



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N1, TOM 14 (2008) 43-51

УДК 624.014

(07)-0153-1

ОЦІНКА НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ БУДІВЕЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

А.М. Югов

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна.
E-mail: amyurus@mail.ru*

Отримана 21 січня 2008; прийнята 25 січня 2008

Анотація. В статті розглядається питання про оцінку недосконалостей будівельних металевих конструкцій. Недосконалості конструкція набуває в процесі виготовлення, транспортування, монтажу та експлуатації. Основною умовою забезпечення безаварійної роботи будівель та споруд із металевих конструкцій є діагностика технічного стану в цілому та дефектів і пошкоджень, що їх мають конструкції, зокрема. Дані про недосконалості отримують під час обстеження будівель та споруд. Пропонується механізм оцінки недосконалостей при їхньому постійному накопиченні. Основою для оцінки технічного стану є результати первинної експертної інформації. Запропонована математична модель кумулятивного накопичення недосконалостей на основі апарату нечіткої логіки. Аналіз конструктивного ризику для кожного елемента зводиться до порівняння проектного, дійсного та граничного значень визначальних параметрів. Запропонований апарат дозволяє оцінювати надійність будівель та споруд із металевих конструкцій, що експлуатуються.

Ключові слова: будівельні металеві конструкції, недосконалості, надійність, нечітка логіка, конструктивний ризик.

ОЦЕНКА НЕСОВЕРШЕНСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

А.М. Югов

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.
E-mail: amyurus@mail.ru*

Получена 21 января 2008; принята 25 января 2008

Аннотация. В статье рассматривается вопрос об оценке несовершенств строительных металлических конструкций. Несовершенства конструкция приобретает в процессе изготовления, транспортирования, монтажа и эксплуатации. Основным условием обеспечения безаварийной работы зданий и сооружений из металлических конструкций является диагностика технического состояния в целом и имеющихся дефектов и повреждений в частности. Данные о несовершенствах получают при обследовании зданий и сооружений. Предлагается механизм оценки несовершенств при их постоянном накоплении. Основой для оценки технического состояния служат результаты первичной экспертной информации. Предложена и обоснована математическая модель кумулятивного накопления несовершенств на основе аппарата нечеткой логики. Анализ конструктивного риска для каждого элемента сводится к сравнению проектного, действительного и предельного значений определяющих параметров. Предложенный аппарат позволяет оценивать надежность эксплуатируемых зданий и сооружений из металлических конструкций.

Ключевые слова: строительные металлические конструкции, несовершенства, надежность, нечеткая логика, конструктивный риск.

ESTIMATION OF BUILDING METAL STRUCTURES IMPERFECTIONS ON THE BASIS OF THE FUZZY-SET THEORY

A.M. Yugov

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Derzavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.*

E-mail: amyus@mail.ru

Received 21 January 2008; accepted 28 January 2008

Abstract. The article is devoted to the estimation of building metal structures imperfections. A structure gets imperfections in the processes of manufacture, transportation, erection and operation. The basic condition of guaranteeing the trouble-free operation of metal buildings and structures is diagnostics of technical conditions as a whole and available defects and damages in particular. The data about imperfections are obtained when inspecting buildings and structures. There is put forward the mechanism of estimating imperfections at their continuous accumulation. Estimation of technical conditions is based on the results of the primary expert judgement. There is suggested and substantiated a mathematical model of cumulative accumulation of imperfections on the basis of the fuzzy logic apparatus. Analysis of a constructive risk for each element is reduced to the comparison of design, valid and limiting values of the determining parameters. The apparatus offered allows estimating reliability of metal buildings and structures under operation.

Keywords: building metal structures, imperfections, reliability, fuzzy logic, constructive risk.

Введение

Основным условием обеспечения безаварийной работы зданий и сооружений из металлических конструкций является диагностика технического состояния в целом и имеющихся дефектов и повреждений в частности. В процессе натурного освидетельствования определяют структурные параметры конструкций: фактические размеры элементов, соединений и сварных швов, взаимное расположение элементов, их отклонения от проектного положения, погнутости и искривления конструктивных элементов, наличие трещин, степень коррозионного износа материала конструкций, состояние болтовых и заклепочных соединений и т.п.

При общем осмотре уточняется конструктивная схема элементов, общее состояние конструкций, характер повреждений и зоны наибольшей повреждаемости. Проверяется соответствие конструкций, их отдельных элементов и узлов проекту (если таковой имеется в наличии).

При обследовании проверяется также соответствие материалов конструкций требованиям

проектной документации и действующих нормативных документов. Для определения реальных свойств примененных материалов экспериментально исследуют физико-механические характеристики (прочность стали на растяжение, сжатие, сдвиг, срез, смятие, ударную вязкость).

Таким образом, основой для оценки технического состояния служат результаты первичной экспертной информации (ПЭИ) о качестве элементов конструкции, задаваемые в виде числовых значений действительных величин геометрических параметров и расчетно-механических характеристик материала. Выявленные в процессе обследования несовершенства имеют различную степень влияния на несущую способность конструктивных элементов. При этом, учитывая нелинейную зависимость между величиной отклонений и параметрами несущей способности, необходимо их соответствующее математическое представление.

По данным ПЭИ, а также на основании численного и конструктивного анализа объекта формируется множество параметров, определяющих,

в соответствии с требованиями предельных состояний, работоспособность конструкций и сооружения в целом. Согласно ДСТУ [2] определяющий параметр – это физический параметр (показатель качества), характеризующий состояние объекта, достижение которым некоторого предельного значения определяет отказ (запретельное состояние). Определяющие параметры могут быть представлены рядом характеристик, зависящих от вида НДС и внешних воздействий.

Для возможности проведения математических операций по объединению результатов их влияния на несущую способность элементов конструкции, они должны быть представлены в относительной (безразмерной) форме с определением степени их принадлежности проектному или (для расчетно-механических свойств материалов) нормативному значению. Этот факт обуславливает применение основных положений теории нечетких множеств [2 – 4, 6 – 20], которая позволяет при отсутствии выборки статистических данных оценить степень принадлежности какого-либо определяющего параметра его проектному (или нормативному) значению и оценить степень влияния изменения этого параметра на качество элемента.

Для обоснования математической модели используются следующие основные положения теории нечетких множеств [2 – 4, 6 – 20]:

- 1) элементы, составляющие нечеткое множество, для которого удовлетворяется какая-либо совокупность требований и ограничений, и обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени. Т.е. каждый элемент характеризуется функцией принадлежности $\mu_A: U \rightarrow [0;1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу U число $\mu_A(U)$ из интервала $[0;1]$, характеризующее степень принадлежности элемента U нечеткому множеству A . Тогда носителем нечеткого множества A будет множество таких точек в U , для которых величина $\mu_A(U)$ положительна;
- 2) функция принадлежности элемента нечеткому множеству может быть произвольной функцией, в отличие от основного признака элементов четкого множества, принадлежность к которому описывается строго определенной функцией;

- 3) поскольку функция принадлежности элемента нечеткого множества определяется безразмерными относительными значениями, это дает возможность производить математические операции по объединению функций принадлежности различных элементов множества в область, где удовлетворяется совокупность накладываемых требований и ограничений.

Эксплуатируемые металлические конструкции зданий и сооружений имеют, как правило, различные дефекты и повреждения, которые обладают именно нечеткой характеристикой степени своего влияния на снижение несущей способности в силу отсутствия статистической выборки. Кроме того, при анализе используются субъективные представления экспертов. Введение соответствующих математических оценок, основанных на применении теории нечетких множеств, компенсирует недостаток объективной информации и повышает уровень достоверности описания системы. Далее, разбиение нечеткой по своему характеру информации на некоторое количество интервалов на отрезке $[0;1]$ значительно упрощает работу экспертов по отнесению уровня повреждаемости к одному из таких интервалов вместо жесткого вывода типа “работоспособна” – “неработоспособна”.

Несущая способность элементов конструкции определяется определенным множеством параметров (геометрических, жесткостных, прочностных, механических и пр.). Считаем, что все параметры, меняющие свое значение в зависимости от влияния конструктивных несовершенств, принадлежат к нечеткому множеству переменных величин, обладающих лишь одним общим свойством – характеристикой несущей способности конструктивного элемента.

Формирование функции принадлежности определяющих параметров требует соответствующего математического представления первичной экспертной информации. Формализация ПЭИ заключается в переводе данных обследования в соответствующее безразмерное множество степеней принадлежности действительных значений параметров, определяющих соответствие несущей способности элементов конструкции проектному или нормативному значению, принятому за единицу.

При таком переводе в определяющие параметры (геометрические, жесткостные, механические и др. в соответствии с видом НДС) ПЭИ должна пройти в обязательном порядке процедуру ранжирования по степени влияния обследованных параметров на несущую способность элементов конструкции.

Параметры, определяющие несущую способность, являются случайными величинами, закономерности изменения которых вполне описываются дифференциальной функцией нормального распределения [80, 324, 364, 365, 380]. Исследованиями по теории нечетких множеств [2 – 4, 6 – 20] установлено, что для значений нечетких функций, близких какому-то постоянному параметру (например, нормативному или проектному значению), функция принадлежности близка к Гауссовой кривой, описывающей нормальное распределение непрерывной случайной величины.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где x – непрерывная случайная величина;

a – математическое ожидание случайной непрерывной величины x ;

σ – среднее квадратическое отклонение (стандарт) величины x .

Зависимость (1) позволяет при отсутствии строгих статистических данных определить степень принадлежности каждого исследуемого определяющего параметра области его допустимых значений. Для того чтобы перейти к безразмерному относительному значению дифференциальной функции, определим ее максимальное значение. Если $x=a$; $e^0=1$, то

$$F(x)_{max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (2)$$

Если область допустимых значений описывается интервалом $[0;1]$, то степень принадлежности параметра определяется отношением:

$$f(x) = F(x) / F(x)_{max} = e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3)$$

Мерой снижения несущей способности конструктивного элемента является относительное значение отклонения того или иного определя-

ющего параметра от проектного или нормативного значения. Тогда степень принадлежности каждого определяющего параметра области допустимых значений будет иметь вид:

$$f(u) = e^{-\frac{(u_0 - u_n)^2}{2(u_{np})^2}}, \quad (4)$$

где u_0 – действительное значение определяющего параметра на момент оценки риска;

u_n – значение определяющего параметра, устанавливаемое в соответствии с требованиями нормативных (проектных) документов;

u_{np} – предельное значение определяющего параметра, превышение которого ведет к отказу.

В выражении (4) значение u_n , как и математическое ожидание, является центром распределения случайных значений определяющего параметра при появлении конструктивных несовершенств; значение u_{np} принято за среднее квадратическое отклонение.

Тогда анализ конструктивного риска для каждого элемента сводится к сравнению проектного, действительного и предельного значений определяющих параметров. Сравнение должно проводиться с учетом различной степени влияния изменения каждого определяющего параметра на НДС элемента.

Согласно [14, 119] конструкция или ее элемент приходят в состояние непригодности к эксплуатации, когда они проходят через некоторое состояние, называемое предельным, т.е. такое состояние, за пределами которого не соблюдается хотя бы один из критериев, определяющий их несущую способность или пригодность к эксплуатации.

Для формирования предельных значений определяющих параметров используют методы, направленные на выявление запасов несущей способности, заложенных при проектировании. При строгом подходе можно воспользоваться известным в строительной механике методом расчета по предельному равновесию. Тогда задача формулируется следующим образом: найти значения определяющих параметров, при которых действующая на строительную конструкцию нагрузка становится предельной, соответствующей наступлению аварийного состояния (переход несущей конструкции в механизм). Однако, на практике такая задача является весьма трудоемкой. Учитывая, что в соответствии с

[1, 6] перерасчет конструкций выполняется по расчетным сопротивлениям по пределу текучести материала (для функциональных предельных состояний R_y) и по расчетным сопротивлениям по временному сопротивлению (для абсолютных предельных состояний R_u), а также учитывая возможность работы элементов с конструктивными несовершенствами в зоне за пределом текучести материала, при построении математической модели ПЭИ предлагается предельное значение параметра для элементов, работающих на растяжение, определять как:

$$u_{np} = N/R_{un}, \quad (5)$$

и для элементов, работающих на сжатие:

$$u_{np} = N/(j_y * R_{yn}), \quad (6)$$

где R_{yn} и R_{un} – соответственно расчетные сопротивления по пределу текучести и по временному сопротивлению материалов конструкции, в соответствии со СНиП II-23-81* [6];

j_y – коэффициент продольного изгиба;

u_{np} – предельное значение определяющего параметра элемента конструкции.

Такой подход дает возможность определить предельно допустимое значение геометрических характеристик элементов с конструктивными несовершенствами или проверить, насколько имеющиеся дефекты приближаются к значениям, при которых в элементах возникают напряжения, близкие к R_{un} .

Очевидно, что не все конструктивные несовершенства представляют одинаковую опасность и требуют немедленного устранения сразу после обнаружения. Следовательно, необходимо провести их ранжирование по степени влияния на несущую способность элементов. Опасность дефекта определяется степенью удаления действительного значения определяющего параметра от его предельного значения. Ранжирование выполняется введением в (2.16) параметра “ r ”, значение которого определяется на основе понятия точки перехода в теории нечетких множеств.

Точкой перехода нечеткого множества A согласно [17] называется такой элемент U , степень принадлежности которого множеству A равна 0,5. Поскольку верхняя граница нечеткого множества строго определена проектным значением (u_n), степень принадлежности которого равна 1, а нижняя граница может задавать-

ся по предельно допустимому значению несущей способности конструктивного элемента (u_{np}), то параметр r определяется расчетным путем из условия $f=0,5$:

$$f = e^{-\frac{(u_{\partial}-u_n)^2}{2(r u_{np})^2}} = 0,5. \quad (7)$$

Величина $0 \leq r \leq 1$ позволяет ранжировать дефекты и повреждения по влиянию на несущую способность. Конструктивный элемент утрачивает работоспособность при $r \leq 0,5$. При этом считается, что дефект полностью выводит конструктивный элемент из строя. Анализ величины “ r ” показывает, что она зависит от относительного запаса несущей способности. Чем больше запас (значение u_{∂} удалено от u_{np}), тем меньшее влияние оказывает дефект на качество элемента.

Тогда математическая модель формализации ПЭИ примет вид:

$$f = e^{-\frac{(u_{\partial}-u_n)^2}{2(r u_{np})^2}}, \quad (8)$$

где r определяется по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{(u_{np}-u_n)^2}{1,38(u_{np})^2}}. \quad (9)$$

Зависимость r от степени удаления проектного от предельного значения определяющего параметра представлена на рис. 1.

Подставив выражение (9) в (4), получим:

$$f(u) = e^{-\frac{0,6931(U_{\partial}-U_n)^2}{(U_{np}-U_n)^2}}. \quad (10)$$

Полученная математическая модель позволяет учесть степень удаления действительного значения параметра, определяющего несущую способность конструктивного элемента, от его проектного значения при оценке риска аварии.

При оценке технического состояния элементов металлических конструкций определенные затруднения вызывает оценка одновременного влияния ряда несовершенств на их напряженно-деформированное состояние. В силу многообразия типов конструкций, величины и вида приложения нагрузки, расположения и вида несовершенств не представляется

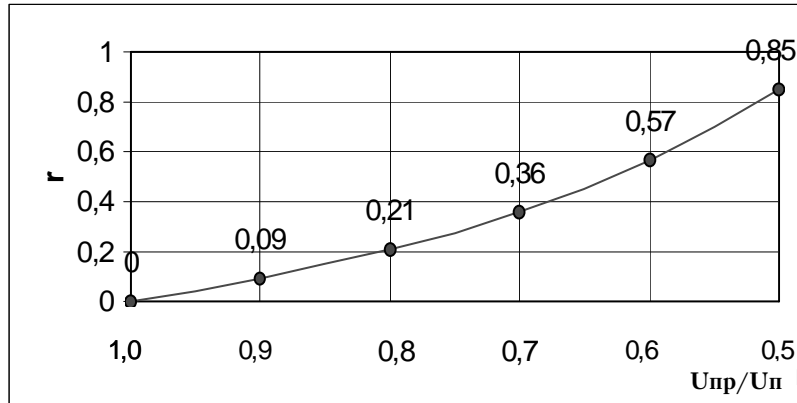


Рис. 1. Зависимость ранга дефекта от $U_{пр}/U_{п}$.

возможным собрать необходимый статистический материал для исследования изменения усилий в элементах конструкций. Очевидно, что дополнительные напряжения в элементах, возникающие в результате накопления несовершенств, нельзя учитывать по принципу суперпозиции.

Вместе с тем, при оценке влияния имеющихся конструктивных несовершенств на снижение несущей способности элементов без статистической выборки с позиций теории нечетких множеств, задача заключается в определении степени принадлежности параметров, определяющих несущую способность конструктивного элемента, такому множеству, где удовлетворяется вся совокупность требований и ограничений в соответствии с проектными и нормативными документами.

Степень принадлежности определяющих параметров бездефектного элемента множеству, где удовлетворяются все требования нормативных документов, определяется операцией объединения соответствующих нечетких множеств, характеризующих степень принадлежности каждого параметра (правилом свертки).

В теории вероятностей сверткой двух функций $f(t)$ и $g(t)$ называется интеграл вида:

$$\int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau, \quad (11)$$

где t - малое приращение аргумента. Преобразование Лапласа для свертки имеет вид [273]:

$$\int_0^{\infty} e^{-zt} dt \int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau =$$

$$= \int_0^{\infty} g(\tau) e^{-z\tau} d\tau \int_{\tau}^{\infty} f(t-\tau) e^{-z(t-\tau)} dt =$$

$$= \int_0^{\infty} \tilde{f}(z)g(\tau) e^{-z\tau} d\tau = \tilde{f} \cdot \tilde{g}. \quad (12)$$

Таким образом, если две функции свертываются, то их преобразования Лапласа перемножаются. Аналогичное правило применимо для сколь угодно большого числа функций. Кроме того, операции над нечеткими множествами не требуют каких-либо ограничений на совокупность элементарных событий (полнота, независимость и т.д.), которые накладываются в теории вероятностей.

Объединение нечетких множеств «А» и «В» в «Х» определяют через алгебраическую сумму их функций принадлежности [16]:

$$f_{A \cup B}(x) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ f_A(x) + f_B(x) \end{array} \right\}, \text{ если } x \in X. \quad (13)$$

Пересечение нечетких множеств «А» и «В» определяют как алгебраическое произведение их функций принадлежности:

$$f_{A \cap B}(x) = f_A(x) \cdot f_B(x), \text{ если } x \in X. \quad (14)$$

Для учета влияния нескольких дефектов на несущую способность конструктивного элемента используется операция пересечения нечетких множеств:

$$f_{A \cap B \cap C \dots} = f_A(x) \cdot f_B(x) \cdot f_C(x) \dots = \prod_{i=1}^n f_k(x) \quad (15)$$

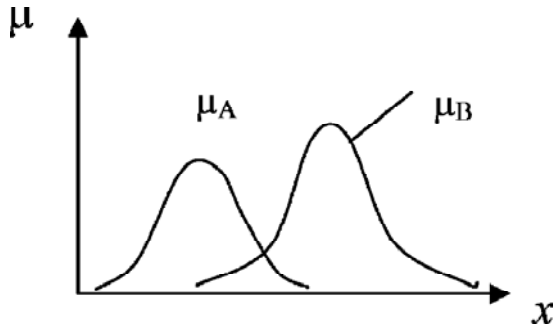


Рис. 2. Графическая интерпретация операции пересечения нечетких множеств.

При составлении решающего правила свертки целесообразно выделить две группы параметров, определяющих несущую способность конструктивных элементов: параметры, характеризующие расчетные свойства материала (с индексом «m») и параметры, определяющие геометрию элемента (с индексом «s»). Правилom свертки должна учитываться различная степень влияния параметров групп «m» и «s» на формирование аварийного состояния элемента.

Таким образом, для оценки конструктивного риска отдельного элемента при полной независимости появления «n» несовершенств используем зависимости:

$$f_s = \prod f_i = \prod f_{is} \prod f_{im}; \quad (16)$$

$$k = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{\prod f_i} = \frac{1}{\prod f_{is} \prod f_{im}}, \quad (17)$$

где f_s – значение суммарной функции принадлежности определяющих параметров конструктивного элемента; k – коэффициент, характеризующий общее снижение проектной несущей способности элемента от имеющихся конструктивных несовершенств.

Учитывая то обстоятельство, что первичная экспертная информация (ПЭИ) является до некоторой степени субъективной, то согласно положениям нечеткой логики [16], из нескольких имеющихся экспертных данных по каждому виду несовершенств используют минимальные значения f_i :

$$\begin{aligned} f(u)_m &= \min[f(u)_m] \\ f(u)_s &= \min[f(u)_s] \end{aligned} \quad (18)$$

Решающее правило свертки (18) для конструктивного элемента, полученное на основе теоремы полной вероятности событий [5], учитывает различную степень влияния определяющих параметров «m» и «s» на формирование аварийного состояния элемента:

$$\begin{aligned} f_s &= A[1 - (f_{i_m})] \cdot [1 - (f_{i_s})] + B[1 - (f_{i_m})] f_s + \\ &+ C[1 - (f_{i_s})] f_m + f_s f_m \end{aligned} \quad (19)$$

где A, B, C – коэффициенты; (f_{i_m}) и (f_{i_s}) – значения функций принадлежности области допустимых значений расчетных свойств материала и геометрических параметров.

Учитывая то, что значение f_i будет максимальным при $A=B=C=0$ (т.к. $A, B, C < 1$) и что различие в значениях f_i при $A=B=C=0$ и $A=B=C=1$ составляет 6-7%, можно сделать вывод о том, что первыми тремя слагаемыми в (19) можно пренебречь. Тогда выражение примет вид:

$$\begin{aligned} f_s &= f_s f_m \\ k_s &= k_s k_m \end{aligned} \quad (20)$$

Выводы

1. Важным методом оценки показателей надежности эксплуатируемых металлических конструкций является исследование процесса накопления несовершенств в конструкциях на всех этапах жизненного цикла с использованием статистического и диагностического методов.
2. В качестве статистических методов изучения процесса накопления несовершенств рационально и эффективно применение модели кумулятивного накопления повреждений и теории нечетких множеств, позволяющих в обобщенной форме оценивать влияние несовершенств на поведение и показатели надежности эксплуатируемого объекта.
3. При использовании кумулятивной модели накопления несовершенств процесс рассматривается на основе конечной стационарной цепи Маркова, при которой будущее значение процесса зависит только от известного прошлого значения и не зависит от

- всех предыдущих значений. При этом используется аппарат условной вероятности.
4. Полученное уравнение (2.12) представляет собой основу для вычисления вероятностей перехода из одного состояния процесса накопления несовершенств в другой, и, таким образом, является математической моделью кумулятивного накопления несовершенств в эксплуатируемых металлических конструкциях.
 5. Применение аппарата теории нечетких множеств позволяет осуществлять объединение влияния несовершенств на несущую способность элементов и конструкций при представлении этих результатов в относительной (безразмерной) форме с определением степени их принадлежности проектному или нормативному значению. При этом функция принадлежности может быть произвольной функцией, позволяющей, в то же время, объединять в себе влияние на показатели надежности различных видов несовершенств.

Литература

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
2. Биргер И.А. Применение теории случайных процессов для описания разрушения // Прочность материалов и конструкций. – К.: Наукова думка, 1975. – С. 297-314.
3. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
4. Болотин В.В. К статистической интерпретации норм расчета строительных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. – 1986. – №1. – С.10-13.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
6. Гвоздев А.А. К вопросу о статистическом методе расчета элементов конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ЦНИИСК. 1974. – С.20-21.
7. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-57). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету – М.: Изд-во стандартов. – 1988. – 10 с.
8. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. – Київ: Держстандарт України. – 1995. – 38 с.
9. Кофман А.В. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с англ. – М.: Радио и связь. – 1982. – 432 с.
10. Малышев Н.Г., Бернштейн Л.С., Боженко А.В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
11. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука. – 1981. – 208 с.
12. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Нормы проектирования.
13. Югов А.М. Оценка надежности металлических конструкций на этапах жизненного цикла. – Макеевка: ДонГАСА. – 2003. – 200 с.
14. Brown C.B. and J.T.P. Yao. Fuzzy Sets and Structural Engineering// ASCE Journal of Structural Engineering.– №109(5).– 1983.– P.1211-1225.
15. Chang W.L., Dong W.M., Wong F.S. A Comparative Study of Probabilistic and Fuzzy Set Methods// Probabilistic Engineering Mechanics.– №2(2). 1987.– P. 82-91.
16. Driankov D., Hellendoorn H. Reinfrank M. An Introduction to Fuzzy Control. Springer, Berlin, 1996. – 316 p.
17. Grabisch M., Nguyen H.T. Walker E.A. (Eds.) Fundamentals of Uncertainty Calculi with Applications to Fuzzy Inference. – Kluwer Academic Publishers. 1995. – 360 p.
18. Hadipriono F.C. Fuzzy Reasoning Expert System (FRES) for Assessing Damage of Protective Structures. A Report Presented to Universal Energy Systems.– Columbus.– Ohio.– Ohio State University. – 1988.
19. Hadipriono F.C. and Sun K.N. Angular Fuzzy Set Models for Linguistic Values// Journal of Civil Engineering Systems.–1990.–No. 7(3).– P. 148-156.
20. Kosko B. Fuzzy Engineering. – Prentice-Hall, New Jersey. – 1997. – 549 p.
21. Shiraishi N., Furuta H. Reliability Analysis Based on Fuzzy Probability// Journal of Engineering Mechanics (ASCE).–№109(6).–1983.–P.1445-1459.
22. Zadeh L.A. Fuzzy Sets// Information and Control. – Vol.8. – 1965. – P. 338-353.
23. Zadeh L.A. Probability Measures of Fuzzy Events// Journal of Mathematical Analysis and Applications. – №23. – 1968. – P. 421-427.
24. Zadeh L.A. Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Part I// Information Sciences. – №9. – 1975. – P. 199-249.
25. Zadeh L.A. Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Part II// Information Sciences. – №9. – 1975. – P. 301-357.
26. Zadeh L.A. Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Part III// Information Sciences. – №9. – 1975. – P. 43-80.
27. Zimmerman H.J. Fuzzy Sets Theory and its Applications. – Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic. – 1991. – 540 p.
28. Rządowski J. Failure consequence factor on the basis of fuzzy set theory. – IX International Conference on Metal Structures, Krakow, Poland, 26-30 June 1995. Preliminary Report. Vol. 2, pp. 151-158.

Югов Анатолий Михайлович – д.т.н., профессор, завідувач кафедри "Технологія, організація та охорона праці в будівництві", Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій, Член Міжнародної асоціації просторових конструкцій, Член Української спілки з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій технічна діагностика будівельних конструкцій.

Югов Анатолий Михайлович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой "Технология, организация и охрана труда в строительстве", Членом Украинской ассоциации по металлическим конструкциям, Член Международной ассоциации пространственных конструкций, Член Украинского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, техническая диагностика строительных конструкций.

Yugov Anatoly Mykhaylovych – Dc. Sc.(Eng), professor, Head of the Department "Technology, Organization and Protection of Labour in Civil Engineering" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a Member of the Ukrainian Association of Metal Structures, a Member of the International Association of Spatial Structures, a Member of the Ukrainian Society on the NDT testing and Engineering Diagnostics. His research interests are an operational reliability of metal structures, engineering diagnostics of building structures.