

УДК 007.2+54-116
ББК 32.816

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОЛИМЕРНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА ЕЕ КОМПОНЕНТОВ

Гермашев И.В.¹

(Волгоградский государственный социально-педагогический университет, Волгоград)

Дербишер В.Е.², Дербишер Е.В.³

(Волгоградский государственный технический университет, Волгоград)

Рассмотрена задача управления качеством полимерной продукцией. Требования к полимерам формируются исходя из потребительских качеств и условий технологического процесса их производства. Управление предлагается осуществлять путем выбора полимерной матрицы и состава ингредиентов композита. Для этого проводится оценка компонентов полимерной композиции на основе нечеткого анализа их свойств. Приведены конкретные примеры и решение поставленной задачи на этих примерах.

Ключевые слова: управление качеством, полимерная композиция, оценка свойств, нечеткий анализ.

¹ *Илья Васильевич Гермашев, доктор технических наук, профессор (germasheviv@mail.ru).*

² *Вячеслав Евгеньевич Дербишер, доктор химических наук, профессор (derbisher-28091945@yandex.ru).*

³ *Евгения Вячеславовна Дербишер, кандидат технических наук, доцент (derbisher1@yandex.ru).*

1. Введение

Управление свойствами технических систем позволяет эффективно решать многие задачи науки и техники. Одним из подходов к решению такой задачи управления является анализ систем для выявления управляющих воздействий. В данной работе предлагается менять состав системы для достижения необходимого эффекта. Подходы, предлагаемые далее, имеют довольно общий характер, но в силу научных интересов авторов будут изложены применительно к полимерным композициям (ПК).

Существует довольно много методов анализа систем, для выяснения управляющих воздействий и вычисления их последствий, оперирующих в числовых пространствах [6, 8]. Но при наличии нечисловых параметров, такие методы становятся малопригодными и требуют дополнительных усилий по согласованию методов и данных. Проведя их сопоставительный анализ и критически проанализировав существующие математические подходы [6, 8], мы пришли к выводу, что в большинстве случаев, по крайней мере, часть этой проблемы, можно решить, применив нечеткие множества для описания как числовых, так и нечисловых параметров и решив получившуюся многокритериальную задачу уже в терминах теории нечетких множеств. Важные элементы последней все чаще применяются в научном анализе и технике [1].

Управление свойствами ПК возможно разными способами, например:

- 1) выбором полимера,
- 2) изменением химической структуры полимера, например, управляя процессом полимеризации,
- 3) применением ингредиентов для полимеров,
- 4) варьированием состава и структуры ПК.

Среди современных подходов к управлению свойствами ПК через ее структуру можно выделить, например, послойное осаждение полимеров для управления проводимостью офтальмологических препаратов через линзы [12].

Также часто встречающиеся подходы, направленные на изменение условий полимеризации для управления физико-химическими свойствами полимера [10, 11, 13] или повышение структурной устойчивости ДНК, нейтрализуя противоионы с помощью ингредиентов в виде полиаминов [9].

Использование нечеткого анализа ПК для оценки полимерных систем [3, 5] и сопоставление вышеизложенных материалов позволило обобщить существующие подходы и в результате сформулировать задачу управления свойствами полимерных систем и получить методы ее решения.

2. Описание задачи управления

Управление качеством полимерной продукции будем осуществлять согласно схеме, предложенной на рис. 1.

Основные требования к продукции формулируют потребители (заказчики) продукции и инженеры-технологи. Если первые определяют спектр и допуски физико-химических, механических, эргономических, экологических и др. свойств, определяющих эксплуатационные характеристики; то вторые — исходят из технологических процессов плавления, смешивания, литья, формования, штампования и т. д. Формулирование таких требований производится экспертами в соответствующих областях и данная задача в нашей работе не рассматривается. Будем считать, что эти требования уже заданы. Необходимо определить оптимальный состав ПК с точки зрения, предъявленных требований.

Управление осуществляется выбором 1) полимерной матрицы, 2) ингредиентов для данной полимерной композиции. Вообще говоря, эти два действия необходимо осуществлять одновременно, поскольку каждая полимерная матрица определяет уникальный набор возможных ингредиентов. Даже выбрав очень хорошую полимерную матрицу, можно получить довольно невзрачный набор ингредиентов и в итоге — далеко не оптимальный продукт.

Предлагается следующая модель управления.

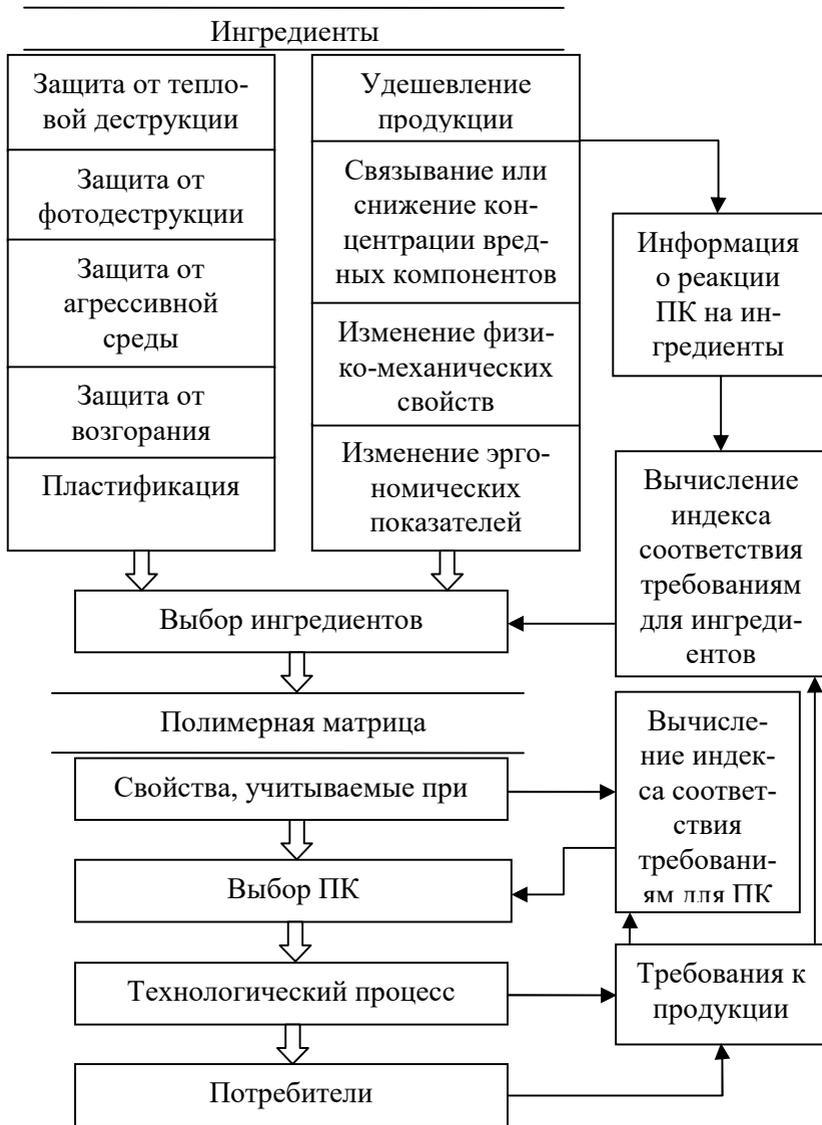


Рис. 1. Схема управления качеством полимерной продукции

1. Выбор полимерной матрицы. Осуществляется простым перебором из имеющего набора.
2. Определение состава ингредиентов. Осуществляется экспертами.
3. По каждому ингредиенту выбор конкретного представителя. Вычисление индекса соответствия требованиям для каждого представителя.
4. Оценка ПК на основе выбранных компонентов. Вычисление индекса соответствия требованиям для ПК. Переход на п. 1.
5. Принятие решения о выборе состава ПК.

В данной статье более подробно рассмотрены пункты 3 и 4, а именно задача оценки добавки для ПК и задача оценки ПК в контексте принятия решения о выборе состава ПК.

3. Задача оценки качества

Чтобы оценить качество добавки для ПК и самой ПК сформируем общую задачу определения соответствия предъявляемым требованиям произвольного объекта и приведем основные положения метода ее решения подробно изложенные в [4].

Пусть $S = \{s_i | i=1, \dots, n\}$ — множество, состоящее из n объектов. Для каждого объекта s_i определено m характеристик Q_{ij} , $j=1, \dots, m$. В зависимости от условий применения набор рассматриваемых характеристик может расширяться и сужаться, вплоть до введения химических, биологических, эргономических и прочих свойств. Выделим эталонный объект s_0 и его характеристики Q_{0j} , причем s_0 может быть как элементом множества S , так и нет, — это зависит от конкретных условий задачи и предпочтений проводимого исследования или мнения эксперта. Характеристики Q_{0j} подбираются таким образом, чтобы s_0 был оптимальным, с точки зрения предъявляемых требований к качеству объекта.

Требуется оценить элементы множества S по заданным m характеристикам на соответствие эталону.

Построим для каждой характеристики Q_{ij} нечеткое множество \hat{Q}_{ij} , $i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$. Для этого определим переменные x_j с областью значений G_j . Значения переменной x_j , удовлетворяющие характеристике Q_{ij} , составят отрезок X_{ij} . Определим середину q_{ij} и радиус $\delta_{ij} > 0$ отрезка X_{ij} :

$$X_{ij} = [q_{ij} - d_{ij}; q_{ij} + d_{ij}].$$

Далее для критерия Q_{ij} подбираем функцию принадлежности μ_{ij} . Исходя из построения множества X_{ij} , получаем, что в q_{ij} функция имеет точку максимума, в пределах множества X_{ij} функция принадлежности принимает значения больше 0,5, а вне X_{ij} — меньше:

$$\mu_{ij} : G_j \rightarrow [0; 1],$$

$$\mu_{ij}(q_{ij}) = 1,$$

$$\mu_{ij}(x_j) \geq 0,5 \Leftrightarrow x_j \in X_{ij}.$$

Проведенные нами ранее исследования [2] по проблеме выбора функции принадлежности показали, что в рамках решения предлагаемых задач можно использовать функции следующего вида:

$$\mu_{ij}(x_j) = e^{-\frac{\ln 2}{\delta_{ij}^2}(x_j - q_{ij})^2}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m.$$

В результате получаем нечеткие множества

$$\hat{Q}_{ij} = \{x_j \mid \mu_{ij}(x_j)\}, \quad i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m.$$

Чтобы определить в какой мере характеристика объекта s_i близка характеристике эталонного объекта s_0 , вычислим степень равенства v_{ij} соответствующих нечетких множеств [7]:

$$v_{ij} = \max_{G_j} \min(\mu_{ij}(x_j), \mu_{0j}(x_j)), \quad —$$

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

Для функций принадлежности приведенного вида нами получено, что значение максимина достигается в точке пересече-

ния функций принадлежности, указанных в качестве его аргументов, откуда вытекает следующая формула [2]:

$$(1) \quad v_{ij} = \mu_{0j}(x_{ij}^*), \text{ где } x_{ij}^* = \frac{q_{ij}\delta_{0j} + q_{0j}\delta_{ij}}{\delta_{0j} + \delta_{ij}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

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

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

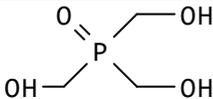
где $\alpha_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$. Здесь α_j является весом j -того критерия и показывает уровень его важности.

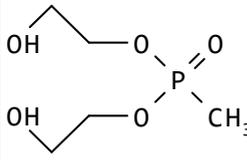
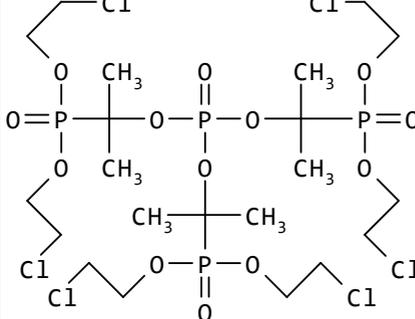
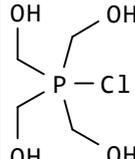
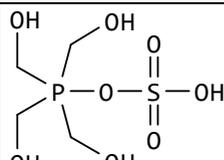
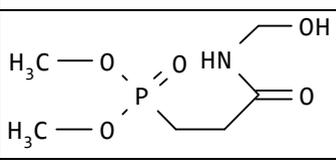
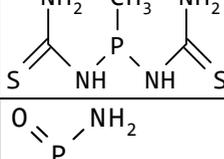
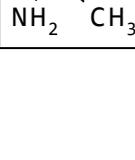
4. Вычисление индекса соответствия требованиям для ингредиентов

В качестве примера рассмотрим проблему выбора антипирена для текстильных материалов.

Здесь множество S составит набор химических соединений, например, фосфорсодержащих антипиренов для натуральных волокнистых материалов (табл. 1; в последнем столбце, для экономии места, уже указано решение задачи, полученное далее); данные взяты из источника [4]. В таблице приняты обозначения: Q_{i1} — концентрация антипирена на волокне, %, Q_{i2} — концентрация фосфора на волокне, %, Q_{i3} — приращение кислородного индекса у модифицированного волокна, %.

Таблица 1. Результаты ранжирования антипиренов текстильных волокон по эффективности модифицирующего действия

i	Соединение	Q_{i1}	Q_{i2}	Q_{i3}	v_i
0	Эталон (q/δ)	1,1/1 3,9	0,79/ 4,21	26/21	
1		19	12,1	9	0,35

2		18	10,7	9	0,37
3		18	3,7	14	0,65
4		6-10	6-10	15	0,47
5		18	2	9	0,68
6		3	3	10,6	0,85
7		1,0-1,2	2,67	15	0,90
8		1,0-1,2	1,5-2	9-11	0,89

Оценивая качество антипирена (в смысле понижения горючести модифицируемого волокна), поступаем в соответствии с рассмотренной выше методикой, т. е.:

описываем пространство параметров;

строим множества X ;

строим нечеткие множества \hat{Q} ;

вычисляем индекс v .

Построим множества X_{ij} . Проиллюстрируем на соединении №7. Для характеристики Q_{71} получаем $X_{71}=Q_{71}=[1,0; 1,2]$, а для X_{72} и X_{73} возьмем значения Q_{72} и Q_{73} соответственно с учетом погрешности измерения (0,01 и 1 соответственно), получим $X_{72}=[2,66; 2,68]$ и $X_{73}=[14; 16]$.

Для данных характеристик в качестве q_{7j} берем середину отрезка X_{7j} , а в качестве δ_{7j} — половину длины отрезка X_{7j} , $j = 1, 2, 3$ (табл. 2).

Таблица 2 Данные по вычислению уровней соответствия v_{7j} соединения №7 характеристикам эталона

j	q_{7j}	δ_{7j}	q_{0j}	δ_{0j}	v_{7j}
1	1,1	0,1	1,1	13,9	1,0000
2	2,67	0,01	0,79	4,21	0,8715
3	15	1	26	21	0,8409

Произведем расчеты для объекта №7. Применив формулу (1), получим уровни соответствия v_{7j} эталону по каждой характеристике (табл. 2). Далее по формуле (2) вычисляем интегральную оценку соответствия эталону:

$$v_7 = 0,9035.$$

Здесь в качестве α_1 , α_2 и α_3 взяли 0,33, 0,33 и 0,34, поскольку в данном демонстрационном примере это не принципиально. А, вообще говоря, коэффициенты α_j подбираются исходя из приоритетов характеристик эталона: чем выше приоритет характеристики Q_{0j} , тем больше значение α_j .

Поступая аналогично для остальных объектов, вычислим и остальные v_i , $i=1, \dots, n$ (табл. 1).

5. Вычисление индекса соответствия требованиям для ПК

Теперь проиллюстрируем применение рассмотренной выше методики для решения конкретных задач. Рассмотрим ряд полимерных дублированных материалов (ПДМ) из работы [4] и проведем их экспертизу на качество. Основные параметры ПДМ приведены в табл. 3. Здесь элементы множества S составили образцы ПДМ и $n=11$. В данном случае мы рассматриваем всего 7 физико-механических свойств исходного материала, т. е. $m=7$. В качестве значений q_{ij} , были взяты соответствующие опытные данные (табл. 3), а δ_{ij} — погрешность этих величин ($i=1, \dots, n$, $j=1, \dots, m$).

Таблица 3. Результаты ранжирования образцов ПДМ по уровню качества

i	Характеристики строения ПДМ				
	Трикотажная основа			Полимерное покрытие	
	Вид нити	Линейная плотность Т, текс	Переплетение	Вид полимера, число слоев	Модуль использования, М
Критерий					
Уровень значимости критерия, α					
1	2	3	4	5	6
0	Эталон (q_{0j}/δ_{0j})				
1	хлопчатобумажная	15,4×2	ластик 1+2	сшитый полиуретан	0,34
2	хлопчатобумажная	15,4×2	ластик 1+2	-	0,00
3	эластик	10×2	ластик 1+2	-	0,00
4	эластик + спандекс	10×2 15,6	ластик 1+2	линейный полиуретан, 1	0,42

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

1	2	3	4	5	6
5	модифицированный эластик + спандекс	10×2 15,6	комбинированное: ластик 2+1 и гладь	линейный полиурейлен, 1	0,38
6	эластик	10×2	комбинированное: ластик 1+2 и гладь	сшитый полиуретан, 2	0,55
7	модифицированный эластик + спандекс	20 15,6	ластик 1+3	линейный полиамидоуретан, 1	0,34
8	привитой сополимер поли-ε-капроамида + спандекс	20 15,6	ластик 1+3	линейный полиуретаноацилсемикарбазид, 1	0,40
9	эластик + спандекс	10×2 15,6	ластик 1+2	линейный полиуретаноуреиллен, 2	0,78
10	эластик + спандекс	20 15,6	ластик 1+3	сшитый полиуретан, 1	0,35
11	эластик + спандекс	10×2 15,6	ластик 1+3	сшитый полиуретан, 2	0,74

Физико-механические свойства, Q							Уровень качества, v_i
Разрывная нагрузка P_p , дин		Удлинение при разрыве $\epsilon_p, \%$		Поверхностная плотность $P_{п}, \text{г/м}^2$	Выносливость при растяжении на 150%, тыс. циклов	Остаточная циклическая деформация, $\epsilon_{ост.ц.}, \%$	
По длине	По ширине	По длине	По ширине				
Q_{i1}	Q_{i2}	Q_{i3}	Q_{i4}	Q_{i5}	Q_{i6}	Q_{i7}	
0,164	0,164	0,148	0,148	0,098	0,147	0,131	
7	8	9	10	11	12	13	14
100/30	80/30	1000/900	1400/1300	900/300	1300/800	20/10	
59,9	31,0	69,3	204,0	404	312	8,6	0,347
46,7	14,5	61,8	192,0	302	212	16,4	0,343
78,1	54,9	394	493	455	516	19,3	0,657
70,5	50,4	330	460	690	465	6,0	0,548
73,0	39,4	400	560	670	590	4,1	0,538
39,2	54,3	160	140	691	512	18,9	0,544
68,1	51,0	703	920	660	620	3,8	0,611
71,0	43,2	714	990	580	1020	4,9	0,631
96,0	78,3	370	390	890	490	3,1	0,720
79,2	79,0	910	1100	630	980	5,3	0,791
97,0	70,5	419	1350	795	1250	5,9	0,845

Таким образом, чтобы построить нечеткие множества, нам осталось лишь использовать рассмотренную выше функцию принадлежности.

Далее подставляя полученные значения v_{ij} в формулу (2) получим итоговые значения v_i (табл. 3).

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что наиболее качественные ПДМ по данным табл. 3 под №№9-11.

6. Управление качеством полимерной композиции

Для демонстрации применения изложенных выше методов рассмотрим модельную задачу. Пусть для производства изделия требуется ПК, удовлетворяющая следующим требованиям:

- требуется пониженная горючесть;

- требуются текстильные материалы с повышенными показателями на разрывную нагрузку, удлинение при разрыве (как по длине, так и по ширине), поверхностную плотность, выносливость при растяжении, остаточную циклическую деформацию, причем значение каждого из показателей, высказанное заказчиком было формализовано в виде «уровня значимости критерия, α » (табл. 1);

- в связи со срочностью заказа, необходимо антипирен и ПК выбрать из имеющихся у производителя фосфорсодержащих соединений, указанных в табл. 1 и текстильных материалов в табл. 3.

Согласно проведенным выше расчетам, выявлено, что указанным требованиям удовлетворяет волокно эластик со спандексом с двойным полимерным покрытием из сшитого полиуретана (табл. 3, №11) с уровнем качества 0,845. Кроме того, указанный материал необходимо модифицировать антипиреном, согласно расчетам, №7 в табл. 1.

Конечно, приведенное решение модельной задачи не в полной мере отражает реальную ситуацию, поскольку при производстве ПК могут возникнуть дополнительные требования от инженеров-технологов. Могут возникнуть и другие требования. Но данный пример демонстрирует, как можно решать такие задачи.

Литература

1. БЛОХНИН А. Г. *Алгебра нечетких множеств* // Теория и системы управления. – 1998. – №5. – С. 88–95.
2. ГЕРМАШЕВ И. В., ДЕРБИШЕР В. Е. *Свойства унимодальных функций принадлежности в операциях с нечетки-*

- ми множествами // Известия вузов. Математика. – 2007. – №3. – С. 77–80.
3. ГЕРМАШЕВ И. В., ДЕРБИШЕР В. Е., КОКОРИНА Т. М., МУРАШКИНА И. А. *Оценка качества трикотажа с применением теории нечетких множеств* // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1999. – №4. – С. 7–10.
 4. ГЕРМАШЕВ И. В., ДЕРБИШЕР В. Е., МОРОЗЕНКО Т. Ф., ОРЛОВА С. А. *Оценка качества технических объектов с использованием нечетких множеств* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2001. – Т. 67, №1. – С. 65–68.
 5. ДЕРБИШЕР В. Е., ГЕРМАШЕВ И. В., БОДРОВА Г. Г. *Количественная оценка эффективности термо- и фотостабилизирующих добавок в полимерных композитах на основе представлений о нечетких множествах* // Высокомолекулярные соединения. – 1997. – Т. 39, №6. – С. 960–964.
 6. КИМ ДЖ.-О., МЬЮЛЛЕР Ч. У., КЛЕККА У. Р., ОЛДЕНДЕРФЕР М. С., БЛЭШФИЛД Р. К. *Факторный, дискриминантный и кластерный анализ*. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
 7. МЕШАЛКИН В. П. *Экспертные системы в химической технологии*. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
 8. ФОР А. *Восприятие и распознавание образов*. – М.: Машиностроение, 1989. – 271 с.
 9. CHOU L.Y.T., SONG F., CHAN W.C.W. *Engineering the Structure and Properties of DNA-Nanoparticle Superstructures Using Polyvalent Counterions* // Journal of the American Chemical Society. – 2016. – Vol. 138, №13. P. 4565–4572.
 10. IKEDA T., TAMURA H., SAKURAI T., SEKI S. *Control of optical and electrical properties of nanosheets by the chemical structure of the turning point in a foldable polymer* // Nanoscale. – 2016. – Vol. 8, №30. – P. 14673–14681.
 11. KOBAYASHI A., NAKAZA T., HIRANO T., KITAGAWA S., OHTANI H. *Variation in the chromatographic, material, and chemical characteristics of methacrylate-based polymer monoliths during photoinitiated low-temperature polymerization* //

Journal of Separation Science. – 2016. – Vol. 39, №13. – P. 2459–2465.

12. SILVA D., PINTO L. F. V., BOZUKOVA D., SANTOS L. F., SERRO A. P., SARAMAGO B. *Chitosan/alginate based multilayers to control drug release from ophthalmic lens // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* – 2016. – №147. – P. 81–89.
13. STRACHOTA B., HODAN J., MATEJKA L. *Poly(N-isopropylacrylamide)-clay hydrogels: Control of mechanical properties and structure by the initiating conditions of polymerization // European Polymer Journal.* – 2016. – №77. – P. 1–15.

THE POLYMER PRODUCTS QUALITY CONTROL BASED ON FUZZY ANALYSIS OF ITS COMPONENTS

Ilya Germashev, Volgograd State Socio-Pedagogical University, Volgograd, Doctor of Science, professor (germasheviv@mail.ru).

Vyacheslav Derbisher, Volgograd State Technical University, Volgograd, Doctor of Science, professor (derbisher-28091945@yandex.ru).

Evgeniya Derbisher, Volgograd State Technical University, Volgograd, Cand. Sc., assistant professor (derbisher1@yandex.ru).

Abstract: The polymer products quality control problem is considered. Consumer quality and technological process conditions forms polymers requirements. The choice of the polymer matrix and the ingredients composition manages polymer composite properties. The polymer composition components estimate based on their properties fuzzy analysis allows to solve this problem. Specific examples and the considered problem solution in these examples are given.

Keywords: quality control, polymer composition, properties estimate, fuzzy analysis

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...

Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...