

УДК 691.3:666.9

Т.А. Костюк

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков*

## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА СОСТАВА КОМПОЗИТА С ПОВЫШЕННЫМИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВАНИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

*Представлены составы композитов с повышенными гидрофизическими характеристиками, рассчитанные на основании методов математического планирования эксперимента. Предложен инструментальный метод для обоснованного выбора состава композита на основании качественных характеристик эксплуатируемых объектов.*

**Ключевые слова:** состав композита, гидрофизические характеристики, нечеткая логика.

### Постановка проблемы; анализ исследований и публикаций

Сложные экономические условия заставляют предприятия строительной отрасли Украины переходить в режим жесткой экономии материальных ресурсов, но такая экономия не должна негативно сказываться на ремонте и восстановлении поврежденных зданий и сооружений. Кроме того, вопросы подбора гидроизоляционных цементных составов плотной структуры, устойчивых к растрескиванию, имеющих широкую номенклатуру и простые технологии применения, являющихся конкурентоспособными, остаются актуальными.

Анализ литературных источников [1 – 5] показал, что наиболее эффективными составами для защиты бетонных и железобетонных конструкций являются гидроизоляционные составы на цементной основе, работающие по принципу интегрально-капиллярных составов, способных создавать в контактной зоне (бетон – защитный состав) буферный уплотненный кристаллогидратами слой, что делает бетон водонепроницаемым. Такие материалы эффективно работают как при прямом, так и при обратном давлении и одинаково применимы как внутри, так снаружи зданий и сооружений. Однако существующая номенклатура не достаточно отражает требования рынка по технологии применения, составы импортного производства содержат водорастворимые полимеры, что сужает температурные границы их нанесения, часто содержат несбалансированный состав химических добавок, что приводит либо к высолом и растрескиванию, либо к потере гидрозащитных функций. Кроме того, составы на цементной основе имеют низкую трещиностойкость.

Наиболее часто оптимизация составов с заданными характеристиками осуществляется на основании исследований В.А. Вознесенского [6]. Так в работах [7, 8] предложена оптимизация составов ком-

позитов на основании метода математического планирования эксперимента.

В современных экономических условиях целесообразно принимать обоснованные решения относительно выбора состава композита на основании качественных характеристик эксплуатируемых объектов и опираясь на ресурсные возможности предприятий строительной отрасли.

Качественные характеристики эксплуатируемых объектов чаще описаны вербально, если же показатели имеют числовые значения, то их сложно привести к одной единице измерения, в этом случае для организации методики выбора состава наиболее целесообразен нечеткологический подход.

Применение такого подхода было эффективно применено при решении задач выбора способов восстановления трубопроводов водоснабжения и водоотведения [9 – 11].

**Целью настоящей статьи** является разработка методологического и программного инструментария для обоснованного выбора состава композита на основании качественных характеристик эксплуатируемых объектов с использованием нечеткологического подхода и средств Fuzzy Logic Toolbox в MATLAB.

### Основной материал

До применения аппарата нечеткой логики были подобраны оптимальные составы композита с использованием метода математического планирования эксперимента (табл. 1). Из представленных в табл. 1 составов наилучшим по гидрофизическим характеристикам является второй состав, который будет эффективно работать в любых условиях эксплуатации. Но предварительный расчет стоимости указанных составов показал его наибольшую дороговизну. Он стоит 134 грн за 100 кг, тогда как стоимость первого состава составляет 107 грн за 100 кг, а третьего – 116 грн за 100 кг.

Таким образом, обоснованный выбор состава композита, учитывая стоимостной аспект, является актуальным, так как ремонт и восстановление не всех эксплуатируемых объектов требует максимальных показателей по всем гидрофизическим и физико-механическим характеристикам. Обобщенные данные по исследованию физических и физико-

механических свойств композита представлены в табл. 2.

Требования разработанного композита цементным составам проникающего действия, применяемым в виде сухих смесей для гидроизоляции, в том числе с обратным давлением воды, соответствуют ДСТУ Б.В.2.7-126:2011.

Таблица 1

Примеры составов композита с повышенными гидроизоляционными характеристиками

№ п/п	Наименование компонентов	Состав, масс. %			
		1	2	3	контрольный
1	Портландцемент	30,0	34,7	40,0	30
2	Кварцевый песок	65,0	56,0	52,5	60,0
3	Перлитовый песок	1,0	0,50	1,50	4,5
4	Стекловолокно	0,10	0,07	0,20	0,5
5	Карбонат кальция (отход водоочистки)	3,0	4,0	4,3	5,0
6	Комплексная химическая добавка	0,9	1,23	1,50	–

Таблица 2

Обобщенная таблица результатов по физико-механическим испытаниям

Свойства отвержденного состава композита	Номер состава в соответствии с табл. 1			
	1	2	3	контрольный
Предел прочности состава при сжатии, $R_{сж}$ , МПа	32,8	41,1	27,5	25,5
Предел прочности состава при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	8,2	12,5	7,9	7,6
Адгезия к бетону, $R_{от}$ , МПа, при замачивании в воде	2,05	2,36	2,28	0,74
Деформаций усадки через 6 месяцев, %	0,09	0,07	0,15	0,87
Водонепроницаемость, W	более W8	≈ W12	W8	W4
Морозостойкость, F, циклы	200	Более 200	150	100
Паропроницаемость, $\mu$ , мг/м·час·Па	0,035	0,032	0,038	0,16
Трещиностойкость, визуально	без трещин	без трещин	без трещин	волосяные трещины
Водопоглощение по массе, %	1,09	0,56	1,15	3,21
Водопоглощение по объему, %	2,5	1,28	2,61	7,22

Математическая теория нечетких множеств и нечеткая логика являются обобщением классической теории множеств и классической формальной логики [12]. При построении моделей систем и процессов с применением нечеткомножественного подхода и аппарата нечеткой логики все входящие и исходящие переменные представляются как лингвистические, принимающие значения из множества слов или словосочетаний какого-либо природного или искусственного языка [12].

При этом для описания лингвистической переменной необходимо задать ее имя (X), множество допустимых значений или терм-множество (T), каждый элемент которого (терм) является нечетким множеством на универсальном множестве U; синтаксические правила (G), порождающие названия термов; семантические правила (M), задающие функции принадлежности нечетких термов, порожденных синтаксическими правилами G [11, 12].

Аппроксимация зависимости «входы-выход» при использовании аппарата нечеткой логики, называемая также нечетким логическим выводом, осуществляется на основании правил типа «ЕСЛИ-ТО» и операций над нечеткими множествами [11, 12].

В общем случае механизм логического вывода включает четыре этапа: ввод нечеткости (фаззификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости (дефаззификация).

Одним из наиболее распространенных способов логического вывода в нечетких системах является алгоритм Мамдани, в основе которого лежит использование минимаксной композиции нечетких множеств для аппроксимации исходных данных [12].

При построении модели по алгоритму Мамдани взаимосвязь между входами и выходом Y определяется нечеткой базой знаний типа Мамдани следующего формата:

ЕСЛИ  $(x_1 = a_1^{j1})$  И  $(x_2 = a_2^{j1})$  И...И  $(x_n = a_n^{j1})$ ;  
 ИЛИ  $(x_1 = a_1^{j2})$  И  $(x_2 = a_2^{j2})$  И...И  $(x_n = a_n^{j2})$ ;  
 ....  
 ИЛИ  $(x_1 = a_1^{jk})$  И  $(x_2 = a_2^{jk})$  И...И  $(x_n = a_n^{jk})$ ,  
 ТО  $(y = d_j)$ ,

для всех  $j = \overline{1, m}$ , где  $a_p^{jk}$  – нечеткий терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в строчке с номером  $jp$  ( $p = \overline{1, k}$ );  $k$  – количество строк-конъюнкций, в которых вход  $y$  оценивается нечетким термом  $d_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $m$  – количество термов, которые используются для лингвистической оценки исходящего параметра  $y$  [11, 12].

С помощью операций  $\cup$ (ИЛИ) и  $\cap$ (И) нечеткая база знаний записывается компактнее:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left( \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right) \rightarrow (y = d_j), j = \overline{1, m}.$$

Нечеткий логический вывод позволяет с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами построить аппроксимацию зависимости  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [11, 12].

В общем случае при  $n$  входящих переменных и одной исходящей переменной  $\mu_{jp}(x_i)$  – функция принадлежности входа  $x_i$  нечеткому терму  $a_p^{jk}$ , т.е.

$$a_p^{jk} = \int_{x_i}^{\overline{x_i}} \mu_{jp}(x_i) / x_i, \quad x_i \in [\underline{x_i}, \overline{x_i}];$$

$\mu_{d_j}(y)$  – функция принадлежности выхода  $y$  нечеткому терму  $d_j$ , т.е.

$$d_j = \int_y^{\overline{y}} \mu_{d_j}(y) / y, \quad y \in [\underline{y}, \overline{y}];$$

из базы знаний определяется следующей системой логических уравнений:

$$\mu_{d_j}(X^*) = \bigvee_{p=\overline{1, k}} w_{jp} \cdot \bigwedge_{i=\overline{1, n}} [\mu_{ip}(x_i^*)], \quad j = \overline{1, m},$$

где  $\wedge$  ( $\bigvee$ ) – операция s-нормы (t-нормы), то есть множество реализаций логической операции ИЛИ (И). Наиболее часто используются следующие реализации: для операции ИЛИ – нахождение максимума, для операции И – нахождение минимума [11, 12].

Нечеткое множество  $\tilde{y}$ , которое соответствует входному вектору  $X^*$ , определяется таким образом:

$$\tilde{y} = \text{agg} \left( \int_y^{\overline{y}} \min(\mu_{d_j}(X^*), \mu_{d_j}(y) / y) \right),$$

где  $\text{agg}$  – агрегация нечетких множеств, которая наиболее часто реализуется операцией нахождения максимума. Записывается следующим образом:

$$\tilde{y} = \frac{\mu_{d_1}(X^*)}{d_1} + \frac{\mu_{d_2}(X^*)}{d_2} + \dots + \frac{\mu_{d_m}(X^*)}{d_m}.$$

Особенностью этого нечеткого множества является то, что универсальным множеством для него является терм-множество переменной  $y$  [11, 12]. Нечеткий логический вывод по алгоритму Мамдани выполняется на основании нечеткой базы знаний:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left( \bigcap_{i=1}^n x_i = a_i^{jp} \text{ с весом } \omega_{jp} \right) \rightarrow (y = d_j), j = \overline{1, m},$$

в которой значения входящих и исходящих переменных заданы нечеткими множествами [11, 12].

Для разработки информационной системы выбора состава композита сформированы входные и исходящая переменные (терм-множества), термы и их описания (табл. 3).

Таблица 3

Переменные, терм-множества и термы

Перем.	Терм-множество	Показатель	Термы	Описание
Входящие переменные				
X1	Требования к пределу прочности бетона при сжатии	Предел прочности бетона при сжатии, МПа	[0;0,33] [0,34;0,66] [0,67;1]	низкий (20-25 МПа) средний (25-30 МПа) высокий (31-40 МПа)
X2	Требования к пределу прочности бетона при изгибе	Предел прочности бетона при изгибе, МПа	[0;0,33] [0,34;0,66] [0,67;1]	низкий (меньше 7 МПа) средний (7-8,9 МПа) высокий (9-12 МПа)
X3	Необходимость заделки стыков и швов	Деформаций усадки через 6 месяцев, %	[0;0,5] [0,51;1]	нет да
X4	Необходимость использ. в системах с высоким давлением воды	Водонепроницаемость, W	[0;0,5] [0,51;1]	нет да
X5	Необходимость наружной облицовки цоколя и отмостки	Морозостойкость, F, циклы	[0;0,5] [0,51;1]	нет да
Исходящая переменная				
Y	Номер состава*		[0;1] [1,1;2] [2,1;3]	1 2 3

\* номер состава задан в соответствии с табл. 1.

Система нечеткого логического вывода реализована средствами Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB, который содержит набор GUI-модулей, обеспечивающих проведение этапа структурной идентификации в диалоговом режиме [11, 12].

Фаззификация некоторых из входящих переменных и дефаззификация исходящей переменной представлены на рис. 1 – 3. На рис. 4 представлена база знаний разработанной системы. Один из результатов работы системы на основании заданных значений входных переменных представлен на рис. 5. Так, при средних значениях пределов прочности при сжатии и изгибе, необходимости осуществления заделки стыков и швов, использовании в конструкциях с высоким положительным или отрицательных давлением воды и без необходимости применения в наружной облицовке цоколя и отмостки система рекомендует применение второго состава.

Еще одной из возможностей системы является построение поверхностей, графически отображающих изменение исходящей переменной, для всех значений двух входящих переменных и варьируемых значения оставшихся переменных (рис. 6).

Представленная на рис. 6 поверхность в двух

нижних осях учитывает все возможные заданные на входе значения пределов прочности при сжатии (ось X) и изгибе (ось Y), а по оси Z отображается номер рекомендуемого состава.

В данном примере варьируемые значения оставшихся трех переменных свидетельствуют об отсутствии необходимости осуществления заделки стыков и швов, отсутствие необходимости использования в конструкциях с высоким положительным или отрицательных давлением воды и без необходимости наружной облицовки цоколя и отмостки.

Интерпретируя полученную поверхность (рис. 6) можно сделать вывод, что при низких пределах прочности при сжатии и изгибе следует выбрать третий состав, при средних значениях этих же показателей – первый состав, и при высоких – второй.

### Выводы

Представленная система может быть адаптирована для учета большего количества входящих переменных, которые необходимо будет связать требуемыми правилами с переменной выхода. Система универсальна, проста в использовании и может быть развита с учетом любых пожеланий пользователя.

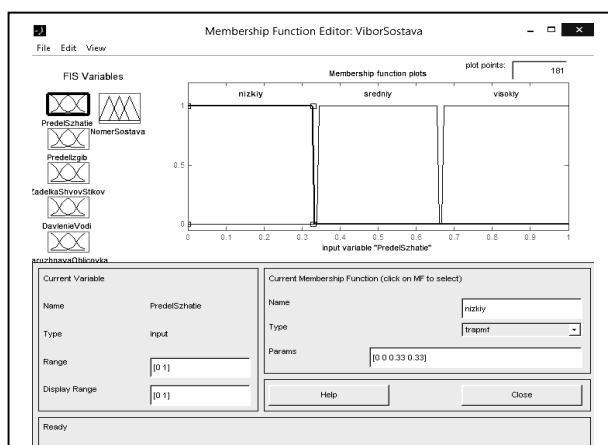


Рис. 1. Описание входящей переменной, учитывающей предел прочности при сжатии

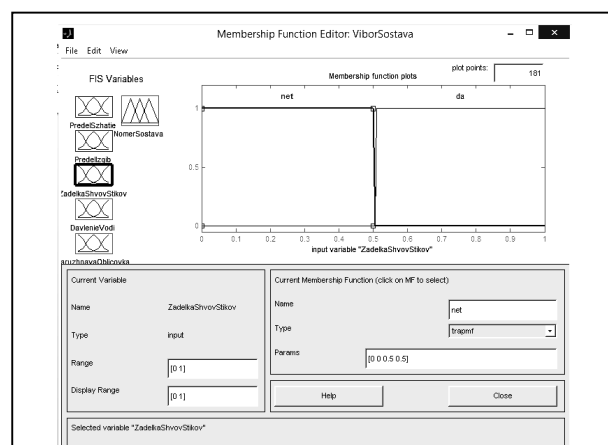


Рис. 2. Описание входящей переменной, учитывающей необходимость заделки швов и стыков



Рис. 3. Описание исходящей переменной, рекомендующей применение того или иного состава

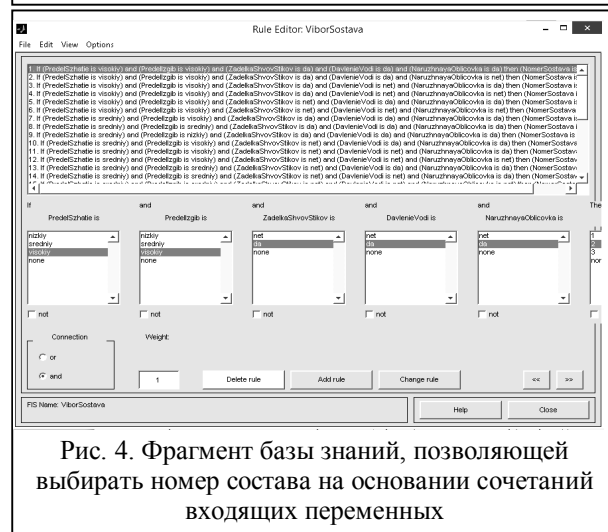


Рис. 4. Фрагмент базы знаний, позволяющей выбирать номер состава на основании сочетаний входящих переменных

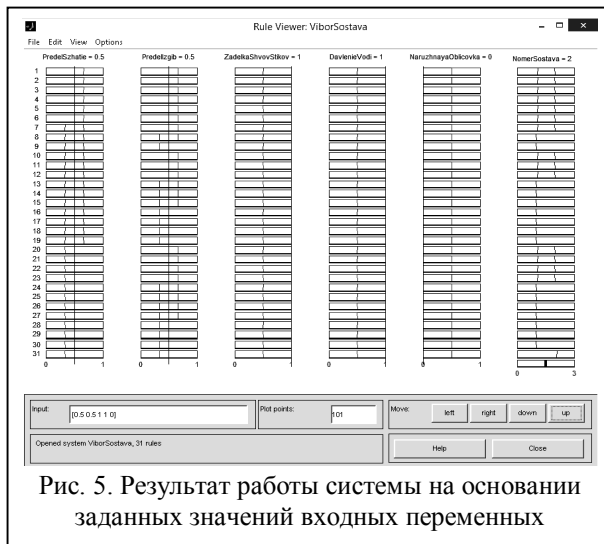


Рис. 5. Результат работы системы на основании заданных значений входных переменных

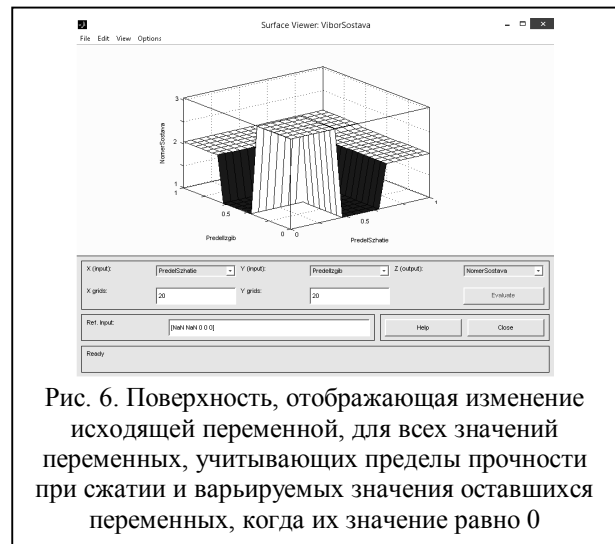


Рис. 6. Поверхность, отображающая изменение исходящей переменной, для всех значений переменных, учитывающих пределы прочности при сжатии и варьируемых значения оставшихся переменных, когда их значение равно 0

### Список литературы

1. Бабушкин В.И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа / В.И. Бабушкин. – Х.: Выща школа, 1989. – 165 с.
2. Плугин А.А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных покрытий / А.А. Плугин, М.Г. Салия, Т.А. Костюк // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП», 2011. – № 50. – С. 97-103.
3. Рунова Р.Ф. Конструкційні матеріали нової генерації та технології їх впровадження в будівництво / Р.Ф. Рунова, В.І. Гоц, І.І. Назаренко. – К.: ЕксОб, 2008. – 355 с.
4. Минеральные химические добавки / За заг. ред. О. Ушерова-Маршака. – Х.: Колорит, 2005. – 280 с.
5. Дворкин Л.И. Будівельне матеріалознавство / Л.И. Дворкин. – Рівне: РДТУ, 2000. – 478 с.
6. Вознесенский В.А. Оптимизация состава многокомпонентных добавок в композиты / В.А. Вознесенский. – К.: Знание, 1981. – 201 с.
7. Салия М.Г. Оптимизация состава сухой строительной смеси для повышения ее прочности с использованием метода математического планирования эксперимента / М.Г. Салия, О.В. Старкова, Д.А. Бондаренко, Т.А. Костюк, Е.Б. Деденева // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 3 (101). – С. 99-102.
8. Арутюнов В.А. Моделирование оптимальных гидроизоляционных составов интегрально-капиллярного

действия с повышенным содержанием полимерных волокон // В.А. Арутюнов, О.В. Старкова, Д.А. Бондаренко // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 5 (112). – С. 83-86.

9. Старкова О.В. Моделирование выбора метода восстановления сетей водоотведения / О.В. Старкова, Е.А. Шаповалова, Л.А. Гнучих // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техника, 2008. – Вип. 85. – С. 19-26.
10. Старкова О.В. Выбор оптимальных параметров восстановления сетей водоотведения / О.В. Старкова, Е.А. Шаповалова, Л.А. Гнучих // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техника, 2008. – Вип. 87. – С. 17-23.
11. Гончаренко Д.Ф. Разработка автоматизированной системы выбора способа восстановления водоводов с использованием аппарата нечеткой логики / Д.Ф. Гончаренко, О.В. Старкова, А.И. Алейникова // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 8 (124). – С. 18-23.
12. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 342 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2015

Рецензент д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Гончаренко, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков.

### РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ОБҐРУНТОВАНОГО ВИБОРУ СКЛАДУ КОМПЗИТУ З ПІДВИЩЕНИМИ ГІДРОФІЗИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВІ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ

Т.О. Костюк

Представлено склади композитів з підвищеними гідрофізичними характеристиками, що підібрані із застосуванням методів математичного планування експерименту. Запропоновано інструментарій для обґрунтованого вибору складу композиту на основі якісних характеристик об'єктів, що експлуатуються.

**Ключові слова:** склад композиту, гідрофізичні характеристики, нечітка логіка.

### THE DEVELOPMENT OF TOOLS TO MAKE INFORMED CHOICES OF COMPOSITE WITH INCREASED HYDRO-PHYSICAL CHARACTERISTICS BASED ON A QUALITATIVE CHARACTERISTICS OPERATED FACILITIES

T. O. Kostyuk

The compositions of composites with improved hydro-physical characteristics, calculated on the basis of mathematical experiment planning. Proposed tools to make informed choices on the basis of the composition of the composite qualitative characteristics of the exploited sites.

**Keywords:** composite structure, hydro-physical characteristics, fuzzy logic.