E.N. Principles of ensuring the safety of mining operations in coal mining. *Notes of the Mining Institute*. 2019; 240:649–653. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.649.
8. Yakovlev V.L. [et al.] Methodological principles of risk management in mining enterprises under conditions of environmental uncertainty. *Safety of labor in industry*. 2024; 10:27–36. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-10-27-36. EDN BBVUYG.
9. Kravchuk I.L. A conceptual approach to improving production safety at mining enterprises: its capabilities in ensuring technological sovereignty. *Problems of subsurface use*. 2024. № 2(41). Pp. 40–49. EDN GFECFW.
10. Andreeva L.I., Danilkin A.A. Assessment of factors influencing the performance of equipment operating in the conditions of development of mining systems. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 4(168):20–27. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27.
11. Andreeva L.I. Monitoring of the technical condition of mining machinery as a method for determining the economic feasibility of its operation. *Mining equipment and electrical engineering*. 2024; 2(172):59–64. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-59-64. EDN VZFPQJ.
12. Andreeva L.I. Recommendations for improving the MRO system in the changing conditions of the functioning of mining enterprises. *Problems of subsoil use*. 2024; 1(40):81–88. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.081. EDN FMTTMA.
13. Kuzin E.G. Assessment of the technical condition of gearboxes of mine belt conveyors by non-destructive testing methods: specialty 05.05.06 "Mining machines" : dissertation for the degree of candidate of technical Sciences / Kuzin Evgeny Gennadievich. Kemerovo, 2020. 141 p. EDN LOCCJI.
14. Gericke B.L. [et al.] Recognition of rolling bearing defects in mining gearboxes by vibration signal parameters. *Mining equipment and electromechanics*. 2017; 5(132):43–48. EDN ZDMVIZ.
15. Kuzin E. [et al.] Diagnostics of Gearboxes of Mining Belt Conveyors Using Floating Spectral Masks. *E3S Web of Conferences : IVth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, October 14-16, 2019. EDP Sciences: EDP Sciences; 2019. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503011. EDN YQFIFS.
16. Kuzin E.G. [et al.] Predictive technical service of belt conveyor drives based on the analysis of lubricating oil parameters. *Mining equipment and electromechanics*. 2025; 3(179):48–60. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-48-60. EDN LUGDAH.
17. Mamaeva M., Kuzin E. Development of Innovative Methods for the Assessment of the Technical Condition of the Gearboxes of the Mine Belt Conveyors in the Parameters of the Lubricating Oil. *MATEC Web of Conferences : The conference proceedings (ISPCIME-2019)*. Kemerovo, November 26-29, 2019. Vol. 297. Kemerovo: EDP Sciences; 2019. P. 03006. DOI: 10.1051/mateconf/201929703006. EDN ECHHRC.
18. Pudov E. [et al.] Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods. *IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCIET'2020*. Veliky Novgorod, June 25-26, 2020. Vol. 939. Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd; 2020. P. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/939/1/012063. EDN FWVJTS.
19. Bakin V.A., Pudov E.Yu., Kuzin E.G., Rempel K.K. Analysis of surveys of the state of mine workings fixed with an anchor with the use of georadar. *Mining information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 10:172–178. EDN UQFPZN.
20. Razumov E.A., Kalinin S.I., Venger V.G., Pudov E.Yu. Improving the efficiency of anchoring mining workings by applying "active" methods for controlling the condition of a rock mass. *Mining Journal*. 2021; 1:27–30. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.05. EDN PMSCGM.
21. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Analysis, control, diagnostics and monitoring of strength, resource, reliability, survivability, risks, safety and protection from accidents and catastrophes of oil and gas facilities. *Problems of safety and emergency situations*. 2024; 5:25–51. DOI: 10.36535/0869-4176-2024-05-3. EDN VFIYZS.
22. Makhutov N.A. [et al.] Criteria and defining equations for assessing the strength, resource, survivability and safety of bearing elements of railway rolling stock. *Scientific foundations and technologies for increasing the resource and survivability of railway rolling stock* :

Proceedings of the international scientific Conferences, Kolomna, June 22, 2021. Kolomna: Joint-Stock Company "Scientific Research and Design-Technological Institute of Rolling Stock"; 2021. Pp. 94–107. EDN CIUTDC.

23. Tamrazyan A. Conceptual Approaches to Robustness Assessment of Building Structures, Buildings and Facilities. *Reinforced concrete structures.* 2023; 3:62–74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74.

24. Makhutov N.A. The complexity of reserves in the strength, resource and risk-based justification of the safety of hazardous production facilities. *Occupational safety in industry.* 2025; 1:7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-7-14. EDN JWSRFE.

25. Makhutov N.A. Spectral analysis of the parameters of the state of technical systems in normal and damaged conditions. *Factory laboratory. Diagnostics of materials.* 2025; 91(1):51–59. DOI: 10.26896/1028-6861-2025-91-1-51-59. EDN OMZIMK.

26. Kaledina N.O. Risk-oriented approach in ensuring industrial safety of mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2020; 6–1:5–14. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-5-14. EDN WYZXUA.

27. Kaledina N.O., Malashkina V.A. Reserves for increasing the efficiency of underground degassing of coal seams in order to improve the working conditions of miners. *Mining Journal.* 2017; 6:86–89. DOI: 10.17580/gzh.2017.06.17. EDN ZAXIXF.

28. Kaledina N.O., Malashkina V.A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems. *Notes of the Mining Institute.* 2021; 250:553–561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8. EDN RASFAD.

29. Gericke B.L. [et al.] Development of a system for monitoring the technical condition of main ventilation fans. *Mining equipment and electrical engineering.* 2025;

1(177):65–74. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-65-74. EDN GIWPCX.

30. Kuzin E.G. [et al.] Models of the limiting state of belt conveyor drive stations. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2024; 8:92–107. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_92. EDN RQBASS.

31. Gericke B. [et al.] Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes. *E3S Web of Conferences : 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition.* Kemerovo, October 03-05, 2018. Vol. 41. Kemerovo: EDP Sciences; 2018. P. 03011. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103011. EDN XVTPBB.

32. Nasyrov R.Sh. [et al.] Technological solutions for adapting a block self-destruction mining system for the conditions of ore bodies of the Donskoy Mining and Processing Plant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mining Journal.* 2024; 4:60–68. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-60-68. EDN PZVYLJ.

33. Neugomonov S.S. [et al.] Substantiation of the loading scheme and methods for calculating stresses in the anchor rod with friction fastening. *Mining Journal.* 2024; 1:74–82. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.12. EDN YYGIQM.

34. Qingmiao L. [et al.] Experimental study on the evolution law of mining-induced fractures and deformation rock mass structure of gently inclined layered slope. *Energy Science & Engineering.* 2022; 10(9):3667–3688. DOI: 10.1002/ese3.1216. EDN CBCBKM.

35. Vokhmin S.A. [et al.] Technologies for fixing mining workings of deep horizons of the Oktyabrskoye field. *Izvestiya vuzov. Mining magazine.* 2019; 7:45–52.

36. Zhang P.D. [et al.] Study on overburden failure characteristics and displacement rule under the influence of deep faults. *Frontiers in Earth Science.* 2024; 12. DOI 10.3389/feart.2024.1388612. EDN NTZABR.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Evgeny G. Kuzin - Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk, Russia, Prokopyevsk, Kemerovo region 653039, 19a Nogradskaya str., Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kuzinegen@gmail.com

Contribution of the authors:

Evgeny G. Kuzin– formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, formulation of terms, development of methodology, conclusions, writing the text;

All authors have read and approved the final manuscript.

