УДК 614.841, 630.432

ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ АНТИПИРЕНОВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУДНОГОРЮЧЕГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА МЕТОДОМ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Богданова В.В.*, д.х.н., профессор, Тихонов М.М.,**
Кирлица В.П.*, к.ф.-м.н., доцент**
***Учреждение Белорусского государственного университета**
«Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»
****Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь**
*****Белорусский государственный университет**

e-mail: mail@kii.gov.by

С помощью математического планирования эксперимента определены улучшенные соотношения основных компонентов антипиреновой смеси для получения трудногорючего композиционного материала на основе пенополиуретана марки «Изолан-125», перспективного к применению в качестве активного или пассивного способа ограничения распространения пожара по кабельным шахтам гражданских зданий. Установлено, что огнестойкость получаемого материала возрастает при увеличении в содержании антипиреновой смеси количества реагентов, содержащих хлор, фосфор и азот. Абсолютные значения коэффициентов модели указывают, что наибольшее влияние на огнестойкость оказывает содержание хлора и фосфора в антипиреновой смеси. Это в свою очередь позволяет предположить, что для исследуемой пенополиуретановой системы характерен комплексный механизм действия огнезамедлительной системы: выход летучих галогенсодержащих продуктов в газовую фазу способствует снижению температуры отходящих газов и усиление образования в присутствии фосфорсодержащих продуктов карбонизованного теплоизолирующего слоя в конденсированной фазе.

With the help of mathematical planning of experiments determined the improved relations between the basic components of a mixture of flame retardant for slow-composite material based on polyurethane mark «Izolan-125», promising to use as active or passive means of limiting the spread of fire by the cable shafts civic buildings. It is established that the fire resistance of the material produced increases with the content of flame retardant mixture of reagents containing chlorine, phosphorous and nitrogen. The absolute values of the model indicate that the greatest effect on fire resistance has chlorine and phosphorus flame retardant mixture. This, in turn, suggests that for the studied polyurethane systems characterized by a complex mechanism of action flame retardant system: volatile halogenated products in the gas phase reduces the temperature of exhaust gases and increased formation of phosphorus-containing products in the presence of carbonized insulating layer in the condensed phase.

(Поступила в редакцию 14 ноября 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные ранее исследования [1] по разработке систем замедлителей горения для получения трудногорючего композиционного материала на основе пенополиуретана марки «Изолан-125», планируемого к использованию в качестве активного или пассивного способа ограничения распространения пожара по кабельным шахтам гражданских зданий показали, что определяющим фактором, оказывающим влияние на огнестойкость получаемого материала, является содержание соединений, имеющих в составе азот, фосфор, хлор, двухвалентные металлы. Однако определение оптимального соотношения компонентов анитипиреновой смеси и создание условий для задействования максимального количества факторов, способствующих получению трудногорючего материала, требует проведения большого количества экспериментов с поочередным варьированием каждого исследуемого фактора, что сопровождается большими финансовыми и временными затратами.

С целью нахождения значимых факторов, существенно влияющих на огнестойкость пенополиуретана, поиска оптимального соотношения компонентов антипиреновой смеси, количественной оценки основных эффектов и эффектов взаимодействия факторов в исследуемой системе использованы приемы математического планирования эксперимента [2]. При этом применялась схема полного факторного эксперимента (ПФЭ), в ходе которого варьировали одновременно три фактора.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Критерием, позволяющим отнести материал к группе трудногорючих, является потеря массы образца менее 60 % и приращение температуры газообразных продуктов горения менее 60 °C при проведении огневых испытаний по ГОСТ 12.1.044-89 п. 4.3. Задача состоит в том, чтобы разработать антипиреновую смесь с оптимальным содержанием компонентов, позволяющую получить материал с наименьшим процентом потери массы образца и наименьшим приращением температуры газообразных продуктов горения. Для решения этой задачи необходимо построить математическую модель, позволяющую на феноменологическом уровне описать процесс потери массы образца и приращения температуры газообразных продуктов горения при проведении огневых испытаний.

Основными компонентами антипиреновой смеси, определяющими огнестойкость пенополиуретана, выбраны три компонента: трихлорэтилфосфат (ТХЭФ), аммонийный металлофосфат (СФ), гидроксид двухвалентного металла (Бр^{100}), содержание которых в процентах обозначено как x_1, x_2, x_3 соответственно, и которыми можно варьировать (контролируемые переменные, определяющие огнестойкость пенополиуретана). В ходе проводимых экспериментов измерялись две величины: y_1 и y_2. Значение y_1 – это потеря массы в %, y_2 – приращение температуры газообразных продуктов горения в °С.

В ходе разведочных экспериментов была выбрана наилучшая антипиреновая смесь со следующими значениями компонентов: $x_1^{(0)} = 3$ %, $x_2^{(0)} = 7$ %, $x_3^{(0)} = 5$ %.

Для этого соотношения компонентов антипиреновой смеси было проведено 6 экспериментов, результаты которых следующие. Для потери массы: $y_{11} = 47{,}6$, $y_{12} = 52{,}6$, $y_{13} = 49{,}9$, $y_{14} = 52{,}16$, $y_{15} = 52{,}72$, $y_{16} = 52{,}16$. Среднее значение потери массы составило 51,23 %.

Для приращения температуры газообразных продуктов горения результаты 6 экспериментов таковы: $y_{21} = 41$, $y_{22} = 24$, $y_{23} = 47$, $y_{24} = 37$, $y_{25} = 39$, $y_{26} = 36$. Среднее значение приращения температуры газообразных продуктов горения составило 37,33 °С.

Для построения математической зависимости наблюдаемых значений y_1 и y_2 от контролируемых экспериментатором значений x_1, x_2 и x_3, значения $x_1^{(0)} = 3$ %, $x_2^{(0)} = 7$ %, $x_3^{(0)} = 5$ % были выбраны в качестве центра плана полного факторного эксперимента (ПФЭ), в котором эти три компоненты варьировались на двух уровнях [2].

В качестве феноменологической модели, объясняющей изменение наблюдаемых переменных y_1 и y_2, выбрана регрессионная зависимость с коэффициентами парного взаимодействия [2]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

где y – среднее значение наблюдаемой переменной (математическое ее ожидание).

Для построения полного факторного эксперимента в модели (1) перейдем от натуральных переменных x_i к кодированным переменным X_i:

$$X_i = \frac{x_i - x_i^{(0)}}{\Delta x_i},\ i = 1, 2, 3, \qquad (2)$$

где $x_i^{(0)}$ – значения компонент состава в центре плана ПФЭ,

Δx_i - интервал варьирования по переменной x_i .

Интервал варьирования был выбран равным 10 % от $x_i^{(0)}$ для каждой из контролируемых переменных. В нашем случае Δx_1 = 0,3 %, Δx_2 = 0,7 %, Δx_3 = 0,5 %. Каждая из кодированных переменных X_i, $i =$ 1, 2, 3 принимает только два значения -1, 1.

Значение -1 она принимает на нижнем уровне, когда $x_i = x_i^{(0)} - \Delta x_i$ и значение +1 на верхнем уровне, когда $x_i = x_i^{(0)} + \Delta x_i$. В кодированных переменных X_i, $i =$ 1, 2, 3, модель наблюдений (1) принимает вид:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 \qquad (3)$$

Для получения оценок неизвестных параметров b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, в модели (3) в восьми вершинах куба кодированных переменных: $X^{(1)}$ = (-1,-1,-1), $X^{(2)}$ = (-1,-1,1), $X^{(3)}$ = (-1,1,-1), $X^{(4)}$ = (-1,1,1), $X^{(5)}$ = (1,-1,-1), $X^{(6)}$ = (1,-1,1), $X^{(7)}$ = (1,1,-1), $X^{(8)}$ = (1,1,1) было проведено по шесть наблюдений в каждой вершине. Результаты этих экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов, полученных в вершинах куба

Вершина куба	y_1, %	y_2, °C	Вершина куба	y_1, %	y_2, °C
$X^{(1)}$	46	45	$X^{(5)}$	52	41
	61	31		17	49
	52	48		54	50
	37	18		38	28
	37	44		46	31
	25	23		50	41
$X^{(2)}$	64	46	$X^{(6)}$	23	16
	36	49		15	35
	35	50		9	13
	35	59		17	27
	54	54		15	13
	52	36		28	21
$X^{(3)}$	43	65	$X^{(7)}$	17	24
	52	20		17	15
	52	43		13	19
	59	36		26	10
	58	37		22	17
	45	50		23	16
$X^{(4)}$	63	25	$X^{(8)}$	17	21
	61	47		13	53
	46	29		43	16
	54	26		12	34
	46	52		29	33
	50	56		12	32

Для того, чтобы записать модель наблюдений (3) в матричном виде, введем следующие обозначения. Обозначим через θ′ вектор-строку неизвестных параметров размерности семь, $\theta' = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23})$. Здесь символ «штрих» означает операцию транспонирования, т. е. θ′ – это вектор-строка, а θ – это вектор-столбец. Через $f'(X) = f'(X_1, X_2, X_3)$ обозначим вектор-строку базисных функции размерности семь, $f'(X) = f'(1, X_1, X_2, X_3, X_1 \cdot X_2, X_1 \cdot X_3, X_2 \cdot X_3)$, $X' = (X_1, X_2, X_3)$. Тогда, в векторном виде модель наблюдений (3) примет вид: $y = \theta' \cdot f(X) = f'(X) = f'(X) \cdot \theta$.

Введем в рассмотрение матрицу *P* планирования полных факторных экспериментов с шестью повторными экспериментами в каждой точке куба $X^{(i)}$, $i = \overline{1,8}$:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{bmatrix} \qquad (4)$$

В записи (4) строка, состоящая из многоточий, означает, что предыдущая строка должна входить в матрицу (4) ровно шесть раз. Таким образом, матрица *P* ПФЭ имеет размерность 48х7. Согласно [2] наилучшей линейной несмещенной оценкой вектора неизвестных параметров θ модели наблюдений (3) является оценка:

$$\hat{\theta} = (P'P)^{-1} P'Y, \qquad (5)$$

где *Y* – это вектор-столбец наблюдаемых значений эксперимента.

В нашем случае, в соответствии с таблицей 1 вектор *Y* имеет размерность 48. Если рассматривать эксперименты относительно потери массы пенополиуретана, то

$$Y' = (25,37,37,52,61,46,52,54,35,35,36,64,45,58,59,52,52,43,50,46,54,46,61,63,50,46,38,\\ 54,17,52,28,15,17,9,15,23,23,22,26,13,17,17,12,29,12,43,13,17) \qquad (6)$$

Для экспериментов относительно увеличения температуры вектор *Y* будет другим:

$$Y' = (23,44,18,48,31,45,36,54,59,50,49,46,50,37,36,43,20,65,56,52,26,29,47,25,41,31,28,\\ 50,49,41,21,13,27,13,35,16,16,17,10,19,15,24,32,33,34,16,53,21) \qquad (7)$$

Так как матрица ПФЭ *P* – это матрица со взаимно ортогональными столбцами, то формула (5) упрощается и принимает вид:

$$\hat{\theta} = \frac{P'Y}{N}, \tag{8}$$

где $N = n \cdot m$ – общее число экспериментов,

n – количество различных вершин куба в ПФЭ,

m – количество повторных наблюдений в каждой вершине куба. В нашем случае n = 8, m = 6, N = 48.

Используя статистические функции электронных таблиц Excel и результаты наблюдений (6), можно получить наилучшие линейные несмещенные оценки неизвестных параметров модели наблюдений (3) для потери массы пенополиуретана:

$$y = 36{,}9 - 11{,}56 \cdot X_1 - 0{,}52 \cdot X_2 - 2{,}35 \cdot X_3 - 4{,}48 \cdot X_1 \cdot X_2 - 3{,}56 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3{,}15 \cdot X_2 \cdot X_3 \tag{9}$$

Для того, чтобы определить адекватна ли модель (9) результатам наблюдений, воспользуемся критерием адекватности моделей наблюдений, полученных с помощью ПФЭ с повторными наблюдениями в каждой точке наблюдения эксперимента (формула (4.5.28) из [2]):

$$\frac{(N-n)\left(m\bar{Y}'\bar{Y} - N \cdot \left\|\hat{\theta}\right\|^2\right)}{(n-p)(Y'Y - m\bar{Y}'\bar{Y})} \le F_{a;n-p,N-n}, \tag{10}$$

где p – число неизвестных параметров модели наблюдений,

$\bar{Y}$ – вектор средних значений наблюдений в каждой вершине куба ПФЭ,

$F_{a;n-p,N-n}$ – квантиль уровня α распределения Фишера с n-p, N-n степенями свободы. Если выполняется неравенство (10), то модель наблюдений признается адекватной полученным наблюдениям на уровне значимости α.

Проверим теперь значимость коэффициентов в модели наблюдений (9). Согласно формуле (3.2.13) из [2] коэффициент θ_j значим, если выполняется неравенство:

$$\frac{\left|\hat{\theta}_j\right|}{s\sqrt{c_{jj}}} > t_{a,N-p}, \tag{11}$$

где $t_{a,N-p}$ – квантиль уровня α распределения Стьюдента с N-p степенями свободы,

c_{jj} – j-тый диагональный элемент матрицы $(P'P)^{-1}$,

s^2 – несмещенная оценка дисперсии равноточных наблюдений.

Для ПФЭ имеем $c_{jj} = \frac{1}{N}$, значение $s\sqrt{c_{jj}}$, рассчитанное по соответствующей статистической функции Excel, равно 1,540952, а значение $t_{0,05;41}$ = 2,0195. Опираясь на критерий значимости коэффициентов (11), замечаем, что коэффициенты -0,52; -2,35 в модели (9) не значимы, а остальные коэффициенты значимы. Опустим незначимые коэффициенты в модели наблюдений (9). Получим модель наблюдений:

$$y = 36{,}9 - 11{,}56 \cdot X_1 - 4{,}48 \cdot X_1 \cdot X_2 - 3{,}56 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3{,}15 \cdot X_2 \cdot X_3 \tag{12}$$

В модели наблюдений (12) коэффициенты при соответствующих переменных остались такими же, как и в модели (9) в силу свойств ПФЭ. Однако теперь число оцененных параметров уменьшилось на два по сравнению с моделью (9) и равно p = 5. Меняется также и квадрат нормы вектора оценок $\hat{\theta}$ и квантили в модели наблюдений (12), теперь:

$$\left\|\hat{\theta}\right\|^2 = 1537{,}644313\,,\; t_{0,05;43} = 2{,}0166,\; F_{0,05;3,40} = 2{,}838745\,.$$

Покажем, что модель (12) адекватна на уровне значимости α = 0,05, для этого проверим выполнимость неравенства (10). Для проведенных экспериментов N = 48, n = 8, $m = 6$, $p = 5$, $F_{0,05;3,40} = 2{,}838745406$.

Вектор средних значений $\overline{Y}' = (21; 19{,}67; 17{,}83; 42{,}83; 53{,}33; 51{,}5; 46; 43)$, квадрат нормы этого вектора равен $\overline{Y}'\overline{Y} = 12441{,}5656$. Квадрат нормы вектора наблюдений (6) равен $Y'Y = 78805$, квадрат нормы вектора оценок $\hat{\theta}$ равен $\left\|\hat{\theta}\right\|^2 = 1537{,}644313$. Подставляя эти значения в левую часть (10), получаем значение 2,703068241, что меньше, чем 2,838745406, следовательно, модель (12) адекватна наблюдаемым значениям на уровне значимости 0,05.

В ходе проведения экспериментов была также предпринята попытка построить адекватную модель процесса приращения температуры газообразных продуктов горения. Были проведены те же расчеты, что и для модели потери массы пенополиуретана. В этих расчетах изменился вектор наблюдений Y, который выбирался в соответствии с (7). Проведенные математические выкладки (аналогичные расчетам для потери массы пенополиуретана) показали, что построенная по данным наблюдений (7) модель не является адекватной на уровне значимости α = 0,05. Это указывает на то, что феноменологическая модель приращения температуры газообразных продуктов горения сложнее, чем предложенная модель наблюдений (1). Вопрос о построении адекватной математической модели приращения температуры газообразных продуктов горения пока остается открытым.

Используем теперь адекватную модель наблюдений (12) для потери массы образца для улучшения свойств первоначальной антипиреновой смеси: $x_1^{(0)}$ = 3 %, $x_2^{(0)}$ = 7 %, $x_3^{(0)}$ = 5 %. Для этого используем метод оптимизации Бокса-Уилсона [2] и подход, предложенный в монографии [3] при решении примера 3.1 на стр. 23-24. Суть этого подхода заключается в том, что мы будем двигаться из начальной точки $x_1^{(0)}$, $x_2^{(0)}$, $x_3^{(0)}$ (в кодированных переменных из точки $X_1^{(0)} = X_2^{(0)} = X_3^{(0)}$) по антиградиенту поверхности отклика (12), следя за тем, будет ли убывать среднее значение приращения температуры газообразных продуктов горения. Антиградиент поверхности отклика (12) в центре ПФЭ – это вектор g = (11,56; 0; 0) размерности три. Осуществим переход из центра плана ПФЭ в новую точку по направлению вектора g: $X_1^{(i)} = a_i \cdot 11{,}56$ $X_2^{(i)} = 0$, $X_3^{(i)} = 0$, i = 1,2,…, где $a_i > 0$ – параметр шага движения. В натуральных переменных, в силу (2), переходим из точки $x_1^{(0)}$, $x_2^{(0)}$, $x_3^{(0)}$ в точки с координатами $x_1^{(i)} = 11{,}56 \cdot \Delta x_1 \cdot a_1 + x_1^{(0)} = 11{,}56 \cdot 0{,}3 \cdot a_i + 3 = 3{,}5 \cdot a_i + 3$, $x_2^{(i)} = x_2^{(0)} =$ 7 %, $x_3^{(i)} = x_3^{(0)} =$ 5 %.

При шаге α = 0,2 из точки $x_1^{(0)}$ = 3 %, $x_2^{(0)}$ = 7 %, $x_3^{(0)}$ = 5 % переходим к испытанию антипиреновой смеси с таким соотношением компонентов: $x_1^{(1)}$ = 3,7 %, $x_2^{(1)}$ = 7 %, $x_3^{(1)}$ = 5 %. Для новой антипиреновой смеси было проведено шесть испытаний, результаты которых по потере массы образца оказались следующими: $y_1 = 54$, $y_2 = 56{,}16$, $y_3 = 51{,}84$, $y_4 = 49{,}79$,

$y_5 = 38{,}88$, $y_6 = 56{,}38$. Среднее их значение составило 51,18 %, что меньше, чем для первоначальной антипиреновой смеси – 51,23 %.

Показатели по приращению температуры газообразных продуктов горения дали следующие результаты в ходе этих шести испытаний: $y_1 = 43{,}1$, $y_2 = 52$, $y_3 = 18{,}45$, $y_4 = 32{,}9$, $y_5 = 43{,}95$, $y_6 = 32{,}9$. Среднее значение этих показателей составило величину в 37,22 °С, что также меньше, чем этот же показатель для исходной антипиреновой смеси – 37,33 °С. Как видим, для новой антипиреновой смеси показатели лучше, чем для исходной. Однако это улучшение незначительное. Это свидетельствует, видимо, о том, что исходная смесь, полученная в ходе разведочных экспериментов, дает значения, близкие к некоторому локальному минимуму. Поэтому следующий переход из точки $x_1^{(1)}$, $x_2^{(1)}$, $x_3^{(1)}$ в новую точку при движении вдоль прежнего вектора g было решено совершить с шагом α = 0,302. Значения переменных, определяющих новую антипиреновую смесь:

$$x_1^{(2)} = x_1^{(0)} + 0{,}3 \cdot 11{,}56 \cdot 0{,}302 = 3 + 1{,}05 = 4{,}05,\; x_2^{(2)} = x_2^{(0)} = 7\ \%,\; x_3^{(2)} = x_3^{(0)} = 5\ \%.$$

Для потери массы образца в ходе шести экспериментов с новой антипиреновой смесью были получены следующие результаты: $y_1 = 60$, $y_2 = 42{,}43$, $y_3 = 54$, $y_4 = 66{,}46$, $y_5 = 66{,}46$, $y_6 = 61{,}12$. Среднее их значение 59,75 %. Для приращения температуры газообразных продуктов горения результаты шести экспериментов с новой антипиреновой смесью оказались следующими: $y_1 = 57{,}8$, $y_2 = 55{,}25$, $y_3 = 21{,}25$, $y_4 = 49{,}3$, $y_5 = 57{,}8$, $y_6 = 41{,}65$. Среднее их значение составило величину в 47,18 °С.

Как видим, эти результаты значительно хуже, чем для предыдущей и первоначальной антипиреновой смеси. Первоначальную антипиреновую смесь, полученную в ходе разведочных экспериментов, можно улучшить, если в ней первый компонент увеличить на 0,7 %, а остальные компоненты смеси $x_2^{(0)}$, $x_3^{(0)}$ оставить на прежнем уровне.

В натуральных переменных x_1, x_2, x_3, в силу преобразования (2), модель (12) принимает следующий вид:

$$y = -337{,}06 + 229{,}51 \cdot x_1 + 19{,}05 \cdot x_2 + 8{,}33 \cdot x_3 - 21{,}33 \cdot x_1 \cdot x_2 - 23{,}75 \cdot x_1 \cdot x_3 + 8{,}99 \cdot x_2 \cdot x_3 \qquad (13)$$

Таким образом, модель наблюдений (13) достаточно точно описывает процесс потери массы образца в ходе огневых испытаний по ГОСТ 12.1.044-89 п. 4.3. При содержании компонентов антпиреновой смеси: 3,7 % – ТХЭФ, 7 % – СФ и 5 % – Бр^{100}, полученный композиционный материал на основе пенополиуретана марки «Изолан-125» имеет наименьшие потерю массы образца и приращение температуры газообразных продуктов горения при проведении огневых испытаний по ГОСТ 12.1.044-89.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом полного факторного эксперимента определены улучшенные соотношения основных компонентов антипиреновой смеси для получения трудногорючего композиционного материала на основе пенополиуретана марки «Изолан-125», перспективного к применению в качестве активного или пассивного способа ограничения распространения пожара по кабельным шахтам гражданских зданий. Установлено, что огнестойкость получаемого материала возрастает при увеличении в содержании антипиреновой смеси количества реагентов, содержащих хлор, фосфор и азот. Абсолютные значения коэффициентов модели указывают, что наибольшее влияние на огнестойкость оказывает содержание хлора и фосфора в антипиреновой смеси. Это в свою очередь позволяет предположить, что для исследуемой пенополиуретановой системы характерен комплексный механизм действия огнезамедлительной системы. Так, выход летучих галогенсодержащих продуктов в газовую фазу способствует снижению температуры отходящих газов за счет их взаимодействия с активными центрами пламени. Одновременно присутствие фосфорсодержащих продуктов в конденсированной фазе способствует образованию на поверхности горения вспененных теплоизолирующих структур, препятствующих термическому разложению пенополиуретана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова, В.В. Трудногорючий напыляемый пенополиуретановый материал для локализации пожаров в инженерных коммуникациях / В.В. Богданова, М.М. Тихонов, О.Н. Бурая // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 21-22 апреля 2011 г. : в 2 ч. Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 2. / С. 87–88.
2. Асатурян, В.И. Теория планирования эксперимента: учеб. пособие для вузов по спец. «Прикл. математика» / В.И. Асатурян. – М. : Радио и связь, 1983. – 248 с.
3. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л. : Химия, 1975. – 48 с.