

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ШАХТ

*Д.В. Бровка, Ю.Г. Вилкул, Н.И. Ступник, «Криворожский национальный университет»,  
Украина*

Использован вероятностно-статистический подход при определении технического состояния поверхностных объектов шахт и их конструктивных элементов математическими методами технической диагностики, а также получены данные, по оценке параметров их надежности. Разработанная методика может быть использована для контроля технического состояния и прогнозирования безопасного остаточного ресурса несущих конструкций в условиях действующих и законсервированных шахт.

Большинство сооружений шахтных поверхностных комплексов эксплуатируются более полувека и претерпели значительный физический износ. Переход конструкций в предельное напряженное состояние несет угрозу для жизни и здоровья технического персонала шахты. Существующие нормативные методики определения технического состояния конструкций имеют характер общих методических указаний и не учитывают характер реальной нагрузки элементов 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, зачастую, находятся в труднодоступных местах.

Обследование сооружений поверхности – ответственная процедура диагностирования их технического состояния. На основе полученных, в результате технического обследования, фактических значений контролируемых параметров оценивается пригодность объекта для дальнейшей эксплуатации, необходимость в реконструкции, в восстановлении, усилении и ремонте элементов конструкций. Невыявленные дефекты приводят к авариям в процессе эксплуатации промышленных объектов шахт. Существующий научный и производственный опыт, на котором базируется большинство методик определения фактического состояния конструктивных элементов объектов поверхности шахт, весьма традиционен и гибок. При этом разработка и внедрение новых методик, основанных на современных подходах к комплексному определению фактического состояния объектов поверхности, безусловно, продлит их безопасную эксплуатацию.

Для решения задач по достоверному определению технического состояния, уровня надежности и степени износа конструктивных элементов зданий и сооружений в целом, а также для совершенствования методов существующей обследовательской деятельности, впервые предлагается инкорпорировать в математический аппарат технической диагностики вероятностно-статистические методы с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации.

В выполненных исследованиях в качестве одного из основных статистических методов технической диагностики применен метод Байеса, особенности использования которого для сложных технических систем изложены в трудах И.А. Биргера, А. Зельнера. [1,2] Справедливо отмечено, что конечной целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса систем и что техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности. Таким образом, техническое состояние и его главный признак – надежность, с ее основным разделом – технической диагностикой, базирующейся на обследовании технического состояния, – все это следует считать звеньями одного процесса, обеспечивающего создание и поддержание нормальных условий функционирования зданий и сооружений в соответствии с современными требованиями.

Оценка технического состояния элементов конструкций зданий и сооружений осуществляется путем сопоставления предельно допустимых (расчетных или нормативных)

и фактических значений параметров, характеризующих прочность, устойчивость, деформативность и иные эксплуатационные характеристики конструкций. При проектировании объектов поверхности изменение их эксплуатационных характеристик во времени не является заданным. Не прогнозируется или моделируется физический износ конструктивных элементов и объекта в целом. Сложно на стадии проектирования определить будущие затраты по обеспечению надежной эксплуатации зданий и сооружений.

Характерный архитектурно-строительный облик современных горных предприятий определяется прежде всего наличием на поверхности таких сооружений как башенные копры значительной высоты, эстакадные мосты, соединяющие здания различного назначения, стальные укосные копры, аккумулирующие или погрузочные бункера, обогатительные фабрики, административно-бытовые комбинаты. За время эксплуатации поверхностных комплексов шахт в Криворожском железорудном бассейне произошёл ряд аварий и катастроф, вследствие разрушений конструкций горнотехнических сооружений.

В Криворожском национальном университете выполняются работы по технической диагностике и проектированию проведения ремонтно-восстановительных работ конструкций горнотехнических сооружений шахтной поверхности. Всего к настоящему времени накоплены диагностические данные по объектам рудника "СУХА БАЛКА", Криворожского железорудного комбината и Восточного, Северного, Центрального, Южного, Ингулецкого горно-обогатительных комбинатов [3].

Для установления основных закономерностей физического износа использовались следующие методы: для характерных эксплуатационных повреждений и зонирования конструкций - факторный анализ в виде последовательных классификаций; для определения условных скоростей коррозионного и абразивного износа элементов конструкций - статистические методы обработки диагностических данных; для определения скоростей коррозии в характерных точках - ускоренные натурные и лабораторные испытания; для оценки влияния эксплуатационных повреждений - метод анализа разрушения упругопластических систем.

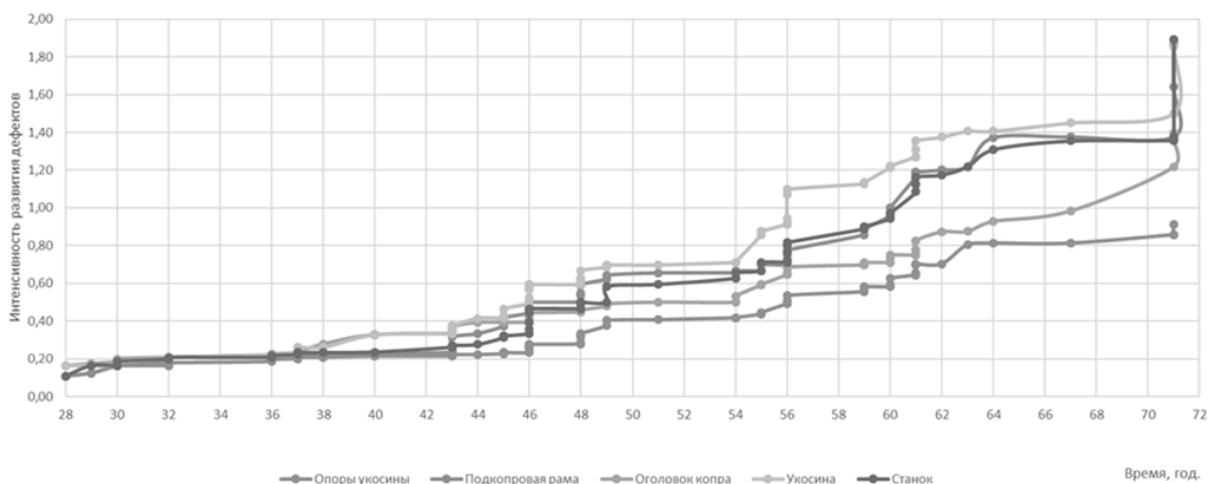


Рис. 1 Интенсивность развития дефектов конструктивных элементов копров со временем эксплуатации

В сложных системах отказ даже одного элемента может привести к исключительно серьезным последствиям. Поэтому основной задачей является выбор конструктивных и механических параметров системы с учетом таких факторов, как стоимость, надежность, масса и объем. Для решения этой задачи необходима оценка надежности элементов на этапе проектирования.

Традиционные способы проектирования проектирования, основанные на применении коэффициента безопасности и коэффициента запаса 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 получено и фиксируется на основе значительного опыта применения элементов, аналогичных рассматриваемому. Кроме того, дефекты конструктивных элементов часто являются случайными величинами, что полностью игнорируется при обычных методах проектирования.

Обычный подход к проектированию конструктивных параметров как к детерминированным величинам не является удовлетворительным с точки зрения анализа надежности. Поэтому необходима методика проектирования, которая учитывала бы вероятностный характер поведения конструктивных параметров во времени, с тем, чтобы надежность элементов можно было прогнозировать уже на этапе проектирования. В этом случае задаются все конструктивные параметры, которые в свою очередь определяют распределения напряжений. Если характер этого распределения известен оба эти распределения определены, то можно вычислить вероятность безотказной работы элемента (рис. 2).

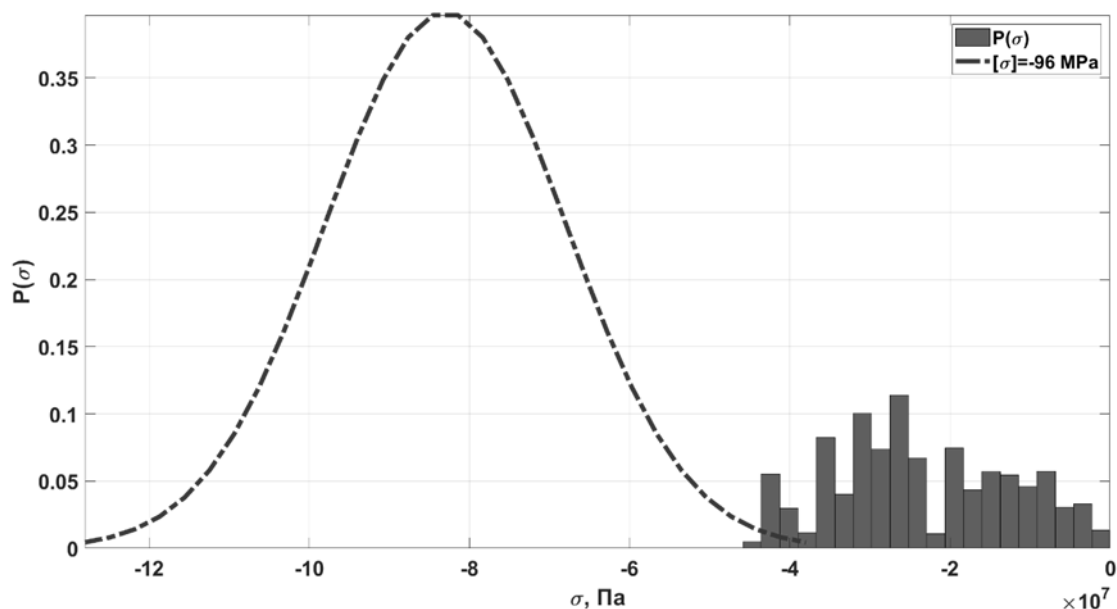


Рис. 2. Распределение предельных и действительных напряжений

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

$$H = P(R > S)$$

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

В общем случае

$$P(R > S) = \int_{-\infty}^{\infty} f(S) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(R) dR \right] dS$$

По этому выражению можно вычислить вероятность безотказной работы конструктивного элемента при различных сочетаниях законов распределения несущей способности и нагрузки. Например, в случае нормального распределения нагрузки и несущей способности вероятность безотказной работы определяется выражением:

$$P(R > S) = 1/2 + \Phi\left(\frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right)$$

где  $\Phi$  – нормированная функция Лапласа;  $m_R$  и  $m_S$  – математическое ожидание величин  $R$  и  $S$ , соответственно;  $\sigma_R^2$  и  $\sigma_S^2$  – среднее квадратическое отклонение величин  $R$  и  $S$ , соответственно.

В реальных ситуациях несущая способность элемента и его долговечность зависит от геометрических размеров, характеристик материала и ряда влияющих факторов (рис. 3). Если геометрические параметры являются детерминированными, то характеристики материала элемента имеют случайную природу с определенными законами распределения. Проявления и интенсивность влияния внешних факторов в большинстве случаев носят стохастический характер, что не дает возможность формализовать характер и степень их влияния аналитически, эмпирически или численными методами.

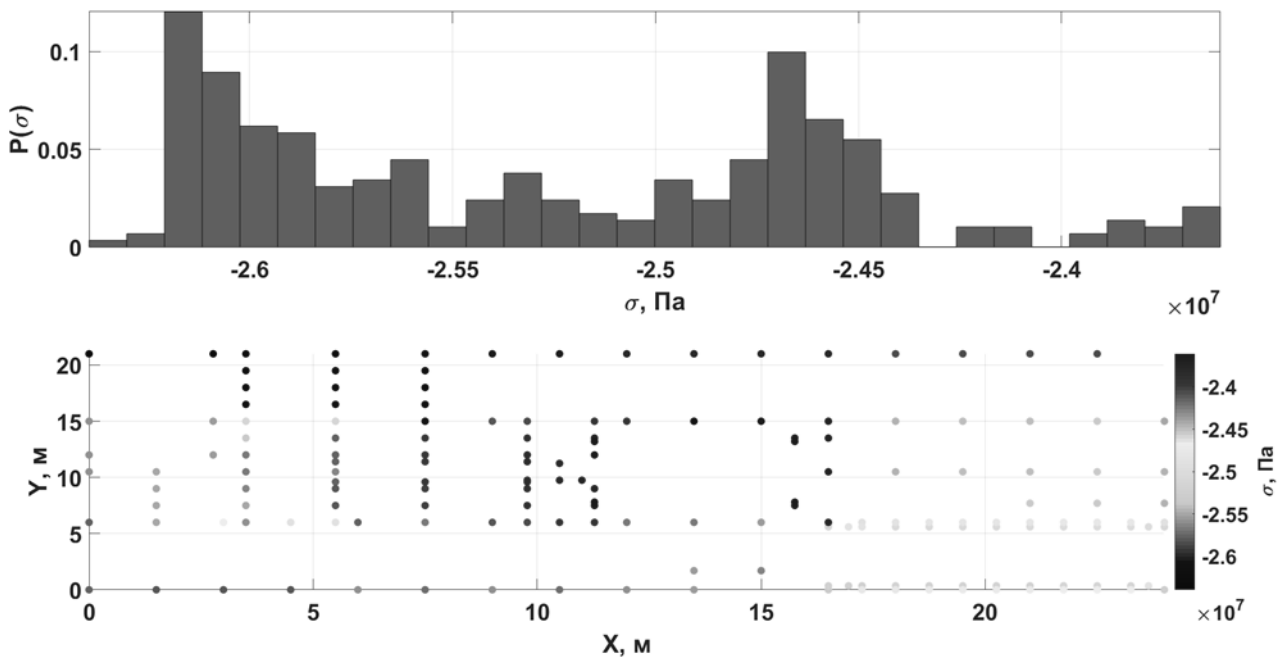


Рис.3. Распределение действующих напряжений в конструктивных элементах башенного копра

Исходя из этого, изучаемые протекающие случайные процессы могут быть заменены срезами одномерных случайных величин.

Из рассмотренного выше следует, что в основу системы надежности следует ввести статистические методы, оперирующие параметрами функции распределения, которые описывают как статическое напряженное состояние конструктивных элементов, так и реологические их изменения (рис.4).

Расчет оценок математического ожидания, дисперсии, среднеквадратичного отклонения, коэффициента асимметрии и эксцесса (на основе моментов распределения) не требует предварительного упорядочивания и группировки данных. Эти величины могут быть найдены непосредственно по исходной выборке.

Преимущество применения типовых законов распределения состоит в их хорошей изученности и возможности получения состоятельных, несмещенных и относительно эффективных оценок параметров. Однако, типовые законы распределения не обладают необходимым разнообразием форм с ярко выраженной асимметрией и эксцессом, поэтому их применение не дает необходимой общности представления случайных величин, которые встречаются в нашем исследовании.

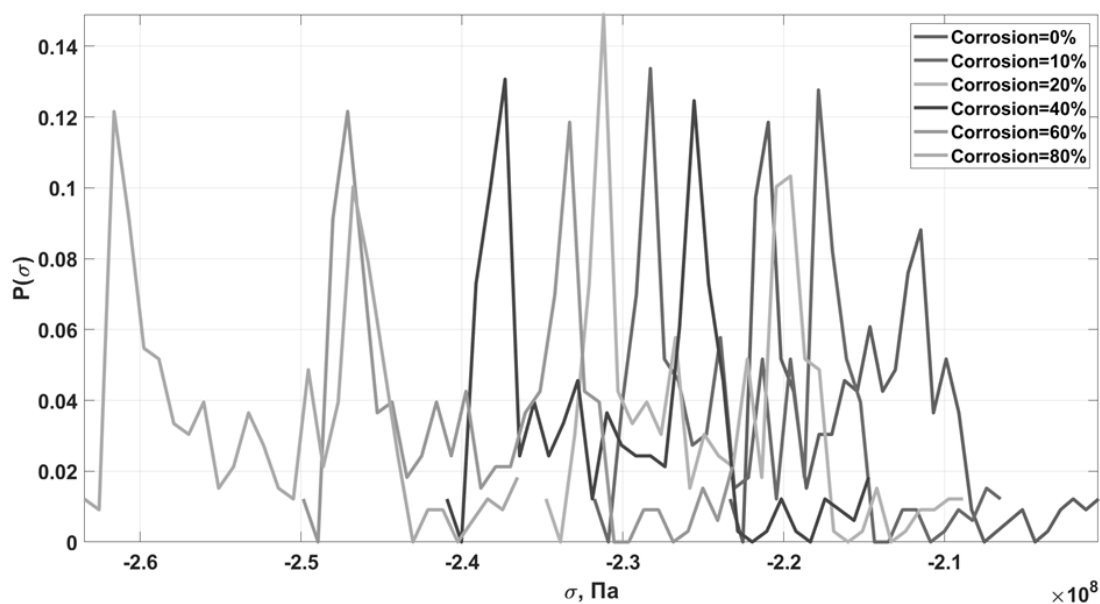


Рис. 4. Графическое представление изменения напряжений в зависимости от интенсивных коррозионных процессов

Для оценки надежности конструктивного элемента по полученным плотностям распределений и заданным распределениям предела прочности используем принцип расстояния Кульбака-Лейблера. Это расстояние в нашем случае является 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:

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

Основание логарифма в этой формуле существенной роли не играет. Его выбор позволяет зафиксировать конкретный вид функционала из семейства эквивалентных функционалов и равносильно 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. Так же установлено, что развитие дефектов конструктивных элементов происходит во времени и связано 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 нечувствительные к закону распределения методы оценки, то есть использовать непараметрические показатели такие как дивергенция Кульбака-Лейблера ( $D_{KL}$ ), что более предпочтительно чем метод Байеса.

Установлено, что с ростом интенсивности коррозии значение  $D_{KL}$  уменьшается. Таким образом 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  $K=80\%$ , характеризующееся минимальным уровнем надежности конструктивных элементов.

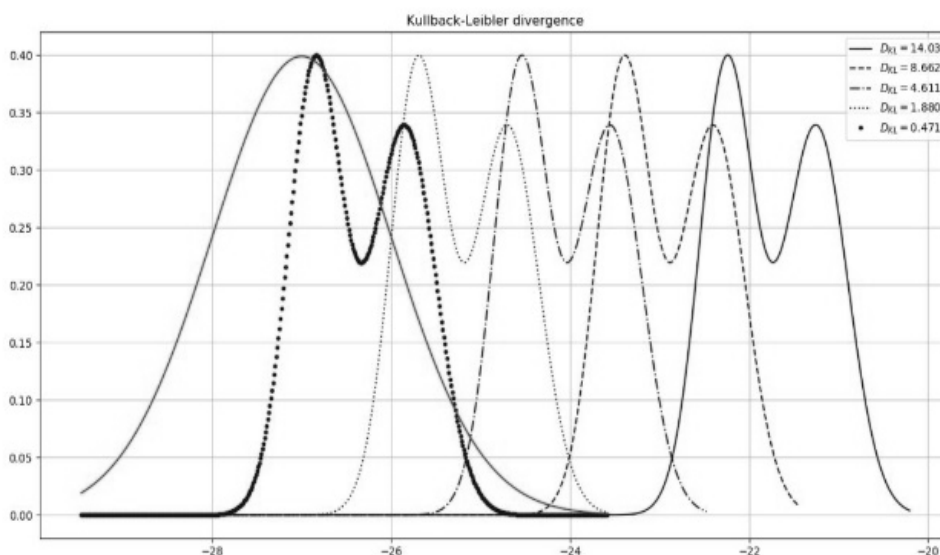


Рис. 5. Графическое представление изменения дивергенции Кульбака-Лейблера под действием процессов коррозии

С другой стороны, расстояние Кульбака - Лейблера может быть использовано как мера информационного выигрыша при переходе от априорного к апостериорному вероятностному распределению. То есть в большинстве случаев в модели Байеса целью является максимизация ожидаемого расстояния Кульбака - Лейблера между априорным и апостериорным распределениями, что дает возможность оценки верхней границы  $D_{KL}$ , а это приводит к использованию оценок Байеса и установлению их параметров.

Мерой оценки надежности элементов эксплуатируемых зданий и сооружений поверхностного комплекса есть дивергенция Кульбака-Лейблера, при стремлении к нулевому значению сигнализирует о вероятности аварийной ситуации, при этом характеристики дефектов, значения которых, имеют априорное распределение вероятности, после поступления информации приобретают апостериорное распределение, что позволяет формировать эксплуатационную надежность, как конструктивных элементов, так и всей системы в целом.

Предложенная вероятностная модель и реализованный на ее основе метод диагностирования позволяют построить методику расчета физического износа на основе вероятностного подхода. Внедрение подобных методик связано с обеспечением эффективного управления и повышением технической безопасности поверхностных комплексов шахт, посредством разработки и применения системы комплексного контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния элементов конструкций на объекте.

#### Список литературы

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. -М.: Машиностроение, 1978. - 240с.
2. Зельнер А. Байесовские методы в эконометрии. / Пер. с англ. Г. Г. Пирогова и Ю. П. Федоровского; с предисл. переводчиков. — М.: Статистика, 1980. — 438 с.
3. Andreev, B. M., Brovko, D. V. and Khvorost, V. V., 2016. Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction. Metallurgical and Mining Industry, - No 9. pp. 54-57.