
**СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ
И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

**SYNTHESIS AND PROCESSING OF POLYMERS
AND POLYMERIC COMPOSITES**

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-6-549-558>

УДК 661.717.5



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Медленные полимочевинные композиции
с высокими эксплуатационными свойствами**

**С.В. Романов¹, О.А. Ботвинова¹, Е.А. Тимаков², Д.А. Ращупкина²,
Ю.Т. Панов²,✉**

¹Производственная компания «Эласт-ПУ», Владимир, 600026 Россия

²Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, 600014 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: tpp_vlgu@mail.ru

Аннотация

Цели. Совершенствование технологии получения полимерных напыляемых покрытий на основе поликарбодиимидов (полимочевин), путем изучения закономерностей изменения технологических и эксплуатационных свойств при введении в состав композиции производных аспарагиновой кислоты (ПАК).

Методы. Процесс производства напыляемых и контактных полимочевин сопряжен с рядом трудностей, главной из которых является стоимость используемых компонентов и работа с высокопроизводительным оборудованием высокого давления, поэтому авторами было предложено использовать метод математического моделирования для оценки оптимального плана проведения эксперимента. Измерение времени жизни композиции проводили в условиях, приближенных к реальным условиям нанесения. Компоненты А и Б термостатировали, смешивали в заданных соотношениях. Затем измеряли время гелеобразования, которое считали временем жизни композиции. Твердость материала определяли по методу Шора по ГОСТ 24621-91. Прочность и относительное удлинение при растяжении определяли по стандартной методике (ГОСТ 30436-96).

Результаты. Исследовано влияние трех ПАК на свойства готовой полимочевины и показано, что введение в состав полимочевины двух из них (ПАК1 и ПАК2) в количестве до 40 мас. % дает возможность получить полимочевины со временем жизни >250 с, что позволяет перевести их в разряд «медленных», то есть способных наноситься вручную. Готовые продукты обладают физическими свойствами, аналогичными материалам, полученным методом машинной заливки (прочностью на разрыв >73 МПа, прочностью при растяжении >23 МПа и относительным удлинением >500%). Составлены уравнения регрессии, на основании которых построены графики равных уровней, показывающие возможные области направленной модификации исследуемых композиций.

Выводы. Применение ПАК в качестве модифицирующего компонента для полимочевинных систем позволяет получить «медленные» полимочевины с высокими эксплуатационными свойствами, которые можно целенаправленно регулировать, используя метод математического моделирования. Помимо прочего, полученные продукты несут в себе коммерческую ценность, так как обладают совокупностью нужных физико-механических свойств.

Ключевые слова: полимочевина, время жизни, полимерные покрытия, физико-механические свойства, математическое моделирование

Для цитирования: Романов С.В., Ботвинова О.А., Тимаков Е.А., Ращупкина Д.А., Панов Ю.Т. Медленные полимочевинные композиции с высокими эксплуатационными свойствами. *Тонкие химические технологии*. 2023;18(6):549–558. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-6-549-558>

RESEARCH ARTICLE

High-performance slow-curing polyurea compositions

Sergei V. Romanov¹, Olga A. Botvinova¹, Evgenii A. Timakov²,
Dariya A. Rashchupkina², Yuri T. Panov^{2,✉}

¹Elast PU Production Company, Vladimir, 600026 Russia

²Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University, Vladimir, 600014 Russia

✉Corresponding author, e-mail: tpp_vlgu@mail.ru

Abstract

Objectives. To improve the technology for obtaining polymer spray coatings based on polycarbodiimides (polyureas) by studying changes in the process and operational parameters due to the introduction of aspartic acid derivatives (AADs) into the composition.

Methods. The process of the production of sprayed and contact polyureas involves a number of difficulties, not least in terms of the cost of the components and high-pressure equipment. For this reason, mathematical modeling was used to optimize experimental design. The curing time of the composition was measured under conditions simulated to be close to actual. After thermostating and mixing Components A and B in predetermined ratios, the gelation time was measured to represent the curing time of the composition. The hardness of the material was determined by the Shore method according to GOST 24621-91. Tensile strength and relative elongation were determined according to a standard method (GOST 30436-96).

Results. The effect of three AADs on the properties of the finished polyurea was studied. It was found that the introduction of two of them (AAD-1 and AAD-2) into polyurea in an amount of up to 40 wt % produces slow-curing (>250 s) polyureas capable of manual application. The finished products have physical properties on par with machine-poured materials (breaking strength >73 МПа; tensile strength >23 МПа; elongation >500%). Compiled regression equations were used to construct graphs of equal levels showing the possible areas of directed modification of the studied compositions.

Conclusions. AAD can be used as a modifying component for polyurea systems to obtain slow-curing polyureas with high performance properties, which can be purposefully controlled by mathematical modeling. The resulting products have commercial value due to their combination of valuable physical and mechanical properties.

Keywords: polyurea, curing time, polymer coatings, physical and mechanical properties, mathematical modeling

For citation: Romanov S.V., Botvinova O.A., Timakov E.A., Rashchupkina D.A., Panov Yu.T. High-performance slow-curing polyurea compositions. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2023;18(6):549–558. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-6-549-558>

ВВЕДЕНИЕ

Высокая конкуренция в сфере строительных и отделочных материалов предопределяет необходимость сочетать простоту и скорость выполнения работ для получения готовых покрытий с высокими эксплуатационными свойствами.

В настоящее время лидирующее положение приобретают полимочевинные покрытия, которые хорошо зарекомендовали себя в качестве электроизоляционных, футеровочных и антикоррозионных материалов. Однако такие покрытия требуют применения дорогостоящего оборудования, работающего при высоких давлениях и высококвалифицированных работников. Эти трудности мало заметны при нанесении покрытий на большие поверхности, но становятся непреодолимыми, если требуется нанести покрытия на небольшие поверхности, например, при ремонтных работах. В этом случае нужны системы, имеющие время жизни более 5 мин, которые можно смешивать и наносить вручную. Предварительные эксперименты показали, что применение известных способов уменьшения скорости реакции (увеличения время жизни системы) возможно лишь при одновременном снижении эксплуатационных свойств готовых покрытий [1].

В последнее время появились работы [2–4], в которых в качестве аминного компонента предлагается использовать производные аспарагиновой кислоты (ПАК).

Целью данной работы являлась возможность получения «медленных» полимочевин с высокими эксплуатационными свойствами на основе ПАК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во многих работках показано, что ПАК являются ценными модификаторами для синтеза полимеров. С их помощью удастся улучшать физико-механические свойства готовых продуктов. В настоящее время в промышленных масштабах выпускается большое количество ПАК. В работе использовались ПАК, полученные методом синтеза на основе взаимодействия бис-имидов ненасыщенных кислот с алифатическими и ароматическими диаминами. Используемые в данной работе ПАК, их общая формула и реакционная способность приведены на рис.1 и в табл. 1.

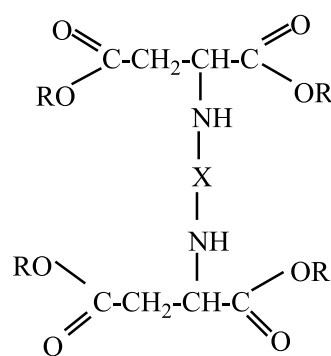


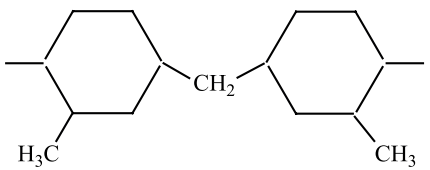
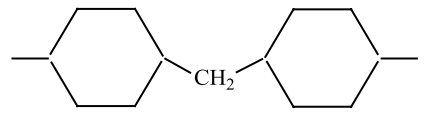
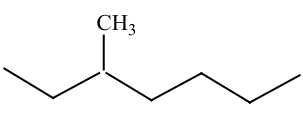
Рис. 1. Общая формула производного аспарагиновой кислоты (ПАК).

Fig. 1. General formula of an aspartic acid derivative (AAD).

ПАК вступают в реакцию с изоцианатами. В результате получается полимочевина, в составе которой отсутствуют гидроксилсодержащие компоненты, как это показано на рис. 2 [3].

Основными составляющими полиуретан-полимочевинной системы являются гидроксил- и аминоксодержащие вещества (например полиолы и полиэфирамины), совокупно называемые «компонентом А»

Таблица 1. Структура основной цепи ПАК и их реакционная способность
Table 1. Structure of the main chain of AADs and their reactivity

Обозначение Notation	Структура основной цепи (X на рис. 1) Structure of main chain (X in Fig. 1)	Время гелеобразования, ч Gelation time, h
ПАК 1 AAD 1	Метиленбис(2-метилциклогексан-4,1-диил) Methylenebis(2-methylcyclohexane-4,1-diyl) 	8
ПАК 2 AAD 2	Метилендициклогексан-4,1-диил Methylenedicyclohexane-4,1-diyl 	1
ПАК 3 AAD 3	2-Метилпент-1,5-диил 2-Methylpentane-1,5-diyl 	0.1

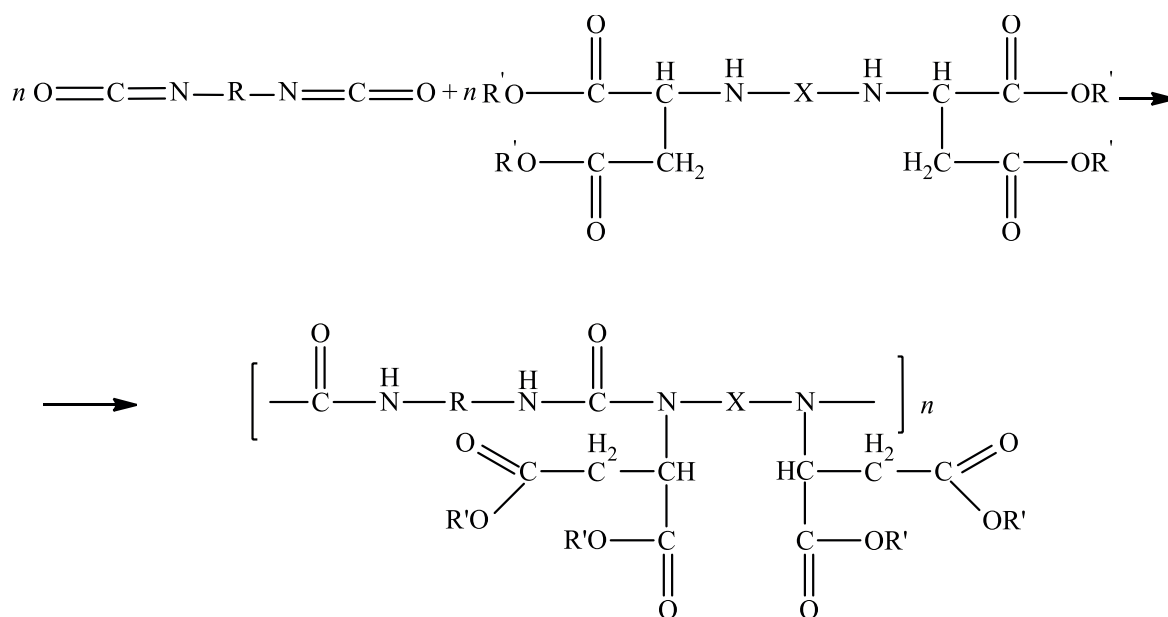


Рис. 2. Реакция получения полимочевины с использованием ПАК [3].

Fig. 2. Reaction to produce polyurea from AADs [3].

системы. В то время, как в «компонент Б» входят вещества, относящиеся к классу изоцианатов, которые отвечают за реакцию уретанообразования.

В ходе проведения эксперимента, в компонент А системы добавлялись ПАК в разных соотношениях с условием, что индекс системы будет находиться в пределах 1.1–1.2.

Измерение времени жизни композиции проводили в условиях, приближенных к реальным условиям нанесения. Компоненты А и Б термостатировали, смешивали в заданных соотношениях. Затем измеряли время гелеобразования, которое считали временем жизни композиции. Твердость материала определяли по методу Шора по ГОСТ 24621-91¹ на дюрометре модификации ТВР-А (ВОСТОК-7, Россия). Прочность и относительное удлинение при растяжении определяли по стандартной методике (ГОСТ 11262-2017²) на разрывной машине РКМ 2.1 (*Etalon-profit*, Россия). В табл. 2 представлены время жизни и основные эксплуатационные свойства полимочевин на основе различных ПАК.

Как видно из табл. 2, применение ПАК 1 и ПАК 2 позволяет перевести композиции в разряд «ручных». При этом применение ПАК 2 позволяет получить покрытия по твердости сопоставимые с классической полимочевинной, а применение ПАК 1 — покрытия, превосходящие классические

по эластичности. Добавление ПАК в количестве более 40 мас. % не оправдано, так как в этом случае время жизни возрастает до значений, которые уже кратно превышают удобные показания для работы с ними. При этом снижаются эксплуатационные характеристики готового покрытия, а себестоимость композиции возрастает. Возникает предположение о сочетании двух видов ПАК с целью улучшения свойств полимочевинных покрытий.

Известно, что влияние исходных компонентов в полимочевинной композиции имеют сложный характер [5], поэтому для их учета удобнее всего воспользоваться методом математического моделирования.

Проведение экспериментов, связанных с синтезом полимочевин сопряжено с использованием дорогостоящего оборудования, работающего под высоким давлением и длительным временем эксперимента. Исходя из этого, нами было принято решение использовать метод математического моделирования. Как известно [6], существует множество методов математического анализа для обработки экспериментальных данных. Одним из широко используемых и позволяющих получать наиболее точные данные является метод активного эксперимента [6]. Данный метод позволяет обрабатывать одновременно нескольких входных

Таблица 2. Свойства покрытий на основе полимочевины в присутствии различных ПАК
Table 2. Properties of coatings based on polyurea in the presence of various AAD

Обозначение Notation	Количество ПАК, мас. % AAD content, wt %	Время жизни, с Curing time, s	Твердость по Шору А, ед. Shore A hardness, units	Прочность при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	Относительное удлинение, % Relative extension, %
ПАК 1 AAD 1	20	850	65	18.5	580
	40	3600	58	15.0	615
ПАК 2 AAD 2	20	250	75	23.4	531
	40	300	73	26.1	505
ПАК 3 AAD 3	20	25	85	25.8	520
	40	50	92	26.5	390
Без ПАК Without AAD	0	10	78	22.1	550

¹ ГОСТ 24621-91. Государственный стандарт Союза ССР. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). М.: Издательство стандартов; 1992. URL: <https://progest.com/gost/001.083.080/gost-24621-91/>. Дата обращения 08.11.2023. [GOST 24621-91. State Standard of the USSR. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness). Moscow: Izdatelstvo standartov; 1992. URL: <https://progest.com/gost/001.083.080/gost-24621-91/>. Accessed November 08, 2023.]

² ГОСТ 11262-2017. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ; 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158280>. Дата обращения 08.11.2023. [GOST 11262-2017. Interstate Standard. Plastics. Tensile test method. Moscow: Standartinform; 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158280>. Accessed November 08, 2023.]

факторов. В работе это позволило уменьшить количество экспериментов, которые необходимо провести, и наглядно представить результаты анализа для дальнейшего планирования синтеза продуктов, отвечающих заданным требованиям. Обработка экспериментальных данных для получения математической модели проводилась методами классического регрессионного и корреляционного анализов [7, 8].

Как известно, применение метода регрессионного анализа возможно при соблюдении следующих условий [6, 8]:

1) результаты наблюдений представляют собой независимые, нормально распределенные случайные величины;

2) входные переменные измеряются с малой ошибкой по сравнению с ошибкой определения случайных величин и являются неслучайными;

3) оценка дисперсий входных параметров, полученных при одинаковых условиях, являются однородными.

Для нахождения аналитических зависимостей между основными эксплуатационными характеристиками (истиранием, прочностью при растяжении, относительным удлинением) и составом композиции экспериментальные данные обрабатывались с использованием метода наименьших квадратов.

В работе, в качестве математического описания использован полный квадратный полином вида:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2,$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ — коэффициенты регрессии, x_1, x_2 — безразмерные входные переменные, которые рассчитывались по уравнению:

$$x_j = \frac{X_j - X_{0j}}{h_j}$$

где x_j — безразмерная j -ая входная переменная; X_j — размерная j -ая входная переменная; h_j — интервал варьирования j -ой входной переменной, рассчитанной по уравнению:

$$h_j = \frac{X_j^{\max} - X_j^{\min}}{2};$$

X_{0j} — среднее значение размерной j -ой входной переменной, рассчитываемой по уравнению:

$$X_{0j} = \frac{X_j^{\max} + X_j^{\min}}{2},$$

где $X_j^{\max}, X_j^{\min}$ — максимальное и минимальное значения размерной j -ой входной переменной.

В работе был использован двухфакторный эксперимент: X_1 — количество ПАК 1 и X_2 — содержание свободных NCO-групп, %. В табл. 3 представлены значения этих факторов для всех уровней варьирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью программного пакета MATLAB (MathWorks, США)³ был получен оптимальный план проведения эксперимента. Расширенная матрица

Таблица 3. Исходные данные для расчета уравнения регрессии
Table 3. Input data for calculating the regression equation

Входные переменные Input variables	Входные факторы Input factors			
	Количество ПАК 1 в компоненте А AAD 1 content in component A		Доля NCO-групп, % Fraction of NCO-groups, %	
	X_1 , мас. % X_1 , wt %	x_1 , безразмерная величина x_1 , dimensionless units	X_2 , %	x_2 , безразмерная величина x_2 , dimensionless units
Верхний уровень Upper level	100	+1	15	+1
Нижний уровень Lower level	0	−1	10	−1
Нулевой уровень Zero level	50	0	12.5	0
Шаг варьирования, h Variation step, h	50	—	2.5	—

³ MATLAB. <https://www.mathworks.com/>. MathWorks, США. Дата обращения 08.11.2023. / MATLAB. <https://www.mathworks.com/>. MathWorks, USA. Accessed November 08, 2023.

планирования и экспериментальные значения свойств композиции представлены в табл. 4.

Для установления этих зависимостей была разработана MATLAB-программа. В блок входных данных входят:

1) расширенная матрица планирования эксперимента, размерность которой определяется числом входных переменных и порядком уравнения регрессии (табл. 4);

2) экспериментальные значения выходных переменных в соответствии с матрицей планирования, которая записывается в программу в виде вектор-столбца;

3) интервалы изменения по каждой входной переменной.

В блок выходных данных входят:

1) расчетные значения коэффициентов регрессии искомого уравнения;

2) таблица сравнения экспериментальных и расчетных данных по полученному уравнению регрессии;

3) дисперсия относительного среднего значения выходной переменной;

4) остаточная дисперсия;

5) критерий Фишера;

6) графический материал, включающий поверхность отклика, полученную по найденному уравнению регрессии и график контурных линий.

На основании разработанной MATLAB-программы были рассчитаны коэффициенты регрессии. Полученные уравнения регрессии приведены ниже:

– для времени жизни:

$$Y1 = 200.44 + 105.33x_1 - 51.33x_2 + 30.5x_1x_2 + 68.67x_1^2 + 20.67x_2^2;$$

– для прочности при разрыве:

$$Y2 = 16.78 + 1.0x_1 + 2.5x_2 + 1.5x_1x_2 + 0.33x_1^2 + 0.83x_2^2;$$

– для относительного удлинения при разрыве:

$$Y3 = 688.89 - 86.67x_1 + 120x_2 + 95x_1x_2 + 56.67x_1^2 - 23.33x_2^2.$$

Адекватность уравнений оценивалась по критерию Фишера. Оценка адекватности F_p проводилась относительно среднего значения выходной переменной S_y^2 и остаточной дисперсии $S_{ост}^2$:

$$F_p = \frac{S_y^2}{S_{ост}^2},$$

Таблица 4. Расширенная матрица планирования в кодированных переменных и значения свойств

Table 4. Extended planning matrix in coded variables and property values

№ Опыта No. of experiment	x_0	x_1	x_2	$x_1 \times x_2$	x_2^2	x_1^2	Время жизни, с Curing time, s	Прочность при разрыве, МПа Tensile strength, MPa	Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %
1	1	-1	1	-1	1	1	8	22	550
2	1	-1	-1	1	1	1	16	13	1050
3	1	-1	0	0	1	0	14	15	850
4	1	1	1	1	1	1	150	20	580
5	1	1	-1	-1	1	1	280	17	700
6	1	1	0	0	1	0	240	19	650
7	1	0	1	0	0	1	90	19	620
8	1	0	-1	0	0	1	260	16	720
9	1	0	0	0	0	0	210	17	680

где остаточная дисперсия определялась по уравнению

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - K}.$$

Дисперсия относительно среднего значения выходной переменной вычислялась по формуле

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N - 1},$$

где N — полное число опытов, K — число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, $\bar{y}$ — средние значения.

Расчетные значения критерия Фишера составляют: для прочности — 191.1, относительного удлинения — 54.55, времени жизни — 32.15. Табличное значение критерия Фишера, в соответствующих условиях, составляет 8.8 [7]. Как видно, расчетные критерии Фишера превышают табличное значение, следовательно, уравнения адекватно описывают процесс.

Графики линий равных уровней построенных функций регрессии в зависимости от выбранных факторов представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, данные графики позволяют оптимизировать исследуемый процесс, так как изучаемые свойства меняются в широких пределах, что дает возможность разработчикам композиции варьировать эксплуатационные параметры готового продукта в зависимости от требований заказчика. Стоит отметить, что во всем исследуемом интервале свойств удалось получить покрытия удовлетворительного качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что применение ПАК позволяет увеличить время жизни до требуемых потребителем пяти минут. Установлено, что введение двух из них (ПАК1 и ПАК2) в количестве до 40 мас. % позволяет получить полимочевины со временем жизни >250 с, прочностью на разрыв >73 МПа, прочностью при растяжении >23 МПа и относительным удлинением >500%.

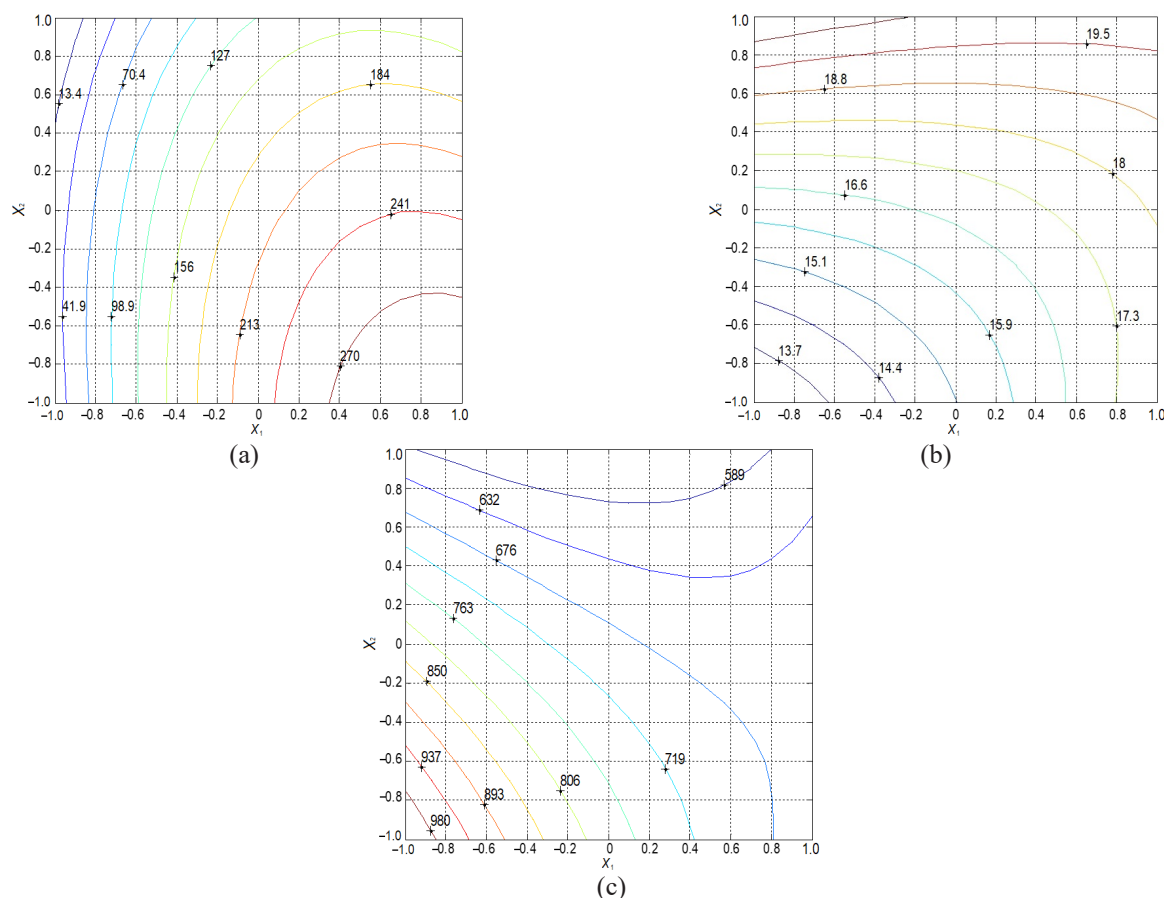


Рис. 3. Линии равных уровней функции Y при растяжении полимочевинных покрытий на основе смеси ПАК 1 и ПАК 2: (а) для времени жизни, (б) для прочности при растяжении, (с) для относительного удлинения.

Fig. 3. Isoline maps of the main performance characteristics of polyurea coatings based on a mixture of AAD-1 and AAD-2: (a) for curing time, (b) for tensile strength, and (c) for relative elongation.

Используя метод планирования двухфакторного эксперимента, были составлены уравнения регрессии для каждого из исследуемых свойств. При помощи критерия Фишера установлена адекватность уравнений. Полученные графики равных уровней позволяют использовать их для моделирования полимочевинных композиций с широкими эксплуатационными свойствами в соответствии с требованиями заказчика.

Вклад авторов

С.В. Романов – идея исследования, материальная база;

О.А. Ботвинова – проведение экспериментов, анализ полученных результатов;

Е.А. Тимаков – написание текста статьи, анализ полученных результатов;

Д.А. Ращупкина – написание текста статьи;
Ю.Т. Панов – общее руководство, научное редактирование.

Authors' contributions

S.V. Romanov – research idea, resource provision;
O.A. Botvinova – conducting research, analysis of the results;

E.A. Timakov – writing the text of the article, analysis of the results;

D.A. Rashchupkina – writing the text of the article;

Yu.T. Panov – supervision, scientific editing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов С.И., Ботвинова О.А., Тимаков Е.А., Чиждова Л.А., Панов Ю.Т. Разработка композиции на основе полимочевины с увеличенным сроком службы. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(2):176–183. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-176-183>
2. Аржаков М.С., Яковлев П.П., Ярышева А.Ю., Лопаткин А.И., Ярославов А.А. Механические свойства изоляционных покрытий на основе модифицированной полимочевины. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. 2021;497(1):29–32. <https://doi.org/10.31857/S2686953521020035>
3. Botvinova O.A., Panov Y.T., Romanov S.V. Producing Bicomponent Sealants Based on Polyaspartate Urea Resins. *Polym. Sci. Ser. D*. 2020;13:407–413. <https://doi.org/10.1134/S1995421220040048>
4. Posey M.L., Hillman K.M., Klein H.P. New Secondary Amine Chain Extenders for Aliphatic Polyurea Materials. *Materials Science*. 2003. Corpus ID: 92430089
5. Akindoyo J., Beg M., Ghazali S., Islam M., Jeyaratnam N., Yuvaraj A.R. Polyurethane types, synthesis and applications-a Review. *RSC Adv*. 2016;6(115):114453–114482. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>
6. Zilg C., Mulhaupt R. Morphology and toughness/stiffness balance of nanocomposites based upon anhydride-cured epoxy resins and layered silicates. *Macromol. Chem. Phys*. 1999;200(3):661–670. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3935\(19990301\)200:3<661::AID-MACP661>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3935(19990301)200:3<661::AID-MACP661>3.0.CO;2-4)
7. Умнов А.Е. *Методы математического моделирования*. М.: МФТИ; 2021. 295 p.
8. Закгейм А.Ю. *Введение в моделирование процессов химической инженерии*. Серия «Химическая кибернетика». М.: Химия; 1982. 288 с.

REFERENCES

1. Romanov S.I., Botvinova O.A., Timakov E.A., Chizhova L.A., Panov Yu.T. Development of a polyurea-based composition with an extended life span. *Tonk. Khim. Technol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(2):176–183 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-2-176-183>
2. Arzhakov M.S., Yakovlev P.P., Yarysheva A.Y., et al. Mechanical Properties of Insulation Coatings Based on Modified Polyurea. *Dokl. Phys. Chem.* 2021;497(1):25–27. <https://doi.org/10.1134/S0012501621030015>
[Original Russian Text: Arzhakov M.S., Yakovlev P.P., Yarysheva A.Yu., Lopatkin A.I., Yaroslavov A.A. Mechanical Properties of Insulation Coatings Based on Modified Polyurea. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*. 2021;497(1):29–32 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686953521020035>]
3. Botvinova O.A., Panov Y.T., Romanov S.V. Producing Bicomponent Sealants Based on Polyaspartate Urea Resins. *Polym. Sci. Ser. D*. 2020;13:407–413. <https://doi.org/10.1134/S1995421220040048>
4. Posey M.L., Hillman K.M., Klein H.P. New Secondary Amine Chain Extenders for Aliphatic Polyurea Materials. *Materials Science*. 2003. Corpus ID: 92430089
5. Akindoyo J., Beg M., Ghazali S., Islam M., Jeyaratnam N., Yuvaraj A.R. Polyurethane types, synthesis and applications-a Review. *RSC Adv*. 2016;6(115):114453–114482. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>
6. Zilg C., Mulhaupt R. Morphology and toughness/stiffness balance of nanocomposites based upon anhydride-cured epoxy resins and layered silicates. *Macromol. Chem. Phys*. 1999;200(3):661–670. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3935\(19990301\)200:3<661::AID-MACP661>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3935(19990301)200:3<661::AID-MACP661>3.0.CO;2-4)

9. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. *Методы оптимизации эксперимента в химической технологии*: учебник для химико-технологических специальностей вузов. М.: Высшая школа; 1985. 327 с.

7. Umnov A.E. *Metody matematicheskogo modelirovaniya (Methods of mathematical modeling)*. Moscow: MFTI; 295 p. (in Russ.).

8. Zakgeim A.Yu. *Vvedenie v modelirovanie protsessov khimicheskoi inzhenerii*. Seriya "Khimicheskaya kibernetika" (Introduction to chemical engineering process modeling. Series "Chemical cybernetics"). Moscow: Khimiya; 1982. 288 p. (in Russ.).

9. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii: uchebnik dlya khimiko-tekhnologicheskikh spetsial'nostei vuzov (Methods of experiment optimization in chemical technology: a textbook for chemical engineering specialties of universities)*. Moscow: Vysshaya shkola; 1985. 327 p. (in Russ.).

Об авторах:

Романов Сергей Викторович, к.т.н., директор ООО «Эласт-ПУ» (600026, Россия, Владимир, ул. Гастелло, д. 21а). E-mail: romanov-elastpu@mail.ru. Scopus Author ID 55809569400, SPIN-код РИНЦ 9952-4171, <https://orcid.org/0000-0002-5152-4678>

Ботвинова Ольга Андреевна, к.т.н., начальник исследовательской лаборатории ООО «Эласт-ПУ» (600026, Россия, Владимир, Гастелло, д. 21а). E-mail: ermolaeva_olya@inbox.ru. Scopus Author ID 56907022800, SPIN-код РИНЦ 3933-6884, <https://orcid.org/0000-0003-0217-8446>

Тимаков Евгений Александрович, старший преподаватель кафедры «Химические технологии», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (600000, Россия, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: okakie@yandex.ru. Scopus Author ID 57219018403, SPIN-код РИНЦ 3178-1477, <https://orcid.org/0000-0003-3312-0810>

Ращупкина Дарья Андреевна, магистрант кафедры «Химические технологии», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (600000, Россия, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: dashulka010220002016@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7724-6218>

Панов Юрий Терентьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Химические технологии», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (600000, Россия, Владимир, ул. Горького, д. 87). E-mail: tpp_vlgu@mail.ru. Scopus Author ID 54789107500, SPIN-код РИНЦ 6961-3659, <https://orcid.org/0000-0001-8528-1195>

About the authors:

Sergei V. Romanov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Elast PU Production Company (21a, Gastello ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: romanov-elastpu@mail.ru. Scopus Author ID 55809569400, RSCI SPIN-code 9952-4171, <https://orcid.org/0000-0002-5152-4678>

Olga A. Botvinova, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Laboratory, Elast PU Production Company (21a, Gastello ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: ermolaeva_olya@inbox.ru. Scopus Author ID 56907022800, RSCI SPIN-code 3933-6884, <https://orcid.org/0000-0003-0217-8446>

Evgenii A. Timakov, Senior Lecturer, Chemical Technologies Department, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: okakie@yandex.ru. Scopus Author ID 57219018403, RSCI SPIN-code 3178-1477, <https://orcid.org/0000-0003-3312-0810>

Dariya A. Rashchupkina, Master Student, Chemical Technologies Department, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: dashulka010220002016@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-7724-6218>

Yuri T. Panov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chemical Technologies Department, Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University (87, Gor'kogo ul., Vladimir, 600026, Russia). E-mail: tpp_vlgu@mail.ru. Scopus Author ID 54789107500, RSCI SPIN-code 6961-3659, <https://orcid.org/0000-0001-8528-1195>

Поступила: 21.12.2022; получена после доработки: 26.05.2023; принята к опубликованию: 10.11.2023.
The article was submitted: December 21, 2022; approved after reviewing: May 26, 2023; accepted for publication: November 10, 2023.