

напруженнях. Лінійна модель бетону може бути застосована тільки для випадків пружної роботи бетону, але розрахунки для таких випадків простіше і скоріше виконувати в спеціалізованих пакетах «Ліра» і SCAD.

Подальші роботи необхідно проводити в напрямі досліджень спільної роботи бетону і арматури і перевірити відповідність роботи розглянутих моделей для бетону, що працює на розтяг.

Список літератури

1. Sakhno S., Liulchenko Y., Chyrva T., Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method, Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph. — Sofia: Publishing House “St.Ivan Rilski”, 2020. , p. 326 — 340.
2. Дьячкова, А. А. Расчет усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами / А. А. Дьячкова, В. Д. Кузнецов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 25 – 28.
3. Мурин, А. Я. Моделювання роботи залізобетонних балок, підсилених зовнішньою фібропластиковою арматурою, у програмному комплексі «Ліра» /А. Я. Мурин, М. М. Іванів // Вісник Львівського національного аграрного університету. –2012. – №13. – С. 94 – 98.
4. Antonio F. Barbosa and Gabriel O. Ribeiro Analysis of reinforced concrete structures using ansys nonlinear concrete model. https://www.researchgate.net/publication/2584814_Analysis_Of_Reinforced_Concrete_Structures_Using_Ansys_Nonlinear_Concrete_Model
5. Diyyala N., Reshma V., P. Polu Raju Modelling and analysis of reinforced concrete beam under flexure using ANSYS, International Journal of Civil Engineering and Technology, Volume 8, Issue 3, March 2017, pp. 1103–1111 Article ID: IJCIET_08_03_113
6. T. Subramani, R. Manivannan, M. Kavitha Crack Identification in Reinforced Concrete Beams Using ANSYS, T. Subramani et al Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, Issue 6(Version 6), June 2014, pp.133-141
7. Babu R.R., Benipal G.S. & Singh A.K.: “Constitutive modelling of concrete an overview”. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 6(4): 211-246, 2005.], [Camanho P.P, Davila C.G & Ambur D.R.: “Numerical simulation of delamination growth in composite material”. NASA-TP-211041, 2001.
8. Cruz J.S., Barros J. & Azevedo A.: “Elasto-plastic multi-fixed smeared crack model for concrete”. Report 2004.
9. Hsu T.T.C. & Zhu R.R.H.: “Softened membrane model for reinforced concrete elements in shear”. *ACI Structural Journal*. 99(4): 460-469, 2002.
10. Yang Z.J., Chen J.F. & Proverbs D.: “Finite Element Modelling of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams”. *Construction and Building Materials*. 17(1): 3-13, 2003.
11. Chaudhari, S.V.; Chakrabarti, M.A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS. *Int. J. Comput. Appl.* 2012, 44, 14–18.
12. Jirásek, M. Damage and Smeared Crack Models. In *Numerical Modeling of Concrete Cracking*; Hofstetter, G., Meschke, G., Eds.; CISM International Centre for Mechanical Sciences, Springer: Vienna, Austria, 2011; Volume 532.

Рукопис подано до редакції 16.03.2020

УДК [624.046.5:622.012]:536.75

Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,

В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, кандидати техн. наук, доценти

Криворожский национальный университет

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО КОМПЛЕКСА ШАХТ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ ЭНТРОПИИ

Цель. Построение научно обоснованной методологии диагностики технического состояния, оценки надежности и степени физического износа для зданий и сооружений шахтного комплекса с использованием математического аппарата и вероятностно-статистических методов технической диагностики и методов теории информации.

Методы. Использование общенаучных методов исследования: статистических, теории вероятностей, теории информации, моделирования, формализации, анализа (в том числе ретроспективного) – при построении решения на уровне отдельных конструктивных элементов; основных принципов организации систем и системного анализа – при построении модели диагностирования.

Научная новизна. Научная новизна предложенного в работе метода – адекватное описание оценки и анализа надежности выполнения работ при обследовании и реконструкции промышленных объектов шахт с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных с учетом математического моделирования возможных дефектов.

Практическая значимость. Состоит в реализации метода анализа в практической обследовательской деятельности, что придаст уверенность эксперту при определении технического состояния объекта, позволит обоснованно определить комплекс мероприятий, и эффективно планировать эксплуатационные расходы и затраты на приведение объекта в исправное состояние. Предложенная методика диагностирования может быть использована при создании современных нормативных документов по оценке состояний, надежности и физического износа рассматриваемых зданий на основе единого вероятностного подхода.

Результаты. Предложенная методика определения надежности эксплуатируемых зданий и сооружений поверхности может быть использована на практике для оценки вида технического состояния и безопасного остаточного ресурса.

Получены расчётные значения как энтропии (H) так и дивергенции Кульбака-Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции показали, что с ростом воздействия коррозии значение первой (H) растёт, а второй величины (D_{KL}) уменьшаются, что свидетельствует об износе элементов конструкции так и системы в целом.

Ключевые слова: объекты поверхности шахт, надёжность, дивергенция Кульбака-Лейблера, живучесть, распределение, напряжения, предел прочности.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-73-83

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Качество выполнения работ реконструкции промышленных объектов шахт - это максимально возможное устранение выявленных дефектов. Обследование сооружений поверхности – процедура определения их технического состояния. На основе результатов (фактических значений контролируемых параметров) технического обследования здания или иного сооружения можно оценить пригодность объекта для дальнейшей эксплуатации, реконструкции или определить необходимость в восстановлении, усилении, ремонте элементов конструкций. Эта задача огромной важности, так как не выявленные дефекты проявляются в виде аварийных ситуаций в процессе эксплуатации промышленных объектов шахт [21].

Современные научные и производственные представления, на которых базируется большинство методик определения фактического состояния конструктивных элементов объектов поверхности шахт, опираются на стандартные представления. При этом разработка и внедрение новых методик, основанных на комплексном определении фактического состояния объекта, позволяет продлевать их безопасную эксплуатацию.

Анализ исследований и публикаций. Как отмечено выше, для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и здания в целом, а также для приведения в современный и согласованный вид нормативной литературы, существующей в обследовательской деятельности, впервые предлагается использовать математический аппарат технической диагностики, основанный на вероятностно-статистических методах с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации [21].

В работе для диагностики конструктивных элементов использовались статистические методы такие как метод Байеса, процедура применения которого для сложных технических систем отображена в трудах И. А. Биргера, А. Зельнера.

В своих работах И. А. Биргер совершенно справедливо отмечает, что конечной целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса систем, а техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности. Таким образом, техническое состояние и его главный признак – надежность, следует рассматривать как процесс, обеспечивающий создание и поддержание нормальных условий функционирования зданий и сооружений на современном уровне [21].

Проблемы надежности строительных конструкций на основе вероятностных подходов рассмотрены в работах многих ученых, среди которых можно отметить труды В.В. Болотина, С.Л. Буторина, Б.А. Гарагаша, А.П. Кудзиса, О.В. Лужина, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаницына, А.Г. Ройтмана, Н.Н. Складнева, Б.И. Снарскиса, С.А. Тимашева, В.С. Уткина, С.Г. Шульмана, Г.С.Шульмана и других авторов. Значительная роль в развитии теории надежности принадлежит также и зарубежным ученым: Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати, А.М. Фрейденталь, Г. Шпете и др. [21].

В данной работе представлена методика использования вероятностно-статистического подхода при оценке технического состояния строительных конструкций и систем в целом.

Постановка задачи. Оценка технического состояния элементов конструкций зданий и сооружений проводится путем сопоставления предельно допустимых (расчетных или нормативных) и фактических значений величин, характеризующих прочность, устойчивость, деформативность и другие эксплуатационные характеристики конструкций. При проектировании объектов поверхности их эксплуатационные характеристики являются заданными, это обеспечивается путем введения различных коэффициентов надежности. Поэтому физический износ конструктивных элементов и объекта в целом не моделируется. Практически довольно сложно на стадии проектирования определить будущие затраты по обеспечению надежной эксплуатации здания.

Выполнить ретроспективный анализ результатов обследований прошлых лет, сбор, обработку и обобщение информации по состояниям (диагнозам) и характерным повреждениям (диагностическим признакам), и разработать методики на основе процедур вероятностно-статистического аппарата технической диагностики и элементов теории информации, позволяющую оценивать не только состояние, но и надежность, а также физический износ всех структур всех уровней.

Изложение материала и результаты. За время эксплуатации поверхностного комплекса шахт Криворожского железорудного бассейна произошёл ряд аварий и катастроф, которые были вызваны разрушениями конструкций горнотехнических сооружений. Характерный архитектурно-строительный облик современных горных предприятий определяется прежде всего наличием таких сооружений на поверхности как башенные копры значительной высоты, эстакадные мосты, соединяющие здания различного назначения, стальные укосные копры, аккумулирующие или погрузочные бункера, обогатительные фабрики, административно-бытовые комбинаты современной архитектуры.

Здания и сооружения, образующие поверхность горного предприятия как единую промышленную площадку, классифицируются по следующим основным признакам: функциональным; архитектурным; конструктивным; по капитальности и огнестойкости.

По функциональному назначению здания и сооружения подразделяются на следующие основные группы: производственные, служащие для размещения основных видов производства (укосные и башенные копры, предназначенные для выдачи полезных ископаемых и породы на поверхность; бункера, служащие для хранения и погрузки полезных ископаемых; обогатительные фабрики, предназначенные для обработки полезных ископаемых и т. д.); вспомогательные (механические и ремонтные мастерские; склады различного назначения; административно-бытовые комбинаты, в которых размещаются бытовые помещения, помещения управлений, общественного питания, здравоохранения, культурного обслуживания и т.д.); энергетические, обеспечивающие снабжение горного предприятия электроэнергией, паром, сжатым воздухом (ТЭЦ, котельные, здания и сооружения электроподстанций, распределительных устройств, компрессорные и т. д.); транспортные (галереи, разгрузочные эстакады, гаражи и т. д.); санитарно-технические, предназначенные для обслуживания систем водопровода и канализации на горном предприятии (водозаборные и очистные сооружения, насосные, отстойники шахтных вод и т.д.).

По признакам формирования и совершенствования проектных решений, организации и технологии строительства горнотехнические здания и сооружения делятся на две группы:

А-здания и сооружения, связанные с основным производственным процессом (добычей, переработкой и погрузкой полезного ископаемого);

Б-здания и сооружения производств вспомогательного назначения, обслуживающих основные процессы, а также санитарно-бытовых служб, предприятий общественного питания, здравоохранения, культурного обслуживания, управления, конструкторских бюро, сооружений водопроводов, канализации, тепло- и электроснабжения, здания заводов машиностроения и баз стройиндустрии.

Принципы компоновки и основные параметры зданий и сооружений группы А и Б различны.

Для зданий и сооружений группы А доминирующим фактором при определении их параметров и габаритов является технологическая схема. Основные производственные здания на поверхности горных предприятий отличаются ярко выраженной индивидуальностью, отражающей специфику предприятий горной промышленности: наличие крупногабаритного оборудования, большие статические и динамические нагрузки, высотное расположение оборудования, воздействие депрессии или компрессии, повышенная взрыво- и пожароопасность и т. д. Это,

как правило, многоэтажные здания и сооружения с нестандартным шагом вертикальных несущих конструкций.

Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений группы Б в меньшей степени зависят от специфики горных предприятий. Главным фактором при определении их параметров и габаритов является унификация строительных конструкций. Это, как правило, одноэтажные здания, за исключением административно-бытовых комбинатов и блочно-комплектных, выделенных в отдельные подгруппы. Характерной особенностью зданий группы Б является то, что при их проектировании и строительстве широко используются типовые конструкции и типовые проекты межотраслевого назначения.

Группа А включает в себя четыре подгруппы, классифицированные по технологическим признакам. При этом объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений подгрупп существенно отличаются друг от друга. Группа Б включает в себя также четыре подгруппы, здания и сооружения в которых классифицированы по архитектурно-конструктивным признакам.

А-1 Надшахтные здания и сооружения - копры и приствольные здания

А-2 Здания и сооружения по переработке полезных ископаемых горных предприятий и обогатительных фабрик – дробильно-сортировочные отделения, главные, сушильные, фильтр-прессовые корпуса, радиальные сгустители

А-3 Сооружения погрузочно-складских комплексов горных предприятий и обогатительных фабрик - приемные устройства, вагоно-опрокидыватели, погрузочные, дозировочные, аккумулирующие бункеры, погрузочные пункты, аварийные, усреднительные склады, прочие складские помещения сыпучих материалов и др.

А-4 Сооружения конвейерного, железнодорожного, автомобильного, трубопроводного транспорта

Б-1 Одноэтажные каркасные здания из типовых конструкций (сборных железобетонных и металлических) - вентиляторные, насосные, депо, гаражи, цеха, машзаводы, базы стройиндустрии и др.

Б-2 Многоэтажные, каркасные и каркасно-панельные здания из типовых сборных железобетонных конструкций-АБК, столовые и др.

Б-3 Типовые межотраслевые здания и сооружения из сборных железобетонных и металлических конструкций- объекты теплоснабжения, электроснабжения, водоснабжения, канализации и др.

Б-4 Блочно-комплектные здания и встроенные помещения производственного и служебно-бытового назначения.

А-здания и сооружения, связанные с основным производственным процессом (добычей, переработкой и погрузкой полезного ископаемого).

А-1 – копры.

А-2 Надшахтные здания и сооружения.

А-3 здания подъёмных машин и дробильно-сортировочные.

А-4 галереи и эстакады.

Б-здания и сооружения производств вспомогательного назначения, обслуживающих основные процессы.

Большинство сооружений шахтной поверхности имеет срок эксплуатации более 30-40 лет и подверглись значительному физическому износу. Переход конструкций в предельное состояние создаёт угрозу для жизни и здоровья технического персонала шахты. Существующие в настоящее время нормативные методики определения технического состояния конструкций имеют характер общих методических указаний и в достаточной мере не учитывают характер действительной работы этих сооружений. В связи с этим оперативное выявление аварийных состояний службами технической эксплуатации и инженерным составом специализированных организаций весьма затруднительно, а в ряде случаев невозможно, поскольку очаги физического износа конструкций, как правило, находятся в недоступных и труднодоступных местах.

В Криворожском национальном университете систематически выполняются работы по технической диагностике, усилению и реконструкции строительных конструкций горнотехнических сооружений шахтной поверхности [3]. Всего к настоящему времени накоплены диагности-

ческие данные по семи основным предприятиям «ВостГОК», «СевГОК», «КЖРК», «СУХА БАЛКА», «ЦГОК», «ЮГОК», «ИнГОК».

Для наглядного рассмотрения сложившейся ситуации на исследуемых объектах, дальше приведем картину в виде графиков развития интенсивности дефектов во времени.

На рис. 1 представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов копров и надшахтных зданий во времени. В первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессирования прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается скачкообразное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 60 лет наблюдаем резкое увеличение.

Выделяются три группы элементов - подкопровая рама, станок, укосина. Особенно вызывают удивление элементы укосины. Но это может быть связано с неправильным отношением к значимости этой группы при эксплуатации

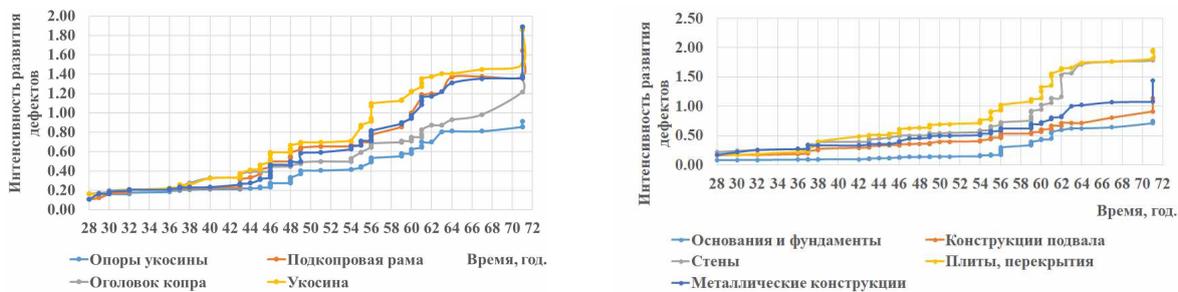


Рис. 1. Распределение коррозионных процессов элементов копров и надшахтных зданий во времени

На рис. 2 представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов машинных зданий (сортировки) галерей и эстакад во времени. Здесь, как и в предыдущем случае, в первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессирования прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается равномерное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 57 лет наблюдаем резкое увеличение. Выделяются две группы элементов - перекрытия и стены. Также в зоне риска находятся металлические конструкции.

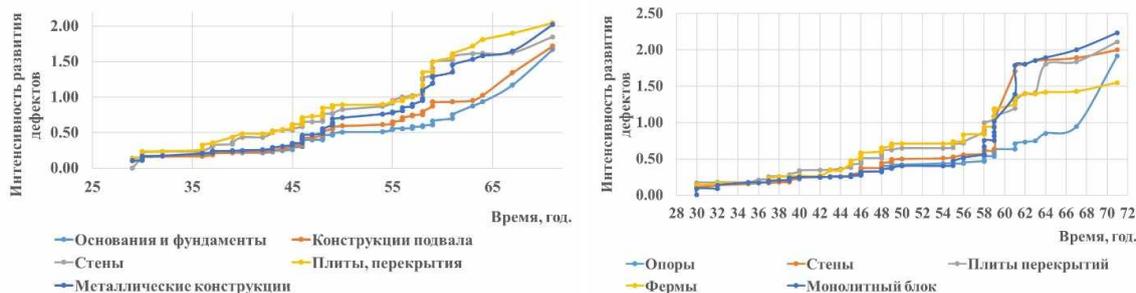


Рис. 2. Распределение коррозионных процессов элементов машинных зданий (сортировки) галерей и эстакад во времени

На рис. 3. представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов вспомогательных зданий во времени. Здесь, как и в предыдущих случаях, в первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессированная прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается равномерное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 57 лет наблюдаем резкое увеличение. Уже выделяются три группы элементов - перекрытия, стены и металлические конструкции.

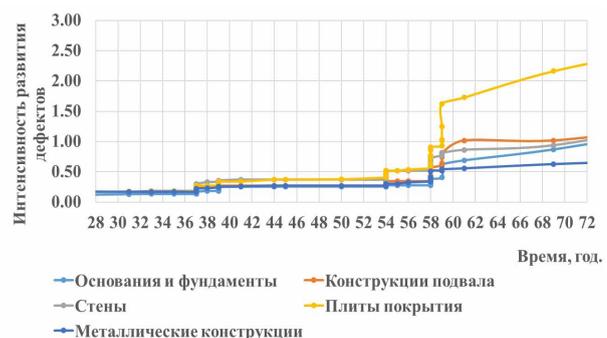


Рис. 3. Распределение коррозионных процессов элементов вспомогательных зданий во времени

Для установления основных закономерностей физического износа использовались следующие методы: для выявления характерных эксплуатационных повреждений и зонирования конструкций применялся факторный анализ в виде последовательных двухсторонних классификаций [4]; для определения условных скоростей коррозионного и абразивного износа элементов металлических конструкций применялись статистические методы обработки диагностических данных [4]; для определения скоростей коррозии в характерных точках применялись ускоренные лабораторные испытания [5, 6]; для оценки влияния эксплуатационных повреждений применялся метод анализа разрушения упругопластических систем [7].

В сложных системах, отказ даже одного элемента может привести к исключительно серьезным последствиям. Поэтому основной задачей является выбор наилучших конструктивных и механических параметров системы с учетом таких факторов, как стоимость, надежность, вес и объем. Для достижения этой цели необходимо проведение оценки надежности элементов на этапе проектирования [22].

В основу расчетов надежности заложено то, что каждый элемент обладает определенной прочностью по отношению к нагрузкам.

Обычный способ проектирования, основанный на применении таких весьма произвольных коэффициентов, как коэффициент безопасности и запас прочности, не позволяет судить о вероятности отказа элемента. Кроме того, даже при одном и том же коэффициенте безопасности вероятность отказа может колебаться в весьма широких пределах.

Использование коэффициента безопасности оправдано только в том случае, когда его значение задано на основе большого опыта применения элементов, аналогичных рассматриваемому. Кроме того, конструктивные параметры часто являются случайными величинами, что полностью игнорируется при обычных методах проектирования [22].

Ясно, что обычный детерминистский подход к проектированию не является удовлетворительным с точки зрения анализа надежности.

Поэтому необходима другая методика проектирования, которая учитывала бы вероятностный характер конструктивных параметров, с тем, чтобы надежность элементов можно было оценивать на этапе проектирования [22].

В этом случае в явном виде задаются все конструктивные параметры, которые в свою очередь определяют распределения напряжения и прочности. Если оба эти распределения определены, то можно вычислить вероятность безотказной работы элемента (рис. 4).

При этом под мерой надежности понимается вероятность того, что максимальное напряжение, возникающее под действием нагрузки, не превысит несущей способности (прочности) элемента [1], т.е.

$$H = P(R > S). \quad (1)$$

где H – надежность; P – вероятность события; R – несущая способность; S – действующее максимальное напряжение.

В общем случае

$$P(R > S) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(S) \cdot f(R) dR dS. \quad (2)$$

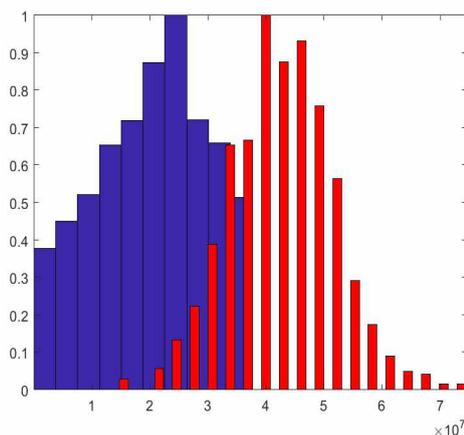


Рис. 4. Статистические распределения плотности вероятности предела прочности стали (синяя гистограмма), и действующие распределение напряжений в стержнях (красная гистограмма)

С использованием этого выражения можно вычислить вероятность безотказной работы элемента при различных сочетаниях законов распределения несущей способности и нагрузки. Например, в случае нормального распределения нагрузки и несущей способности вероятность безотказной работы определяется выражением

$$P(R > S) = \frac{1}{2} + F\left(\frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}}\right) \quad (3)$$

где $\Phi()$ – нормированная функция Лапласа; m_R и m_S – математическое ожидание величин R и S , соответственно; σ_R и σ_S – среднее квадратическое отклонение величин R и S , соответственно.

В реальных ситуациях несущая способность элемента и его долговечность зависит от геометрических размеров, характеристик материала и влияющих факторов (на рис. 5, в качестве примера, представлено распределение действующих напряжений в конструктивных узлах на отметке 54 башенного копра шахты Юбилейная). Если геометрические параметры являются детерминированными величинами, то характеристики материала элемента носят случайные величины с заданными законами распределения, проявление и интенсивность внешних факторов в большинстве случаев носит стохастический характер, что не дает возможность описать их как теоретически, так и эмпирически.

В связи с этим протекающие случайные процессы резонно заменить срезами одномерных случайных величин.

Из выше рассмотренного следует, что основу системы надежности положены статистические методы, оперирующие параметрами функции распределения, которые описывают как нагруженное состояние конструктивных элементов, так и изменение во времени (рис. 6).

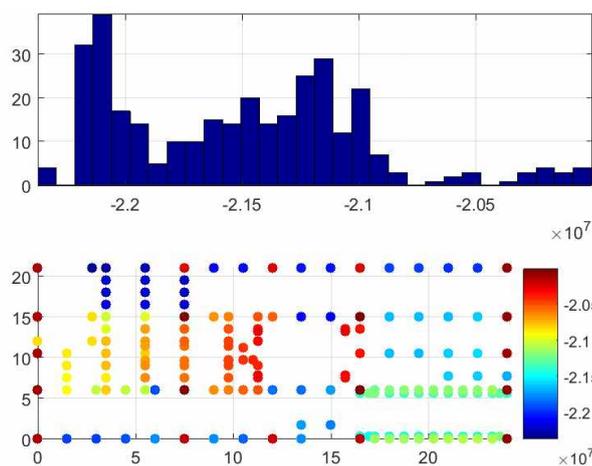


Рис. 5. Распределение действующих напряжений в конструктивных узлах на 54 отм башенного копра шахты «Юбилейная»

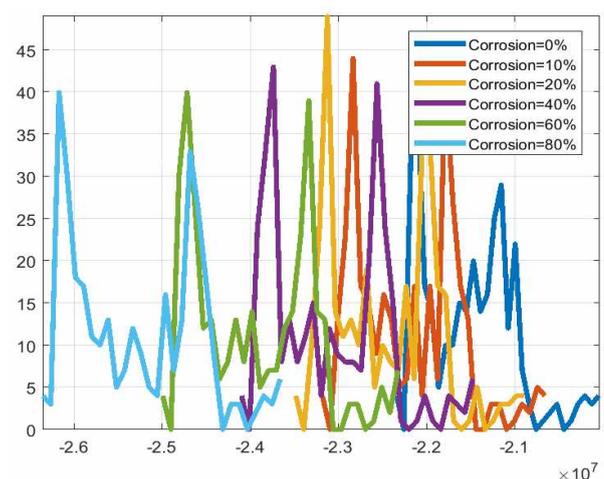


Рис. 6. Графическое представление распределения напряжений узлах элементов на 54 отм., башенного копра шахты «Юбилейная» и изменения напряжений в зависимости от действия коррозии

Надежность объекта зависит от технического состояния групп однотипных элементов, образующих всю систему здания.

Скелет здания со временем приобретает иерархическую систему дефектов с многоступенчатыми, последовательными повреждениями.

С точки зрения теории связи и информации, принятый вид информационной энтропии должен удовлетворять требованиям независимости сообщений при их многоступенчатом поступлении. Если количество разрушенных связей между структурными элементами принять как количество сигналов от этих связей, то открывается принципиальная возможность использования формулы информационной энтропии H , по К.Э. Шеннону.

В этом случае процесс постепенного изменения состояния элементов конструкций можно описать по формуле, показывающей величину (степень) неопределенности при многоступенчатом независимом сообщении со многих источников.

Для установления основных закономерностей физического износа использовались следующие методы:

- факторный анализ в виде последовательных двусторонних классификаций;
- корреляционно-регрессионный анализ.

Установлено, что зависимость интенсивности развития дефектов (рис. 7) описывается степенной функцией

$$y = 2 \times 10^{-5} x^{2.64},$$

коэффициент детерминации ($R^2=0.9665$) указывает на высокий уровень адекватности данной зависимости.

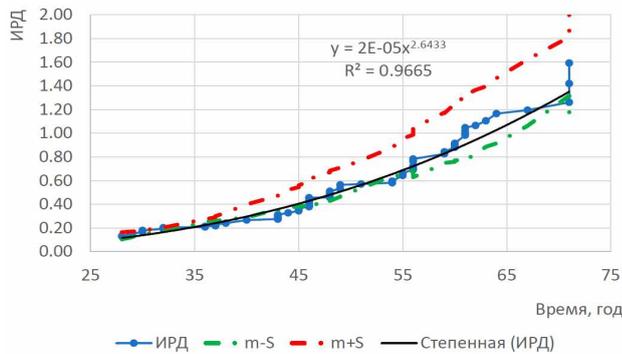


Рис. 7. Интенсивность развития дефектов конструктивных элементов группы А-1 со временем эксплуатации

Приняв математическое ожидание возникновения дефекта равное нулю, определим среднее квадратическое отклонение значений S_X , что позволит вычислить дифференциальную и полную энтропию для значений непрерывной величины, учитывая, следующие

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_X} e^{-\frac{X^2}{2S_X^2}}; h_X = \log \sqrt{2\pi} S_X$$

где S_X – среднее квадратическое отклонение значений измеряемой величины X .

Полная энтропия при нормальном законе распределения, с учетом погрешности, равна

$$H_X = h_X - \log \Delta X = \log \frac{\sqrt{2\pi} S_X}{\Delta X} = \log \frac{4,12 S_X}{\Delta X}$$

На основании полученной информации построены графические зависимости, показывают динамику изменения информационной энтропии (рис. 8).

График на рис. 8 характеризует рост степени неопределенности технического состояния здания в зависимости от величины среднего квадратического отклонения. Последняя величина находится в обратной зависимости к оценке надежности объекта, и по сути является законом деградации строительного объекта.

Для практического применения теоретическая кривая, показанная на рис. 9 для всех групп объектов поверхности, будет разделена на четыре линейные участки, на стыке которых скорость энтропии скачкообразно меняется. Известно, что всякое изменение скорости энтропии информирует об изменении технического состояния объекта.

Вторым показателем оценки "живучести элемента", который основывается на фактической и заданной плотности вероятностного распределения предела прочности, в качестве меры принимаем расстояние [Кульбака-Лейблера](#).

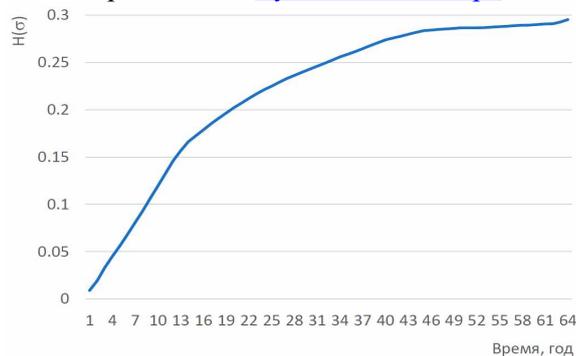


Рис. 8. Интенсивность развития дефектов конструктивных элементов группы А-1 со временем эксплуатации

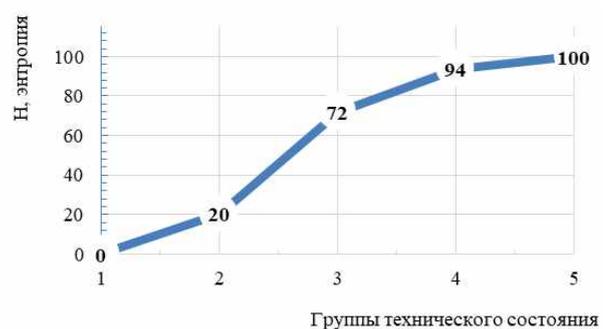


Рис. 9. Скорость энтропии в элементах копра при изменении технического состояния объекта

Расстояние (расхождение) Кульбака-Лейблера (РКЛ) или относительная энтропия $H(P||Q)$ - это неотрицательный функционал, являющийся несимметричной мерой удалённости друг от друга двух вероятностных распределений, определённых на общем пространстве элементарных событий.

Для дискретных вероятностных распределений P и Q с числом элементарных событий n расхождение Кульбака-Лейблера распределения Q относительно распределения P определяется как

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{i=1}^n p_i \log \frac{p_i}{q_i} \quad (4)$$

Основание логарифма в этой формуле существенной роли не играет. Его выбор позволяет зафиксировать конкретный вид функционала из семейства эквивалентных функционалов и равносителен выбору единицы измерения расхождения Кульбака–Лейблера (подобно ситуации с вычислением энтропии), поэтому возможно применение логарифма с любым основанием, большим единицы. Расхождение Кульбака–Лейблера является безразмерной величиной независимо от размерности исходных случайных величин.

В связи с тем, что формы идентифицированных законов изменяются как по высоте, так и от конструктивных особенностей высотной отметки. Так же установлено, что деградация формы закона происходит во времени и связана с такими процессами как коррозия, механический износ и накопление других повреждений. Поэтому для оценки остаточного ресурса как системы в целом так и составных ее элементов предпочтительно использовать не чувствительные к закону распределения методы оценки, то есть использовать непараметрические показатели такие как дивергенция Кульбака–Лейблера (D_{KL}), что более предпочтительней чем метод Байеса.

В ходе проведенного анализа получены расчётные значения дивергенции Кульбака–Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции (табл. 1).

Установлено, что с ростом воздействия коррозии значение D_{KL} уменьшаются. Таким образом, можно видеть, что параметрическая оценка расстояния Кульбака–Лейблера в случае максимального значения $D=14.03$, соответствует расчетному (проектному) значению, тогда как минимальное ($D=0.468$) соответствует максимальному воздействию коррозии $K=80\%$, что соответствует минимальному уровню надежности конструктивного элемента. Графическое представление изменения дистанции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии в элементах представлено на рис. 10.

Таблица 1

Зависимость D_{KL} от влияния коррозии

Коррозия, %	Дивергенция Кульбака–Лейблера (D_{KL})
0	14.03
20	8.659
40	4.616
60	1.885
80	0.468

Связано это с тем, что происходит смещение закона распределения напряжений в элементах в сторону закона распределения предела прочности (рисунок. на рисунке представлены графики теоретических плотностей распределения вероятностей, соответствующие выбранным модельным выборкам (красная линия - предел прочности, соответствует плотности нормального распределения; синяя - распределение напряжений в элементах конструкции, плотность распределения "сложного" закона устанавливается на первом этапе алгоритма), а это приводит к уменьшению расстояния между законами распределений и снижению остаточного предела прочности как элемента так и системы в целом.

Совместим графическое представление изменения дистанции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии с графическим представлением скорости энтропии в элементах объекта в целом при изменении технического состояния объекта (рис. 11). Пересечение данных энтропийных зависимостей является – критической точкой прохождения объектом предельных состояний деградации. После ее прохождения начинаются необратимые дефектные процессы в элементах конструкций. При не устранении дефектов, объект переходит в опасное аварийное состояние и вследствие чего происходят необратимые, а часто и непредсказуемые, процессы деградации.

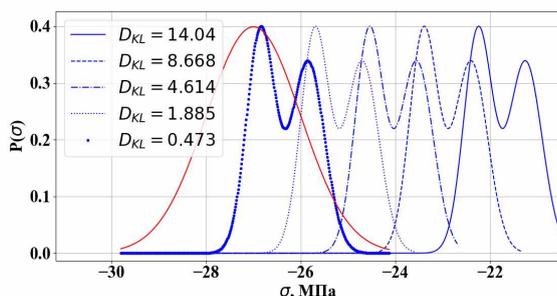


Рис. 10. Графическое представление изменения дивергенции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии

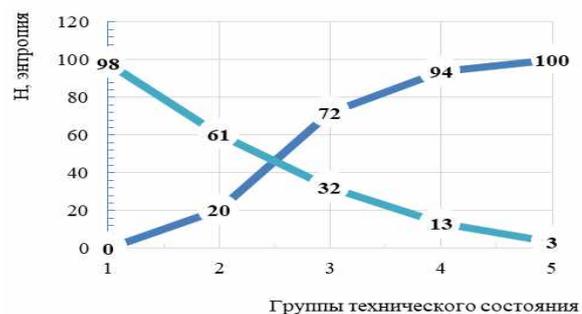


Рис. 11. Графическое представление определения предельных состояний в элементах копра для принятия решения

Следует отметить, что если по истечению ресурса ремонтно-восстановительные мероприятия на объекте не будут проведены, то наступает период повышенной аварийности, а следовательно, к повышению убытков, которые будут несравненно превышать номинальную стоимость предупредительных мероприятий.

Предложенная методика на основе энтропии для оценки конструктивной безопасности эксплуатируемых зданий может быть использована на практике для оценки надежности и технического состояния остаточного ресурса.

Выводы и направление дальнейших исследований. Для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и сооружения в целом, впервые разработаны методы использования аппарата технической диагностики, основанного на вероятностно-статистических методах (методе Байеса, методах статистических решений) с включением в процедуру диагностирования необходимых понятий теории информации.

Результаты численного решения при выполнении вероятностного анализа технического состояния всех элементов показали эффективность предложенной методологии диагностирования. Характерной особенностью предложенного алгоритма анализа является то, что он не базируется на привязке к конкретному закону распределения.

Получены расчётные значения как энтропии (H) так и дивергенции Кульбака-Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции показали, что с ростом воздействия коррозии значение первой (H) растут, а второй величины (D_{KL}) уменьшаются, что свидетельствует об износе элементов конструкции так и системы в целом.

Список литературы

1. **Бровко Д. В.** Вероятностный подход при независимом многоступенчатом поступлении сигналов о дефектах элементов промышленных объектов на поверхности шахт / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Гірничий вісник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – 2015. – №100. – С. 62–67.
2. **Brovko, D. V.** System analysis of the accident risk of surface mining objects as a basis for their safe operation. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // Computer Science, Information Technology, Automation, 2016. –No4, p.p. 20-24.
3. **Andreev, B. M.** Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction. / **B. M. Andreev, D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // Metallurgical and Mining Industry, 2016. –No9. pp. 54-57.
4. **Brovko, D. V.** Dynamics of structures of mining enterprises as one of the components in determining their technical condition. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number, 2016.
5. **Андреев Б. М.** Забезпечення надійності поверхневого комплексу методом прогнозування технічного стану елементів будівель і споруд / **Б. М. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – №41. – С. 87–92.
6. Globalna aspekty Ekonomii Światowej i Stosunków Międzynarodowych w warunkach niestabilności gospodarczej: monografia Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Praktycznej, Częstochowa, Akademia polonijna, 2016. – 897 s.
7. **Бровко Д. В.** Дослідження конструкцій металевого арочного кріплення в умовах криворізького залізорудного басейну. / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2015. – №123. – С. 99–106.
8. **Бровко Д. В.** Визначення надійності шахтних будівель та споруд в умовах обмеженої інформації / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Щомісячний науковий журнал «Smart and Young». – 2016. – №3. – С. 152-157
9. **Бровко Д. В.** Оценка риска надежности конструкций эксплуатируемых объектов горнопромышленного предприятия / **Б. Н. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Сборник научных трудов: БНТУ. – Минск, 2013. – т.1. – С. 180–190.
10. **Андреев Б. М.** Визначення надійності та обґрунтування параметрів об'єктів на поверхні шахт з урахуванням переходу на полегшені огорожувальні конструкції / **Б. М. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Metallurgical and Mining Industry. – Днепропетровск, 2015. – №12. – С. 378–382.
11. **Brovko D. V.** Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko** //Scientific Bulletin of the National Mining University. - Dnipro, 2018 - No. 4, p.p. 66-71. doi: 10.29202/nvngu/2018-4/14
12. **Karapetrou S.** Time-building specific" seismic vulnerability assessment of a hospital RC building using field monitoring data. / **S. Karapetrou, M. Manakou, D. Bindi, B. Petrovic, K. Pitilakis** // Engineering Structures, 2016. Volume 112. - pp. 114-132. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.009
13. **Капырин П.** The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility. / **П. Капырин, N. Sevryugina**// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering: Construction - The Formation of Living Environment, FORM 2018, Volume 365, Issue 4. - pp. 1-10. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042018
14. **Han K.K.** Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study./ **K.K. Han, M. Golparvar-Fard** // Automation in Construction, 2017. Volume 73. - pp. 184-198. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.004

15. Fenton G.A. Reliability-based geotechnical design in 2016 Canadian Highway bridge design code. / **G.A. Fenton, F. Naghibi, D. Dundas, R.J. Bathurst, D.V. Griffiths** // Canadian Geotechnical Journal, 2016. Volume 53. - pp. 236-251. DOI: 10.1139/cgj-2015-0158
16. Yigit C.O. Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. / **C.O. Yigit** // Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016. Volume 7, Issue 1. - pp. 360-383. DOI: 10.1080/19475705.2014.9177248
17. Stupnik N. Features of underlying levels opening at "ArsellorMittal Kryvyi Rih" underground mine. / **N. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pismennij, E. Kalinichenko** // New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining, 39–44.
18. Fedko M.B. Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores. / **M.B. Fedko, I.O. Muzyka, S.V. Pysmennyi, O.V. Kalinichenko** // Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019. Volume 1, 37–41. DOI: [10.29202/nvngu/2019-1/20](https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/20)
19. Stupnik N. The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine "Gigant-Gliboka" of central iron ore enrichment works (CGOK). / **N. Stupnik, V.O. Kalinichenko, O.V. Kalinichenko, I.O. Muzika, S. Pismennij, M.B. Fed'ko** // Metallurgical and mining industry, 2015. Volume 7, 377-383.
20. Kalinichenko V. Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. / **V.O. Kalinichenko, S. Pismennij, N. Shvaher, O. Kalinichenko** // E3S Web of Conferences, 60, art. no. 00041 DOI: [10.1051/e3sconf/20186000041](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000041).
21. Соколов В. А. Вероятностный анализ технического состояния и надежности строительных конструкций зданий старой городской застройки: дис. докт. техн. наук : 05.23.01 / **Соколов Владимир Алексеевич** – Санкт-Петербург, 2016. – 497 с.
22. Смирнов А.А. Методические указания по лабораторной работе по курсу "Надежность" для студентов каф. "Колесные машины" / **А.А. Смирнов**. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. , 2017. – 15 с

Рукопись поступила в редакцию 17.03.2020

УДК 622.73:622.7.016

Д. В. ШВЕЦЬ, ст. викладач
Криворізький національний університет

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ ХІМІКО-МІНЕРАЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИКАХ

Мета. Розробка математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках з метою подальшого синтезу системи управління технологічного процесу подрібнення.

Метод. Проведено системний аналіз технологічного процесу подрібнення на рудозбагачувальних фабриках, визначено вектори керованих та некерованих вхідних змінних, вектор вихідних змінних та вектор збурень. Здійснено декомпозицію технологічного процесу подрібнення. Проведено структурний синтез моделі технологічного процесу подрібнення.

Наукова новизна. Запропоновано математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках.

Практичне значення. Розроблена структура технологічного процесу подрібнення представляє собою «м'яку» математичну модель, що є структурно стійкою при випадкових збуреннях змінних. Отримана математична модель має можливість додавання нових змінних і усунення, при виникненні потреби, старих змінних, що забезпечує можливість в процесі використання моделі підключення нових приладів та пристроїв, які будуть надавати додаткову інформацію про стан технологічного процесу подрібнення.

Результати. Проведений системний аналіз технологічного процесу подрібнення на рудозбагачувальних фабриках дозволив визначити склад векторів некерованих вхідних змінних (вміст загального та магнітного заліза в залізорудній сировині, її міцність, вологість, середня крупність після дроблення за вмістом класу -20мм), керованих вхідних змінних (витрати залізорудної сировини в млин, витрати води в млин), вихідних змінних (гранулометричний склад на зливні класифікатора, щільність пульпи на зливні класифікатора, вміст заліза в промпродукті, втрати заліза в хвості збагачення, вихід заліза, видобуток заліза) та некерованих збурень (зношення футерування млина, зношення шарів в млині, витрати електроенергії). Розроблено математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках. Напрямок подальших досліджень полягає в синтезі системи управління технологічним процесом подрібнення залізорудної сировини.

Ключові слова: залізорудна сировина, математична модель, технологічний процес подрібнення, хіміко-мінералогічні характеристики, ядернофізичні методи, магнітометричні методи.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-83-90

© Швець Д. В., 2020