

участием автора были перепроектированы фундаменты тридцати зданий и сооружений строящихся на территории Украины промышленных и гражданских объектов. Среди них корпус № 1 Днепропетровского комбайнового завода, главный производственный корпус, склад отходов углеобогащения и ремонтно-механическая мастерская Полтавского комбината строительных материалов, главный корпус оборотного водоснабжения аглофабрики № 2 ДМК им. Дзержинского, холодильник Днепропетровского мясокомбината, преаэратор и денитрификатор очистных сооружений ДПО «Азот», мясокомбината в ПГТ Ново-Алексеевка и др.

УДК 624.131

## МЕТОДЫ НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА В ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*А.Е. Бауск, асп.*

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Днепропетровск*

### 1. Постановка проблемы надежности в классических вероятностных схемах.

Наиболее простой реализацией концепции надежности является использование глобальных коэффициентов надежности, например запасов прочности, что дает защиту от различных системных и стохастических ошибок. Впрочем, такая реализация не способна явным образом учесть неопределенности в исходных данных задачи. Помимо этого, использование подобного детерминированного подхода не позволяет дать количественную оценку надежности конструкции, равно как и произвести исследование предельного состояния систем (например, сравнение сопротивлений и внешних нагрузок).

Улучшенное решение предполагает использование полувероятностного подхода в сочетании с частичными коэффициентами надежности. В этом случае неопределенности в исходных данных учитываются при помощи формирования отдельных коэффициентов запаса для групп нагрузок и свойств материалов на основании вероятностной оценки.

Детальное исследование надежности конструкции может быть произведено при помощи вероятностного приближения. В этом случае стохастические распределения вводных параметров преобразуются в нормализованные распределения по Гауссу, и индекс надежности  $\beta$  вычисляется как минимальное расстояние от поверхности предельного состояния до центра соответствующей системы координат [1]. Линеаризация поверхности в точке минимального расстояния (проектной точке) представляет собой метод определения надежности первого уровня. Более точное решение получают при использовании метода второго уровня, при котором для аппроксимации используются полиномы второго уровня. Впрочем, метод второго уровня применяется нечасто ввиду того, что разница в вычислительной емкости несопоставима с улучшением качества результатов.

### 2. Применение альтернативных теорий неопределенности.

Решение, получаемое описанными методами, является «точным» в терминах теории вероятностей. Вероятностный метод оценки надежности сооружений основан на стохастических распределениях исходных данных. Результатом расчета является вероятность эксплуатационного отказа с учетом неопределенностей в нагрузках, материалах и геометрии. Влияние человеческого фактора оценивается посредством предписывания допустимых пределов вероятности отказа. Функции распределения для последней не могут быть получены.

Требуемые для расчета функции плотности и распределения выводятся на основе статистических законов, причем критерием их применимости является наличие некоторого объема закономерно повторяющихся данных, которые доступны только для ограниченной типологии зданий и сооружений. Ввиду арифметического порядка значений вероятности отказа (очень малые числа) большое значение принимает релевантность краевых областей функций распределения [2]. Статистическая обоснованность функций распределения определяются в первую очередь их «внутренней» областью, поэтому значения вероятности отказа не являются абсолютно точными и содержат систематические ошибки.

Предел применимости вероятностных методов наступает тогда, когда статистические данные, необходимые для построения функций плотности или распределения, отсутствуют либо доступны в недостаточном количестве.

Для количественной оценки нестатистических исходных данных за последние два десятилетия исследователями (Б. Мёллер, М. Беер, Д. Дюбуа, Г. Праде и др.) предложены к использованию другие меры неопределенности, которые позволяют определить функции распределения на основании необязательной информации и неполных экспериментальных данных в сочетании с использованием экспертной оценки [2, 6].

Математический аппарат для такой оценки дают теории неопределенности высшего порядка, в частности, теория возможностей [3] и теория очевидностей Демпстера – Шафера [4,5], которые обобщают формулирование теоремы Байеса для описания верхней и нижней огибающих вероятностей. Обе эти теории используют механизм нечеткой логики и теорию нечетких множеств, разработанную Л. Заде [3].

В этом случае методика решения конкретной задачи определяется самой сформулированной проблемой и типом исходных параметров. Итак, помимо вероятностного описания неопределенностей может использоваться нечеткое моделирование на базе теории нечетких множеств.

В статье представлено использование методики на основе нечетких множеств, описанной в своих работах Б. Мёллером и М. Бером [2, 11], с целью формализовать нечеткие и нечетко-вероятностные исходные параметры задачи строительной механики. С помощью теории возможностей становится возможным численно оценить надежность при отсутствии статистических данных о параметре.

### 3. Оценка надежности с использованием теории возможностей.

Оценка надежности с использованием математического аппарата теории возможностей заключается в сравнении текущей возможности разрушения  $\tilde{I}_r^{n00}$  с допустимой возможностью разрушения  $\tilde{I}_r^{at1}$  (здесь и далее – в

терминах теории Демпстера – Шафера) [2]. Для вычисления  $\tilde{I}_f^{\text{нóú}}$  необходимо произвести отображение  $f: \square \rightarrow [0,1]$  вероятностных параметров  $X_i$ , которое формирует нечеткие параметры  $\tilde{x}_i$  через функции принадлежности  $\mu(x_i)$ . Подготовка задачи для решения методами нечеткой логики позволяет учесть как объективную статистическую информацию, так и субъективные оценки.

При нечетком анализе процесс структурного моделирования и решения представляется как отображение нечетких параметров  $\tilde{x}_i$  на пространство решений с получением нечеткого решения  $\tilde{z}_i$ . Для задач строительной механики целесообразным является использование  $\alpha$ -дискретизации, которая позволяет численно выразить нечеткий анализ. В таком случае процесс отображения производится оператором отображения – детерминированным алгоритмом вычисления результатов расчета, и задача оценки надежности решается как оптимизационная. Цель оптимизации описывается оператором наибольшего и наименьшего значения, а сама процесс оптимизации производится методами интервального исчисления.

Подробно процесс нахождения решения и подходящие алгоритмы (алгоритм Хансена, NAVS-метод) подробно описаны, например, у Брабана и Делкруа [8]; они являются предметом отдельного исследования.

Сочетание нечетких результатов  $\tilde{z}_i$  и распределений возможности разрушения  $\pi(z_i)$  дает нам возможность разрушения  $\tilde{I}_f^{\text{нóú}}$  [2]:

$$\tilde{I}_f^{\text{нóú}} = \sup_{z_j \in Z_j} \min(\mu(z_j), \pi(z_j)) \quad (1)$$

Допускаемое значение возможности разрушения  $\tilde{I}_f^{\text{áií}}$  определяется методами теории надежности первого уровня. Требуемый уровень безопасности определяется предписываемым индексом надежности  $\beta_{\delta}$ . Для каждого входного параметра вероятность  $\tilde{F}(\mathbf{x}_{iL})$ , соответствующая  $\tilde{I}_f^{\text{нóú}}$  и точке решения  $\mathbf{x}_L$ , определяется как нечеткая величина. Соотношение между мерой возможности  $\tilde{I}_f^{\text{нóú}} = \tilde{I}(\mathbf{x}_L)$  и мерой вероятности  $\tilde{F}(\mathbf{x}_{iL})$  определяется как нечеткое отношение [2]:

$$\tilde{b}(x_{iL}) = \frac{\tilde{I}_f^{\text{нóú}}}{\tilde{F}(x_{iL})}; \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Если предположить, что выполняется соотношение

$$\tilde{b}(\tilde{x}_{iL}^{\delta}) \approx \tilde{b}(x_{iL}); \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

то допускаемые возможности  $\tilde{I}(\tilde{\mathbf{x}}_{iL}^{\delta})$  и допустимая возможность разрушения  $\tilde{I}_f^{\text{áií}}$  следуют из (1).

Таким образом, вычисление  $\tilde{I}_f^{\text{áií}}$  выполняется в соответствии с теорией возможностей, что в свою очередь предоставляет основу для пессимистической или оптимистической оценки несущей способности. Полное описание данного метода можно найти, например, в [11].

#### 4. Оценка надежности и выводы.

Теория нечетких вероятностных переменных разработана Г. Квакернааком [7] и была использована в виде адаптации к задачам строительной механики и оценки технического состояния В. Брабаном [8], С. Бодри и Д. Дюбуа [9], В. Крэтчмером [10] и другими. Эта теория дает математический аппарат для одновременного учета статистических неопределенностей посредством вероятностных переменных, накладывая на них данные о нечеткой компоненте для учета неполноты информации. Результатом такого подхода, как было показано, является получение нечеткого распределения вероятности в пространстве результатов  $\mathbf{Z}$ , а также нечеткие значения для вероятности разрушения  $\tilde{P}_f$  и показателя надежности  $\tilde{\beta}$ .

Итак, мы показали, каким образом можно на основе существующих теорий неопределенности высшего порядка построить математический аппарат для нечеткой оценки надежности в случае, когда статистические данные по входным параметрам отсутствуют либо не позволяют построить релевантные распределения вероятностей. Данный подход имеет хорошую перспективу к применению в оценке состояния и управлении старением уникальных конструкций, по которым типология исходных данных часто является скудной или вовсе отсутствует. Возможность реализации задач  $\alpha$ -оптимизации для решения систем со большим количеством степеней свободы является предметом дальнейшего исследования.

#### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И. Аугусти и др. Вероятностные методы в строительном проектировании. – М.: Стройиздат, 1988.
2. B. Möller et al. Possibility Theory Based Safety Assessment. – CACIE, Blackwell Publishers, Malden, Oxford, (1999).
3. L. Zadeh. Fuzzy Sets. – Information&Control, **8**, 338-353, (1965).
4. G. Shafer. A Mathematical Theory of Evidence. – Princeton University Press, Princeton, USA, (1976).
5. G. Shafer. Dempster-Shafer Theory. – <http://www.glennshafer.com/assets/downloads/articles/article48.pdf>, (2002).
6. D. Dubois, H. Prade. Possibility Theory. – Plenum Press, New York, London, (1986).
7. H. Kwakernaak. Fuzzy Random Variables – I. Definitions and Theorems. – *Information Sciences*, **15**, 1-29, (1978).
8. V. Braibant et al. Non-Deterministic “Possibilistic” Approaches for Structural Analysis and Optimal Design. – *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, **123**, 331-340, (1998).
9. C. Baudrit et al. Joint Treatment of Imprecision and Randomness in Uncertainty Propagation. – *IPMU-2004*, July 4-9, Perugia, Italy, 873-880, (2004).
10. V. Krätschmer. A Unified Approach to Fuzzy Random Variables. – *Fuzzy Sets and Systems*, **123**, 1-9, (2001).
11. B. Möller. Fuzzy-Modellierung in der Baustatik. – *Bauingenieur*, Vol. **72**(2), (1997).