

Д.В. БРОВКО, В.В. ХВОРОСТ, кандидаты техн. наук, доц.,
Криворожский национальный университет

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ НЕЗАВИСИМОМ МНОГОСТУПЕНЧАТОМ ПОСТУПЛЕНИИ СИГНАЛОВ О ДЕФЕКТАХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ШАХТ

На основе руководств по формальной оценке безопасности выполнен анализ риска возникновения аварийных ситуаций в зданиях и сооружениях. На примере обрушения конструкций сооружения поверхности горнодобывающего предприятия, рассмотрены критерии надежности невосстанавливаемых элементов промышленных объектов поверхности горных предприятий. Выведены выражения для оценки количественных характеристик надежности элементов до первого отказа.

Структурная энтропия служит мерой неупорядоченности строения системы. Если из отдельных элементов взводят пространственную конструкцию, то энтропия этой системы будет отрицательной за счет притока энергии при возведении, а мера неопределенности в расположении отдельных элементов возрастает. При возведении возрастает информация в научном ее понимании, т.е. в смысле возрастания неопределенности. Неопределенность об объекте принимается в теории как информационная энтропия. К концу возведения конструкции информационная энтропия достигает максимальной величины. Приток энергии в момент изготовления соответствует отрицательной энтропии. Таким образом, здесь информационная энтропия будет эквивалентна отрицательной структурной энтропии. Можно сказать, что информационная энтропия - это мера неопределенности перед ее раскрытием, о наличии и расположении вложенных друг в друга элементов и связей между ними в структуре системы. Таким образом, структурная неопределенность тесно связана с информационной энтропией. Для упрощения расчетов, иерархию в дефектообразовании следует описывать с помощью информационной энтропии.

Проблема и ее связь с другими практическими задачами. Стандартные значения степени живучести - это такие средние значения, при достижении которых элементы конструкций объекта переходят в качественно иное состояние. По определению стандартные значения являются инвариантами, так как не зависят ни от конструктивного типа, ни этажности объекта. Они используются для формирования требований к уровню конструкционной безопасности зданий (сооружений) при оценке технического состояния их несущих каркасов [20,21].

К стандартным значениям степени живучести относятся:

нормальная (естественная) степень живучести R_{norm} (normal), регламентирующая величину степени живучести объекта после окончания его строительства;

удовлетворительная степень живучести R_{sat} (satisfactory), соответствующая переходу объекта из нормального в удовлетворительное состояние. При достижении таких параметров на объекте должны быть произведены ремонтные работы;

непригодная степень живучести R_{uns} (unusable), соответствующая переходу объекта из удовлетворительного в непригодное к нормальной эксплуатации состояние. При достижении таких параметров способность объекта сопротивляться действующим на него нагрузкам исчерпывается и требуется проведение капитальных ремонтно-восстановительных работ;

аварийная степень живучести R_{crash} (crash), соответствующая переходу объекта из непригодного в аварийное состояние. При достижении таких параметров способность объекта сопротивляться действующим на него нагрузкам исчерпалась и эксплуатация строго запрещена.

Для отыскания стандартных значений степени живучести используется закон распределения. При этом нормальная степень живучести приравнивается к величине естественного состояния для новых зданий (сооружений), показателем которого может служить математическое ожидание закона распределения степени живучести на неограниченном множестве новых зданий (рис. 1).

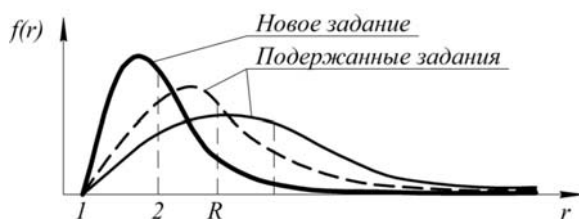


Рис. 1. Распределение плотности вероятности степени живучести объекта в процессе эксплуатации

Фактическая вероятность аварии объекта после окончания его строительства в среднем увеличивается в два раза по сравнению с вероятностью, закладываемой по умолчанию в объект при проектировании.

Постановка задачи. Закон распределения степени живучести построенного объекта в процессе эксплуатации размывается. Причинами этого являются нарушения правил эксплуатации объектов, старение и износ элементов конструкций. В результате совокупного действия этих факторов среднее значение степени живучести смещается вправо. При этом степень неопределенности технического состояния несущего каркаса объекта, показателем которой является величина информационной энтропии, увеличивается.

Изложение материала и результатов. В самом общем виде, энтропия - это мера рассеивания энергии и увеличения всех форм беспорядка. Энергия и энтропия обычно рассматриваются вместе. Однако энтропия, строго говоря, это не потеря энергии, а скорость потери (изменения) энергии. С физической точки зрения - это потенциал. В этом смысле энтропия является тенью энергии. При этом, возрастание энтропии, т.е. потенциал потери энергии, указывает на наиболее вероятное направление протекания процесса в изолированных системах.

Статистическая физика связывает энтропию с вероятностью осуществления данного макроскопического равновесного состояния системы. Энтропия определяется через логарифм статистического веса Ω данного равновесного состояния

$$S = k \cdot \ln \Omega(E, N) \quad (1)$$

где k - постоянная Л. Больцмана; $\Omega(E, N)$ - число квантомеханических уровней в узком интервале энергии ΔE вблизи значения энергии E системы из N частиц.

При испытании системы конструкций элементов зданий и сооружений от начала и до конца нагружения в ней постепенно развиваются системы блоков разного уровня, очерченных или ограниченных сквозными или прерывистыми дефектами. Из упорядоченной системы конструкция постепенно превращается в группу обломков, т.е. сдвигается в сторону хаоса. По мере нагружения конструкции потеря энергии, заложенной при изготовлении конструкции, увеличивается, следовательно, энтропия, как скорость потери энергии, положительна.

К структурной неопределенности примыкает причинно-функциональная неопределенность [3]. Причинно-функциональная неопределенность и ее раскрытие дают информацию о законах взаимодействия между элементами в системе (законы сохранения энергии, Ома и т.п.).

Причинно-функциональная неопределенность о законах взаимодействия представляется слишком большой величиной для определения прочности и устойчивости конструкций, да и сложно устранима на современном уровне науки.

Структурная неопределенность означает информацию о механической системе в целом. Структурная энтропия служит мерой неупорядоченности строения системы. Если из отдельных элементов взводят пространственную конструкцию, то энтропия этой системы будет отрицательной за счет притока энергии при возведении, а мера неопределенности в расположении отдельных элементов возрастает. При возведении возрастает информация в научном ее понимании, т.е. в смысле возрастания неопределенности. Неопределенность об объекте принимается в теории как информационная энтропия. К концу возведения конструкции информационная энтропия достигает максимальной величины. Приток энергии в момент изготовления соответствует отрицательной энтропии.

Таким образом, здесь информационная энтропия будет эквивалентна отрицательной структурной энтропии. Можно сказать, что информационная энтропия - это мера неопределенности перед ее раскрытием, о наличии и расположении вложенных друг в друга элементов и связей между ними в структуре системы.

Таким образом, структурная неопределенность тесно связана с информационной энтропией. С целью упрощения расчетов, иерархию в дефектообразовании следует описывать с помощью информационной энтропии.

Этот путь представляется более простым, но принципиальным и плодотворным для анализа картины дефектов и живучести в конструкциях.

Процесс снижения ценности научной информации в смысле уменьшения неопределенности можно представить как процесс уменьшения неизученного поля элемента конструкции. На рис. 2 показано, как уменьшается неизученная площадь A , увеличивается вероятность изученного поля P и уменьшается неопределенность H_j в задаче изучения поля.

На этом примере видно, что математическая теория информации предусматривает постепенное снятие неопределенности.

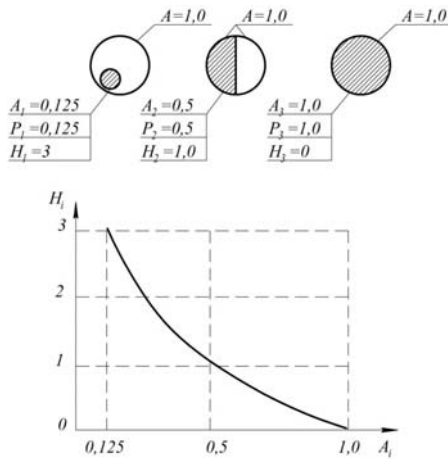


Рис. 2. Изменение меры неопределенности (количества информации) при изучении поля наблюдения. A - общая площадь наблюдения; A_1, A_2, A_3 - площадь изученного поля; P_1, P_2, P_3 - вероятности изученного поля; H_1, H_2, H_3 - неопределенности в изучении относительно всего поля

Процесс снижения неопределенности в научном представлении достаточно глубоко разработан в теории связи и информации [4-8]. Однако возникает проблема выбора вида информационной энтропии. Здесь надо иметь в виду, что эксплуатация, действующие нагрузки, а иногда и нагрузки аварийного действия, способствуют последовательному и иерархическому проявлению дефектов, т.е. непрерывному и многоступенчатому устранению неопределенности в появлении, развитии и завершении картины разрушения системы. Это должно быть учтено для обоснования выбора типа формулы К.Э. Шеннона.

В стадии предразрушения, объект моделируется конечным скелетом из элементов, т.е. слабыми связями. Отсюда следует важнейшее свойство прочностной структуры - локальность разрушения связей при повышении напряжений от внешней нагрузки. Работа данного элемента и его связей мало зависит от того, как нагружены смежные элементы.

Чтобы прийти к стадии конечного скелета, материал должен пройти несколько стадий предразрушений и образовать иерархическую систему дефектов. Отсюда следует другое важнейшее свойство материала - многоступенчатое, последовательное повреждение.

Следовательно, рассматриваемый вид информационной энтропии должен удовлетворять двум свойствам: локальности разрушения связей и многоступенчатому характеру их разрушения. С точки зрения теории связи и информации, принятый вид информационной энтропии должен удовлетворять требованиям независимости сообщения при их многоступенчатом сообщении. Если количество разрушившихся связей между структурными элементами принять как количество сигналов от этих связей, то открывается принципиальная возможность использования формулы информационной энтропии, по К.Э. Шеннону.

В этом случае процесс постепенного изменения состояния элементов конструкций можно описать информационной формулой, показывающей величину (меру) неопределенности при многоступенчатом независимом сообщении от многих источников [5,7,8,17,18,19].

Аналогия между разрушением элементов и сигналами об их разрушении основана на следующих статистических положениях.

Пусть имеется набор связей между элементами с заданной прочностью $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m$ вероятности которых не равны и выражены как $P_1, P_2, \dots, P_i, P_m$. Вследствие действия внешней нагрузки мы можем получить комбинацию разрушившихся связей, содержащую n связей из набора m . Все разорванные связи составят полную систему случайных событий, называемую ансамблем

$$\sum_{i=1}^m P_i = 1. \quad (2)$$

Вероятность каждой данной комбинации n выразится произведением вероятностей ее отдельных разорванных связей, так как предполагается, что появление разрыва отдельной связи есть независимое событие. Поэтому для комбинации разорванных связей имеем

$$P = P_1^{n_1} \cdot P_2^{n_2} \dots P_n^{n_n} = \prod_{i=1}^n P_i^{n_i} \quad (3)$$

Положим, что n достаточно велико для того, чтобы можно было считать

$$n_i = P_i n \quad \text{или} \quad (4)$$

$$P_i = n_i / n$$

Количество возможных комбинаций разорванных связей (сообщений) с количеством связей $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_m$ равно числу перестановок с неограниченными повторениями:

$$N = m^n \quad (5)$$

В теории связи и информации для получателя все N сообщений являются равновероятными, а получение конкретного сообщения равносильно для него случайному выбору одного из N объектов с вероятностью $1/N$. Чем больше N тем больше информативность и тем больше степень неопределенности в сообщении.

Число N могло бы служить мерой информации. Однако, с точки зрения техники связи и информации, необходимо наделить эту меру свойством аддитивности (в результате логарифмирования), т.е. определить ее так, чтобы она была пропорциональна величине n - количеству разорванных связей. Применительно к каркасу здания можно провести следующую аналогию: комбинация N из большого количества разрушенных связей n_i должна давать в результате большее количество дефектов. Таким образом, свойство аддитивности применительно к каркасу здания также крайне нужно для учета накопления разрушившихся связей, образующих общее состояние объекта.

Таким образом, необходимо в качестве меры количества сведений принять не само число N , а некоторую функцию от него, желательно аддитивного типа $I=f(N)$, а именно типа

$$I = \log N = n \log m, \quad (6)$$

где количество информации пропорционально величине n сообщения и удовлетворяет условиям аддитивности.

Используя величину Стирлинга [5], переходя к вероятностям и произвольным основаниям логарифмов, получаем формулы К.Э. Шеннона для количества информации и информационной энтропии

$$I = -n \sum_{i=1}^m P_i \log P_i ; \quad (7)$$

$$H = (I/n) = -\sum_{i=1}^m P_i \log P_i . \quad (8)$$

Факт разрушения конструкции соответствует нулевой величине информационной энтропии $H_i=0$. Это означает, что неопределенность о факте разрушения отсутствует. В этом случае вероятность одного из элементов m^n (например, сквозные трещины) равна единице, т.е.

$$H_i = P_i \log_2 P = 1 \log_2 1 = 0 \quad H_i=0 \quad (9)$$

Информационная энтропия служит мерой измерения (уменьшения) неопределенности сообщения данного источника (конструкции), которые описываются вероятностями P_1, P_2, \dots, P_n , появления дефектов R_1, R_2, \dots, R_n

Протяженность формулы К.Э. Шеннона зависит от характерного размера конструкции и от количества дефектов. Наиболее полная формула имеет следующий вид

$$\sum P_i = 1 \text{ при } H_i = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 \dots P_n \log_2 P_n \quad (10)$$

Большой интерес для будущего анализа представляет четырехступенчатая формула, учитывающая четыре характерных состояний конструкций. Формула имеет следующий вид

$$\sum P_i = 1 \text{ при } H_4 = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 \dots P_4 \log_2 P_4 \quad (11)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n - вероятности разрушения при разных степенях.

Чтобы представить себе характер зависимости $H(P_1, P_2, \dots, P_n)$ по К.Э. Шеннону, от независимых величин вероятностей P_1, P_2, \dots, P_n рассмотрим два варианта физического износа для жилых зданий и промышленных зданий.

Будем полагать, что развитие состояния элементов и здания в целом происходит в соответствии с действующими нормативами с вероятностью, показанной в табл. 1 и 2.

Различия конструктивных схем зданий и сооружений, а также различные условия их эксплуатации, означает больший разброс в наличии наименее уязвимых мест во всей конструкции. Последние приводят к относительно большему числу дефектов. Относительно большее число этих дефектов выражено через вероятности их появления при соблюдении жесткого условия $\sum P_i = 1$.

Следует определить, какие из зданий представляют большую неопределенность в прогнозе появления дефектов. С этой целью подсчитываем частные неопределенности $P_i \log_2 P_i$ для каждого из видов физического износа, а также общую, суммарную неопределенность по формуле

$$H_i = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 \dots - P_n \log_2 P_n \quad \text{при } \sum P_i = 1 \quad (12)$$

Результаты расчета сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Величины вероятностей и неопределенностей в отношении физического износа промышленных зданий и сооружений

Физический износ, %	0-20	21-50	51-80	81-100
Вероятность появления состояния, P_i	0,2	0,3	0,3	0,2
Частная неопределенность, $P_i \log_2 P_i$	0,464386	0,52109	0,52109	0,464386
Общая неопределенность, H_i				1,970951

Таблица 2

Величины вероятностей и неопределенностей в отношении физического износа жилых зданий и сооружений

Физический износ, %	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Вероятность появления состояния, P_i	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Частная неопределенность, $P_i \log_2 P_i$	0,464386	0,464386	0,464386	0,464386	0,464386
Общая неопределенность, H_i					2,321928

Общая суммарная величина неопределенности для жилых зданий и сооружений $H=2,321928$ оказалась на 18 % больше, чем неопределенность для промышленных зданий и сооружений $H=1,970951$. Интерпретировать эти результаты можно на основе различия в количестве видов физического износа. Это подтверждает предположения К.Э. Шеннона при равновероятности состояний, неопределенность события тем больше, чем больше количество этих состояний. Логарифмическая форма, как аддитивная, может быть единственной для определения величины неопределенности или энтропии H_i .

При вычислении энтропии H_i сравнительно маловероятные результаты опыта можно без большой ошибки опустить.

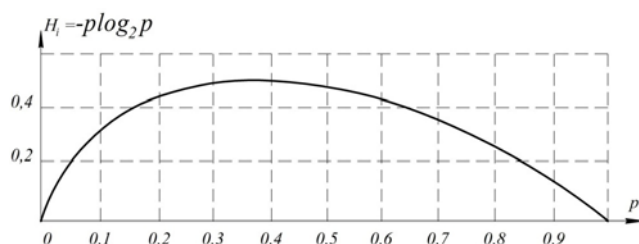


Рис. 3. Изменение частной неопределенности - H в зависимости от вероятности p

Наоборот, в области от $p_i=0,2$ и до $p_i=0,6$ слагаемые $-P_i \log_2 P_i$ принимают наибольшие значения, и они меняются сравнительно плавно. Поэтому в этой средней области кривой довольно значительные изменения величин вероятности P_i сравнительно мало отражаются на суммарной величине энтропии. Еще раз подчеркнем, что энтропия, или неопределенность, является средней характеристикой относительно ожидаемых результатов независимых опытов.

Как отмечается в монографии [8], понятие информационной энтропии (неопределенности), появившись для обслуживания связи и различного рода сообщений, успешно применяется в различных областях природы и техники.

В общем случае (при любом законе распределения) информационная энтропия закона распределения определяется по формуле [9]

$$H_i = P_i \log_2 P = 1 \log_2 1 = 0 \quad (13)$$

где P_i - вероятность события, определяемая из закона распределения и заключающаяся в том, что степень живучести находится в i -м диапазоне значений.

Для практических исследований используем данные о физическом износе зданий и сооружений поверхности горнорудных предприятий Криворожского бассейна. Данные получены сотрудниками ДВНЗ «КНУ» в результате проведенных обследований более 1000 объектов. Исследования степени живучести объектов различного срока эксплуатации и последующий анализ результатов этих исследований позволил принять решение о расположении стыковых точек (пороговых значений степени живучести). В результате приходим к идеализированной системе «энтропия - степень живучести» [10, 14-16], что позволяет утверждать следующее.

Выводы и направление дальнейших исследований. Время эксплуатации объекта с момента окончания его строительства до достижения удовлетворительной степени живучести $R_{sat}=12$ (satisfactory) определяет начальную границу безопасного ресурса объекта. В этот период

эксплуатации объекта дефекты в его конструкциях отсутствуют и можно утверждать, что его элементы способны сопротивляться не только проектным воздействиям, но и за счет запаса прочности большинству не учтенным при проектировании нагрузкам. Техническое состояние объекта на этом промежутке времени можно трактовать как безопасное. Необходимо проводить косметические ремонты.

При достижении объектом непригодной степени живучести $R_{uns}=36$ (unusable), его физический износ составляет более 50%. При такой величине износа требуется капитальный ремонт здания [11-13] с целью восстановления способности его элементов сопротивляться не проектным воздействиям. Если же восстановительные мероприятия на объекте произведены не будут, то степень живучести продолжает расти и достигает следующего предельного (аварийного) значения, равного $R_{crash}=84$ (crash), что определяет предельный ресурс этого объекта.

При достижении объектом предельного значения степени живучести максимальной становится не только степень неопределенности технического состояния несущего каркаса, но и величина его конструкционного износа.

Несущая способность объекта сопротивляться любым нагрузкам теоретически исчерпывается, а рост информационной энтропии практически прекращается. Это означает, что объект находится в аварийном состоянии, при котором наступления аварии объекта становится непредсказуемым.

Стандартные значения степени живучести $R_{norm}, R_{sat}, R_{uns}, R_{crash}$ являются постоянными, поскольку из способа их определения следует, что они не зависят ни от конструктивного типа здания, ни от его этажности. R_{norm} и R_{crash} образуют нижнюю и верхнюю границы приемлемых значений степени живучести объекта.

Пока фактическая степень живучести остается внутри этого коридора, уровень безопасности объекта следует считать удовлетворительным.

Список литературы

1. Мельчаков А.П. "Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов" // Челябинск, Издательство ЮУрГУ, 2006 г.
2. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. - М.: Наука, 1981.
3. Алексеев Г.Н. Энергоэнтропика. - М.: Знание, 1983. - 191 с.
4. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. - М.: Физматгиз, 195;
5. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера: справочник. - Киев: Техника, 1975. - Глава 6. - § 7;
6. Силин А.А. Энтропия, вероятность, информация // Вестник РАН. - 1994. - Том 64. - № 6. - С. 490-496
7. Харкевич А.А. Избранные труды в 3-х томах. Том 3. - М.: Наука, 1973.-524 с1.36 ... 1.38;
8. Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. - М.: Физматгиз, 1973.-511 с.
9. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей. -М.: Наука,1969.
10. Скоробогатов С.М. Принцип информационной энтропии в механике разрушения инженерных сооружений и горных пластов. - Екатеринбург: Изд. УрГУПС, 2000.
11. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет конструкций специальных сооружений. М.: Стройиздат 1990. с. 207.
12. Попов Г.Т., Бурак Л.Я. Техническая экспертиза жилых зданий старой застройки. -2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1986.
13. Применение анализа риска к исследованию хрупкого разрушения и усталости стальных конструкций // Механика разрушения. Разрушение конструкций. «Мир».:М.,1980. - с.7-30.
14. Рабочие чертежи. Реконструкция шахт рудоуправления. Башенное надшахтное здание шахты «Юбилейная» - КРИББАСПРОЕКТ - 1976- 1980г.
15. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. - М.: Стройиздат, 1996.- 192 с.
16. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. - М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.
17. Ройтман А.Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. Надежность и качество - М.: Стройиздат, 1985. - 175 с.
18. Силин А.А. Энтропия, вероятность, информация // Вестник РАН. - 1994. - Том 64. - № 6. - С. 490-496.
19. Синицин А.П. Расчет конструкций на основе теории риска. - М.: Стройиздат, 1985.-304с.
20. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. - 216 с.
21. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 2001. - 116 с.