

## References

1. **Venttsel' E. S.** *Teoriya veroyatnosti* (Probability Theory), Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 575 p. (in Russian).
2. **Zade L. A.** *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* (The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions), Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).
3. **Alefel'd G., Khertsberger Yu.** *Vvedenie v interval'nye vychisleniya* (Introduction to interval computations), Moscow, Mir, 1987, 360 p. (in Russian).
4. **Kantorovich L. V.** *O nekotorykh novykh podkhodakh k vychislitel'nym metodam i obrabotke nablyudenii* (On some new approaches to computational methods and processing of observations), *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal*, 1962, vol. 3, no. 5, pp. 3–14 (in Russian).
5. **Nalimov V. V., Chernova L. A.** *Teoriya eksperimenta* (Theory of experiment), Moscow, Nauka, 1971, 320 p. (in Russian).
6. **Voshchinin A. P., Sotirov G. R.** *Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti* (Optimization in conditions of uncertainty), Moscow, MEI, Sofiya, Tekhnika, 1989, 226 p. (in Russian).
7. **Gorsky V., Shvetzova-Shilovskaya T., Voschinin A.** Risk assessment of Accident involving environmental high-toxicity substances, *Journal of Hazardous Materials*, 2000, no. 78.
8. **Voshchinin A. P.** *Interval'nyi analiz dannykh: razvitiye i perspektivy* (Interval analysis of data: development and prospects), *Zavodskaya Laboratoriya*, 2002, vol. 68, no. 1, pp. 118–126 (in Russian).
9. **Levin V. I.** *Interval'naya matematika i issledovanie sistem v usloviyakh neopredelennosti* (Interval mathematics and systems research in conditions of uncertainty), Penza, PTI, 1998, 68 p. (in Russian).
10. **Levin V. I.** *Metodologiya optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti metodom determinizatsii* (Methodology optimization under conditions of uncertainty by the method of determination), *Informatsionnye Tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 14–21 (in Russian).
11. **Levin V. I.** *Metod modelirovaniya povedeniya funktsii s pomoshch'yu razdeterminizatsii* (A method for modeling the behavior of functions by means of a partition), *Radioelektronika, Informatika, Upravlenie*, 2017, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).

УДК 004.67

**И. В. Гермашев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: i.v.germashev@volsu.ru,  
Волгоградский государственный университет,  
**В. Е. Дербисер**, д-р хим. наук, проф., e-mail: derbisher\_ve@vstu.ru,  
**Е. В. Дербисер**, канд. техн. наук, доц., e-mail: derbisher2@vstu.ru,  
Волгоградский государственный технический университет,  
**Е. А. Маркушевская**, канд. пед. наук, доц., e-mail: emarkushevskaya@vspsu.ru,  
Волгоградский государственный социально-педагогический университет

## Анализ нечетких данных для оптимизации химико-технологических систем

*Предложен метод анализа данных в условиях нечеткой, неполной, разнородной исходной информации для решения задач оптимизации химико-технологических систем. Результаты исследования развивают математическое обеспечение информационных систем обеспечения научно-производственной деятельности химиката технолога в части моделирования лингвистических ресурсов и могут служить для обоснованного принятия решений, например, при оптимизации состава композиционных веществ. Для формализации исходных данных использованы нечеткие числа, в результате чего получено параметрическое пространство, описывающее многокомпонентные системы. Вычисление индекса соответствия каждого параметра системы предъявляемым требованиям позволило перейти к относительным безразмерным вещественным величинам. В качестве агрегатной функции использовалась процедура взвешенного голосования. Полученное значение отражает интегральную меру соответствия химико-технологической системы предъявляемым требованиям.*

**Ключевые слова:** анализ данных, модель данных, оператор, нечеткие числа, многокритериальный анализ, химико-технологические системы, математическое обеспечение, информационные системы

### Введение

Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических систем (ХТС) в условиях многокритериальности, неполноты и нечеткости исходной информации, представляющей собой, в том числе знания, опыт и интуицию специалиста-эксперта для управления этими системами, — один из основных векторов

их развития. При этом выявление оптимальных и компромиссных технических решений уже на ранних стадиях постановки лабораторных исследований и опытно-промышленных выпусков продукции в мировой практике [1, 2] является, несомненно, актуальной задачей, ориентированной как на создание новой техники и технологии, так и на экономию человеческих и материальных ресурсов.

Проблема анализа нечетких данных является довольно распространенной для информационных систем (ИС), ориентированных, как правило, на взаимодействие с конечным потребителем. В качестве примера можно привести систему анализа лингвистической информации для прогноза коммерческой привлекательности товаров [3]. Для обработки подобной информации зачастую используют аппарат нечеткой математики [4].

Эта работа является многоаспектной и сложной, особенно тогда, когда, как указано выше, исходные данные, используемые при подготовке информации для принятия решения, имеют нечеткий характер. В химической технологии таковых, пожалуй, больше всего: выбор составов, оценка свойств новых материалов, проектирование конкурентоспособных технологий, учет возможного экологического ущерба и безопасности и т. д. Характеризуя проблему моделирования ХТС в этой части, необходимо исходить из того, что сама постановка задачи моделирования, компьютерная реализация и ее результативность могут иметь множественный характер, который во многом определяется формализацией исходных данных (параметров и условий) и проверкой правильности полученных в ходе моделирования результатов. В зависимости от уровня нечеткости и вида используемой модели решения могут иметь разную значимость [5].

Современные исследования, нацеленные на обработку нечетких данных, используют разные подходы, укладываемые, как правило, в схему "исходные данные — фаззификация — анализ — дефаззификация — результат". При этом формулируются лингвистические переменные и при использовании общепринятых методов фаззификации термов переходят к нечетким множествам и далее, как например в работе [6], проводится анализ полученной модели данных в математическом пакете или, как в работе [7], реализованы нечеткие компоненты в интеллектуальной системе. Предлагаемые подходы ориентируются на конкретную предметную область, и поэтому входные данные необходимо формализовать в соответствии с требованиями математических методов. А это может оказаться не по силам пользователям системы. Поэтому в таких случаях либо предлагают подробные методические руководства, либо автоматизируют процесс.

Обобщив вышеизложенные подходы и собственный опыт решения подобных задач [8, 9], была сделана настоящая работа, которая представляет собой математическое обеспечение ИС, позволяющее, во-первых, автоматизировать первичную обработку исходных данных (процесс фаззификации) и, во-вторых, проводить их анализ для информационной поддержки процедур

принятия решений. Причем вторая часть ориентирована на широкий круг задач химической технологии таких, как классификация, идентификация и экспертиза ХТС. Хотя, поскольку методы анализа ориентированы на относительные данные, абстрагированные от предметной области, то эти методы могут применяться и в других областях науки и техники, но необходимо предусмотреть формализацию данных предметной области в терминах предлагаемых методов.

Обобщенно отметим также, что для решения задач данного профиля использовались последние достижения в области нечетких множеств [8—11], интервальной математики [12] и др. [13], однако универсальной методики ни в отечественной, ни в зарубежной практике не выработано, и исследования в этом направлении активно продолжаются [14, 15].

Настоящая работа посвящена развитию этих подходов, в частности, направлена на формализацию исходных данных в форме нечетких чисел и определение библиотеки математических моделей информации для поддержки принятия решения о выборе системы из набора заданных. Типизация исходных данных, на наш взгляд, позволит унифицировать и алгоритмизировать процесс подготовки результатов эксперимента для их автоматизированного анализа.

### Постановка задачи

Пусть  $Q = (Q_{ij})$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ , — матрица исходных данных, описывающих результаты измерений или вычислений  $m$  характеристик  $n$  представителей определенного класса химических систем,  $Q_{ij} \in Q_j$ , где  $Q_j$  — множество значений, представляющих собой числа, множества, слова и т. п., что в упрощенном виде показано на рис. 1. По этим данным необходимо оценить представленные системы и выбрать в некотором смысле оптимальную. Лучше всего рассмотреть решение задачи на конкретном примере.

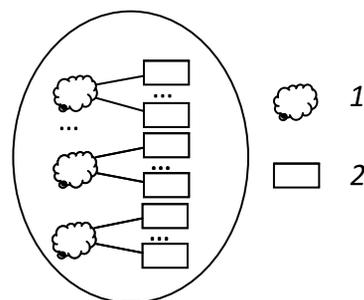


Рис. 1. Модель исходных данных:

1 — представители класса систем; 2 — измеряемые показатели  $Q$  систем

Выборочные характеристики полимеров [10]

№ полимера, <i>i</i>	R''	R'	$\eta_g$ , дл/г	$T_s$ , °C	$T_{10}$ %, °C	Кислородный индекс	Растворимость			
							серная кислота	м-крезол	фенол	тетрахлорэтилен: фенол (3: 1)
Имя параметра			$Q_{i1}$	$Q_{i2}$	$Q_{i3}$	$Q_{i4}$	$Q_{i5}$	$Q_{i6}$	$Q_{i7}$	$Q_{i8}$
1	R <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	0,89	355	550	32,1	+	+	–	+
2	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	0,86	340	520	40,3	+	+	+/-	+
3	R <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	0,79	310	500	36,0	+	+	–	+
4	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	0,80	320	530	41,0	+	+	+/-	+
5	R <sub>2</sub>	R <sub>2</sub>	0,81	295	520	52,0	+	+	+/-	+
6	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	0,85	308	500	43,0	+	+	+/-	+
7	R <sub>4</sub>	R <sub>1</sub>	0,82	300	550	40,2	+	+	–	+
8	R <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	0,90	276	540	52,0	+	+	+/-	+
9	R <sub>4</sub>	R <sub>3</sub>	0,73	308	515	42,0	+	+	–	+

В качестве примера используем анализ набора, выбранного случайным образом из типичного исследования в области создания полимерных композитов [10]. Оно связано с поиском перспективных термо- и огнестойких полигетероариленов. При этом автор ставил задачу дать некоторые компромиссные рекомендации, но использовал при этом только экспериментальные действия.

В указанной работе при синтезе каждого из полигетероариленов использовался свой мономер. При этом мономеры отличались друг от друга только двумя радикалами, которые обозначим R' и R''. Не вдаваясь в подробности указанного исследования, не имеющих отношения к проблематике данной работы, обозначим радикалы для замещения в R' и R'' через R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>. Будем считать, что именно эти радикалы являлись активными фрагментами мономеров, из которых осуществлялся синтез полимеров, и обеспечивали новизну исследования. Далее, используя разные выборки двух радикалов из ряда {R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>} и вводя их в состав вместо R' и R'', при синтезе получали набор полимеров и полимерных ком-

позитов с разными физико-химическими свойствами. Данные, представляющие интерес в качестве исходного информационного массива для настоящей статьи, приведены в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $\eta_g$ , дл/г — приведенная вязкость полимера;  $T_s$ , °C — температура размягчения полимера;  $T_{10}$  %, °C — температура деструкции полимера.

Далее исходим из следующего. Пусть предполагаемое назначение полимера требует от него определенных физико-химических свойств, важность  $\alpha$  которых, по мнению экспертов, для эксплуатации композита будет соответствовать приведенной в табл. 2.

Необходимо оценить привлекательность представленных полимеров с точки зрения этих эксплуатационных требований, т. е. предложить оптимальный вариант исходя из возможного назначения.

Решение задачи разобьем на несколько этапов: анализ исходных данных **Q**, построение нечетких чисел **U**, формализация требований в форме нечетких чисел, сравнение **U** с формальными требованиями, выбор системы.

Таблица 2

Ранговые оценки свойств полимерного композита

№ п/п, <i>j</i>	Характеристика	$\alpha_j$
1	Приведенная вязкость	0,10
2	Температура размягчения	0,25
3	Температура потери 10 % исходной массы	0,20
4	Огнестойкость (кислородный индекс)	0,15
5	Растворимость (серная кислота)	0,05
6	Растворимость (м-крезол)	0,05
7	Растворимость (фенол)	0,10
8	Растворимость [тетрахлорэтилен: фенол (3: 1)]	0,10

### Анализ исходных данных

Цель этого этапа — привести разнотипные данные к одному типу в форме отрезка, т. е. определить оператор **A**:

$$A(Q_{ij}) = [q_{ij1}; q_{ij2}], q_{ij1}, q_{ij2} \in \mathbb{R}, q_{ij1} < q_{ij2},$$

где  $\mathbb{R}$  — множество действительных чисел.

Точно задать эту операцию не представляется возможным, поскольку на практике  $Q_{ij}$  может быть представлено в любой форме, но для нача-

ла можно описать решение для наиболее типичных форм, создав библиотеку моделей данных, а в дальнейшем, при необходимости, пополнять библиотеку, что позволит адаптировать предлагаемый подход практически к любым типам исходных данных. Рассмотрим несколько наиболее распространенных случаев.

1.  $Q_{ij}$  — вещественное число.

В этом случае надо иметь в виду, что большинство измерений или вычислений, в результате которых получены исходные данные, проводятся с определенной погрешностью. Так что даже числовое представление не является вполне четким. Поэтому при оперировании с такими данными обычно параллельно еще проводят оценку погрешности результатов.

Организация нечетких чисел позволяет учесть погрешность в самой величине и поэтому следует ожидать более адекватных результатов при дальнейших вычислениях.

Если погрешность  $Q_{ij}$  не превосходит некоторой величины  $\delta_{ij} > 0$ , тогда положим

$$q_{ij1} = Q_{ij} - \delta_{ij}; q_{ij2} = Q_{ij} + \delta_{ij}.$$

Иллюстрируя полимером № 1 из рассматриваемого примера (табл. 1), получим, например, для кислородного индекса

$$\begin{aligned} Q_{14} &= 32,1, \delta_{14} = 0,1, \\ q_{141} &= 32,0, q_{142} = 32,2, \text{ т. е.} \\ A_1(32,1) &= [32,0; 32,2], \end{aligned}$$

где через  $A_1$  обозначен оператор, реализующий описанную выше процедуру. Фактически для применения оператора  $A_1$  необходимо в качестве аргумента указывать не только значение  $Q_{ij}$ , но и его погрешность  $\delta_{ij}$ , т. е. более корректно будет задать оператор  $A_1$  следующим образом:

$$A_1: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \setminus \{0\} \rightarrow \mathfrak{F}, \mathfrak{F} = \{[a; b] \mid a, b \in \mathbb{R}, a < b\},$$

а именно,

$$A_1(x, y) = [x - y; x + y], x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}.$$

2.  $Q_{ij}$  — множество действительных чисел.

Положим  $q_{ij1} = \inf Q_{ij}$ ,  $q_{ij2} = \sup Q_{ij}$  и получим соответствующий оператор

$$A_2: \mathfrak{X} \rightarrow \mathfrak{F}, \mathfrak{X} = \{X \mid X \subset \mathbb{R}\},$$

а именно,

$$A_2(X) = [\inf X; \sup X], X \subset \mathbb{R}.$$

3.  $Q_{ij}$  — лингвистическое значение.

Пусть  $Q_{ij} \in t = \{t_k \mid k = 1, \dots, r\}$ , причем термы  $t_k$  таковы, что  $t_1 < \dots < t_r$ , где  $<$  — некоторое отношение упорядочивания. Проведем разбиение отрезка

$E = [0; 1]$  на  $r$  частей в соответствии с термами  $t_k$ , при этом сохраняя тот же порядок, т. е.

$$E = \bigcup_{k=1}^r E_k,$$

где  $E_k = [e_{k-1}; e_k]$ ,  $k = 1, \dots, r-1$ ,  $E_r = [e_{r-1}; e_r]$ ,  $0 = e_0 < e_1 < \dots < e_r = 1$ . Ставим в соответствие терму  $t_k$  множество  $E_k$  и далее поступаем согласно пункту 2.

В нашем примере для  $j = 5$  имеем  $t = \{-, +/-, +\}$ , т. е.  $r = 3$  и положим, например,  $E_1 = [0; 0,33]$ ,  $E_2 = [0,33; 0,67]$ ,  $E_3 = [0,67; 1]$ . В итоге получаем

$$\begin{aligned} q_{151} &= 0,67, q_{152} = 1,00, \text{ т. е.} \\ A_3(+) &= [0,67; 1,00], \end{aligned}$$

где описанный выше оператор  $A_3$  задан следующим образом

$$A_3: t \rightarrow \mathfrak{F}_1, \mathfrak{F}_1 = \{[a; b] \mid [a; b] \subset [0; 1]\},$$

а именно,

$$A_3(t_k) = [e_{k-1}; e_k].$$

Таким образом, задан оператор  $A$ , преобразующий исходные данные в числовой отрезок по следующей схеме

$$A(x) = \begin{cases} A_1(x), & \text{если } x \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \\ A_2(x), & \text{если } x \in \mathbb{R}, \\ A_3(x), & \text{если } x \in t. \end{cases}$$

Применив оператор  $A$  к исходной матрице  $Q$ , получим  $q = (q_{ijp})$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $p = 1, 2$ , где  $[q_{ij1}; q_{ij2}] = A(Q_{ij})$ .

Далее, аналогично [8] по значениям  $q$  заданы нечеткие числа:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x-q_{ij})^2}{\delta_{ij}^2} \ln 2},$$

где  $q_{ij} = (q_{ij1} + q_{ij2})/2$ ,  $\delta_{ij} = (q_{ij2} - q_{ij1})/2$ ,  $x \in \mathbb{R}$ .

В итоге получена матрица нечетких чисел  $U(x) = (u_{ij}(x))$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$  (табл. 3).

Далее необходимо формализовать требования к представителям класса систем. В контексте нашего примера — формализовать эксплуатационные требования к полимерам. Для этого поступим аналогично [8], а именно, зададим гипотетический полимер, обладающий такими характеристиками, которые полностью удовлетворяют эксплуатационным требованиям. Присвоим этому полимеру номер 0 (табл. 3). При этом характеристика  $q_{0j}$  отражает требуемое значение, а  $\delta_{0j}$  — допуск, в пределах которого значение соответствующей характеристики удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Параметры нечетких чисел  $u_{ij}$ 

Номер полимера, $i$	Номер характеристики, $j$															
	1		2		3		4		5		6		7		8	
	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$
0	0,95	0,2	360	60	600	100	53	10	0,835	0,5	0,835	0,7	0,835	0,3	0,835	0,5
1	0,89	0,01	355	1	550	5	32,1	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
2	0,86	0,01	340	1	520	5	40,3	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
3	0,79	0,01	310	1	500	5	36,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
4	0,80	0,01	320	1	530	5	41,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
5	0,81	0,01	295	1	520	5	52,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
6	0,85	0,01	308	1	500	5	43,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
7	0,82	0,01	300	1	550	5	40,2	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
8	0,90	0,01	276	1	540	5	52,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
9	0,73	0,01	308	1	515	5	42,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165

### Вычислительный эксперимент и его обсуждение

Для оценки систем из заданного класса воспользуемся методом, описанным в работе [8].

Чтобы определить, в какой мере характеристика полимера №  $i$  близка характеристике эталонного полимера № 0, вычислим степень равенства  $v_{ij}$  соответствующих нечетких множеств [16]:

$$v_{ij} = \max_R \min(u_{ij}(x_j), u_{0j}(x_j)),$$

причем значение 1 будет соответствовать абсолютному равенству, а 0 — абсолютному неравенству.

Для функций принадлежности приведенного вида нами получено, что значение максимума достигается в точке [17]:

$$v_{ij} = \mu_{0j}(x_{ij}^*), \text{ где } x_{ij}^* = \frac{q_{ij}\delta_{0j} + q_{0j}\delta_{ij}}{\delta_{0j} + \delta_{ij}},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Проведя взвешенное голосование, получим интегральную оценку  $v_i$  соответствия совокупности характеристик объекта  $s_i$  совокупности характеристик объекта  $s_0$ :

$$v_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j v_{ij}, \quad (2)$$

где  $\alpha_j \geq 0$ ,  $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$ . Результаты вычислений на основе данных табл. 2 и 3 представлены в табл. 4.

Таким образом, с точки зрения предъявленных требований оптимальным является полимер № 2.

Кроме того, полученные оценки можно применять для классификации систем. Допустим, необходимо все полимеры разделить на три класса:

для первоочередного исследования (класс  $l = 2$ ), резервная группа (класс  $l = 1$ ) и бесперспективные (класс  $l = 0$ ). Зададим пороговые значения  $v^l$  ( $l = 1, 2$ ) при превышении оценки  $v_i$  которых будем относить полимер  $i$  к классу  $l$ . То есть при классификации будем поступать по следующей схеме:

если  $0 \leq v_i < v^1$ , то относим полимер  $i$  в класс 0;  
если  $v^1 \leq v_i < v^2$ , то относим полимер  $i$  в класс 1;  
если  $v^2 \leq v_i \leq 1$ , то относим полимер  $i$  в класс 2.

В данном случае значения  $v^l$  можно варьировать таким образом, чтобы изменять диапазон уровня перспективности полимеров в каждом из классов. Положим,  $v^1 = 0,500$ ,  $v^2 = 0,700$ , тогда полимеры классифицируются следующим образом:

0) неперспективные полимеры (класс 0): таких нет;

1) резервная группа (класс 1): полимеры № 3, 6, 7, 9;

2) для первоочередного исследования (класс 2): полимеры № 1, 2, 4, 5, 8.

Для дополнительной иллюстрации использования вышеприведенного метода без подробных расчетов покажем итоговые данные при реше-

Таблица 4

Оценки  $v_i$  полимеров на соответствие эксплуатационным требованиям

№ полимера, $i$	$v_i$
1	0,746
2	0,774
3	0,575
4	0,730
5	0,740
6	0,690
7	0,648
8	0,742
9	0,614

Характеристика марок ударопрочного полистирола

№ п/п, $i$	Марка полистирола	Параметры							$v_i$
		$\omega$ , не более, %	$B$ , не менее, МПа	$[\sigma]_b$ , не менее, МПа	$a_k$ , не менее, Дж/м <sup>2</sup>	$\epsilon$ , не менее, %	$E_t$ , не менее, МПа	$[\sigma]_r$ , не менее, МПа	
		№ параметра, $j$							
1	2	3	4	5	6	7			
0	Эталон	0,05	2250	37	100,5	42	1850	23–25,0	
1	625	0,05	2350	40	63,0	27	1800	20,0	0,72
2	825	0,05	2000	37–39	96,0	50	1500	17,5	0,83
3	825E	0,05	2200	45	96,0	45–50	1800	21,0	0,86
4	945	0,05	2068	30	120,0	50	1300–1400	15,0	0,65
5	945E	0,05	1600	38	145,0	50	1300	22,5	0,61

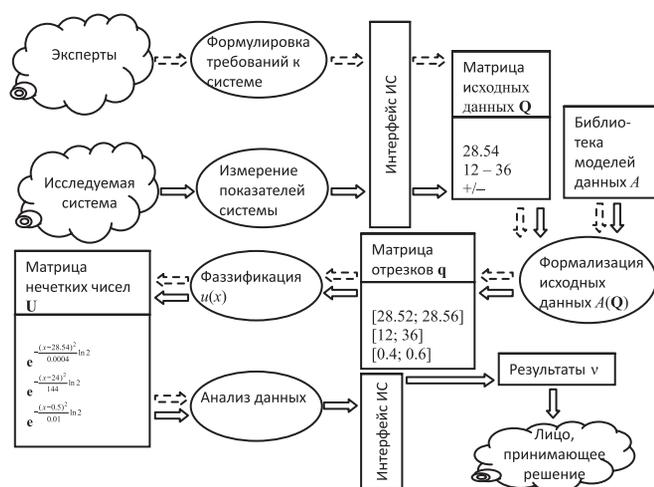


Рис. 2. Схема потоков данных в ИС

нии задачи выбора оптимального варианта ударопрочного полистирола из пяти (число объектов значения не имеет) промышленных образцов (табл. 5). Данные о свойствах материалов взяты с сайта [18].

В табл. 5 приняты следующие обозначения:  $\omega$ , % — массовая доля остаточного стирола;  $B$ , МПа — модуль эластичности;  $[\sigma]_b$ , МПа — прочность при изгибе;  $a_k$ , Дж/м<sup>2</sup> — ударная вязкость по Изоду, с надрезом;  $\epsilon$ , % — относительное удлинение;  $E_t$ , МПа — модуль упругости при растяжении;  $[\sigma]_r$ , МПа — прочность при растяжении.

Предложенная вычислительная модель может служить для автоматизированного анализа при выборе оптимального состава ХТС. Примерная схема работы такой ИС представлена на рис. 2. В предложенной схеме требования к оцениваемым объектам задаются непосредственно в интерфейсе ИС при формулировании задачи, позволяя экспертам оперативно корректировать постановку задачи в контексте проводимых исследований.

При постановке типовых задач оценки ХТС возможно формирование библиотеки экспертных оценок (наряду с библиотекой моделей данных), что позволяет избавить пользователя ИС от необходимости проводить экспертные оценки и полностью автоматизировать процесс оценки ХТС.

## Заключение

Часто возникающая задача на начальных этапах проектирования — это задача выбора наилучшего варианта из множества допустимых, которые удовлетворяют некоторым заданным требованиям. При попытке получить решение в условиях неполной и нечеткой информации об объекте проектирования возникает довольно большая вероятность неправильных решений. Поэтому использование ясной стратегии может свести к минимуму эту вероятность, снижая затраты времени, интеллектуальных и материальных ресурсов.

Предлагаемый в данной статье подход к математическому моделированию с использованием нечеткой информации в области химической технологии в сущности представляет собой математическое обеспечение профилированной ИС. Формирование базы данных моделей внутри системы позволяет вывести лингвистические ресурсы интерфейса пользователя на новый уровень взаимодействия с использованием языковых сред, более приближенных к естественным языкам, и задавать входные данные в более привычной для исследователя форме.

В статье продемонстрирован только один из аспектов использования предлагаемого моделирования, направленный на использование нечетких данных при выборе полимерного композиционного материала из однородного набора. Как видно из приведенных выше результатов, анализ экспериментальных данных хорошо алгоритми-

зируется и может быть реализован в виде ИС химика-исследователя и химика-технолога. Хотя приведенные исследования проиллюстрированы на примере полимерных материалов, однако общеметодическое содержание предлагаемых математических моделей и методов анализа позволяет перенести их и на ряд других задач химии и химической технологии.

#### Список литературы

1. **Khidhir B. A., Al-Oqaiel W., Kareem P. M.** Prediction Models by Response Surface Methodology for Turning Operation // *Am. J. of Model. and Optim.* 2015. Vol. 3, N. 1. P. 1–6.
2. **Sarmasti Emami M. R.** Fuzzy Logic Applications in Chemical Processes // *The J. of Math. and Comput. Sci.* 2010. Vol. 1, N. 4. P. 339–348.
3. **Krishnamoorthy S.** Linguistic features for review helpfulness prediction // *Expert Syst. with Appl.* 2015. Vol. 42, N. 7. P. 3751–3759.
4. **Nasrollahzadeh K., Basiri M. M.** Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system // *Expert Syst. with Appl.* 2014. Vol. 41, N. 4. P. 1006–1020.
5. **Salski A., Bartels F.** A fuzzy approach to land evaluation // *IASME Trans.* 2005. Vol. 5, N. 2. P. 774–780.
6. **Kizhisseri M. I., Mohamed M. M. A.** Fuzzy-based wastewater quality indices for pollution classification: a case study in the United Arab Emirates // *Environ. Syst. and Decis.* 2016. Vol. 36, N. 1. P. 62–71.
7. **Chandra P. H., Kalavathy S. M. S. T., Jayaseeli A. M. I., Karoline J. P.** Mechanism of fuzzy ARMS on chemical reaction // *Adv. in Intell. Syst. and Comput.* 2016. N. 424. P. 43–53.
8. **Гермашев И. В., Дербисер В. Е., Морозенко Т. Ф., Орлова С. А.** Оценка качества технических объектов с ис-

пользованием нечетких множеств // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. Т. 67, № 1. С. 65–68.

9. **Гермашев И. В., Дербисер В. Е.** Оптимизация состава полимерных композиций с использованием теории нечетких множеств // Теоретические основы химической технологии. 2001. Т. 35, № 4. С. 440–443.

10. **Кумыков Р. М.** Растворимые, термо- и огнестойкие полигетероарилены на основе производных хлораля // Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 2010.

11. **Оразбаев Б. Б.** Методы многокритериального выбора и интеллектуальные системы принятия решений для управления производственными объектами при нечеткой исходной информации // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет), 1996.

12. **Орлов А. И., Луценко Е. В.** Системная нечеткая интервальная математика. Краснодар: КубГАУ, 2014.

13. **Орлов А. И.** Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004.

14. **Egrioglu E., Aladag C. H., Basaran M. A., Yolcu U., Uslu V. R.** A new approach based on the optimization of the length of intervals in fuzzy time series // *J. of Intell. and Fuzzy Syst.* 2011. Vol. 22, N. 1. P. 15–19.

15. **Voskoglou M. Gr., Subbotin I. Ya.** Application of the Triangular Fuzzy Model to Assessment of Analogical Reasoning Skills // *Am. J. of Appl. Math. and Stat.* 2015. Vol. 3, N. 1. P. 1–6.

16. **Мешалкин В. П.** Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995.

17. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Properties of unimodal membership functions in operations with fuzzy sets // *Russian Mathematics (Iz VUZ).* 2007. Vol. 51, N. 3. P. 72–75.

18. **Полимерные материалы.** URL: <http://www.polymer-branch.com/> (дата обращения: 03.05.15).

**I. V. Germashev**, Professor, e-mail: [i.v.germashev@volsu.ru](mailto:i.v.germashev@volsu.ru), Volgograd State University,

**V. E. Derbisher**, Professor, e-mail: [derbisher\\_ve@vstu.ru](mailto:derbisher_ve@vstu.ru),

**E. V. Derbisher**, Associate Professor, e-mail: [derbisher2@vstu.ru](mailto:derbisher2@vstu.ru),  
Volgograd State Technical University,

**E. A. Markushevskaya**, Associate Professor, e-mail: [emarkushevskaya@vspu.ru](mailto:emarkushevskaya@vspu.ru),  
Volgograd State Social Pedagogical University

## The Fuzzy Data Analysis for the Chemical-Technological Systems Optimization

*The data analysis method in a fuzzy, incomplete, heterogeneous information source for chemical-technological systems optimization is proposed. The research results develop chemical engineer scientific and production activities information systems mathematical software in terms of modeling linguistic resources and can be used for informed decision making for example by optimizing the composite substances content. Fuzzy numbers formalize the primary data and this resulted in a parametric space that describes the multicomponent systems. The compliance index calculation to demanded requirements for the each system parameter allows moving to the relative dimensionless physical values. The weighted voting procedure was used as an aggregate function. The resulting value reflects a compliance integrated measure to demanded requirements for the chemical-technological system. Based on the proposed approach obtained operator formalizes the primary data, which allow to realize the fuzzification in automatic mode. A few examples illustrate the operator application to solve practical problems in the polymer compositions field. The choosing the best polymer composition problem and also the polymer compositions classification problem in terms of quality were solved. This operator is the basis of the information systems mathematical support. The data flows scheme for such systems is proposed. These systems can be used for organization of engineers and researchers automated working places. The use of experts is only necessary at the initial stage, the formation of data models. Further data analysis is carried out automatically.*

**Keywords:** data analysis, data model, operator, fuzzy number, multi-criteria analysis, identification, classification, chemical-technological systems, mathematical software, information system

## References

1. **Khidhir B. A., Al-Oqaiel W., Kareem P. M.** Prediction Models by Response Surface Methodology for Turning Operation, *Am. J. of Model. and Optim.*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
2. **Sarmasti Emami M. R.,** Fuzzy Logic Applications in Chemical Processes, *The J. of Math. and Comput. Sci.*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 339–348.
3. **Krishnamoorthy S.** Linguistic features for review helpfulness prediction, *Expert Syst. with Appl.*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 3751–3759.
4. **Nasrollahzadeh K., Basiri M. M.** Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system, *Expert Syst. with Appl.*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 1006–1020.
5. **Salski A., Bartels F.** A fuzzy approach to land evaluation. *IASME Trans.*, 2005, vol. 5, no. 2, pp. 774–780.
6. **Kizhisseri M. I., Mohamed M. M. A.** Fuzzy-based wastewater quality indices for pollution classification: a case study in the United Arab Emirates, *Environ. Syst. and Decis.*, 2016, vol. 36, no. 1, pp. 62–71.
7. **Chandra P. H., Kalavathy S. M. S. T., Jayaseeli A. M. I., Karoline J. P.** Mechanism of fuzzy ARMS on chemical reaction, *Adv. in Intell. Syst. and Comput.*, 2016, no. 424, pp. 43–53.
8. **Germashev I. V., Derbisher V. E., Morozenko T. F., Orlova S. A.** Otsenka kachestva tehnikeskikh ob'ektov s ispolzovaniem nechyotkih mnozhestv, *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2001, vol. 67, no. 1, pp. 65–68 (Germashev I. V., Derbisher V. E., Morozenko T. F., Orlova S. A. Assessment of technical objects quality using fuzzy multitudes, *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2001, vol. 67, no. 1, pp. 65–68 (in Russian)).
9. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Optimizatsiya sostava polimernyh kompozitsiy s ispolzovaniem teorii nechyotkih mnozhestv, *Teor. Osn. Him. Tehnol.*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 440–443 (Germashev I. V., Derbisher V. E. Optimization of a compound of polymer compositions using the theory of fuzzy multitudes, *Teor. Osn. Him. Tehnol.*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 440–443 (in Russian)).
10. **Kumykov R. M.** *Rastvorimye, termo- i ognestoykie poligeteroarileny na osnove proizvodnyh hloralaya.* Chemical sciences doctor dissertation abstract, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2010. (Kumykov R. M. Soluble, thermo resistant and fire-proof polyheteroarylenes on the basis of chloral derivatives. Chemical sciences doctor dissertation abstract, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2010 (in Russian)).
11. **Orazbayev B. B.** *Metody mnogokriterialnogo vybora i intellektualnye sistemy prinyatiya resheniy dlya upravleniya proizvodstvennymi ob'ektami pri nechyotkoy ishodnoy informatsii.* Technical sciences doctor dissertation abstract, Moscow, 1996, Moscow State Institute of Steel and Alloys (technological university) (Orazbayev B. B. Methods of multiple criteria and intellectual systems of making decisions for the management of industrial objects along with fuzzy initial information, Technical sciences doctor dissertation abstract, Moscow State Institute of Steel and Alloys (technological university), Moscow, 1996 (in Russian)).
12. **Orlov A. I., Lutsenko E. V.** *Sistemnaya nechyotkaya intervalnaya matematika.* KSAU, Krasnodar, 2014. (Orlov A. I., Lutsenko E. V. System fuzzy interval mathematics, KSAU, Krasnodar, 2014 (in Russian)).
13. **Orlov A. I.** *Nechislovaya statistika.* MZ-Press, Moscow, 2004. (Orlov A. I. Nonnumeric statistics. MZ-Press, Moscow, 2004 (in Russian)).
14. **Egrioglu E., Aladag C. H., Basaran M. A., Yolcu U., Uslu V. R.** A new approach based on the optimization of the length of intervals in fuzzy time series, *J. of Intell. and Fuzzy Syst.*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 15–19.
15. **Voskoglou M. Gr., Subbotin I. Ya.** Application of the Triangular Fuzzy Model to Assessment of Analogical Reasoning Skills, *Am. J. of Appl. Math. and Stat.*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
16. **Meshalkin V. P.** *Expertnye sistemy v himicheskoy tehnologii Chemistry.* Moscow, 1995, (Meshalkin V. P. Expert systems in chemical engineering, Chemistry, Moscow, 1995 (in Russian)).
17. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Properties of unimodal membership functions in operations with fuzzy sets, *Russ. Math. (Iz VUZ)*, 2007, vol. 51, no. 3, pp. 72–75.
18. **Polimernye materialy,** available at: <http://www.polymer-branch.com/> (accessed 03.05.15) (in Russian).

УДК 629.783; 621.396

**Х. Г. Асадов**, д-р техн. наук, проф., e-mail: asadzade@rambler.ru, **Ш. Н. Джахидзаде**, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджан,  
**М. И. Керимова**, диссертант,  
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджан

## Метод дискретно-вариационной оптимизации систем дистанционного зондирования

Современные компьютерные методы оптимизации (генетический метод, метод нейронных сетей, метод нечетких множеств, метод мультиагентов и т. д.) требуют разработки или наличия соответствующего программного обеспечения и неприемлемы для применения в отдельных нестандартных случаях, требующих принятия оперативного рационального или оптимального продолжения решения. Указанная задача более или менее удачно решается в многокритериальных или многоуровневых методах оптимизации. Однако эти методы отличаются большой трудоемкостью и не позволяют принимать оперативное решение в создавшихся нестандартных ситуациях. Показана необходимость разработки новых методов оптимизации систем дистанционного зондирования, специфика работы которых заключается в наличии существенного влияния окружающей среды в зоне прохождения зондирующего и отраженного сигналов. Изложен предлагаемый метод дискретно-вариационной оптимизации информационных систем. Дано математическое обоснование предлагаемого метода. Предложен алгоритм реализации этого метода.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, оптимизация, окружающая среда, информационный критерий, функционал

### Введение

Как отмечается в работе [1], в начале второй половины 20-го века в связи с развитием косми-

ческой техники был получен ряд важных результатов, обобщающих известные положения теории вариационного исчисления. Сюда относятся принцип максимума, метод динамического про-