

DOI:10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Г.Г. Кашеварова, Ю.Л. Тонков, И.Л. Тонков*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, РОССИЯ

**Аннотация:** Инженерному обследованию строительных объектов присущи неклассические ситуации в постановке задач. Это связано с плохой формализуемостью сложной строительной системы, нестандартностью, противоречивостью описания ситуации, подчас сложностью точного измерения контролируемых величин, неточностью исполнительских действий и т.п. Т.е. принятие решения о техническом состоянии связано с решением задачи при весьма нечетких исходных данных, приблизительными «лингвистическими» характеристиками входных параметров (например, дефектов конструкции) и с нечеткостью формулировок категорий технического состояния. А поскольку в процесс подготовки решений включается человек, он не может не разбавить этот процесс заметной долей субъективности. Внедрение интеллектуальной автоматизации в виде экспертных систем в оценку технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений, построенных на базе знаний в результате обобщения экспертных оценок, представляет собой переход на новый более качественный и экономически эффективный технологический уровень обследования строительных объектов. Возможно уже в ближайшем будущем, продукты интеллектуализации этапов инженерного обследования и мониторинга строительных объектов будут обязательными инструментами этой сферы деятельности, как неотъемлемая часть гарантии достоверности выдаваемых результатов.

**Ключевые слова:** строительная конструкция, категория технического состояния, интеллектуальная автоматизация, экспертная система.

## INTELLECTUAL AUTOMATION OF ENGINEERING SURVEY OF BUILDING OBJECTS

*Galina G. Kashevarova, Yuri L. Tonkov, Igor L. Tonkov*

Perm National Research Polytechnic University, Perm, RUSSIA

**Abstract:** The engineering survey of construction objects is characterized by nonclassical situations in setting tasks. The reasons for this are poor formalizability, complexity of the construction system, non-standard, contradictory description of the situation, the difficulty of accurately measuring controlled quantities, inaccurate performance, etc. Thus, the decision on the technical condition is associated with the solution of the problem with fuzzy initial data, approximate "linguistic" characteristics of the input parameters (for example, structural defects) and with the vagueness of formulations of categories of technical condition. Due to the fact that a person is included in the process of preparing decisions, he can not help but dilute this process with a noticeable share of subjectivity. The introduction of intelligent automation in the form of expert systems in assessing the technical condition of the structures of operated buildings and structures built on the basis of knowledge as a result of summarizing expert assessments represents a transition to a new, higher-quality and cost-effective technological level for survey of construction sites. Perhaps already in the near future, the products of intellectualization of the stages of engineering survey and monitoring of construction sites will be mandatory tools of this field of activity, as an integral part of guaranteeing the reliability of the issued results.

**Keywords:** Construction structure, category of technical condition, intellectual automation, expert system

## ВВЕДЕНИЕ

Инженерному обследованию строительных объектов присущи неклассические ситуации в постановке задач. Это плохая формализуемость, нестандартность, противоречивость. С успехом такие проблемы могут решаться с помощью экспертных систем. Речь не идет о замене эксперта в его непосредственной деятельности, но экспертные системы способны расширить и усилить его профессиональные возможности.

Нами сформирована концепция совершенствования технологии принятия решений в инженерном обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений (рис. 1). Она предусматривает введение дополнительного технологического уровня, включающего использование компьютерных средств обработки данных в виде интегрированной интеллектуальной высокотехнологичной системы.

Эта интегрированная система включает в себя несколько экспертных систем, способных работать как в отдельности, и как единое целое (рис. 2). При создании таких экспертных систем используются принципы и методы искусственного интеллекта.

Объектом управления такой интегрированной системы является *аналитический процесс* каждого этапа инженерного обследования строительного объекта. Активный элемент системы – человек, принимающий решения.

В настоящее время нами создана экспертная система определения категории технического состояния конструкций, некоторые принципы создания, диалога с пользователем и оформления результатов решений которой представлены в данной работе. Ведется разработка экспертной системы для обработки результатов лазерного сканирования, подключаемых к процессу обследования.



*Рисунок 1. Связь ресурсов в технологии решения задач диагностики эксплуатируемых строительных объектов: А – существующий технологический уровень, Б – дополнительный концептуальный технологический уровень.*

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При обследовании любого строительного объекта *категория технического состояния* является главным критерием в принятии решения о степени аварийности или необходимости проведения мероприятий по приведению строительного объекта к дальнейшей безопасной эксплуатации. Экспертное заключение о техническом состоянии строительных конструкций требует глубоких высокоспециализированных, знаний в области строительства, и во многом зависит от опыта эксперта. «Переход» конструкции или строительного объекта из одного технического состояния в другое происходит не «скачкообразно», а через множество состояний, границы между которыми трудно распознаваемы. Сложная структура конструкций, многофакторность, неполная, иногда недостоверная и противоречивая информация, весьма короткая шкала [1], размытость границ между ними, увеличивает нежелательную «субъективность» эксперта и искажает разработку решений [2].



Рисунок 2. Структура интегрированной интеллектуальной системы инженерного обследования.

Специалисты-практики в сфере инженерного обследования строительных объектов, не имея четко определенной структуры решений поставленных задач, в первую очередь принимают во внимание объективные критерии, с которыми сопоставляют техническое состояние конструкции. При назначении категорий технического состояния они идут по пути заведомой перестраховки, что приводит к необоснованным затратам значительных средств на выполнение нерациональных или ненужных усилений, и часто упускают из вида опасные значения контролируемых параметров.

В процессе своей профессиональной деятельности мы часто сталкиваемся с техническими отчетами по результатам инженерного обследования, выполненными, очевидно, неопытными исполнителями. Решения, принятые на основании недостаточных знаний и опыта обследования, могут быть ошибочны и даже привести к ухудшению состояния конструкции [3]. Определенный вклад в это явление вносит то, что текущие нормативные стандарты содержат предписывающий

характер и малое число указаний относительно цели. И это далеко не полный перечень причин, придающих актуальность созданию экспертной системы оценки технического состояния [4].

## РОЛЬ РЕПРЕЗЕНТАЦИИ ИНФОРМАЦИИ, ОНТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И АППАРАТА ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ В ПОСТРОЕНИИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

Архитектура экспертных систем [5] (рис. 3) с точки зрения входящих в нее программных модулей, является типовой для большинства проектов. Эти модули могут быть по-разному реализованы, но их состав и взаимодействие имеют четкое назначение. Поэтому при создании конкретной экспертной системы основные усилия сконцентрированы на создании специализированной *базы знаний*, а именно, на выборе моделей пред-

ставления знаний и *решателя (способов вывода решений)*

База знаний (БЗ) - основа любой экспертной системы. Знания – это сочетание теоретического понимания проблемы и эмпирических правил (эвристик) для ее решения.

Источниками знаний в технической диагностике конструкций зданий и сооружений при проектировании экспертной системы является обширная база практических и теоретических исследований, как отдельных авторов, так и научных коллективов [6-16].

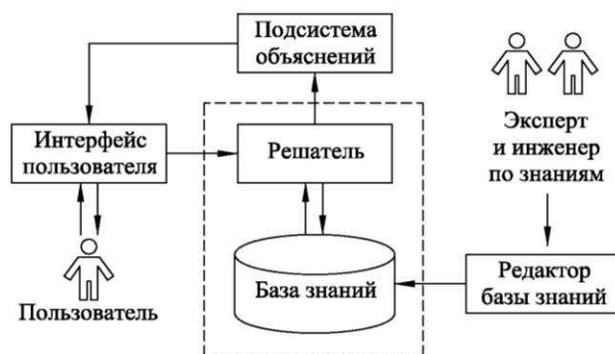


Рисунок 3. Архитектура экспертной системы.

Человек способен принимать решения в условиях неполной или нечеткой информации. Раскрытие и моделирование механизмов памяти человека - эксперта, обеспечивающих хранение огромного объема информации, приобретаемой в течение жизни, а также быстрое и точное воспроизведение необходимой информации при проведении обследования строительного объекта имеет большое практическое значение для построения ЭС.

Именно в этом контексте мы сталкиваемся с понятием «репрезентация информации» в памяти человека. Репрезентация – это представление познаваемого явления с помощью: символов, моделей, в том числе языковых, логических и математических. Естественные и искусственные языки – главные посредники, репрезентанты

Эндель Тульвинг, исследовавший проблемы памяти, выделил три основных вида памяти: эпизодическую, семантическую и процедурную [17]. Эпизодическая память хранит информацию о датированных во времени эпизодах или событиях. Семантическая память – это умственный тезаурус, который организует знания человека. Процедурная – низшая форма памяти сохраняет связи между стимулами и реакцией. Ее можно сравнить с тем, что называют ассоциативной памятью.

При построении БЗ ЭС особое внимание уделяется репрезентации семантических отношений, как предписанию о выполнении определенных операций, реализация которых позволяет проверять наличие того или иного отношения.

Согласно репрезентации семантических отношений, в данной работе сделано предположение, что знания о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений имеют две формы хранения в памяти опытного инженера-обследователя – декларативную и процессуальную [18].

*Декларативная* форма основана на предположении, что семантические отношения хранятся подобно понятиям, непосредственно в виде декларативной информации.

Фрагментарность и разрозненность декларативных знаний – одна из основных сложностей в оценке технического состояния строительной конструкции.

*Процессуальной* формой называют рассмотрение знаний в виде предписаний о выполнении определенных операций, реализация которых позволяет проверять наличие того или иного отношения или системных связей между объектами, процессами и понятиями.

Новые возможности для исследования и учета этих связей открылись благодаря современным технологиям обработки информации, которые используют идеи и методы искусственного интеллекта.

Несмотря на достаточно хорошую изученность, знания оценки технического состояния строительных конструкций недостаточно консолидированы и не располагают четкими

стратегиями принятия решений. Отсутствует рассмотрение технического состояния конструкций с позиций закономерностей системного целого и взаимодействия ее составляющих частей, не уделено внимание иерархическому учету влияющих факторов. Данный факт подчеркивает неготовность знаний из области диагностики строительных объектов к компьютерной реализации.

Организацию системы декларативных знаний о техническом состоянии конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений и целевое использование этих знаний в экспертных системах предлагается связать с **методикой построения онтологий** [19].

Онтология представляется как модель, описывающая совокупность понятий и отношений между ними. В отличие от знаний, перенесенных в алгоритмы, онтология обеспечивает их унифицированное и многократное использование разными группами исследователей или пользователей.

Интеграция моделей представления знаний в ЭС осуществляется на основе *онтологического анализа*, который направлен на исследование и интерпретацию системных связей в сложных предметных областях с применением методов и средств компьютерного моделирования. В нашем случае, это информация о конструкциях эксплуатируемых зданий и сооружений, которую можно разделить на классы по описанию контролируемых параметров и признаков, характеризующих состояние конструкций, выделив совокупности фундаментальных свойств и признаков конструкций для прогнозирования технического состояния этих классов.

Культура перехода от формально-математических моделей и методов к алгоритмам и данным складывалась на протяжении всей истории развития вычислительной техники, но проблемы отображения содержательно-описательных моделей и средств их исследования в информационные объекты и алгоритмы стали объектом изучения сравнительно недавно, и изучаются именно в искусственном интеллекте [20].

Техническое состояние строительной конструкции рассматривается как множество более мелких подмножеств, а признаки, факторы, аномалии и пр. – как элементы более высоких классов обобщений. Результат онтологического анализа – интерпретационная модель предметных знаний в виде *онтографа* (рис. 4, 5) с описаниями внутреннего содержания используемых понятий. Под онтографом понимается графическое представление многоуровневой иерархической структуры (системы) понятий. *Понятия* или, по-другому, часто употребляемые в онтологическом анализе, *концепты*, символизируют классы и подклассы декларативных знаний с механизмом наследования признаков-атрибутов, где каждый элемент характеризуется отличительными и унаследованными от нижестоящего класса признаками [21]. Узлы (вершины) онтографа – понятия, соединяемые дугами, отображающими отношения между ними, как пути передачи и обработки информации.

Для компактного представления онтографа технического состояния конструкций предусматривается система обозначений и индексации, позволяющая его сжать до минимальных размеров (рис. 6). Обозначение каждого концепта отражает его роль в онтологии – класс (группу) признаков (обозначение буквой  $y$ ) или конкретный контролируемый параметр (обозначение буквой  $x$ ).

Основная цель применения онтологического анализа – снижение влияния интуиции экспертов-аналитиков на процесс конструирования декларативных знаний, включенных в оценку технического состояния конструкции, которая определяет последовательность получения этой оценки, в результате решения многоуровневой задачи. Выбор модели процессуальной (процедурной) формы базы знаний зависит от принимаемого в экспертной системе способа вывода решений. В построении современных экспертных систем высокую популярность приобрели такие способы вывода решений как нечеткая логика, искусственные нейронные сети и генети-

ческие алгоритмы [22, 23], моделью которых служит человеческое мышление.

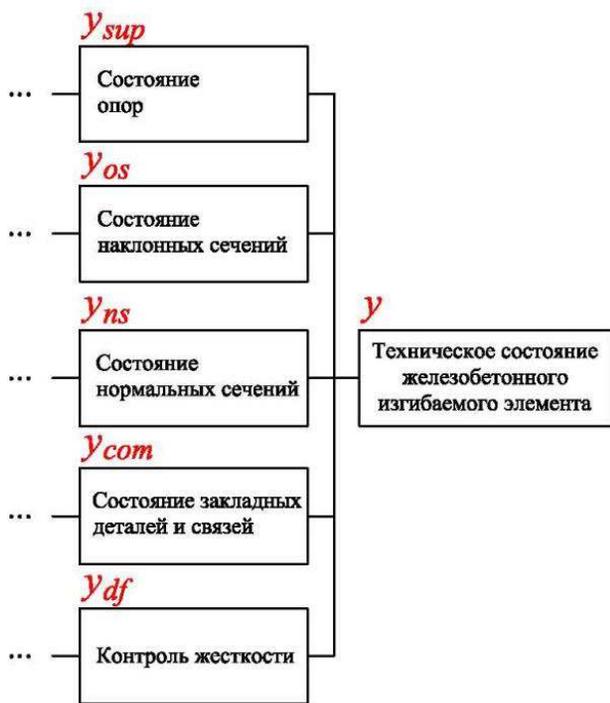


Рисунок 4. Фрагмент онтографа онтологии «Техническое состояние железобетонного изгибаемого элемента» с понятиями 1-го (категориального) уровня.



Рисунок 5. Фрагмент онтографа онтологии «Состояние нормальных сечений» (понятия категориального уровня).

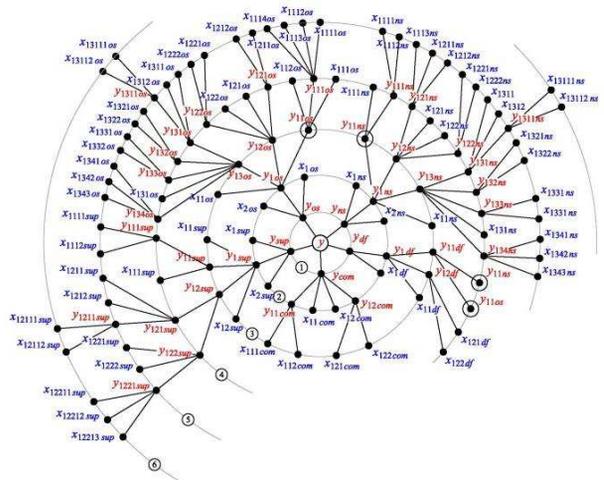


Рисунок 6. Общий вид индексированного онтографа онтологии «Техническое состояние железобетонной изгибаемой конструкции».

В ходе исследований установлено, что экспертную систему для определения категорий технического состояния строительных конструкций целесообразно строить при помощи аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики [24 – 25]. Имея возможности использовать нечеткие величины и лингвистические переменные, описывать простые отношения между переменными с помощью нечетких высказываний, а сложные – нечеткими алгоритмами, эти подходы позволяют описывать состояния строительной конструкции любой сложности.

Под лингвистической переменной понимается переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания некоторого естественного или искусственного языка, описываемая следующими пятью типами данных:

$$(x, T, X, G, M), \quad (1)$$

где  $x$  – имя переменной (заимствованное у соответствующего понятия онтологии);  $T$  – терм-множество (совокупность лингвистических оценок (термов) вида «высокий», «выше среднего» и др.), каждый элемент которого задается нечетким множеством на

универсальном множестве  $X$ ;  $G$  – синтаксические правила, порождающие названия термов;  $M$  – семантические правила, задающие функции принадлежности нечетких термов, порожденных семантическими правилами из  $G$ .

Несмотря на то, что результаты решений при этом являются приближенными, теоретическая основа указанных подходов в математическом смысле является достаточно точной и строгой. Процедурные знания, таких систем, представляются в виде продукционной модели, т.е. в форме правил вида:

*Если* <посылка правила>,  
*то* <заключение правила>.

Например, зависимость  $y_{121ns} = f(x_{1211ns}, x_{1212ns})$  содержит 16 правил, первые 4 из которых следующего вида:

*Если*  $x_{1211ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$  и  $x_{1212ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$ ,  
то  $y_{121ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$ ,  
или;  
*если*  $x_{1211ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$  и  $x_{1212ns} = \langle \text{«выше среднего»} \rangle$ , то  $y_{121ns} = \langle \text{«выше среднего»} \rangle$ , или;  
*если*  $x_{1211ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$  и  $x_{1212ns} = \langle \text{«ниже среднего»} \rangle$ , то  $y_{121ns} = \langle \text{«ниже среднего»} \rangle$ , или;  
*если*  $x_{1211ns} = \langle \text{«высокий»} \rangle$  и  $x_{1212ns} = \langle \text{«низкий»} \rangle$ ,  
то  $y_{121ns} = \langle \text{«ниже среднего»} \rangle$ ,  
или...

Нечеткая логика позволяет технически реализовать лингвистические связки правил продукционной модели знаний при помощи математических операций. Нечеткие правила с логическими операциями «и» ( $\wedge$ ) и «или» ( $\vee$ ) заменяются на операции, соответственно, «минимума» и «максимума».

Решения задач по определению категории технического состояния отлично реализуются на алгоритме нечеткого логического вывода, т.е. аппроксимации зависимости  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Входы  $x_i$  ( $i=1:n$ ) и выходы модели  $y$  представляются лингвистическими переменными [24, 25], заданными на соответствующих универсальных мно-

жествах  $X_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ ,  $Y = [\underline{y}, \overline{y}]$ .

Терм множества, представляются в виде:

– для входной переменной  $x_i$

$$T = \{t_i^1, \dots, t_i^{n_i}\} \quad (2)$$

– для выходной переменной  $y$

$$C = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}, \quad (3)$$

где  $\underline{x}_i$  и  $\overline{x}_i$  – минимальное и максимальное значения входной переменной;  $t_i^{n_i}$  –  $n$ -й лингвистический терм переменной  $x_i$ ;

$c_1, c_2, c_3, c_4$  – термы выходной переменной  $y$ , соответствующие категориям технических состояний:  $c_1$  – *нормативное*,  $c_2$  – *работоспособное*,  $c_3$  – *ограниченно работоспособное*,  $c_4$  – *аварийное техническое состояние*, в соответствии с ГОСТ [1].

По итогам анализа применения известных алгоритмов нечеткого логического вывода в задачах определения категорий технического состояния конструкции был сделан выбор в пользу алгоритма Мамдани, получившего наибольшее практическое применение в моделировании нечетких систем. Предпочтение обусловлено пригодностью этого алгоритма в случаях сложного формирования выборки экспериментальных данных (например, отсутствием эффективной системы сбора информации), а также присущей этому алгоритму возможности интерпретации формируемого заключения.

Формирование базы знаний Мамдани, в которой все значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами, не вызывает трудностей у эксперта (так как вопросы задаются на естественном языке) приводится к виду [24]:

$$(x_1 = t_{1j} \ominus x_2 = t_{2j} \ominus \dots \ominus x_j = t_{j,j} \ominus \dots \ominus x_n = t_{nj} \text{ с весом } w_j) \rightarrow (4)$$

$$\rightarrow y = d_j, \quad j = \overline{1, m}$$

где  $t_{ij}$  – нечеткий терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в  $j$ -м правиле;  $d_j$  – заключение  $j$ -го правила;  $m$  – количество правил в базе знаний;  $\Theta_j$  – логическая операция, связывающая фрагменты антецедента (посылки)  $j$ -го правила (операция «и» или «или»); « $\rightarrow$ » – нечеткая импликация.

Обозначив  $\mu(x_i)$  функцию принадлежности входа  $x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  нечеткому терму  $t_{ij}$ , т. е.

$$t_{ij} = \int_{x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]} \mu_j(x_i) / x_i,$$

а  $\mu_{s_j}(y)$  – функцию принадлежности выхода  $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$  нечеткому терму  $c_j$ , т. е.

$$c_j = \int_{y \in [\underline{y}, \bar{y}]} \mu_{s_j}(y) / y,$$

степень выполнения посылки  $j$ -го правила для текущего входного вектора  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  рассчитывается так:

$$\mu_j(X^*) = w_j(\mu_j(x_1^*)) \chi_j \mu_j(x_2^*) \chi_j \dots \chi_j \mu_j(x_n^*), \quad j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где  $\chi_j$  – обозначает  $t$ -норму, если в  $j$ -м правиле базы знаний используется логическая операция «и», т. е. при  $\Theta = \langle \text{и} \rangle$ , или  $s$ -норму при  $\Theta = \langle \text{или} \rangle$ . Треугольные нормы обычно реализуются операциями минимума ( $t$ -норма) и максимума ( $s$ -норма) [24]. Результат нечеткого вывода представляется в виде:

$$y^* = \left( \frac{\mu_1(X^*)}{c_1}, \frac{\mu_2(X^*)}{c_2}, \dots, \frac{\mu_m(X^*)}{c_m} \right). \quad (6)$$

В результате логического вывода по  $j$ -му правилу базы знаний получается нечеткое значение выходной переменной  $y$ :

$$c_j^* = \text{imp}(c_j, \mu_j(X^*)), \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

где  $\text{imp}$  – импликация, реализуемая операцией минимума, т. е. срезанием функции принадлежности  $\mu_{c_j}(y)$  по уровню  $\mu_j(X^*)$ . Математическая запись нечеткого значения выходной переменной  $y$  имеет вид:

$$c_j^* = \int_{y \in [\underline{y}, \bar{y}]} \min(\mu_j(X^*), \mu_{d_j}(y)) / y. \quad (8)$$

Результат логического вывода с учетом всех правил определяется агрегированием нечетких множеств:

$$y^* = \text{agg}(c_1^*, c_2^*, \dots, c_m^*), \quad (9)$$

где  $\text{agg}$  – агрегирование нечетких множеств, обычно реализуемое операцией максимума.

Через выполнение дефаззификации нечеткого множества  $y_{121ms}$  по методу центра тяжести, определяется четкое значение  $y_{121ms}$  выхода, соответствующее ее входным значениям:

Четкое значение выхода  $y$ , соответствующее входному вектору  $X^*$ , определяется через дефаззификацию нечеткого множества  $y$ .

С помощью функций принадлежности входов  $\mu(x_i)$ , на основании задаваемых четких значений, из универсальных множеств входных лингвистических переменных происходит определение степени уверенности в том, что выходная лингвистическая переменная принимает конкретное значение (рис. 7, 8). Эта степень уверенности определяется как ордината на графике.

Функции принадлежности, в некотором смысле, – это база данных, используемая для преобразования входной разнородной информации в формат последующего диалога с базой знаний. Выбор метода построения функций (прямого или косвенного) определяется соответствующей задачей, характером

неопределенности контролируемого параметра, фрагмента информации о конструкции, а также числом участников, задействованных в этом процессе (один эксперт или группа экспертов) [29, 30].

Для описания понятий и признаков, при отсутствии измеряемых свойств, таких как цвет бетона, звук бетона при простукивании, стадии коррозии арматуры (по внешним признакам) и т. п., применяются, как правило, *косвенные методы*. Они очень трудоемки в сравнении с прямыми методами, но имеют повышенную стойкость к неумышленным искажениям в информации, поступающей от экспертов [31]. Эффективный метод построения функций принадлежности для оценки качественных признаков технического состояния строительных конструкций (рис. 7) подробно представлен в работе [32].

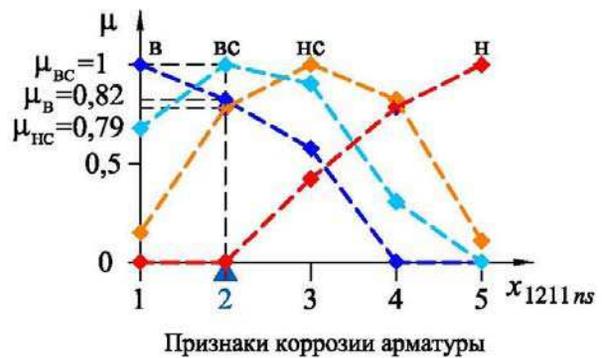
При описании количественных контролируемых параметров предпочтение отдано треугольной и синглтонной функциям принадлежности (рис. 8), определяемых, как правило, *прямым методом*.

В результате проведенных исследований принято решение участки функций принадлежности термов, располагаемые между характерными точками описывать прямыми, для чего лучше всего подходят «классическая» треугольная функция и ее модифицированный вариант – треугольная «ломаная» функция принадлежности (рис. 9). Ее параметрическое описание имеет вид:

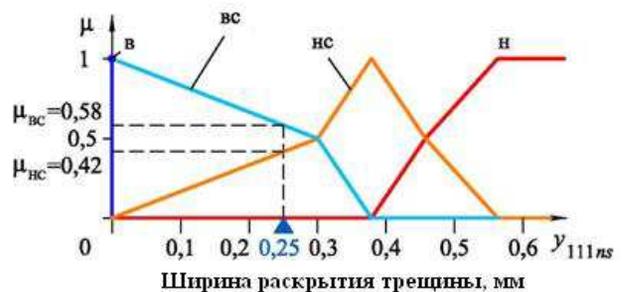
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \text{ или } x \geq c_2, \\ \frac{a_1 - x}{2(a_1 - a_2)}, & a_1 < x \leq a_2, \\ \frac{a_2 - x}{2(a_2 - b)} + 0,5, & a_2 < x \leq b, \\ \frac{x - b}{2(b - c_1)} + 1, & b < x \leq c_1, \\ \frac{x - c_1}{2(c_1 - c_2)} + 0,5, & c_1 < x < c_2. \end{cases} \quad (10)$$

Оценочные термы, характеризующие лишь

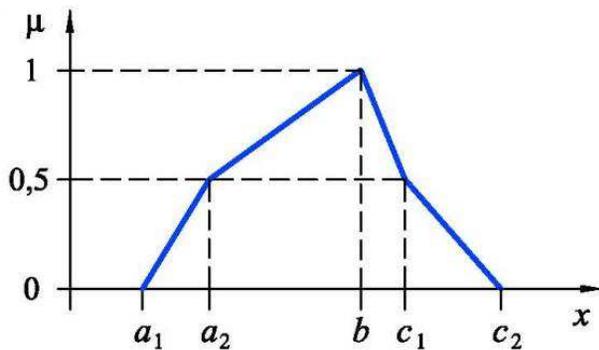
принадлежность присутствия или отсутствия признака технического состояния (каких немало в диагностике строительных конструкций), могут описывать только синглтонные функции принадлежности.



*Рисунок 7. Графики функций принадлежности термов переменной  $x_{1211ns}$  «Результат освидетельствования коррозии арматуры» (в нормальных сечениях) с отображением степеней принадлежности к термам при входе, равном 2 (второй класс признаков повреждения коррозией).*



*Рисунок 8. Графики функций принадлежности термов переменной  $y_{111ns}$  «Напряженное состояние продольной арматуры», автоматически определенных экспертной системой после получения запрашиваемой информации (класс арматуры – А400, расстояние между нормальными трещинами – 250 мм, величина предельно-допустимой ширины раскрытия трещины из условия сохранности арматуры – 0,3 мм): отображены степени принадлежности к термам при ширине раскрытия трещины равной 0,25 мм.*



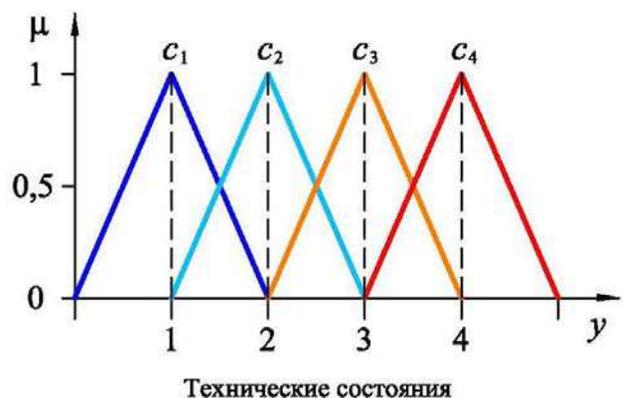
*Рисунок 9. График «ломаной» треугольной функции принадлежности, используемой в описании лингвистических оценок (термов) контролируемых измеримых параметров технического состояния конструкций.*

Получение решений возможно на любом этапе процедуры оценки технического состояния конструкции (от состояний отдельных деталей и материалов до определения технического состояния конструкции в целом). Категория технического состояния объекта определяется как класс с максимальной степенью принадлежности.

На любом этапе обработки информации по декларативной базе знаний может быть определено и четкое значение выхода (категории). Структура функций принадлежности выходной переменной  $\mu_c(y)$  определяется часто используемым в моделировании нечетких систем типом нечетких чисел – *треугольными нечеткими числами* (см. рис. 10). **Треугольное нечеткое число** – это *унимодальное нечеткое число (L-R) типа*, называемое также тройкой  $(l, m, u)$ ,  $(l \leq m \leq u)$  действительных чисел, через которые его функция принадлежности  $\mu_M$  определяется следующим образом [33]:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & \text{если } x \in [l, m], \\ \frac{x-u}{m-u}, & \text{если } x \in [m, u], \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases} \quad (9)$$

Число  $m$  в тройке  $(l, m, u)$  называется *модой* или *четким значением нечеткого треугольного числа*. Числа  $l$  и  $u$  устанавливают степень размытости четкого числа. Так, например, мода нечеткого числа  $c_2$  (рис. 10), характеризующего работоспособное техническое состояние, равна 2, а его размытость определяется числами 1 и 3 – модами нечетких чисел, характеризующих смежные категории технического состояния, соответственно, *нормативное* и *ограниченно работоспособное*.



*Рисунок 10. Нечеткие треугольные числа в описании результата оценки технического состояния строительных конструкций.*

## ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ С ЭКСПЕРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

Успешное тестирование при обработке результатов инженерного обследования конструкций промышленных объектов (рис. 11) прошла экспертная система оценки технического состояния железобетонных изгибаемых конструкций.

Экспертная система автоматически формирует программу проведения обследования, которая включает полный перечень вопросов и требуемых расчетов, необходимых для установления степени эксплуатационной пригодности конкретного типа конструкций, и в режиме диалога выдается пользователю.

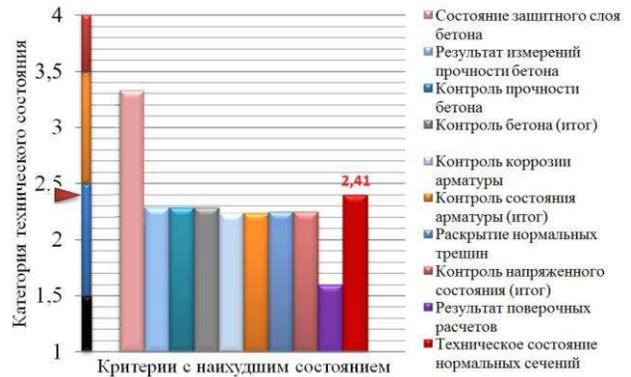


*Рисунок 11. Общий вид одной из железобетонных балок, техническое состояние которых оценивалось при помощи экспертной системы.*

На начальном этапе работы экспертной системы, исходное состояние конструкции считается нормативным, т.е. все параметры в норме. По результатам ответов, пользователь может видеть изменение признаков и категории технического состояния. Для уточнения параметров повреждений, например, при наличии нормальных трещин в середине пролета балки, система запрашивает более подробную, детальную информацию (расстояние между трещинами, ширину раскрытия трещин, класс арматуры на уровне трещины и др.).

Результат оценки технического состояния конструкции, как на промежуточном этапе, так и в целом, пользователь может получать в виде гистограмм с группировкой признаков по категориям со значениями степеней принадлежности к категориям (от 0 до 1). Либо, что более удобно, в виде гистограмм оцениваемых критериев, представленных на непрерывной шкале категорий технических состояний с четкими значениями (от 1 до 4) категории технического состояния. На рис. 12 представлены результаты оценки категории технического состояния обследованной железобетонной балки, изображенной на рис. 11.

Визуализация результатов существенно повышает «прозрачность» принимаемых решений о степени аварийности, формирует понимание причин и рисков возможного изменения технического состояния конструкций, зданий или сооружений.



*Рисунок 12. Пример отображения четких значений категории технического состояния обследованной железобетонной балки.*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеллектуальная автоматизация в области инженерного обследования строительных объектов способна проверить не только собственные знания и предположения, но и наделяет решения прозрачностью, устанавливая контроль над исполнительскими действиями. Поэтому, наряду с совершенствованием нормативных основ, считаемым необходимым внедрение и, в дальнейшем обязательное, применение в этой сфере интеллектуальных систем.

Аппарат теории нечетких множеств, позволяет формализовать и обрабатывать самую разнородную информацию, содержащуюся в признаках технического состояния конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 31937-2011.** Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. ГУП МНИИТЭП, 2011. – 89 с.
2. **Соколов В.А.** Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами. // *Фундаментальные исследования*, 2014, №6-6, с. 1159-1164.
3. Рекомендации по натурным обследованиям железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1972.– 36 с.
4. **Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Фурсов М.Н.** Нечеткая экспертная система диагностики повреждений строительных конструкций. // *Вестник Волжского регионального отделения РААСН: Сб. науч. тр. Вып. 17.* – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2014, с. 167-173.
5. **Джарратано Д.** Экспертные системы: принципы разработки и программирование. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1152 с.
6. **Гроздов В.Т.** Дефекты строительных конструкций и их последствия. – СПб.: Общероссийский общественный фонд «Центр качества строительства», 2007. – 136 с.
7. **Гроздов В.Т.** Признаки аварийного состояния несущих конструкций зданий и сооружений. – СПб.: Издательский Дом KN+, 2000. – 39 с.
8. **Гучкин И.С.** Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2001. – 171 с.
9. **Дементьева М.Е.** Техническая эксплуатация зданий: оценка и обеспечение эксплуатационных свойств конструкций зданий. – М.: МГСУ, 2008. – 227 с.
10. **Добромыслов А.Н.** Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. – М.: МГСУ, 2006. – 256 с.
11. **Добромыслов А.Н.** Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 66 с.
12. **Мальганов А.И., Плевков В.С.** Восстановление и усиление ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений. – Томск: Печатная мануфактура, 2002. – 391 с.
13. **Прядко Н.В.** Обследование и реконструкция жилых зданий. – Макеевка: ДонНАСА, 2006. – 156 с.
14. Классификатор основных видов дефектов в строительстве и промышленности строительных материалов. Утвержден Главгосархстройнадзором России 17 ноября 1993 года. – 95 с.
15. Пособие по практическому выявлению пригодности к восстановлению поврежденных строительных конструкций зданий и сооружений и способам их оперативного усиления. – М.: ЦНИИпромзданий, 1996. – 99 с.
16. Рекомендации по обследованию и мониторингу технического состояния эксплуатируемых зданий, расположенных вблизи нового строительства или реконструкции. Приняты и введены в действие Указанием Москомархитектуры от 18 ноября 1998 года № 39.
17. **Кондаков И.М.** Психология. Иллюстрированный словарь. – СПб.: Прайм-ЕВРОЗНАК, 2007. – 783 с.
18. **Гаврилова Т.А., Червинская К.Р.** Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. – М: Радио и связь, 1992. – 200 с.
19. **Смирнов С.В.** Онтологический анализ: определения и алгоритмы. // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. III междунар. конф. Самара, 4-9 сентября 2001, Самара СНЦ РАН, 2001, с. 206-212.*

20. **Смирнов С.В.** Онтологический анализ в системах компьютерного моделирования: Дис. ... докт. техн. наук. Рос. акад. наук, Ин-т пробл. упр. слож. системами. – Самара, 2002. – 348 с.
21. **Палагин А.В., Петренко Н.Г., Малахов К.С.** Методика проектирования онтологии ПДО. // Комп'ютерні засоби, мережі та системи, 2011, №10, с. 5-12.
22. **Zadeh L.A.** Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing. // Communications of the ACM, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 77-84.
23. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 452 с.
24. **Штовба С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.
25. **Ротштейн А.П.** Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы и нейронные сети. – Винница: Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
26. **Zadeh L.A.** Fuzzy Sets. // Information and Control, No. 8(3), 1965, pp. 338-353.
27. **Zadeh L.A.** A Fussy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. // J. Cybern. Vol. 2, 1992, pp. 4-34.
28. **Zadeh L.A.** The Concept of Linguistic Variable and Approximate Reasoning. // Information Sciences, Vol. 8, 1974, pp. 199-249.
29. **Кашеварова Г.Г., Фурсов М.Н., Тонков Ю.Л.** О построении функций принадлежности нечеткого множества в контексте задачи диагностики повреждений железобетонных плит. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 10, Issue 2, 2014, pp. 93-101.
30. **Kashevarova G.G., Fursov M.N., Tonkov Y.L.** Membership functions of fuzzy sets in the diagnosis of structures pathology // Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014), 16-17 Nov. 2014, Shenzhen, China / Taylor & Francis Group, A Balkema Book, 2015, pp. 261-264.
31. **Аверкин А.Н.** и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
32. **Тонков Ю.Л.** Выбор эффективного метода построения функций принадлежности для оценки качественных признаков технического состояния строительных конструкций. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика, 2016, №3, с. 126-146.
33. **Яхьяева Г.Э.** Нечеткие множества и нейронные сети. – М. Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **GOST 31937-2011.** Zdanija i sooruzhenija. Pravila obsledovanija i monitoringa tehničkog sostojanija [Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition]. Moscow, GUP MNITJeP, 2011, 89 pages
2. **Sokolov V.A.** Kategorii Tehničkog Sostojanija Stroitel'nyh Konstrukcij Zdanij pri ih Diagnostike Verojatnostnymi Metodami [Categories of Technical Condition of Structures of Buildings with their Diagnostics by Probabilistic Methods]. // Fundamental'nye issledovanija, 2014, No.6-6, pp. 1159-1164.
3. Rekomendacii po Naturnym Obsledovanijam Zhelezobetonnyh Konstrukcij [Recommendations for Field Inspections of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, NIIZhB, 1972, 36 pages.

4. **Kashevarova G.G., Tonkov Ju.L., Fursov M.N.** Nechetkaja Jekspertnaja Sistema Diagnostiki Povrezhdenij Stroitel'nyh Konstrukcij [Fuzzy Expert System for Diagnosing Damage to Building Constructions]. // Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdelenija RAASN: Sb. nauch. tr. Vyp. 17, Nizhnij Novgorod: NNGASU, 2014, pp. 167-173.
5. **Dzharratano D.** Jekspertnye Sistemy: Principy Razrabotki i Programirovanie [Expert Systems: Principles of Design and Programming]. Moscow, "Williams" Publishing House, 2006, 1152 pages.
6. **Grozdov V.T.** Defekty Stroitel'nyh Konstrukcij i ih Posledstvija [Defects of Building Structures and their Consequences]. Saint-Petersburg, All-Russian public fund, 2007, 136 pages.
7. **Grozdov V.T.** Priznaki Avarijnogo Sostojanija Nesushhijh Konstrukcij Zdanij i Sooruzhenij [Signs of the Emergency Condition of Load-Bearing Structures of Buildings]. Saint-Petersburg, KN+ Publishing House, 2000, 39 pages.
8. **Guchkin I.S.** Diagnostika Povrezhdenij i Vosstanovlenie Jekspluatacionnyh Kachestv Konstrukcij [Diagnostics of Damages and Restoration of Operational Qualities of Structures]. Moscow, ASV Publishing House, 2001, 171 pages.
9. **Dementieva M.E.** Tehnicheskaja Jekspluatacija Zdanij: Ocenka i Obespechenie Jekspluatacionnyh Svoystv Konstrukcij Zdanij [Technical Maintenance of Buildings: Assessment and Maintenance of the Operational Properties of Building Structures]. Moscow, MGSU, 2008, 227 pages.
10. **Dobromyslov A.N.** Diagnostika Povrezhdenij Zdanij i Inzhenernyh Sooruzhenij [Diagnosis of Damage to Buildings and Engineering Structures]. Moscow, MGSU, 2006, 256 pages.
11. **Dobromyslov A.N.** Ocenka Nadezhnosti Zdanij i Sooruzhenij po Vneshnim Priznakam [Estimation of Reliability of Buildings and Structures by External Signs]. Moscow, ASV Publishing House, 2004, 66 pages.
12. **Mal'ganov A.I., Plevkov V.S.** Vosstanovlenie i usilenie ogradhdajushhijh stroitel'nyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij [Restoration and Strengthening of Enclosing Building Structures of Buildings and Constructions]. Tomsk, Pechatnaja manufaktura, 2002, 391 pages.
13. **Prjadko N.V.** Obsledovanie i Rekonstrukcija Zhilyh Zdanij [Survey and Reconstruction of Residential Buildings]. Makeevka, DonNASA, 2006, 156 pages.
14. **Klassifikator Osnovnyh Vidov Defektov v Stroitel'stve i Promyshlennosti Stroitel'nyh Materialov** [Classifier of the Main Types of Defects in the Construction Industry and Construction Materials]. Utverzhen Glavgosarhstrojnadzorom Rossii 17 nojabrja 1993 goda, 95 pages.
15. **Posobie po Prakticheskomu Vyjavleniju Prigodnosti k Vosstanovleniju Povrezhdennyh Stroitel'nyh Konstrukcij Zdanij i Sooruzhenij i Sposobam ih Operativnogo Usilenija** [A Manual on the Practical Identification of the Suitability for Restoration of Damaged Structures of Buildings and Methods of Their Operational Strengthening]. Moscow, CNIIPromzdanij, 1996, 99 pages.
16. **Rekomendacii po Obsledovaniju i Monitoringu Tehnicheskogo Sostojanija Jekspluatiruemyh Zdanij, Raspolozhennyh Vblizi Novogo Stroitel'stva ili Rekonstrukcii** [Recommendations for Inspection and Monitoring of Technical Condition of Exploited Buildings Located Near New Construction or Reconstruction]. Adopted and put into effect by the Guideline of Mosomarchitecture dated November 18, 1998 No. 39.
17. **Kondakov I.M.** Psihologija. Illjustrirovannyj slovar' [Psychology Illustrated Dictionary]. Saint-Petersburg, Prajm-EVROZNAK, 2007, 783 pages.

18. **Gavrilova T.A., Chervinskaja K.R.** Izvlechenie i Strukturirovanie Znanij Dlja Jekspertnyh System [Extracting and Structuring Knowledge for Expert Systems]. Moscow, Radio i svjaz, 1992, 200 pages.
19. **Smirnov S.V.** Ontologicheskij Analiz: Opredelenija i Algoritmy [Ontological Analysis: Definitions and Algorithms]. // Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnyh sistemah. Proceedings of the Third International Conference, Samara, 4-9 September, 2001, Samara SNC RAN, 2001, pp. 206-212.
20. **Smirnov S.V.** Ontologicheskij Analiz v Sistemah Komp'juternogo Modelirovanija [Ontological Analysis in Computer Modeling Systems]. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Institute for the management of complex systems of the Russian Academy of Sciences, Samara, 2002, 348 pages.
21. **Palagin A.V., Petrenko N.G., Malahov K.S.** Metodika proektirovanija ontologii PdO [Methodology of designing ontology PG]. // Komp'juterni zasobi, merezhi ta sistemi, 2011, No. 10, pp. 5-12.
22. **Zadeh L.A.** Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing. // Communications of the ACM, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 77-84.
23. **Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L.** Nejronnye Seti, Geneticheskie Algoritmy i Nechetkie Sistemy [Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom, 2008, 452 pages.
24. **Shtovba S.D.** Proektirovanie Nechetkih Sistem Sredstvami MATLAB [Designing Fuzzy Systems by MATLAB]. Moscow, Gorjachaja linija-Telekom, 2007, 288 pages.
25. **Rotshtejn A.P.** Intellektual'nye Tehnologii Identifikacii: Nechetkaja Logika, Geneticheskie Algoritmy i Nejronnye Seti [Intelligent Identification Technologies: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms and Neural Networks]. – Vinnica: Universum-Vinnicja, 1999, 320 pages.
26. **Zadeh L.A.** Fuzzy Sets. // Information and Control, No. 8(3), 1965, pp. 338-353.
27. **Zadeh L.A.** A Fussy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. // J. Cybern. Vol. 2, 1992, pp. 4-34.
28. **Zadeh L.A.** The Concept of Linguistic Variable and Approximate Reasoning. // Information Sciences, Vol. 8, 1974, pp. 199-249.
29. **Kashevarova G.G., Fursov M.N., Tonkov Yu.L.** O Postroenii Funkcij Prinadlezhnosti Nechetkogo Mnozhestva v Kontekste Zadachi Diagnostiki Povrezhdenij Zhelezobetonnyh Plit [About Construction of the Functions of the Fuzzy Set Belonging in the Context of the Problem of Damage Diagnostics of Reinforced Concrete Slabs]. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 10, Issue 2, 2014, pp. 93-101.
30. **Kashevarova G.G., Fursov M.N., Tonkov Y.L.** Membership functions of fuzzy sets in the diagnosis of structures pathology // Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014), 16-17 Nov. 2014, Shenzhen, China / Taylor & Francis Group, A Balkema Book, 2015, pp. 261-264.
31. **Averkin A.N. et. al.** Nechetkie Mnozhestva v Modeljah Upravlenija i Iskusstvennogo Intellekta [Fuzzy Sets in Management Models and Artificial Intelligence]. Under the editorship of D.A. Pospelov. Moscow, Nauka, 1986, 312 pages.
32. **Tonkov Yu.L.** Vybor Jeffektivnogo Metoda Postroenija Funkcij Prinadlezhnosti Dlja Ocenki Kachestvennyh Priznakov Tehnicheskogo Sostojanija Stroitel'nyh Konstrukcij [Choosing an Effective Method for Constructing Accessories Functions for the Evaluation of Qualitative Signs of the Technical Condition of Building Structures]. // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Prikladnaja

jekologija. Urbanistika, 2016, No. 3, pp. 126-146.

33. **Jahjaeva G.E.** Nechetkie mnozhestva i nejronnye seti [Fuzzy Sets and Neural Networks]. Moscow, Internet-University of Information Technologies; BINOM. Laboratory of Knowledge, 2006, 316 pages.
- 

Кашеварова Галина Геннадьевна, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; Россия, 614010, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109; тел. +7(342) 219-83-61, e-mail: ggkash@mail.ru.

Тонков Юрий Леонидович, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; 614010, Россия, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109; тел. +7(342) 219-83-93, e-mail: 95081@mail.ru.

Тонков Игорь Леонидович, доцент кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; 614010, Россия, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109; тел. +7(342) 219-83-93, e-mail: 73266@mail.ru.

Galina G. Kashevarova, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Dr.Sc., Head of department “Building constructions and computational mechanics”, Perm National Research Polytechnic University; Russia, 614010, Perm, ul. Kuibyshev, 109; tel. +7 (342) 219-83-61, e-mail: ggkash@mail.ru.

Yuri L. Tonkov, Senior Lecturer, Department “Building constructions and computational mechanics”, Perm National Research Polytechnic University; 614010, Russia, Perm, ul. Kuibyshev, 109; tel. +7 (342) 219-83-93, e-mail: 95081@mail.ru.

Yuri L. Tonkov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Building constructions and computational mechanics”, Perm National Research Polytechnic University; 614010, Russia, Perm, ul. Kuibyshev, 109; tel. +7 (342) 219-83-93, e-mail: 73266@mail.ru.