

МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ГОРЕНИЯ ДЛЯ ПОЛИАМИДА-6

Рева О.В., Криваль Д.В., Дечко М.М., Дьячкова Л.Н.

Цель. Построение адекватной математической модели состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6 с заданной целевой функцией и применение ее для моделирования оптимальных характеристик состава замедлителя горения (обеспечивающего огнестойкость полученного композиционного материала категории ПВ-0 и снижение основных физико-механических характеристик не более чем на 8–10 % по сравнению с исходным полиамидом).

Методы. Использованы теоретические методы статистического анализа результатов эксперимента для получения регрессионной модели с проверкой ее статистической значимости и адекватности; метод сечений дискриминантной функции в плоскости наиболее важных факторов, выявленных регрессионным анализом. Для расчетов применены программы Statistica (TIBCO Software Inc.) и PTC Mathcad Prime (PTC Inc.).

Результаты. Проведено экспериментальное исследование и статистический анализ полученных данных, на основе которого методами регрессионного и дискриминантного анализа построена многоуровневая математическая модель, описывающая зависимости параметров огнестойкости и механических свойств огнезащищенного полимерного композита от суммарной концентрации комплексного замедлителя горения в полиамидной матрице и относительного содержания в нем 5 компонентов, определены коэффициенты в уравнении регрессии. Разработана комплексная математическая модель, позволяющая с учетом приоритетных значений эксплуатационных параметров огнезащищенного полимерного композита выявить оптимальный состав многокомпонентного замедлителя горения.

Область применения исследований. Разработанная математическая модель позволяет определить оптимальный состав комплексного замедлителя горения для тугоплавких полимеров и его концентрации в полимерном композите в соответствии с требованиями к его важнейшим эксплуатационным параметрам: огнестойкости категории ПВ-0 при минимальном снижении физико-механических свойств.

Ключевые слова: теоретическое моделирование, регрессионный анализ, дискриминантный анализ, нетоксичные многокомпонентные замедлители горения, огнестойкие полиамидные композиты.

(Поступила в редакцию 14 января 2026 г.)

Введение

Наиболее распространенным и эффективным способом снижения горючести полимерных материалов и композитов на их основе является внесение замедлителей горения в полимерную матрицу методом экструзии в расплав [1–4]. Для полиамидов одним из главных классов замедлителей горения твердофазного действия, описанных во многих работах [5–9], являются органические соединения фосфора, которые могут быть допированы галогенсодержащими и фосфор-галогенидными антипиренами. Для повышения эффективности замедлителя горения полимерный композит в дополнение к фосфорорганическому соединению может содержать активирующее вещество, например производные меламина, пентаэритрита, неорганические соединения металлов, слоистые двойные гидроксиды, полимеры простого полифениленового эфира [5]. Весьма эффективными для придания огнестойкости полиамамидам являются синергические смеси, включающие оксид сурьмы и галогенсодержащие органические соединения [10–15]. В качестве неорганических антипиренов для полиамидов описаны красный фосфор и полифосфат аммония, а также некоторые глинистые минералы: каолинит, монтмориллонит и гидрослюда, содержащие в качестве примесей кварц и карбонаты кальция, магния, железа, бария, натрия, меди и других металлов [5; 10; 15–17].

Несмотря на высокую эффективность фосфор- и галогенсодержащих органических замедлителей горения, при термодеструкции модифицированных ими полиамидных материалов выделяются высокотоксичные продукты их разложения. В случае малотоксичных

неорганических замедлителей горения часто не обеспечивается необходимый уровень огнезащиты полиамида, поскольку неорганические вещества плохо совмещаются с высокомолекулярной матрицей, а необходимая категория стойкости материала к горению достигается только при достаточно высоком содержании (до 30 и более масс. %) огнезащитной смеси [16; 18].

Кроме того, повышение концентрации примесей другой химической природы отрицательно сказывается на прочностных характеристиках полученного композиционного полимерного материала, поскольку физико-механические свойства полиамидов весьма чувствительны к внесению примесей и очень плохо прогнозируемы, несмотря на обилие накопленных экспериментальных данных и новые теории синтеза композиционных материалов с заданными свойствами [18; 19].

Таким образом, решение комплексной задачи эффективной огнезащиты тугоплавких полимеров, к которым относится полиамид, возможно путем разработки новых многокомпонентных замедлителей горения синергического действия, оптимально сочетающих органические и неорганические компоненты газофазного, твердофазного и структурирующего действия, препятствующие не только горению полимерного композита, но и его растеканию, а также выделению токсичных газов. При эмпирическом составлении многокомпонентного замедлителя горения требуется проведение очень значительного количества экспериментов, поскольку его совокупное огнезащитное действие является сложным и многофакторным физико-химическим процессом, протекающим одновременно в нескольких фазах, что упоминается во многих литературных источниках [20; 21], и не является простой суммой действия отдельных компонентов. К тому же огнестойкость полимерного материала нельзя рассматривать в отрыве от влияния химического состава и концентрации огнезащитной композиции на физико-механические свойства получаемых материалов, многие из которых при внесении примесей изменяются не только нелинейно, но и не взаимосвязанно [18; 19].

Математическое моделирование позволяет существенно сократить объем экспериментов, однако в системах «полимер – комплексный антипирен» построение адекватной модели весьма затруднительно, поскольку не только велико количество значимых факторов, но и для каждой системы мало предсказуемо их взаимодействие. В основном применительно к огнезащите полимерных материалов в литературных источниках встречаются работы, в которых проводится построение относительно несложных математических моделей для процессов тепломассопереноса при горении различных материалов [22], формирования малокомпонентных антипиренов [23–25] с варьированием ограниченного количества факторов.

В работах [26–29] изложены более многофакторные математические модели применительно к созданию огнестойких материалов. Так, в работе [26] методом теоретического моделирования получена рецептура металлофосфатной системы с улучшенными огнезащитно-огнетушащими свойствами по отношению к торфу и древесине; выявлено, что исследуемые металлофосфатные системы для торфа и древесины проявляют комплексный механизм огнетушащего действия. В работе [27] оптимизировано не только соотношение компонентов жидкофазной полимерной термогерметизирующей композиции и параметров технологического процесса; но и прочностные характеристики полученного в результате материала для защитных костюмов. Работы [28; 29] помимо оптимизации рецептуры термовспениваемых полимерных композитов выявляют, что преобладающее влияние на огнестойкость системы и ее термоизолирующие свойства оказывает образование механически прочной вспененной коксовой структуры.

Моделей, полноценно описывающих зависимость не только огнестойкости, но и физико-механических свойств огнезащищенного полимерного композита от состава и концентрации компонентов замедлителя горения, в литературных источниках не обнаружено. В связи с этим при модификации полиамида-6 многокомпонентным антипиреном синергического действия в представленном исследовании использован подход, сочетающий экспериментальные и расчетные методы.

Целью данной работы является построение адекватной математической модели состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6 с заданной целевой функцией и применение ее для моделирования оптимальных характеристик состава замедлителя горения (обеспечивающего огнестойкость полученного композиционного материала категории ПВ-0 и снижение основных физико-механических характеристик не более чем на 8–10 % по сравнению с исходным полиамидом).

За основу многокомпонентного замедлителя горения была выбрана смесь нетоксичных и экологически безопасных нестехиометрических аммонийных металлофосфатов (НЗГ). При накоплении экспериментальных данных для построения многофакторной математической модели в расплав полиамида-6 (220–240 °С) при интенсивном перемешивании вносили огнезащитные композиции на основе НЗГ с рядом структурирующих или газовыделяющих минеральных и органических добавок в количестве от 5 до 18 масс. %. Из полученной однородной массы на термопластавтомате Dr.Boy 22А получали образцы для дальнейших испытаний.

Огневые испытания модифицированных полимерных композитов проводили по ГОСТ 28157-2018¹ на горелке Бунзена не менее 3 пластин на точку. Испытания физико-механических свойств полученных материалов проводили по ГОСТ 11645-2021², ГОСТ 11262-2017³, ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000)⁴, ГОСТ 4647-2015 (ISO 179-1:2010)⁵, ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010)⁶ с испытанием не менее 10 образцов на точку.

Основная часть

Спецификация модели.

С целью определения оптимального состава многокомпонентного замедлителя горения и его концентрации в полиамидном композите выполнено экспериментальное исследование и статистический анализ результатов влияния 5 компонентов (входных факторов) в составе антипирена на огнестойкость и физико-механические свойства огнезащитного композитного полимерного материала. Перечень компонентов, интервалы варьирования и число уровней которых приведены в таблице 1.

При реализации опытов комбинации уровней выбирались исходя из количественного состава компонентов в антипирене, вводимом в полиамид-6. Весьма важным является наличие взаимного влияния варьируемых уровней, в связи с чем результаты анализа распределения и сочетания уровней варьируемых факторов в нормированных координатах приведены на рисунке 1 и в таблице 2.

Поскольку графики взаимных распределений уровней входных факторов (рис. 1) не указывают на их статистически значимую взаимозависимость, очевидно требуется включить все перечисленные факторы в математические модели в качестве независимых переменных.

Таблица 1. – Интервалы варьирования и число уровней компонентов антипирена (входные факторы)

Компонент	Фактор	Min	Max	Уровни
НЗГ, %	X_1	4	12	11
Суперфосфат, %	X_2	0	1	2
Гранит, %	X_3	0	1	4
Меламин + пентаэритрит, %	X_4	1	2	4
NH_4Cl , %	X_5	0	2	6

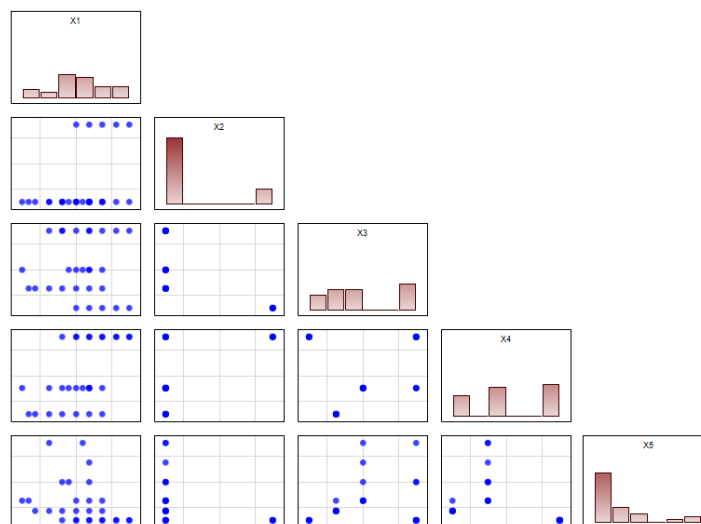


Рисунок 1. – Графики распределения уровней варьируемых факторов

¹ Пластмассы. Методы определения стойкости к горению: ГОСТ 28157-2018. – Взамен ГОСТ 28157-89; введ. 01.02.2019. – М.: Стандартинформ, 2018. – III, 8 с.

² Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава: ГОСТ 11645-2021. – Взамен ГОСТ 11645-73; введ. 01.09.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – III, 25 с.

³ Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). – Взамен ГОСТ 11262-80; введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – IV, 20 с.

⁴ Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду: ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000). – Взамен ГОСТ 19109-84; введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – IV, 15 с.

⁵ Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи: ГОСТ 4647-2015. – Взамен ГОСТ 4647-80; введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – IV, 20 с.

⁶ Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). – Взамен ГОСТ 4648-71; введ. 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – III, 22 с.

Таблица 2. – Сочетания уровней входных факторов в натуральных и нормированных координатах

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы				
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1

Согласно матрице многофакторного эксперимента (табл. 2) были изготовлены образцы огнезащитенного полиамидного материала и измерены две группы важнейших выходных параметров – свойства огнестойкости (Y₁–Y₅) и механические свойства (Y₆–Y₉) (табл. 3). Все параметры, согласно требованиям ГОСТ, измерялись на 5–10 образцах в каждом опыте, а в таблице 3 указаны их средние значения.

Таблица 3. – Экспериментальные значения свойств огнезащитенных полимерных композитов (выходные параметры)

№	Свойства огнестойкости					Механические свойства			
	Время горения, с	Потеря массы, мг	Растекание образца, +/-	Стойкость к горению	Особенности горения	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉
1	0	15	-	ПВ-0	Вспучивается	42,39	54,7	2810	60
2	0	15	-	ПВ-0	Вспучивается	44,2	56	2785	58
3	20	70	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	46,3	58,62	2760	56
4	37	90	+	ПВ-2 или -		45	59,98	2725	54

Продолжение таблицы 3

№	Свойства огнестойкости					Механические свойства			
	Время горения, с	Потеря массы, мг	Расстояние образца, +/-	Стойкость к горению	Особенности горения	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉
5	90	110	+	–	Горит постоянно	50,1	61,2	2700	53
6	0	17	–	ПВ-0	Вспучивается	43	53,2	2802	60
7	0	17	–	ПВ-0	Вспучивается	44,35	56,23	2780	58
8	5	29	+	ПВ-1		46,4	58,28	2756	56
9	8	42	+	ПВ-1		49,8	60,67	2720	54
10	5	26	+	ПВ-1 или ПВ-2		50,12	61,9	2695	52
11	8	44	+	ПВ-2		50,6	65,2	2671	50
12	4	22	+	ПВ-1		49,45	61,13	2718	54
13	9	49	+	ПВ-1		49,2	59,88	2724	55
14	8	43	+	ПВ-1 или ПВ-2		49,9	60	2726	54
15	0	15	–	ПВ-0	Вспучивается	49,79	60,5	2722	54
16	4	23	+	ПВ-1		50,17	63,3	2693	52
17	7	36	+	ПВ-1 или ПВ-2		50,44	66,6	2670	50
18	20	64	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	50,62	66,7	2667	49
19	32	72	+	ПВ-2	Пламя обрывается с каплей	50,39	66,48	2665	51
20	41	85	–	ПВ-2 или –	Горит медленно, но постоянно	50,28	66,82	2673	49
21	21	64	–	ПВ-1		50,05	63,6	2697	52
22	26	69	–	ПВ-1		51,2	65,9	2664	51
23	33	78	–	ПВ-1		56,72	67,1	2630	42
24	37	84	–	ПВ-1		63,24	67,66	2590	37
25	55	87	+	ПВ-2		63,8	68,1	2545	32
26	68	93	+	ПВ-2		65,6	69,16	2520	27
27	77	96	+	ПВ-2		66,4	69,27	2518	28
28	90	112	+	ПВ-2 или –		67,2	69,4	2522	27

Исключая X_2 , остальные факторы варьировались на более чем двух уровнях, что позволяет использовать для описания влияния варьируемых факторов на исследуемые параметры полиномиальную модель 2-го порядка для всех факторов, за исключением фактора X_2^2 . Кроме того, большое количество уровней варьирования факторов X_1 и X_5 может обусловить значимость их кубических эффектов, которые также включены в модель. Таким образом, в качестве общей модели для поиска зависимости свойств огнезащитного полимерного композита (выходных параметров Y_k) от состава и концентрации компонентов антипирена (входных факторов X) выбран полином вида:

$$Y_k = b_{0k} + \sum_{i=1}^5 b_{ik} X_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^5 b_{ijk} X_i X_j + \sum_{i=1, i \neq 2}^5 b_{iik} X_i^2 + b_{111k} X_1^3 + b_{555k} X_5^3, \quad k = \overline{1,9}. \quad (1)$$

Выходные параметры огнестойкости. Огнестойкость характеризуется двумя количественными параметрами Y_1 , Y_2 и тремя качественными Y_3 – Y_5 . Параметр Y_5 зафиксирован менее, чем в половине экспериментов, поэтому из дальнейшего анализа исключен.

Графики распределений наблюдаемых значений выходных параметров огнестойкости (рис. 2) показывают тесную взаимозависимость параметров Y_1 и Y_2 , что логично, т.к. большее время горения будет приводить к большей потере массы. Основным показателем огнестойкости материала является время горения (Y_1), поэтому потерю массы (Y_2) выразим

как функцию от времени горения (рис. 3). Для аппроксимации функциональной зависимости между этими параметрами использована логарифмическая функция вида:

$$Y_2 = 36 \ln(Y_1 + 7) - 56. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции экспериментальных и рассчитанных по уравнению (2) значений параметров Y_1 (время горения) и Y_2 (потеря массы) равен 0,99, что подтверждает их тесную взаимосвязь.

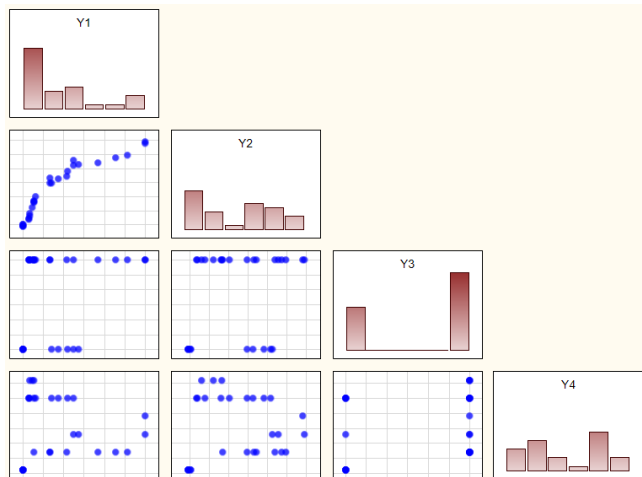


Рисунок 2. – Графики распределения выходных параметров огнестойкости

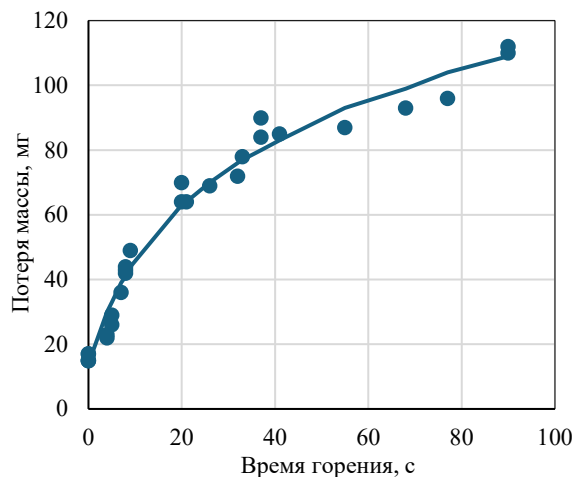


Рисунок 3. – Зависимость потери массы образца от времени горения

Определение зависимости времени горения (Y_1) от варьируемых факторов с помощью функции выполнено в программе Statistica (TIBCO Software Inc.) с помощью процедуры «Обобщенные линейные и нелинейные модели» (GLZ) [30]. В качестве регрессионной зависимости выбрана модель с логарифмической функцией связи и нормальным распределением параметра:

$$\ln(Y_1) = F(X_1, X_2, \dots X_5).$$

Выбор логарифмической функции основан на том, что наибольший интерес представляет описание зависимости времени горения в области значений, близких к нулю, а погрешности аппроксимации с помощью степенных полиномов могут привести к появлению отрицательных расчетных значений в этой области. Коэффициенты регрессии рассчитывались пошаговым методом с исключением эффектов, не значимых по критерию Фишера. В результате получена следующая зависимость:

$$\ln(Y_1) = 10,272 - 5,064X_1 + 6,099X_2 + 3,832X_4 + 5,315X_5 + 1,248X_1X_3 - 1,579X_1X_4 - 4,341X_1X_5 + 2,195X_3X_4 - 2,576X_3X_5 + 7,990X_4X_5 - 0,267X_1^3 - 2,375X_5^3. \quad (3)$$

Рассчитанные по уравнению (3) значения времени горения представлены в таблице 4.

На основе полученного уравнения решена задача прогноза состава антипирена, который обеспечивает минимальное время горения. Задача решена путем поиска минимума функции при ограничениях на факторы, соответствующие их интервалам варьирования:

$$Y_1(X_1 \dots X_5) \rightarrow \min, \quad -1 \leq X_1 \dots X_5 \leq 1.$$

Таблица 4. – Расчетные и экспериментальные значения времени горения модифицированного полиамида

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы					Время горения, с	
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y ₁ , расч.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	0	2,0
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	0	5,6
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	20	14,8
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	37	37,0

Продолжение таблицы 4

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Нормированные факторы					Время горения, с	
						X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y ₁	Y _{1, расч.}
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	90	90,2
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	0	1,7
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	0	2,6
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	5	3,6
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	8	4,8
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	5	6,3
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	8	8,3
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	4	3,8
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	9	9,4
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	8	7,9
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	0	1,9
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	4	3,6
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	7	6,5
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	20	19,9
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	32	31,9
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	41	41,0
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	21	20,5
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	26	26,1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	33	32,5
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	37	40,4
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	55	51,5
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	68	69,0
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	77	77,0
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	90	90,1

Расчеты выполнены в программе PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) [31] методом сопряженных градиентов с перебором 100 случайных стартовых точек. В результате получен граничный экстремум, указывающий, что минимальное время горения может быть достигнуто при концентрации компонентов, указанной в таблице 5.

Таблица 5. – Концентрация компонентов антипирена, обеспечивающая минимальное время горения согласно расчетам

Компонент	Фактор	Нормированный	Натуральный
НЗГ, %	X ₁	1	12
Суперфосфат, %	X ₂	-1	0
Гранит, %	X ₃	1	1
Меламин + пентаэритрит, %	X ₄	-1	1
NH ₄ Cl, %	X ₅	1	2

На рисунке 4 показаны расчетные значения уровней параметра «Время горения» в оптимальной области состава антипирена.

Согласно расчетам концентрация NH₄Cl более 0,5 % должна обеспечить малые значения времен горения, причем в этом случае влияние добавок НЗГ будет незначительным. Однако одним из важнейших условий составления нового комплексного замедлителя горения является отсутствие или минимизация содержания галогенсодержащих компонентов. Таким образом, повышение концентрации высокоэффективного компонента NH₄Cl более 0,5 % недопустимо.

Качественный параметр Y₃ разделяет характер горения в эксперименте на две категории: «+» – есть растекание образца, «-» – нет растекания образца. Для построения математической модели, классифицирующей характер горения по этим признакам в зависимости от варьируемых факторов, использован метод дискриминантного анализа. В качестве математической модели использовано уравнение (1). Расчет коэффициентов дискриминантных функций выполнен в программе Statistica (TIBCO Software Inc.) с помощью процедуры «Общие модели дискриминантного анализа» (GDA). Коэффициенты дискриминантных функций

рассчитывались пошаговым методом с включением эффектов, значимых по критерию Фишера. В результате проведенных расчетов установлено, что из всех коэффициентов уравнения (1) статистически значимыми (со среднеквадратичным отклонением для коэффициента меньшим, чем среднеквадратичное отклонение для самого параметра) являются только коэффициенты X_1X_5 , X_4X_5 и X_5^2 , численные значения которых приведены в таблице 6.

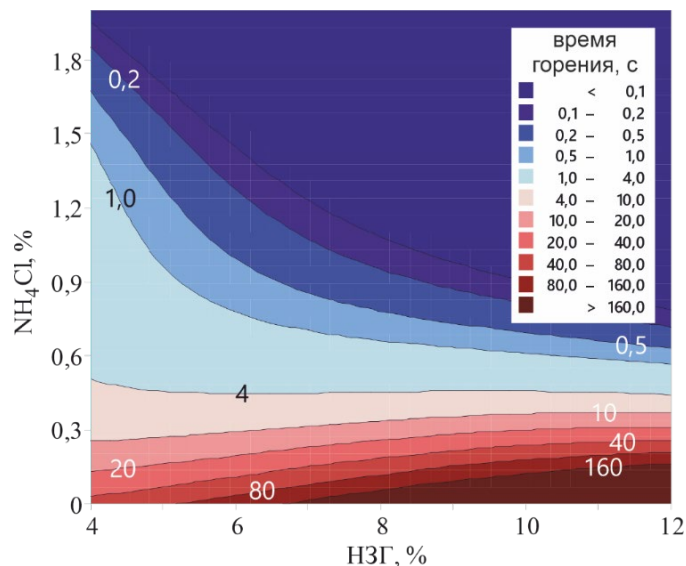


Рисунок 4. – Зависимость времени горения от изменения концентраций НЗГ и NH_4Cl при наличии в составе антипирена 1 % гранита и 1 % меламина + пентаэритрита

Величины коэффициентов дискриминантных функций при подстановке полученных значений в уравнение (1) показывают, что факторы X_2 (суперфосфат) и X_3 (гранит) не оказывают статистически существенное влияние на растрескивание. Наибольшее влияние оказывает фактор X_5 (NH_4Cl), причем во взаимодействии с факторами X_1 (НЗГ) и X_4 (меламин + пентаэритрит). Дискриминантные функции для классификации по двум категориям параметра «растрескивание образца» выражены как:

Таблица 6. – Статистически значимые коэффициенты дискриминантных функций по параметру «растрескивание образца»

Эффект	Нет растрескивания (-)	Есть растрескивание (+)
Const	-8,75	-2,20
X_1X_5	-13,96	1,34
X_4X_5	10,39	1,51
X_5^2	13,59	6,76

$$D^- = -8,75 - 13,96X_1X_5 + 10,39X_4X_5 + 13,59X_5^2; \quad (4)$$

$$D^+ = -2,20 + 1,35X_1X_5 + 1,51X_4X_5 + 6,75X_5^2. \quad (5)$$

Опыт будет отнесен к соответствующей категории в зависимости от того, какая из функций принимает максимальное значение. Отсюда можно вывести функцию, которая будет принимать значения «+1» или «-1» для прогнозирования растрескивания образца или его отсутствия:

$$Y_3 = \text{sign}(D^+ - D^-) = \text{sign}(6,55 + 15,31X_1X_5 - 8,88X_4X_5 - 6,84X_5^2). \quad (6)$$

Результаты классификации с помощью этих функций совпадают во всех экспериментах с наблюдаемым растрескиванием (табл. 7).

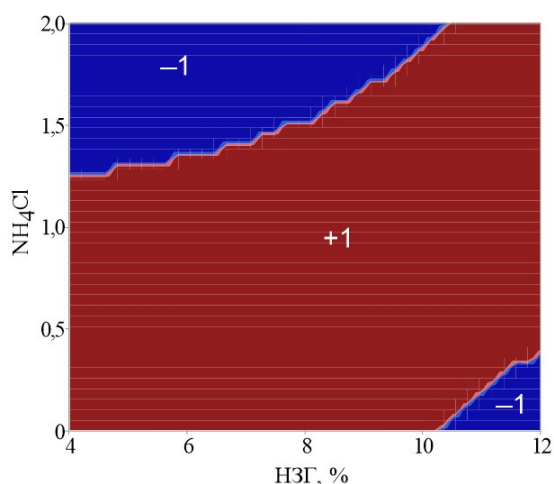
Сочетание влияющих факторов на растрескивание образца наглядно иллюстрируется графиками уровней функции в координатах концентрации НЗГ и NH_4Cl (рис. 5).

При добавках смеси меламина и пентаэритрита (компонента, отвечающего как за выделение инертных газов при термодеструкции композита, так и за формирование в твердой фазе смолоподобных продуктов поликонденсации, таких как аммелин (4,6-диамино-2-гидрокси-1,3,5-триазин) и аммелид (6-амино-2,4-дигидрокси-1,3,5-триазин) в количестве

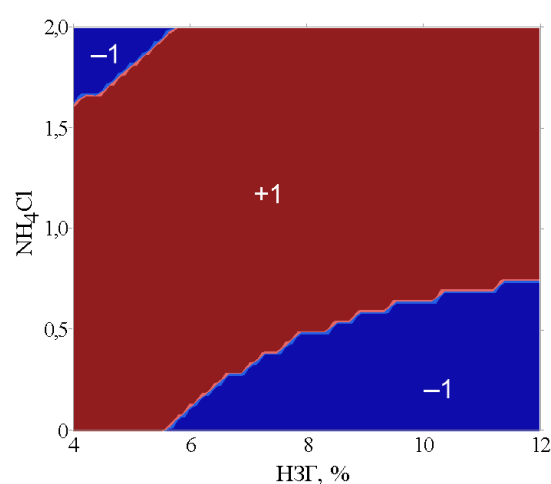
2 % (рис. 5а) отсутствие растекания прогнозируется при концентрации NH_4Cl 1,25–2 % и НЗГ 4–10 %. Вторую область без растекания ограничивают концентрации НЗГ 10–12 %, $\text{NH}_4\text{Cl} < 0,25\%$.

Таблица 7. – Экспериментальные значения и результаты классификации по параметру «Растекание образца» по дискриминантным функциям

№	НЗГ, %	сульфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Растекание образца			
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_3	D^+	D^-	Y_3 , прогн.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	-	1,71	8,42	-
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	-	2,04	4,93	-
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	+	2,38	1,44	+
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	+	2,71	-2,05	+
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	+	3,05	-5,55	+
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	-	1,71	8,42	-
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	-	2,04	4,93	-
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	+	2,38	1,44	+
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	+	2,71	-2,05	+
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	+	3,05	-5,55	+
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	+	3,38	-9,04	+
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	+	-0,59	-8,83	+
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	+	4,22	-0,37	+
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	-	-0,60	-0,13	-
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	+	-0,43	-1,88	+
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	+	-0,26	-3,62	+
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	+	-2,20	-8,75	+
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	-	3,38	8,36	-
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	-	2,23	11,92	-
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	-	2,48	9,30	-
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	-	2,73	6,69	-
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	-	2,98	4,07	-
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	+	3,23	1,45	+
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	+	3,49	-1,17	+
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	+	0,58	-8,00	+
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	+	0,41	-10,60	+



а – при добавке 2 % меламин + пентаэритрита



б – при добавке 1 % меламин + пентаэритрита

Рисунок 5. – Области, в которых прогнозируется отсутствие растекания образца при горении (синие)

При добавках смеси меламина и пентаэритрита в количестве 1 % (рис. 5б) распределение областей отсутствия растекания изменяется по центральной симметрии относительно предыдущей картины. Отсутствие растекания прогнозируется при концентрации NH_4Cl 1,6–2 % и НГЗ 4–6 % либо $\text{NH}_4\text{Cl} < 0,6$ % и НГЗ 6–12 %. При этом оба компонента в составах нужно увеличивать одновременно на границах диапазонов; однако второй вариант более предпочтителен по экологическим параметрам. Кроме того, следует подробнее изучить действие других каркасообразующих компонентов, препятствующих растеканию полиамидного композита (суперфосфат и гранит).

Параметр «стойкость к горению» Y_4 категориальный, представлен 6 классами (табл. 8).

Таблица 8. – Категории параметра «стойкость к горению»

Класс	1	2	3	4	5	6
Категория	ПВ-0	ПВ-1	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2	ПВ-2 или –	–

Для построения математической модели, прогнозирующей стойкость к горению по указанным классам в зависимости от варьируемых факторов, использован, как и при изучении характера горения, метод дискриминантного анализа. В модель включены эффекты, которые содержатся в уравнении, и дополнительно включен параметр Y_3 «растекание образца», как 2-уровневый фактор (+1 при растекании и –1 без растекания).

Коэффициенты дискриминантных функций представлены в таблице 9, прогнозируемые на их основе значения параметра – в таблице 10. Результат прогнозирования находится при заданных в нормированных координатах факторах X_1 – X_5 путем сравнения 6 значений, рассчитанных по коэффициентам дискриминантных функций (табл. 9). Наблюдение относится к тому классу, дискриминантная функция для которого максимальна.

Результаты прогнозирования по дискриминантным функциям дали 26 совпадений с экспериментальными значениями, что составляет 93 %, причем два ошибочных прогноза приходится на пограничные случаи ПВ-1 или ПВ-2 (№ 11, 17).

Таблица 9. – Статистически значимые коэффициенты дискриминантных функций для параметра «стойкость к горению»

Эффект	ПВ-0	ПВ-1	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2	ПВ-2 или –	–
$Const$	–12,50	–14,48	–25,33	–29,37	–50,83	–89,45
X_1	35,13	–22,83	–42,71	–62,78	–104,22	–129,16
X_4	4,06	–21,52	–24,40	–27,83	–26,23	–28,08
X_1X_3	–8,05	3,71	8,07	12,91	33,35	59,08
X_1X_4	22,79	–20,19	–32,12	–37,99	–61,58	–88,11
X_1X_5	25,43	–37,49	–51,58	–69,52	–98,08	–110,48
X_3X_4	8,85	–3,62	–9,17	–15,01	–33,99	–55,03
X_5^2	–12,11	27,37	42,27	44,87	62,87	82,99
X_5^3	4,84	–11,64	–11,88	–18,90	–23,09	–33,53
Y_3	–8,63	16,60	23,25	26,03	27,07	28,77

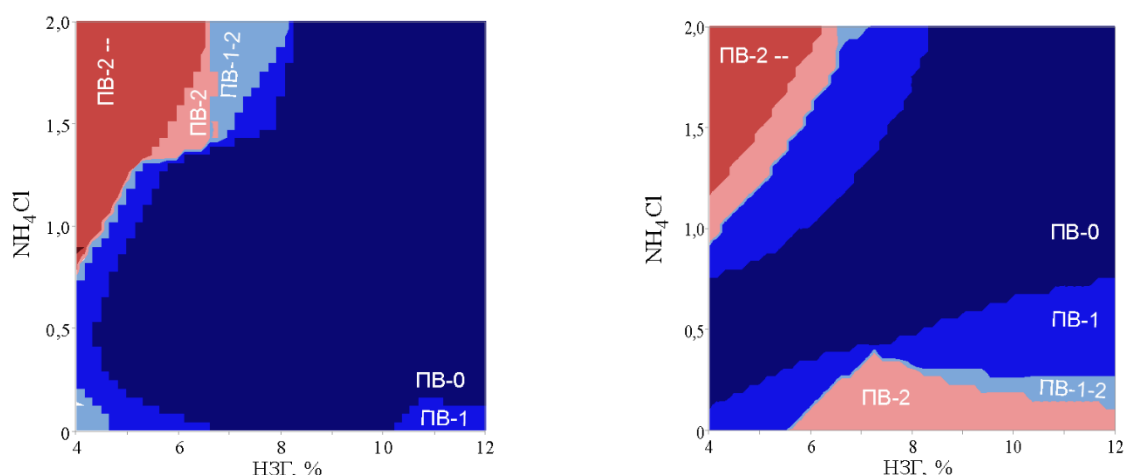
Таблица 10. – Экспериментальные значения и результаты классификации по параметру «Стойкость к горению» по дискриминантным функциям

№	НГЗ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Растекание образца	Стойкость к горению	
							Y_3	Y_4 , прогноз.
1	12	1	0	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
2	11	1	0	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
3	10	1	0	2	0	+	ПВ-2	ПВ-2
4	9	1	0	2	0	+	ПВ-2 или –	ПВ-2 или –
5	8	1	0	2	0	+	–	–
6	12	0	1	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
7	11	0	1	2	0	–	ПВ-0	ПВ-0
8	10	0	1	2	0	+	ПВ-1	ПВ-1

Продолжение таблицы 10

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Растекание образца	Стойкость к горению	
							Y ₃	Y ₄ , прогноз.
9	9	0	1	2	0	+	ПВ-1	ПВ-1
10	8	0	1	2	0	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
11	7	0	1	2	0	+	ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
12	9	0	1	1	1	+	ПВ-1	ПВ-1
13	9	0	0,5	1	1,5	+	ПВ-1	ПВ-1
14	8,5	0	0,5	1	2	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-1 или ПВ-2
15	10	0	0,5	1	0,5	-	ПВ-0	ПВ-0
16	9	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-1	ПВ-1
17	8	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-1 или ПВ-2	ПВ-2
18	7	0	1	1	1	+	ПВ-2	ПВ-2
19	7,5	0	0,5	1	1	+	ПВ-2	ПВ-2
20	6	0	1	1	2	-	ПВ-2 или -	ПВ-2 или -
21	10	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
22	9	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
23	8	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-	ПВ-1	ПВ-1
25	6	0	0,3	0,5	0,3	+	ПВ-2	ПВ-2
26	5	0	0,3	0,5	0,3	+	ПВ-2	ПВ-2
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	+	ПВ-2	ПВ-2
28	4	0	0,5	1	0,5	+	ПВ-2 или -	ПВ-2 или -

Для поиска оптимального состава антиперена по параметру «стойкость к горению» использован метод сечений дискриминантной функции в плоскости факторов X₁ и X₅ при варьировании факторами X₃ и X₄. В каждом сечении определялась относительная доля классов 1 и 2 (ПВ-0 и ПВ-1). В результате получено, что наилучшие результаты могут быть достигнуты для составов, отвечающих темно-синей зоне, представленных на рисунке 6.



а – 6 % меламина + пентаэритрита и 4 % гранита: P = 0,83

б – 2 % меламина + пентаэритрита и 2 % гранита: P = 0,77

Рисунок 6. – Составы антиперена, обеспечивающие стойкость к горению ПВ-0 и ПВ-1 с вероятностью P

Механические свойства полиамидного композита в данной теоретической модели характеризуются четырьмя важнейшими количественными параметрами (табл. 3). Графики взаимных распределений механических параметров указывают на их статистически значимую взаимосвязь, близкую к линейной (рис. 7), что вполне ожидаемо, т.к. кристаллическая структура полиамидов, и соответственно, физико-механические свойства, чрезвычайно чувствительны к наличию и концентрации примесей другой химической природы [18; 19].

Приведенные графики (рис. 7) и коэффициенты линейной корреляции (табл. 11) показывают очень высокую взаимозависимость механических свойств. Особенно тесная взаимосвязь между ударной вязкостью (Y_6), модулем Юнга (Y_8) и пределом текучести (Y_9). Прочность при разрыве (Y_7) имеет особенность во взаимосвязи с остальными факторами: на графиках виден излом линейной зависимости (рис. 8).

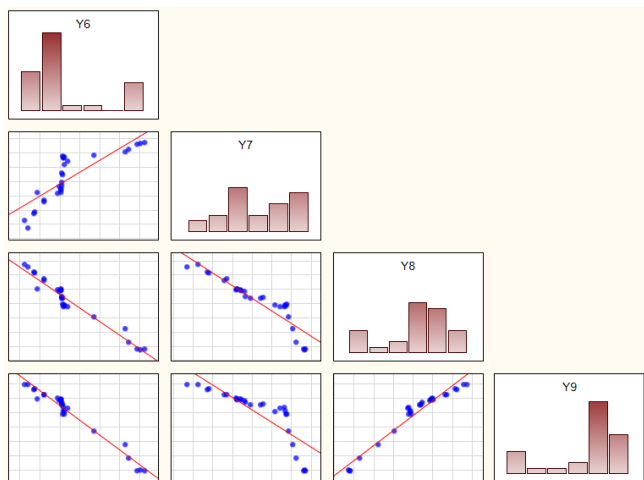


Рисунок 7. – Графики распределения наблюдаемых показателей механических свойств

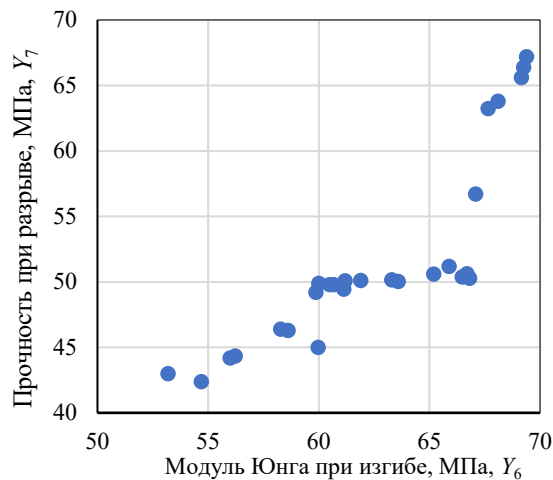


Рисунок 8. – Взаимозависимость модуля Юнга и прочности при разрыве

Таблица 11. – Коэффициенты линейной корреляции механических свойств

Параметры	Коэффициент корреляции		
	Y_6	Y_7	Y_8
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , Y_6	1		
Прочность при разрыве, МПа, Y_7	0,83	1	
Модуль Юнга при изгибе, МПа, Y_8	-0,97	-0,92	1
ПТР, г/10 мин, Y_9	-0,98	-0,83	0,97

В связи с этим целесообразно построить математические модели взаимосвязи только для параметров «ударная вязкость» (Y_6) и «прочность при разрыве» (Y_7) с факторами, варьируемыми в составе антипирена. Модуль Юнга и предел текучести могут быть выражены через ударную вязкость (рис. 9) и связаны уравнениями:

$$Y_8 = 3264 - 11,23Y_6; \tag{7}$$

$$Y_9 = 119 - 1,36Y_6. \tag{8}$$

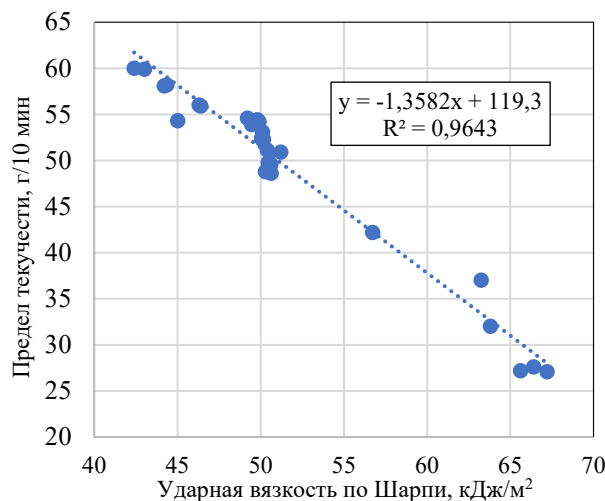
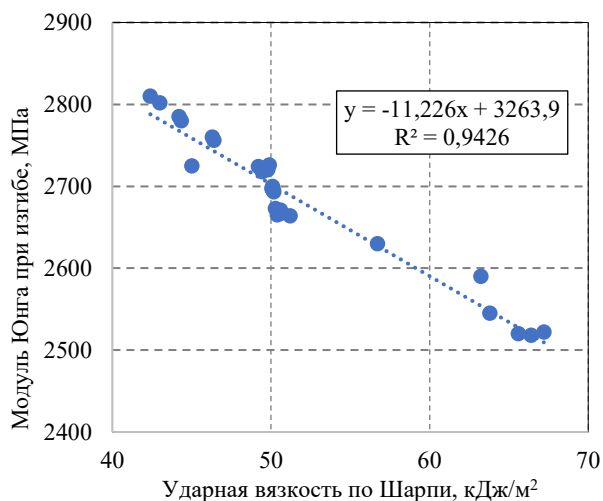


Рисунок 9. – Взаимосвязь ударной вязкости, модуля Юнга и предела текучести

Уравнение регрессии в нормированных координатах для описания зависимости ударной вязкости от составов антипирена с учетом статистической значимости коэффициентов имеет вид:

$$Y_6 = 48,1 - 6,23X_1 - 8,97X_4 + 5,31X_1X_2 + 6,15X_1X_3 - 10,63X_4^2 + 10,22X_5^2 - 10,57X_5^3. \quad (9)$$

Анализ коэффициентов уравнения показывает, что наибольшее влияние на ударную вязкость оказывает содержание смеси меламина с пентаэритритом и NH_4Cl .

Рассчитанные по уравнению значения ударной вязкости представлены в таблице 12.

Таблица 12. – Экспериментальные и расчетные значения ударной вязкости

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_6	Y_6 , расч.
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	42,39	42,21
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	44,2	43,98
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	46,3	45,74
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	45	47,51
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	50,1	49,28
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	43	43,89
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	44,35	45,23
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	46,4	46,58
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	49,8	47,93
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	50,12	49,28
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	50,6	50,62
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	49,45	48,55
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	49,2	48,24
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	49,9	48,11
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	49,79	48,00
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	50,17	50,89
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	50,44	53,77
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	50,62	51,24
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	50,39	51,34
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	50,28	52,24
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	50,05	49,33
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	51,2	52,98
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	56,72	56,64
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	63,24	60,29
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	63,8	63,94
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	65,6	67,59
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	66,4	66,00
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	67,2	65,31

На рисунке 10 показаны уровни ударной вязкости в зависимости от состава антипирена в области граничных максимумов. Максимальная расчетная ударная вязкость 88,5 кДж/м² прогнозируется для состава 4 % НЗГ и 1,3 % смеси меламина с пентаэритритом.

Уравнение регрессии в нормированных координатах для описания зависимости прочности при растяжении от составов антипирена с учетом статистической значимости коэффициентов имеет вид:

$$Y_7 = 63,5 - 8,37X_1 - 3,00X_4 - 2,31X_5 + 1,69X_1X_2 - 1,52X_1X_4 - 4,75X_1X_5 - 0,94X_3X_5 - 3,22X_1^2 - 1,13X_4^2. \quad (10)$$

Анализ коэффициентов уравнения показывает, что наибольшее влияние на прочность при растяжении оказывает содержание компонента НЗГ.

Рассчитанные по уравнению значения прочности при растяжении представлены в таблице 13.

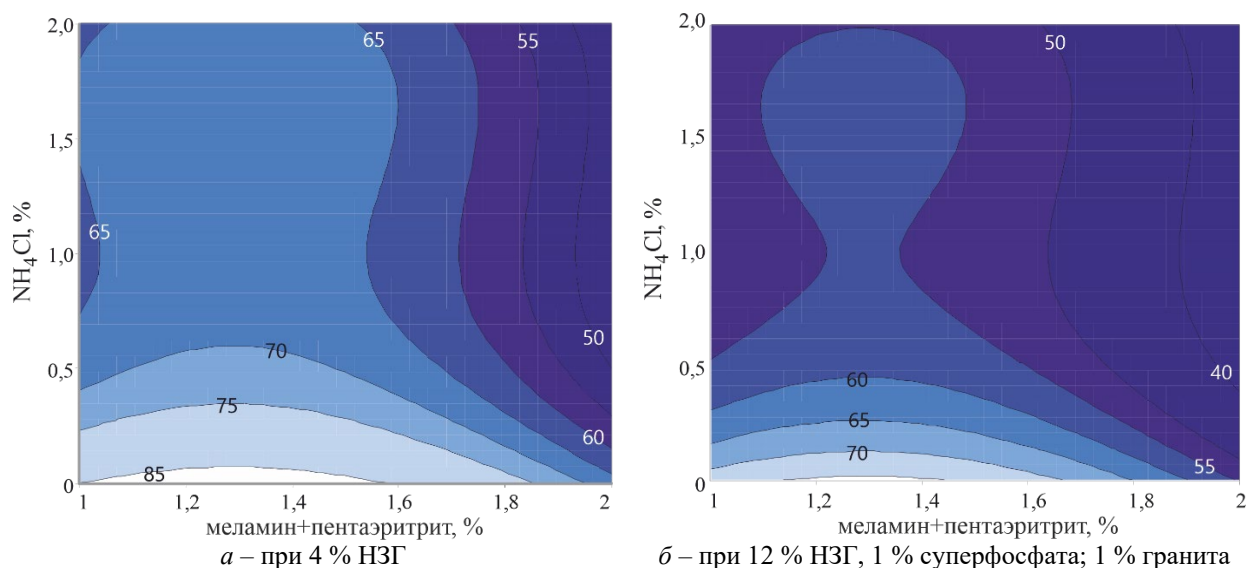


Рисунок 10. – Зависимость ударной вязкости от содержания меламина + пентаэритрита и NH_4Cl

Таблица 13. – Экспериментальные и расчетные значения прочности композита при разрыве

№	НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH_4Cl , %	Нормированные факторы					Прочность при разрыве, МПа	
						X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_7	$Y_7, \text{расч}$
1	12	1	0	2	0	1	1	-1	1	-1	54,7	54,33
2	11	1	0	2	0	0,75	1	-1	1	-1	56	56,60
3	10	1	0	2	0	0,5	1	-1	1	-1	58,62	58,47
4	9	1	0	2	0	0,25	1	-1	1	-1	59,98	59,93
5	8	1	0	2	0	0	1	-1	1	-1	61,2	61,00
6	12	0	1	2	0	1	-1	1	1	-1	53,2	52,83
7	11	0	1	2	0	0,75	-1	1	1	-1	56,23	55,94
8	10	0	1	2	0	0,5	-1	1	1	-1	58,28	58,66
9	9	0	1	2	0	0,25	-1	1	1	-1	60,67	60,97
10	8	0	1	2	0	0	-1	1	1	-1	61,9	62,87
11	7	0	1	2	0	-0,25	-1	1	1	-1	65,2	64,38
12	9	0	1	1	1	0,25	-1	1	-0,33	0	61,13	61,74
13	9	0	0,5	1	1,5	0,25	-1	0	-0,33	0,5	59,88	59,85
14	8,5	0	0,5	1	2	0,125	-1	0	-0,33	1	60	59,89
15	10	0	0,5	1	0,5	0,5	-1	0	-0,33	-1	60,5	61,25
16	9	0	0,5	1	0,5	0,25	-1	0	-0,33	-1	63,3	63,64
17	8	0	0,5	1	0,5	0	-1	0	-0,33	-1	66,6	65,64
18	7	0	1	1	1	-0,25	-1	1	-0,33	0	66,7	66,52
19	7,5	0	0,5	1	1	-0,13	-1	0	-0,33	0	66,48	65,48
20	6	0	1	1	2	-0,5	-1	1	-0,33	1	66,82	67,14
21	10	0	0,3	0,5	0,3	0,5	-1	-1	-1	-1	63,6	63,64
22	9	0	0,3	0,5	0,3	0,25	-1	-1	-1	-1	65,9	65,48
23	8	0	0,3	0,5	0,3	0	-1	-1	-1	-1	67,1	66,93
24	7	0	0,3	0,5	0,3	-0,25	-1	-1	-1	-1	67,66	67,97
25	6	0	0,3	0,5	0,3	-0,5	-1	-1	-1	-1	68,1	68,61
26	5	0	0,3	0,5	0,3	-0,75	-1	-1	-1	-1	69,16	68,85
27	4,5	0	0,3	0,8	0,5	-0,88	-1	-1	-0,67	-1	69,27	69,39
28	4	0	0,5	1	0,5	-1	-1	0	-0,33	-1	69,4	69,59

На рисунке 11 показаны уровни прочности при разрыве в зависимости от состава антипирена в области максимумов. Максимальная расчетная прочность при растяжении 73,9 МПа прогнозируется для состава 4 % НЗГ, 1,2 % смеси меламина и пентаэритрита, 2 % NH_4Cl .

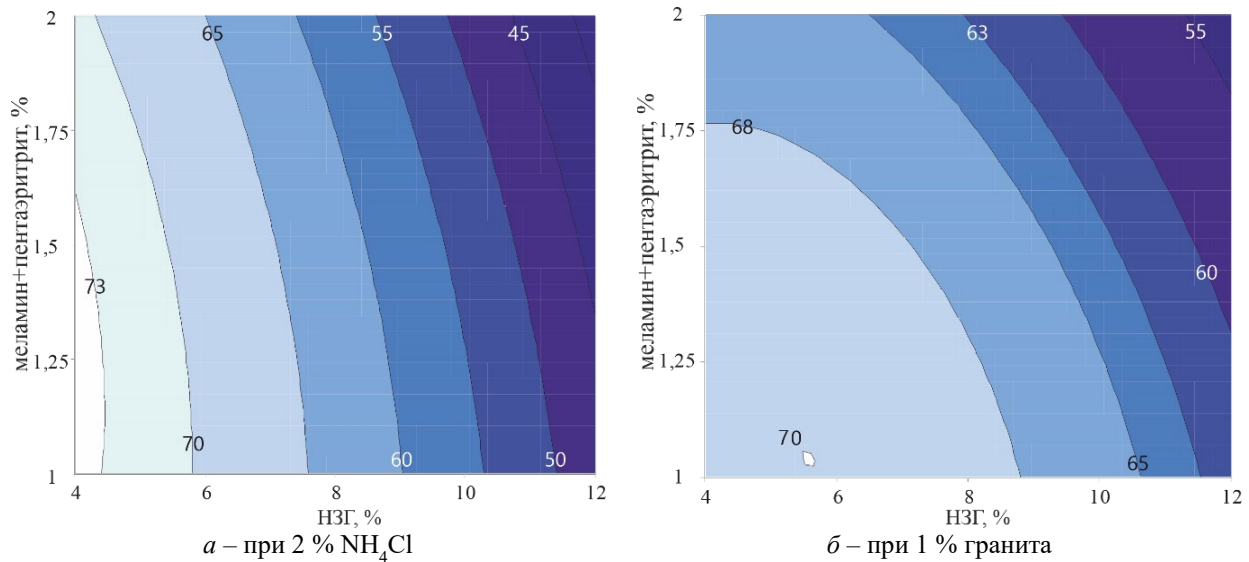


Рисунок 11. – Зависимость прочности при разрыве от содержания НЗГ и меламина + пентаэритрита

На основании построенной комплексной математической модели, описывающей взаимосвязь эксплуатационных параметров с составом антипирена (уравнения (2), (3), (6)–(10)), решена задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения на основе приоритетных значений эксплуатационных параметров (табл. 14).

Таблица 14. – Значимость и требуемые уровни свойств антипирена

Значимость отклика	Показатель	Желаемый (допустимый) диапазон
1	t горения, с, Y_1	0–4 (до 15)
2	Потеря массы, мг, Y_2	15–30
3	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ² , Y_6	50–65 (не менее 45)
4	Прочность при разрыве, МПа, Y_7	55–70
5	Модуль Юнга при изгибе, МПа, Y_8	2500–2700
6	Растекание образца, +/-, Y_2	–
7	ПТР, г/10 мин, Y_9	25–45

В качестве целевой функции выбрано время горения Y_1 . Минимизация этого параметра (см. табл. 5) удовлетворяет требования ко всем остальным параметрам, за исключением ударной вязкости Y_6 , и в систему уравнений оптимизационной задачи добавлено ограничение по этому параметру:

$$\ln(Y_1) = 10,272 - 5,064X_1 + 6,099X_2 + 3,832X_4 + 5,315X_5 + 1,248X_1X_3 - 1,579X_1X_4 - 4,341X_1X_5 + 2,195X_3X_4 - 2,576X_3X_5 + 7,990X_4X_5 - 0,267X_1^3 - 2,375X_5^3 \rightarrow \min;$$

$$Y_6 = 48,1 - 6,23X_1 - 8,97X_4 + 5,31X_1X_2 + 6,15X_1X_3 - 10,63X_4^2 + 10,22X_5^2 - 10,57X_5^3 \geq 50,$$

$$-1 \leq X_i \leq 1, \quad i = \overline{1,5}.$$

Расчеты выполнены в программе PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) [31] с перебором 100 случайных стартовых точек. Полученные данные приведены в таблице 15. В результате математического моделирования предложено 2 состава многокомпонентного замедлителя горения комплексного действия для полиамидных полимеров и его концентрация в композитном материале. Оба состава полностью отвечают поставленным требованиям: отсутствие галогенсодержащих и других токсичных компонентов; огнестойкость композиционного материала соответствует категории ПВ-0 согласно ГОСТ 28157-2018 при минимально допустимом снижении механической прочности полимерного композита.

Таблица 15. – Варианты состава антипирена, отвечающего требуемым критериям по всем выходным параметрам

Оптимальные значения факторов в нормированных координатах					НЗГ, %	суперфосфат, %	гранит, %	меламин + пентаэритрит, %	NH ₄ Cl, %	Время горения, с	Потеря массы, мг	Растекание образца, +/-	Стойкость к горению	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Прочность при разрыве, МПа	Модуль Юнга при изгибе, МПа	Предел текучести расплава, г/10 мин
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅													
0,27	-0,97	-1,00	0,78	-0,99	9,1	0	0	1,9	0	0,0	14	-	ПВ-0	50	60	2702	51
0,38	-0,90	0,02	0,82	-1	9,5	0,05	0,5	1,9	0	0,1	15	-	ПВ-0	50	60	2701	51

Заключение

В соответствии с разработанным планом многофакторного эксперимента определено влияние на огнестойкость и механическую прочность полиамидного композиционного материала концентрации комплексного замедлителя горения, состоящего из неорганического комплекса аммонийных металлофосфатов (НЗГ), меламина, пентаэритрита и ряда минеральных добавок (суперфосфат, NH₄Cl; молотый гранит) с размером частиц не более 100 мкм в различных массовых соотношениях. На основе анализа результатов многофакторного эксперимента определены коэффициенты в уравнении регрессии, построена комплексная математическая модель, связывающая состав многокомпонентного замедлителя горения с огнестойкостью и физико-механическими свойствами огнезащищенного полиамидного композита. На основании построенной комплексной математической модели решена задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения на основе приоритетных значений выходных эксплуатационных параметров (табл. 14). В качестве целевой функции выбрано время горения Y₁. Минимизация этого параметра (табл. 5) удовлетворяет требования ко всем остальным параметрам, за исключением ударной вязкости по Шарпи, на которую было наложено дополнительное требование ≥ 50 кДж/м². С помощью построенной комплексной математической модели определен состав многокомпонентного замедлителя горения, обеспечивающий полиамидному материалу наивысшую категорию стойкости к горению ПВ-0 при отсутствии растекания и минимальном снижении физико-механической прочности, из которого исключен экологически опасный галогенсодержащий компонент NH₄Cl: 9,1–9,5 % НЗГ, 0,5 % гранита, 1,9 % смеси меламина с пентаэритритом.

При анализе построенной комплексной модели установлена очень высокая взаимозависимость ряда физико-механических свойств огнезащищенного полиамида, что иллюстрируется величиной коэффициентов линейной корреляции в уравнениях (9), (10). Особенно тесная взаимосвязь обнаружена между ударной вязкостью (Y₆), модулем Юнга (Y₈) и пределом текучести (Y₉). Прочность при разрыве (Y₇) имеет отдельную особенность во взаимосвязи с остальными факторами. Таким образом, доказано, что задача получения оптимальных характеристик состава замедлителя горения и эксплуатационных свойств конечного огнезащищенного полиамидного композита может решаться только в комплексе.

Разработанная комплексная математическая модель может быть использована для проверки эффективности и выявления оптимального состава многокомпонентных замедлителей горения синергического действия для других тугоплавких полимеров без проведения значительного количества экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Green, J. An overview of the fire-retardant chemicals industry, past-present-future / J. Green // Fire Materials. – 1995. – Vol. 19, No. 5. – P. 197–204.
2. Кодолов, В.И. Замедлители горения полимерных материалов / В.И. Кодолов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
3. Morgan, A.B. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions / A.B. Morgan, J.W. Gilman // Fire Materials. – 2013. – Vol. 37, No. 4. – P. 259–279. – DOI: 10.1002/fam.2128.
4. Смайлс, С.К. Огнезащитные добавки для полимерных материалов: рынок, проблемы, пути решения / С.К. Смайлс // Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии. – 2018. – № 11. – С. 50–58.

5. Патент RU 2535687 C2, МПК C09K 21/12 (2006.01), C09K 21/14 (2006.01), C08K 5/5397 (2006.01), C08K 7/14 (2006.01), C08L 77/00 (2006.01). Фосфорсодержащие антипирены: № 2011150488/05: заявлено 10.05.2010: опубл. 20.12.2014 / Тимберлейк Л.Д., Хансон М.В., Нараян С., Филдинг У.Р.; заявитель Кемтура Корпорейшн (US). – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2535687C2> (дата обращения: 09.01.2026).
6. Замедлители горения для полимеров / С.М. Ломакин, Г.Е. Заиков, А.К. Микитаев [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 7. – С. 71–86. – EDN: LXNTRB.
7. Патент RU 2679237 C1, МПК C08L 77/00 (2006.01), C09K 21/08 (2006.01), C09K 21/14 (2006.01). Фторсодержащая полиамидная композиция с пониженной горючестью: № 2018101540: заявлено 16.01.2018: опубл. 06.02.2019 / Кудашев С.В., Шаповалов В.М., Валенков А.М.; заявитель Волгоградский государственный технический университет. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2679237C1/ru> (дата обращения: 09.01.2026).
8. Леонов, Д.В. Разработка полиамида 6 функционального назначения, модифицированного окисленным графитом: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Леонов Дмитрий Владимирович; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – Саратов, 2018. – 163 л.
9. Бураков, Б.А. Синтез и свойства полимеризационноспособных фосфорсодержащих олигомеров со спейсером в структуре: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06 / Бураков Борис Андреевич; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2020. – 161 л.
10. Костюченко, М.А. Влияние триазинового и неорганического фосфорного ингибиторов горения на эксплуатационные свойства и стойкость к горению стеклонаполненного полиамида 6 / М.А. Костюченко, М.М. Ревяко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2013. – № 2. – С. 21–24. – EDN: VHRDLZ.
11. Богданова, В.В. Огнегасящий эффект замедлителей горения в синтетических полимерах и природных горючих материалах / В.В. Богданова // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст.: в 2 вып. / Бел. гос. ун-т, НИИ физ.-хим. проблем; под редакцией О.А. Ивашкевича. – Мн.: БГУ, 2003. – Вып. 2. – С. 344–375. – EDN: XMIFAD.
12. Ненахов, С.А. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) / С.А. Ненахов, В.П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 8. – С. 11–58. – EDN: MUVTGB.
13. Fire retardancy of polymeric materials / ed. by A.F. Grand, C.A. Wilkie. – New York; Basel: Marcel Dekker, 2000. – XIV, 572 p.
14. Fire retardant materials / ed. by A.R. Horrocks, D. Price. – CRC Press, Woodhead, 2001. – 444 p.
15. Богданова, В.В. Превращения сурьма-галоген- и азот-фосфорсодержащих антипиренов в полиолефинах и их огнегасящая эффективность / А.В. Богданова // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2001. – Т. 43, № 4. – С. 746–750. – EDN: RHXWAL.
16. Песецкий, С.С. Полиамидные нанокомпозиты пониженной горючести / С.С. Песецкий, Б. Юрковски, А.А. Давыдов // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. трудов XXIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 окт. 2010 г. / НАН Беларуси, Ин-т химии новых материалов; науч. ред.: В.Е. Агабеков [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 2011. – С. 184–194.
17. Богданова, В.В. Синтез и физико-химические свойства фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония (обзор) / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, № 10. – С. 1385–1399. – EDN: MONTMI.
18. Берлин, А.А. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин, С.А. Вольфсон, В.Г. Ошмян, Н.С. Ениколопов. – М.: Химия, 1990. – 238 с.
19. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы: прочность и технология / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 347 с.
20. Богданова, В.В. Механизм огнезадерживающего действия азот- и фосфорсодержащих антипиренов в полимерах различных классов / В.В. Богданова, О.И. Кобец, О.Н. Бурая // Журнал Белорусского государственного университета. Химия. – 2023. – № 1. – С. 3–19. – DOI: 10.33581/2520-257X-2023-1-3-19. – EDN: GCPLNJ.
21. Богданова, В.В. Исследование основных рецептурных факторов, оказывающих доминирующее влияние на термоизолирующую способность и атмосферостойкость огнезащитных покрытий / В.В. Богданова, Д.Н. Арестович, В.П. Кирлица // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 4. – С. 24–31. – EDN: YOOTIV.
22. Чумаченко, С.Н. Методика создания математической модели энергетической составляющей химико-физических процессов, которые происходят в древесине при ее нагревании до начала фазы

- пламенного горения / С.Н. Чумаченко, С.В. Жартовский, А.Н. Титенко // *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*. – 2016. – Vol. 44, No. 4. – P. 131–137. – DOI: 10.12845/bitp.44.4.2016.10. – EDN: YMDAQJ.
23. Метод трехфакторного планирования состава вспучивающегося антипирена / С.В. Илюшина, Р.Н. Фазуллина, А.Н. Минязова, И.Р. Замалиева // *Вестник технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 17. – С. 144–146. – EDN: UOSQND.
 24. Леонович, А.А. Простой метод сравнительной оценки эффективности антипиренов / А.А. Леонович, М.Г. Глазунова // *Древесные плиты и фанера: теория и практика: сб. материалов XXIV Всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 г. / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова*. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – С. 47–55. – EDN: ROBZZV.
 25. Бобрышева, С.Н. Применение метода дисперсионного анализа однофакторной математической модели для оптимизации состава полимеров с пониженной горючестью / С.Н. Бобрышева, Л.И. Буякевич, Д.Л. Подобед // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого*. – 2019. – № 3. – С. 45–51. – EDN: QCAOWJ.
 26. Богданова, В.В. Оптимизация огнезащитно-огнетушащих свойств состава для предотвращения и локализации пожаров в природном комплексе методом математического планирования эксперимента / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.А. Людко, В.П. Кирлица // *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. – 2012. – № 1 (15). – С. 32–39. – EDN: SMZWGB.
 27. Ольшанский, В.И. Оптимизация состава полимерной композиции и параметров технологического процесса для термогерметизации специальной защитной одежды пожарных / В.И. Ольшанский, В.П. Довыденкова, А.Ф. Худолеев, Н.М. Дмитракович // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2017. – № 2. – С. 116–125. – EDN: YUGXID.
 28. Богданова, В.В. Оптимизация огнестойких и термоизолирующих свойств вспениваемых композитов с привлечением математического планирования эксперимента / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.С. Платонов, А.Б. Перевозникова // *Горение и взрыв*. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 62–72. – DOI: 10.30826/CE23160306. – EDN: XKWFRE.
 29. Богданова, В.В. Зависимость огне-термозащитных свойств стирол-акрилового термовспениваемого композиционного материала от соотношения основных компонентов / В.В. Богданова, О.И. Кобец, А.С. Платонов [и др.] // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. – 2025. – Т. 61, № 4. – С. 271–285. – DOI: 10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285.
 30. Халафян, А.А. *Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA: учеб. пособие* / А. А. Халафян. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 384 с.
 31. Кирьянов, Д.В. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0* / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

Многофакторная модель оптимизации состава комплексного замедлителя горения для полиамида-6

Multifactor model for optimizing the composition of a complex flame retardant for polyamide-6

Рева Ольга Владимировна

кандидат химических наук, доцент
Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра химической, биологической, радиационной и ядерной защиты, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: volha107@rambler.ru
SPIN-код: 9028-4876

Olga V. Reva

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Protection, Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: volha107@rambler.ru
ORCID: 0000-0003-4006-8678

Криваль Денис Викторович

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра химической, биологической, радиационной и ядерной защиты, преподаватель
Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
Email: den.kryval@mail.ru
SPIN-код: 5548-5105

Denis V. Krival'

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Protection, Lecturer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: den.kryval@mail.ru
ORCID: 0009-0006-2389-9276

Дечко Михаил Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Иностранное унитарное научно-производственное предприятие «САМСОЛЮШНС», инженер
Адрес: ул. Филимонова, 15, 220037, г. Минск, Беларусь
Email: mdechko@rambler.ru

Mikhail M. Dechko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Foreign Unitary Scientific and Production Enterprise «SAMSOLUTIONS», Engineer
Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Minsk, Belarus
Email: mdechko@rambler.ru

Дьячкова Лариса Николаевна

доктор технических наук, профессор
Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа», лаборатория сверхтвердых и износостойких материалов, главный научный сотрудник
Адрес: ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь
Email: dyachkova@tut.by

Larisa N. Dyachkova

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute», Laboratory of Superhard and Wear-Resistant Materials, Chief Researcher
Address: Platonova str., 41, 220005, Minsk, Belarus
Email: dyachkova@tut.by
ORCID: 0000-0003-4006-8678

MULTIFACTOR MODEL FOR OPTIMIZING THE COMPOSITION OF A COMPLEX FLAME RETARDANT FOR POLYAMIDE-6

Reva O.V., Krival' D.V., Dechko M.M., D'yachkova L.N.

Purpose. Development of an adequate mathematical model of the composition of a complex flame retardant for polyamide-6 with a given reduction limit and its application to determine the optimal characteristics of the flame retardant composition (ensuring fire resistance of the resulting composite material of category PV-0 and a reduction in the main physical and mechanical characteristics by no more than 8–10 % compared to the original polyamide).

Methods. Theoretical methods of statistical analysis of the experimental results were used to obtain a regression model and test its statistical significance and adequacy as well the method of cross-sections of the discriminant function in the plane of the most important factors identified by regression analysis. Statistica (TIBCO Software Inc.) and PTC Mathcad Prime (PTC Inc.) were used for calculations.

Findings. An experimental study and statistical analysis of the obtained data were conducted. Using regression and discriminant analysis methods, a multi-level mathematical model was developed. This model describes the dependence of the fire resistance parameters and mechanical properties of a fire-resistant polymer composite on the total concentration of a complex flame retardant in the polyamide matrix and the relative content of its five components. The coefficients in the regression equation were determined. A comprehensive mathematical model was developed that allows for the identification of the optimal composition of a multi-component flame retardant, taking into account the priority values of the fire-resistant polymer composite's performance parameters.

Application field of research. The developed mathematical model allows us to determine the optimal composition of a complex flame retardant for heat-proof polymers and its concentration in a polymer composite in accordance with the requirements for its most important operational parameters: fire resistance of category PV-0 with a minimal reduction in physical and mechanical properties.

Keywords: theoretical modeling, regression analysis, discriminant analysis, non-toxic multicomponent flame retardants, fire-resistant polyamide composites.

(The date of submitting: January 14, 2026)

REFERENCES

1. Green J. An overview of the fire-retardant chemicals industry, past-present-future. *Fire Materials*, 1995. Vol. 19, No. 5. Pp. 197–204.
2. Kodolov V.I. Zamedliteli goreniiya polimernykh materialov [Combustion inhibitors for polymer materials]. Moscow: Khimiya, 1980. 274 p. (rus)
3. Morgan A.B., Gilman J.W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions. *Fire Materials*, 2013. Vol. 37, No. 4. Pp. 259–279. DOI: 10.1002/fam.2128.
4. Smayls S.K. Ognезashchitnye dobavki dlya polimernykh materialov: rynek, problemy, puti resheniya [Fire protective additives for polymeric materials: market, problems, and solutions]. *Polymer Materials. Products, Equipment, Technology*, 2018. No. 11. Pp. 50–58. (rus)
5. Timberleyk L.D., Khanson M.V., Narayan S., Filding U.R. Fosforsoderzhashchie antipireny [Phosphorus-containing flame retardants]: patent RU 2535687 C2. Published December 20, 2014. Applicant: Chemtura Corporation (US). (rus). URL: <https://patenton.ru/patent/RU2535687C2> (accessed: January 9, 2026).
6. Lomakin S.M., Zaikov G.E., Mikitaev A.K., Kochnev A.M., Stoyanov O.V., Shkodich V.F., Naumov S.V. Zamedliteli goreniiya dlya polimerov [Combustion retardants for polymers]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012. Vol. 15, No. 3. Pp. 71–86. (rus). EDN: LXNTRB.
7. Kudashev S.V., Shapovalov V.M., Valenkov A.M. Ftorsoderzhashchaya poliamidnaya kompozitsiya s ponizhennoy goryuchest'yu [Fluorinated polyamide composition with reduced flammability]: patent RU 2679237 C1. Published February 6, 2019. Applicant: Volgograd State Technical University. (rus). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2679237C1/ru> (accessed: January 9, 2026).
8. Leonov D.V. Razrabotka poliamida 6 funktsional'nogo naznacheniya, modifitsirovannogo okislennym grafitom [Development of functional polyamide 6 modified with oxidized graphite]. PhD tech. sci. diss.: 05.17.06. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov, 2018. 163 p. (rus)
9. Buravov B.A. Sintez i svoystva polimerizatsionnosposobnykh fosforsoderzhashchikh oligomerov so speyserom v strukture [Synthesis and properties of polymerizable phosphorus-containing oligomers with

- a spacer in the structure]. PhD tech. sci. diss.: 02.00.06. Volgograd State Technical University. Volgograd, 2020. 161 p. (rus)
10. Kostosuchenko M.A., Reviako M.M. Vliyanie triazinovogo i neorganicheskogo fosfornogo ingibitorov goreniya na ekspluatatsionnye svoystva i stoykost' k goreniyu steklonapolnennogo poliamida 6 [Triazine and inorganic phosphorous flame-retardants influence on performance characteristics and compatibility of glass fiber reinforced polyamide 6]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2013. No. 2. Pp. 21–24. (rus). EDN: VHRDLZ.
 11. Bogdanova V.V. Ognegasyashchiy effekt zamedliteley goreniya v sinteticheskikh polimerakh i prirodnykh goryuchikh materialakh [Fire protective effect of flame retardants in synthetic polymers and natural combustible materials]. *Khimicheskie problemy sozdaniya novykh materialov i tekhnologiy* [Chemical problems of creating new materials and technologies]: collection of articles in 2 issues. Minsk: Belarusian State University, 2003. Iss. 2. Pp. 344–375. (rus). EDN: XMIFAD.
 12. Nenakhov S.A., Pimenova V.P. Fiziko-khimiya vspenivayushchikhsya ognenezashchitnykh pokrytiy na osnove polifosfata ammoniya (obzor literatury) [Physico-chemical foaming fire-retardant coatings based on ammonium polyphosphate (review of the literature)]. *Fire and Explosion Safety*, 2010. Vol. 19, No. 8. Pp. 11–58. (rus). EDN: MUVTGB.
 13. *Fire retardancy of polymeric materials*. Ed. by A.F. Grand, C.A. Wilkie. New York; Basel: Marcel Dekker, 2000. XIV, 572 p.
 14. *Fire retardant materials*. Ed. by A.R. Horrocks, D. Price. – CRC Press, Woodhead, 2001. – 444 p.
 15. Bogdanova V.V. Transformations of antimony-halogen- and nitrogen-phosphorus-based flame retardants in polyolefins and their performance. *Polymer Science, Series B*, 2001. Vol. 43, No. 3-4. Pp. 105–108. EDN: XJRRAX.
 16. Pesetsky S.S., Yurkovski B., Davydov A.A. Poliamidnye nanokompozity ponizhennoy goryuchesti [Low-flammability polyamide nanocomposites]. *Proc. of XXIII Intern. scientific-technical conf. «Khimicheskie reaktivy, reagenty i protsessy malotonnazhnoy khimii», Minsk, October 27–29, 2010*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Chemistry of New Materials; ed. by V.E. Agabekov [et al.]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011. Pp. 184–194. (rus)
 17. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Synthesis and physicochemical properties of di- and trivalent metal-ammonium phosphates. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014. Vol. 87, No. 10. Pp. 1387–1401. DOI: 10.1134/S1070427214100012. EDN: UVBEXF.
 18. Berlin A.A., Wolfson S.A., Oshmyan V.G., Enikolopov N.S. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov* [Principles of creating composite polymer materials]. Moscow: Khimiya, 1990. 238 p. (rus)
 19. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy: prochnost' i tekhnologiya* [Polymer composite materials: strength and technology]. Dolgoprudny: Intellect, 2010. 347 p. (rus)
 20. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Buraya O.N. Mekhanizm ognenezaderzhivayushchego deystviya azoti i fosforsoderzhashchikh antipirenov v polimerakh razlichnykh klassov [The mechanism of the nitrogen- and phosphorus-containing fire retardants action in polymers of various classes]. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2023. No. 1. Pp. 3–19. (rus). DOI: 10.33581/2520-257X-2023-1-3-19. EDN: GCPLNJ.
 21. Bogdanova V.V., Arestovich D.N., Kirlitsa V.P. Issledovanie osnovnykh retsepturnykh faktorov, okazyvayushchikh dominiruyushchee vliyanie na termoizoliruyushchuyu sposobnost' i atmosferostoykost' ognenezashchitnykh pokrytiy [Research of main recipe factors providing a dominant impact on the thermal insulating capacity and atmospheric resistance of fire protective coatings]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2017. No. 4. Pp. 24–31. (rus). EDN: YOOTIV.
 22. Chumachenko S.N., Zhartovskiy S.V., Titenko A.N. Metodika sozdaniya matematicheskoy modeli energeticheskoy sostavlyayushchey khimiko-fizicheskikh protsessov, kotorye proiskhodyat v drevesine pri ee nagrevanii do nachala fazy plamennogo goreniya [Methods of creating a mathematical model of an energy component of chemical and physical processes that occur in wood when it is heated prior to the flaming phase]. *Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza*, 2016. Vol. 44, No. 4. Pp. 131–37. (rus). DOI: 10.12845/bitp.44.4.2016.10. EDN: YMDAQJ.
 23. Ilyushina S.V., Fazullina R. N., Minyazova A. N., Zamalieva I. R. Metod trekhfaktornogo planirovaniya sostava vspuchivayushchegosya antipirena [The method of three-factor planning of the composition of an intumescent flame retardant]. *Herald of Technological University*, 2015. Vol. 18, No. 17. Pp. 144–146. (rus). EDN: UOSQND.

24. Leonovich A.A., Glazunova M.G. Prostoy metod sravnitel'noy otsenki effektivnosti antipirenov [A simple method for comparative assessment of the effectiveness of flame retardants]. *Proc. of XXIV All-Russian scientific-practical conf. «Drevesnye plity i fanera: teoriya i praktika»*, St. Petersburg, March 17–18, 2021. Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov. St. Petersburg: POLITEKh-PRESS, 2021. Pp. 47–55. (rus). EDN: ROBZZV.
25. Bobrysheva S.N., Buyakevich L.I., Podobed D.L. Primenenie metoda dispersionnogo analiza odnofaktornoy matematicheskoy modeli dlya optimizatsii sostava polimerov s ponizhennoy goryuchest'yu [Application of the method of dispersion analysis of a single-factor mathematical model to optimize the composition of polymers with reduced flammability]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*, 2019. No. 3. Pp. 45–51. (rus). EDN: QCAOWJ
26. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Lyudko A.A., Kirlitsa V.P. Optimizatsiya ognезashchitno-ognетushashchikh svoystv sostava dlya predotvrashcheniya i lokalizatsii pozharov v prirodnom komplekse metodom matematicheskogo planirovaniya eksperimenta [Optimization of fire-protective and fire-extinguishing properties of a composition for preventing and localizing fires in a natural complex by the method of mathematical experimental planning]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2012. No. 1 (15). Pp. 32–39. (rus). EDN: SMZWGB.
27. Olshansky V.I., Dovydenkova V.P., Hudoleev A.F., Dmitrakovich N.M. Optimizatsiya sostava polimernoy kompozitsii i parametrov tekhnologicheskogo protsessa dlya termogermetizatsii spetsial'noy zashchitnoy odezhdy pozharnykh [Optimization of a mixture of polymeric composition and parameters of technological process for thermo-sealing of special protective clothes for fireman]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical Series*, 2017. No. 2. Pp. 116–125. (rus). EDN: YUGXID.
28. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Platonov A.S., Perevoznikova A.B. Optimizatsiya ognestoykikh i termoizoliruyushchikh svoystv vspenivaemykh kompozitov s privlecheniem matematicheskogo planirovaniya eksperimenta [Optimization of fire-resistant and fire-thermal protective properties of intumescent composites using mathematical experimental planning]. *Combustion and Explosion*, 2023. Vol. 16, No. 3. Pp. 62–72. (rus). DOI: 10.30826/CE23160306. EDN: XKWFRE.
29. Bogdanova V.V., Kobets O.I., Platonov A.S., Perevoznikova A.B., Buraya O.N. Zavisimost' ognetermozashchitnykh svoystv stirol-akrilovogo termovspeniva-emogo kompozitsionnogo materiala ot sootnosheniya osnovnykh komponentov [Dependence of fire-heat protective properties of styrene-acrylic intumescent composite material on the ratio of main components] *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2025. Vol. 61. No. 4. Pp. 271–285. (rus). DOI: 10.29235/1561-8331-2025-61-4-271-285.
30. Khalafyan A.A. *Promyshlennaya statistika: kontrol' kachestva, analiz protsessov, planirovanie eksperimentov v pakete STATISTICA* [Industrial statistics: quality control, process analysis, design of experiments in the STATISTICA package]; tutorial. Moscow: LIBROKOM, 2013. 384 p. (rus)
31. Kiryanov D.V. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012. 432 p. (rus)

Copyright © 2026 Reva O.V., Krival' D.V., Dechko M.M., D'yachkova L.N.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.