ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 9

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 8

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОМЕОСТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА РИСКОВ ЖИЗНИ И ЗДОРОВЬЯ ШАХТЁРОВ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ УГОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Атабаева Мамура Мадаминовна
Ташкентский государственный технический университет, старший преподователь.
E-mail: Mamuratabayeva59@gmail.com
Атабаев Кахрамон Альберт ўғли
Министерство занятости и сокращения бедности Республики Узбекистан, Ташкент, Доктор философии PhD.
E-mail: kaxramon93@yandex.ru

Аннотация. В статье предложена динамическая гомеостатическая модель анализа рисков жизни и здоровья шахтёров, основанная на представлении шахты как нелинейной социотехнической системы. В отличие от традиционных вероятностно-сценарных методов, риск интерпретируется как вероятность утраты системной устойчивости при накоплении интегрального напряжения производственной среды. Разработана математическая формализация интегрального состояния шахты, учитывающая нелинейные взаимодействия факторов, адаптационную ёмкость системы и динамику человеческого ресурса. Проведён анализ ограничений действующих подходов к управлению промышленной безопасностью и обоснована необходимость перехода к предиктивной модели мониторинга. Особое внимание уделено актуальности внедрения системно-динамического подхода в условиях модернизации угольной отрасли Республики Узбекистан. Предложены практические рекомендации по интеграции технических, организационных и медико-гигиенических данных в единую систему управления рисками.

Ключевые слова: динамическая гомеостатическая модель; промышленная безопасность; подземная добыча угля; профессиональные риски; системная устойчивость; интегральное системное напряжение; нелинейная динамика; адаптационная ёмкость; человеческий фактор; функциональный резонанс; предиктивное управление безопасностью; Республика Узбекистан.

Annotatsiya. Maqolada konni nochiziqli ijtimoiy-texnik tizim sifatida tasavvur qilishga asoslangan konchilarning hayoti va sog‘lig‘i uchun xavflarni tahlil qilishning dinamik gomeostatik modeli taklif etilgan.Sanoat xavfsizligini boshqarishda amaldagi yondashuvlarning cheklovlari tahlil qilindi va monitoringning bashoratli modeliga o‘tish zarurligi asoslandi. O‘zbekiston Respublikasi ko‘mir sanoatini modernizatsiya qilish sharoitida tizimli-dinamik yondashuvni joriy etishning dolzarbligiga alohida e’tibor qaratildi. Texnik, tashkiliy va tibbiy-gigiyenik ma’lumotlarni xavflarni boshqarishning yagona

ISSN 3030-3907

tizimiga integratsiya qilish bo‘yicha amaliy tavsiyalar berildi.klovlari tahlil qilindi va monitoringning bashoratli modeliga o‘tish zarurligi asoslandi. O‘zbekiston Respublikasi ko‘mir sanoatini modernizatsiya qilish sharoitida tizimli-dinamik yondashuvni joriy etishning dolzarbligiga alohida e’tibor qaratildi. Texnik, tashkiliy va tibbiy-gigiyenik ma’lumotlarni xavflarni boshqarishning yagona tizimiga integratsiya qilish bo‘yicha amaliy tavsiyalar berildi.

Kalit so‘zlar: dinamik gomeostatik model; sanoat xavfsizligi; yer osti ko‘mir qazib olish; kasbiy xavflar; tizim barqarorligi; integral tizim tarangligi; nochiziqli dinamika; moslashuv sig‘imi; inson omili; funksional rezonans; xavfsizlikni bashoratli boshqarish; O‘zbekiston Respublikasi.

Annotation. The article proposes a dynamic homeostatic model for analyzing the risks to the life and health of miners, based on the concept of a mine as a nonlinear sociotechnical system. Unlike traditional probabilistic scenario methods, risk is interpreted as the probability of loss of system stability with the accumulation of integral stress in the production environment. A mathematical formalization of the integral state of the mine has been developed, taking into account the nonlinear interactions of factors, the adaptive capacity of the system and the dynamics of human resources. The limitations of current approaches to industrial safety management are analyzed and the need for a transition to a predictive monitoring model is substantiated. Special attention is paid to the relevance of the introduction of a system-dynamic approach in the context of modernization of the coal industry in the Republic of Uzbekistan. Practical recommendations on the integration of technical, organizational and medical-hygienic data into a single risk management system are proposed.

Keywords: dynamic homeostatic model; industrial safety; underground coal mining; occupational risks; system stability; integrated system voltage; nonlinear dynamics; adaptive capacity; human factor; functional resonance; predictive safety management; Republic of Uzbekistan.

ВВЕДЕНИЕ.

Подземная добыча угля остаётся одной из наиболее травмоопасных сфер промышленности, что обусловлено сочетанием газодинамических процессов, геомеханических напряжений массива, пылеобразования, высокой энергонасыщенности оборудования и постоянного присутствия человека в замкнутом пространстве. Несмотря на развитие систем промышленного мониторинга и автоматизации, аварийность и профессиональная заболеваемость в шахтах сохраняют устойчивый характер, что подтверждается современными исследованиями в области горной безопасности [5].

ISSN 3030-3907

В российской практике анализ риска преимущественно основывается на нормативном контроле параметров производственной среды и применении вероятностных методов оценки опасных событий. Риск интерпретируется как сочетание вероятности неблагоприятного события и тяжести его последствий, что отражено в современных работах по теории промышленной безопасности [6,11]. Однако подобный подход ориентирован преимущественно на идентификацию отдельных сценариев и отказов и в меньшей степени учитывает динамическое взаимодействие технических, природных и человеческих факторов.

Современные исследования в области безопасности сложных социотехнических систем указывают на то, что аварии часто являются результатом накопления внутренних дисбалансов и системной нестабильности, а не следствием одного критического события [8]. В условиях высокой взаимосвязанности процессов подземной добычи превышение допустимых параметров может носить нелинейный характер и проявляться скачкообразно, что затрудняет своевременную идентификацию угроз.

Особое значение приобретает человеческий фактор, включающий психофизиологическое состояние работников, уровень усталости, когнитивную нагрузку и организационные особенности управления безопасностью [1]. Традиционные методы учитывают его через коэффициенты надёжности, что не отражает динамики изменения функционального состояния персонала во времени.

Таким образом, наблюдается противоречие между сложностью шахты как нелинейной производственной системы и применением преимущественно статических методов анализа риска. Это обусловливает необходимость разработки модели, рассматривающей безопасность как характеристику устойчивости всей системы и учитывающей накопление системного напряжения во времени.

Цель настоящего исследования заключается в формировании теоретически обоснованной динамической модели анализа рисков жизни и здоровья шахтёров, основанной на концепции системной устойчивости и адаптационной способности шахты как социотехнической системы.

АНАЛИЗ ИМЕЮЩЕЙСЯ ЛИТЕРАТУРЫ.

Подземная добыча угля характеризуется устойчиво высоким уровнем вредных и опасных производственных факторов. По данным комплексных исследований условий труда в угольных шахтах, более 90% рабочих мест относятся к классам вредности 3.1–3.4, при доминирующем воздействии

ISSN 3030-3907

аэрозолей преимущественно фиброгенного действия, тяжести труда и шума [1]. Установлено, что профессиональная заболеваемость шахтёров в десятки и сотни раз превышает средние показатели по экономике, а структура патологии определяется сочетанием пылевого фактора, вибрации, неблагоприятного микроклимата и значительной физической нагрузки.

Традиционные методы обеспечения безопасности в подземной добыче включают нормативное регулирование параметров шахтной атмосферы, организационно-технические мероприятия, применение средств коллективной и индивидуальной защиты, а также систему специальной оценки условий труда. Основные принципы защиты направлены на предотвращение обрушений, взрывов метано-воздушных смесей, пылевых взрывов, пожаров и аварий при эксплуатации оборудования [3]. Вместе с тем в современных публикациях подчёркивается, что формальное соблюдение нормативных требований не всегда обеспечивает реальное снижение профессиональных рисков, поскольку не учитывает совокупное и динамическое воздействие факторов.

Исследования, посвящённые развитию методов управления профессиональными рисками на предприятиях угольной промышленности, акцентируют внимание на необходимости системного выявления опасностей и их интегральной оценки [4]. Однако существующая практика преимущественно базируется на дискретной оценке отдельных факторов: концентрации метана, запылённости, уровней шума, параметров микроклимата. Между тем данные анкетных и медико-гигиенических исследований свидетельствуют о том, что реальная вредность условий труда часто недооценивается по таким показателям, как тяжесть трудового процесса, локальная вибрация и световая среда [2].

Аналогичные проблемы характерны и для стран Центральной Азии. В Республике Узбекистан угольная отрасль рассматривается как стратегически значимая составляющая топливно-энергетического комплекса, обладающая существенными подтверждёнными запасами угля [7]. В условиях планируемого наращивания добычи угля возрастает актуальность вопросов промышленной безопасности, модернизации технологий добычи и совершенствования государственного регулирования. Отмечается, что инновационное развитие отрасли непосредственно связано с повышением уровня безопасности горных работ и внедрением новых технологических решений [7].

Для шахт Узбекистана, в частности предприятий «Шаргункумир» и «Бойсункумир», характерны сложные горно-геологические условия,

ISSN 3030-3907

ограниченные возможности технического перевооружения и повышенные требования к вентиляции и контролю газового режима. При этом методологическая база оценки риска остаётся преимущественно нормативно-параметрической и ориентированной на соблюдение предельно допустимых значений отдельных показателей. Такая система недостаточно учитывает взаимосвязанность процессов, накопительный характер неблагоприятных воздействий и адаптационные возможности производственной системы.

Таким образом, анализ современных публикаций показывает, что действующие подходы к оценке и управлению рисками в угольной промышленности — как в Российской Федерации, так и в Республике Узбекистан — характеризуются:

– доминированием дискретной оценки отдельных производственных факторов;

– недостаточным учётом их совокупного и синергетического воздействия;

– слабой формализацией динамики изменения условий труда во времени;

– ограниченной интеграцией технических и медико-гигиенических данных в единую систему анализа.

Указанные обстоятельства обосновывают необходимость перехода к интегральной динамической модели, позволяющей рассматривать безопасность шахты как функцию системной устойчивости при воздействии совокупности взаимосвязанных факторов, что особенно актуально в условиях модернизации угольной отрасли Республики Узбекистан.

МЕТОДОЛОГИЯ.

Целью данного исследования является анализ рисков жизни и здоровья шахтёров в условиях модернизации угольной отрасли на основе системно-динамического подхода, разработка динамической гомеостатической модели и определение возможностей её практического применения в системе управления промышленной безопасностью.

В процессе исследования использованы методы системного анализа, логического обобщения, сравнительного анализа и математического моделирования. Также проведён анализ научной литературы, современных исследований в области промышленной безопасности, а также статистических данных, характеризующих условия труда и профессиональные риски в угольной промышленности.

При построении модели учитывались взаимосвязь и динамика изменения факторов производственной среды, а также влияние

ISSN 3030-3907

человеческого фактора. Особое внимание уделено интеграции технических, организационных и медико-гигиенических показателей в единую систему оценки рисков.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

Подход к риску как к характеристике состояния целой социотехнической системы базируется на трёх взаимосвязанных положениях. Первое — шахта функционирует как открытая нелинейная система, где технические, природные и человеческие компоненты связаны обратными и прямыми связями; второе — безопасность следует рассматривать не как свойство отдельных параметров (концентрация газа, запылённость и т.п.), а как способность системы сохранять рабочее равновесие (гомеостаз) при внешних и внутренних возмущениях; третье — накопление и взаимодействие вариабельностей могут приводить к фазовым переходам (системной потере устойчивости), проявляющимся в виде аварий или массового ухудшения состояния здоровья персонала. Эти положения опираются как на эмпирические данные по условиям труда и профессиональной заболеваемости в угольной отрасли (анкетные и медицинские исследования, обследования рабочих мест), так и на современную теорию системной безопасности и ресилшнс-инжиниринга.

Эмпирическая сторона. Современные обследования рабочих мест и эпидемиологические данные демонстрируют кумулятивный характер воздействия ведущих опасных факторов: аэрозольная нагрузка преимущественно фиброгенного действия, тяжесть труда, шум, локальная вибрация и неблагоприятный микроклимат входят в число доминирующих причин профессиональной патологии у шахтёров [1,2]. Эти исследования показывают, что при традиционной пофакторной оценке значительная доля вредности недооценивается: формальные нормативы отдельных показателей не гарантируют отсутствия системного стресса на рабочем месте. (см. также комплексные обзоры мер безопасности при подземных работах и методики динамической оценки риска).

Теоретическая база. В международной литературе нарастает консенсус в пользу системного, предиктивного подхода к безопасности: Leveson предлагает формализацию системного анализа безопасности на основе теории управления и системной теории, где отказ — это результат неудовлетворительной архитектуры управления и взаимодействия компонентов, а не простого набора отказавших деталей [8]. Hollnagel и соавторы развивают идею функционального резонанса (FRAM) и ресилшнс-инжиниринга: вариабельность функций работы (work-as-done) может

ISSN 3030-3907

резонировать и приводить к неожиданным результатам, что требует внимания к динамике и адаптивности системы, а не только к устранению отдельных причин ошибок [10]. Совокупность этих взглядов формирует основание для перехода от «Safety-I» (реактивное устранение ошибок) к «Safety-II» / ресилшнс-инжинирингу (поддержание способности системы адаптироваться к вариабельности).

Ключевые концепты, которые ложатся в основу системно-динамической модели риска в контексте шахт:

• **Интегральное состояние системы** $X(t)$ — скаляр или вектор показателей, агрегирующий вклад технических (газ, пыль, температура, состояние оборудования), организационных (режимы работы, скорость реагирования) и человеческих (усталость, когнитивная нагрузка) факторов. Такой агрегат должен учитывать как мгновенные отклонения, так и их интеграцию во времени (накопление). (см. динамические подходы к оценке риска на производстве).

• **Порог устойчивости** X_{crit}— значение интегрального состояния, при котором система теряет способность к самокомпенсации; пересечение этого порога соответствует фазовому переходу (авария, массовое ухудшение здоровья).

• **Ада— характеристика компенсаторных механизмов (быстрота реакции управления, резерв мощности вентиляции, наличие оперативных протоколов, когнитивные резервы персонала). В отличие от статичных запасов прочности, адаптационная ёмкость — динамический ресурс, зависящий от предшествующей нагрузки и текущих условий.

• **Вариабельность и резонанс функций** — взаимодействие колебаний разных компонент (например, циклическое увеличение нагрузки — повышение газовыделения — снижение эффективности вентиляции — рост усталости персонала) может привести к функциональному резонансу, когда суммарный эффект существенно больше арифметической суммы вкладов (концепция FRAM).

Методологические следствия. Принятие описанных концептов влечёт за собой несколько измнений в методике анализа риска:

1. **Временная динамика вместо статических срезов** — нужно моделировать не отдельные сценарии, а эволюцию $X(t)$ с учётом скоростей изменения факторов и интеграции их вкладов (накопление напряжения). Практически это означает переход к дифференциальным/рекуррентным моделям и использованию данных мониторинга для оценки трендов (см.

ISSN 3030-3907

методы динамической оценки и автокаталитического роста в прикладных работах).

2. **Моделирование взаимных нелинейных эффектов** — наличие перекрёстных членов (взаимодействий) в модели состояния, которые могут усиливать или ослаблять влияние отдельных факторов; такие члены должны оцениваться на основе эмпирики и экспертов, с последующей калибровкой по историческим данным. Это исключает чисто аддитивную оценку суммарной вредности.

3. **Включение адаптационных механизмов в модель риска** — нельзя сводить систему к набору пассивных параметров: модели должны содержать блоки управления, которые изменяют динамику $X(t)$ (принятие мер по вентиляции, смена режима работы, вызов резервных сил). Это приближает анализ к управленческой теории риска [8].

4. **Учёт человеческого фактора как динамической переменной** — усталость, когнитивная нагрузка и обучение персонала должны входить в модель не через статические коэффициенты, а как процессы с собственной динамикой (накопление усталости, восстановление после отдыха, накопление опыта). Эмпирические исследования показывают существенную роль таких процессов в топологии профессиональной заболеваемости шахтёров.

Для Узбекистана характерны планы наращивания добычи и модернизации горной отрасли, что усиливает требования к интегрированному мониторингу и управлению безопасностью (аналитические обзоры и отчёты по перспективам угольной промышленности Узбекистана; государственные отчёты по внедрению ESG и модернизации предприятий). Рост добычи увеличивает нагрузку на существующие системы вентиляции и обслуживание оборудования, а также требует усиленной интеграции технических и организационных мер безопасности — что делает системно-динамический подход особенно практико-релевантным для проектов модернизации (Ангрен/Шаргункумир и др.).

Вывод логического уровня. Системно-динамическая интерпретация риска даёт теоретическую основу для модели, где ключевыми объектами анализа являются: интегральное состояние $X(t)$, пороги устойчивости, адаптационные резервы системы и механизмы функционального резонанса. Такая интерпретация согласуется с современными международными подходами (Leveson; Hollnagel; ресилшнс-инжиниринг) и подтверждается

ISSN 3030-3907

отечественными эмпирическими наблюдениями о кумулятивной природе вредностей в угольных шахтах.

Математическая формализация динамической гомеостатической модели риска

Предлагаемая модель исходит из того, что авария или тяжёлый вред здоровью шахтёров являются не мгновенным следствием одного опасного фактора, а результатом накопления системного напряжения в производственной среде. Следовательно, необходимо формализовать интегральное состояние шахты во времени и описать механизмы его роста и компенсации.

Введём безразмерную функцию **интегрального системного напряжения** *S(t)*, отражающую совокупное воздействие всех значимых факторов. Она формируется из нормированных параметров среды и труда:

$$S(t)=\sum_{i=1}^{n} w_e * x_i(t) + \sum_{i\neq j} k_{ij} x_i(t) x_j(t)$$

где $x_i(t)$ — нормированные показатели (концентрация метана, запылённость, температура, вибрация, физическая нагрузка, уровень усталости и др.), w_i— их относительная значимость, а k_{ij}— коэффициенты взаимодействия факторов.

Первая сумма описывает линейный вклад каждого фактора. Вторая — принципиально важна: она учитывает синергетические эффекты. Например, высокая температура сама по себе может быть допустимой, но в сочетании с тяжёлой физической нагрузкой резко ускоряет накопление усталости и снижает концентрацию внимания. Аналогично, умеренная запылённость при высоком уровне вибрации и шуме может приводить к ускоренному развитию профессиональной патологии.

Нормирование факторов производится через отношение текущего значения к допустимому:

$$x_i(t)=\frac{X_i(t)}{X_{i,lim}}$$

Это позволяет объединять параметры разной физической природы в единую шкалу.

Однако ключевым элементом модели является не сама величина *S(t)*, а её динамика. Рост или снижение системного напряжения определяется балансом между возмущающими процессами и адаптационными механизмами:

$$\frac{d_S}{d_t}=\alpha\Phi(t) - \beta A(t)$$

Здесь Φ(t) — суммарная интенсивность возмущений (например, рост добычи, ухудшение вентиляции, увеличение продолжительности смены), а

ISSN 3030-3907

A(t)— адаптационная ёмкость системы. Коэффициенты α и β отражают чувствительность системы к нагрузке и её способность к компенсации.

Интерпретация уравнения проста: если производственная нагрузка возрастает быстрее, чем система способна её компенсировать, напряжение накапливается. Если же адаптационные ресурсы достаточны, напряжение стабилизируется или снижается.

Адаптационная ёмкость не является константой. Она включает технические и человеческие компоненты:

$$A(t)=R(t)+M(t)+C(t)+H(t)A(t)$$

где $R(t)$— скорость управленческого реагирования, $M(t)$— резерв технических мощностей (вентиляция, энергообеспечение), $C(t)$— устойчивость коммуникационных процессов, $H(t)$ — человеческая устойчивость.

Человеческий компонент формализуется через соотношение когнитивного ресурса и нагрузки:

$$H(t)=\frac{CR(t)}{SL(t)*g(t)}$$

где $CR(t)$— когнитивный резерв (квалификация, опыт), $SL(t)$— стрессовая нагрузка, $F(t)$— накопленная усталость.

Например, при длительной смене без достаточного отдыха $F(t)$ возрастает, что уменьшает $H(t)$, а следовательно, снижает общую адаптационную способность шахты. Это объясняет, почему аварии часто происходят в конце смены или при повышенной производственной нагрузке.

Риск в данной модели определяется вероятностью достижения критического уровня напряжения:

$$R(t)=P(S(t)\geq S_{crit})$$

При достижении порога S_{crit} система входит в состояние бифуркации, где даже незначительное дополнительное воздействие может вызвать скачкообразный переход — взрыв, обрушение или тяжёлое травмирование.

Дополнительно учитывается эффект функционального резонанса факторов:

$$R_{res}=\sum_{i<j} a_i a_j cos\,(\varphi_{ij})$$

Если колебания различных параметров совпадают по фазе (например, рост метановыделения и снижение вентиляции происходят одновременно), возникает усиление системного эффекта. В этом случае даже умеренные значения отдельных параметров могут привести к резкому росту $S(t)$.

Для наглядности рассмотрим практический пример. Предположим, в шахте Узбекистана при увеличении объёма добычи на 15% фиксируется рост газовыделения на 10% и повышение температуры воздуха на 5%. Каждый из

ISSN 3030-3907

этих параметров остаётся ниже предельно допустимого значения. Однако одновременный рост нагрузки приводит к увеличению физической усталости персонала и снижению эффективности контроля. В модели это отражается увеличением $x_i(t)$, уменьшением $H(t)$ и положительным вкладом перекрёстных коэффициентов k_{ij}. В результате $S(t)$ может приблизиться к критическому уровню даже без формального превышения нормативов.

Таким образом, предложенная формализация позволяет:

– учитывать динамику накопления неблагоприятных воздействий;

– моделировать влияние человеческого фактора как изменяющейся переменной;

– интегрировать технические и медико-гигиенические данные;

– прогнозировать достижение критического состояния до наступления аварии.

В условиях модернизации угольной отрасли Республики Узбекистан такая модель может использоваться как цифровой инструмент оценки устойчивости шахт при изменении объёмов добычи, реконструкции вентиляционных систем и изменении режимов труда.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ.

Проведённый анализ показал, что современная система обеспечения безопасности в угольных шахтах —остаётся преимущественно нормативно-параметрической и событийно-вероятностной. Она ориентирована на контроль отдельных факторов (метан, пыль, шум, вибрация) и расчёт вероятности аварийных сценариев. При этом реальная динамика производственной среды носит нелинейный и накопительный характер. Эмпирические данные по условиям труда шахтёров подтверждают, что профессиональные риски формируются под воздействием совокупности факторов, взаимодействующих во времени, а не в виде изолированных отклонений.

Разработанная динамическая гомеостатическая модель (DHRM) предлагает иную интерпретацию риска — как вероятности выхода производственной системы за пределы области устойчивого функционирования. Ключевым параметром является интегральное системное напряжение S(t), отражающее совокупное воздействие технических, природных и человеческих факторов, а также баланс между возмущающими процессами и адаптационной ёмкостью шахты.

Принципиальным преимуществом модели является:

1. **Интеграция разнотипных данных** — технического мониторинга, медико-гигиенических показателей и организационных характеристик.

ISSN 3030-3907

2. **Учёт нелинейных эффектов и функционального резонанса**, когда совпадение неблагоприятных процессов во времени усиливает общий риск.

3. **Включение человеческого фактора как динамической переменной**, а не статического коэффициента.

4. **Переход к предиктивному управлению**, позволяющему прогнозировать приближение к критическому состоянию.

Анализ применимости модели к условиям Республики Узбекистан показывает её особую актуальность. Узбекистан обладает значительными запасами угля и планирует модернизацию и увеличение добычи. Это объективно повышает нагрузку на вентиляционные системы, инфраструктуру и персонал. В условиях расширения производственных мощностей риск определяется не только техническими параметрами, но и способностью системы адаптироваться к росту интенсивности работ. Применение динамической модели позволяет оценить устойчивость шахты до начала масштабного увеличения добычи и выявить «узкие места» в системе управления.

Практические предложения

1. **Создание интегрированной системы мониторинга устойчивости шахты.** Необходимо объединить данные газового контроля, вентиляции, температурных режимов, производственной нагрузки и показателей режима труда в единую цифровую платформу. На её основе рассчитывается S(t) в режиме реального времени.

2. **Введение индекса адаптационной ёмкости.** Предлагается ежегодно оценивать технические и организационные резервы шахты: скорость управленческого реагирования, наличие резервных мощностей, подготовку персонала. Это позволит количественно оценивать способность системы к компенсации нагрузки.

3. **Пилотное внедрение на одной из шахт Узбекистана.** Рекомендуется провести апробацию модели на предприятиях «Шаргункумир» или «Бойсункумир» с использованием исторических данных о производственной динамике. Калибровка коэффициентов модели должна осуществляться на основе статистики аварий и профессиональной заболеваемости.

4. **Интеграция медико-гигиенических данных в систему управления безопасностью.** Показатели усталости, частоты микротравм и самочувствия персонала должны использоваться не только для отчётности, но и как переменные модели риска.

ISSN 3030-3907

5. **Переход к динамическому нормированию.** Предлагается дополнить существующие нормативы системой «предупредительных зон», основанных на скорости изменения параметров и их сочетании, а не только на превышении предельно допустимых значений.

6. **Подготовка кадров в области системного анализа безопасности.** Для успешного внедрения модели необходима подготовка специалистов по анализу данных, системной инженерии и управлению рисками.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Лебедева А.А. и др. Профессиональная заболеваемость работников угольной промышленности Российской Федерации в современных условиях // Медицина труда и промышленная экология. 2023.
2. Зибарев Е.В., Вострикова С.М., Кравченко О.К., Бессонова А.К., Никонова С.М. Самооценка уровней воздействия вредных производственных факторов на рабочих местах шахтёров // Экология человека. 2025. Т. 32. № 7. С. 504–516.
3. Чемезов В.Н. Безопасность при подземных горных работах: защита жизни и здоровья шахтёров. М.: Горная книга, 2019.
4. Мохначук И.И., Варламов В.В., Лисовский В.В. и др. Развитие методов обеспечения безопасности труда на предприятиях компании «СУЭК» с участием представителей Росуглепрофа // Уголь. 2025. № 7. С. 14–18.
5. Каплунов Д.Р., Мельников Н.Н., Лисин А.М. Современные проблемы промышленной безопасности в угольной отрасли России // Горный журнал. 2018.
6. Федосеев С.В. Управление профессиональными рисками в горнодобывающей промышленности. М.: Недра, 2016.
7. Khasilov Kh., Omonov Kh., Abdullaev H., Ochildev A., Normurodov Sh. Prospects for the Coal Industry of Uzbekistan // Transport of the Silk Road. 2020. № 1.
8. Leveson N. Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety. Cambridge: MIT Press, 2011.
9. Hollnagel E. FRAM: The Functional Resonance Analysis Method. Farnham: Ashgate, 2012.
10. Hollnagel E., Woods D.D., Leveson N. (eds.). Resilience Engineering: Concepts and Precepts. London: Ashgate, 2017.
11. Aven T. Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation. European Journal of Operational Research. 2016.

ISSN 3030-3907

12. International Labour Organization. Safety and Health in Mines: Code of Practice. Geneva: ILO, 2011.

ISSN 3030-3907