

УДК 614.844.6 + 519.242.7

ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ТРАВЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ПОЛИЭФИРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рева О.В., Лукьянов А.С., Арестович Д.Н., Богданова В.В., Платонов А.С.

Описан метод математического планирования эксперимента, в ходе применения которого были установлены компоненты травильной композиции и их концентрации, оказывающие определяющее влияние на реакционную способность поверхности полиэтилентерефталата. Показано, что основной вклад в обеспечение последующего химического взаимодействия поверхности обрабатываемого материала и огнезащитной композиции вносит определенное соотношение соляной и фосфорной кислот на стадии травления материала.

Ключевые слова: полиэфирный материал, огнезащитная обработка, фосфор-азотсодержащие антипирены, математическое планирование, полнофакторный эксперимент, технологическая схема.

(Поступила в редакцию 25 сентября 2017 г.)

Введение. Огнезащитная обработка полиэфирных тканей и нетканых волокнистых материалов традиционно осуществляется пропиткой или опрыскиванием готовых материалов антипиреновыми композициями. В результате обработки эффективными средствами огнезащиты исключается возможность загорания текстильных материалов от малокалорийных источников зажигания, снижается способность распространения пламени по поверхности, снижается дымообразующая способность, токсичность продуктов терморазложения [1].

Для снижения пожарной опасности текстильных материалов используются замедлители горения различного состава: неорганические и органические вещества, среди них преобладают галоген- и фосфорсодержащие соединения. На обивочную мебельную ткань и ковровые изделия с целью огнезащиты также наносят тонкий слой хлорсодержащих полимеров, в частности поливинилхлорида, полихлоропрена или поливинилиденхлорида. Замедлители горения отличаются по структуре и по способу нанесения или отделки. Наиболее безопасными являются фосфорсодержащие и фосфор-азотсодержащие антипирены, поэтому они наиболее широко используются в производстве модифицированных полиэфирных, гидратцеллюлозных и некоторых других волокон [2, 3].

Огнезащитная отделка синтетических волокнистых материалов и тканей, так же, как и других синтетических текстильных материалов, в настоящее время находится на стадии постоянного совершенствования и научного поиска, поскольку на конечный результат влияет не только множество факторов, но и их противоречивое действие. Огнезащитные пропиточные составы наносят напылением, окунанием, двусторонней обработкой, однако после стирки их эффективность значительно снижается, так как пропиточные составы чаще всего не обеспечивают взаимодействие замедлителей горения с защищаемой поверхностью. В соответствии с этим для придания устойчивых свойств огнезащитной обработке актуальна разработка и исследование свойств травильных композиций, позволяющих активизировать поверхность инертной полимерной матрицы для последующего ее взаимодействия с активными центрами замедлителей горения [4, 5].

Предварительно установлено, что количество огнезащитной композиции и прочность ее химической привязки к полиэфирным материалам (далее – ПЭМ) (соответственно и устойчивость огнезащиты к стирке) зависит от целого ряда факторов на каждой из стадии обработки. Была экспериментально выявлена зависимость эффективности огнезащитной обработки и огнестойкости ПЭМ от значений показателей температуры и длительности проведения стадии травления [6]. Нами разработана ступенчатая технологическая схема поверхностной огнезащитной обработки ПЭМ, одной из ключевых стадий которой являлась стадия травления [7]. Стадия травления активизирует материал – позволяет раскрыть функциональные группы на его поверхности, которые способны к химическому взаимодействию с ионами металлов фосфор-азотсодержащего антипирена на последующих этапах обработки.

Поскольку эмпирический поиск оптимального диапазона каждого из действующих факторов в травильной композиции требует проведения масштабного эксперимента и длительного времени [8], перспективной представляется разработка метода математического планирования многофакторного эксперимента с построением адекватной математической модели изучаемой системы.

Методика эксперимента. С целью определения оптимальной рецептуры травильного состава и его компонентов, определяющих эффективность активации поверхности полиэфирного материала, применялся метод полнофакторного эксперимента (далее – ПФЭ). В эксперименте в качестве полиэфирной матрицы использовали нетканый полиэфирный материал полиэтилентерефталат (далее – ПЭТФ) производства ОАО «Могилевхимволокно» толщиной 3,8 мм с поверхностной плотностью 397 г/м². Огнезащитным агентом являлась синтетическая дисперсия аммонийных фосфатов кальция и магния с общим химическим составом в пересчете на оксиды (P₂O₅ – NH₃ – CaO – MgO – Fe₂O₃ = 28,4 : 7,5 : 0,72 : 0,15 : 2,39).

При выборе перспективной рецептуры травильного состава был проведен ряд разведочных экспериментов для достижения максимальной степени активации поверхности ПЭТФ. В ходе разведочных экспериментов был выбран травитель, в который входили следующие компоненты:

- $x_1 = 50$ г/л соляная кислота (HCl);
- $x_2 = 50$ г/л серная кислота (H₂SO₄);
- $x_3 = 50$ г/л уксусная кислота (CH₃COOH);
- $x_4 = 50$ г/л фосфорная кислота (H₃PO₄).

Эти компоненты были выбраны как основные составляющие растворы травления.

Температуру растворов травления варьировали от 18 до 45 °С, время травления варьировали от 2 до 6 минут, в качестве функции отклика использовали удельный привес антипирена в граммах на единицу площади поверхности обрабатываемого материала:

$$m_{y\partial} = \frac{m_1 - m_0}{S_{yч}}; \quad (1)$$

$$\Delta m\% = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где m_1 – масса образца после финишной обработки, г; m_0 – исходная масса образца, г; $S_{yч}$ – площадь участка полиэфирного материала (далее – ПЭМ), мм²; $m_{y\partial}$ – привес удельной массы антипирена к ПЭМ после обработки, г/см²; $\Delta m\%$ – общий привес антипирена в процентном соотношении к ПЭМ после обработки.

Математическое описание. Для построения математической модели, описывающей процесс химического травления и его влияния на эффективность огнезащиты полиэфирного волокна при огневом воздействии, нами предварительно проведено $n = 16$ серий экспериментов по 9 опытов в серии. В каждой из них были отобраны $m = 3$ результата, в которых наблюдался больший привес антипирена к ПЭТФ.

Для определения оптимального состава травления, способствующего достижению устойчивого положительного привеса у антипирена к обрабатываемому материалу, было рассмотрено уравнение регрессии, учитывающее взаимодействие факторов x_1, x_2, x_3, x_4 – компонентов состава травления [9]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4 + a_{123}x_1x_2x_3 + a_{124}x_1x_2x_4 + a_{134}x_1x_3x_4 + a_{234}x_2x_3x_4 + a_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (3)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{1234}$ – неизвестные коэффициенты, подлежащие оцениванию. Каждый фактор x_j варьировался на двух уровнях: на верхнем уровне $x_j = x_j^{(0)} + \Delta x_j$, на нижнем уровне $x_j = x_j^{(0)} - \Delta x_j$, $j = \overline{1, 4}$. Здесь $\Delta x_j = 50$ г/л – радиус интервала варьирования переменной x_j , точка $x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, x_4^{(0)})$, с координатами $x_1^{(0)} = 100$ г/л (HCl), $x_2^{(0)} = 100$ г/л (H₂SO₄), $x_3^{(0)} = 100$ г/л, (CH₃COOH), $x_4^{(0)} = 100$ г/л (H₃PO₄), – центр плана ПФЭ.

Для обработки результатов проведенных экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии факторы приводили к одному масштабу. Это достигалось путем кодирования переменных: от натуральных переменных x_j к кодированным переменным перешли по формулам:

$$X_j = \frac{x_j - x_j^{(0)}}{\Delta x_j}, \quad j = \overline{1,4}. \quad (4)$$

Каждая из кодированных переменных X_j принимает значение 1 на верхнем уровне переменной x_j и значение -1 – на нижнем уровне переменной x_j .

В кодированных переменных (4) модель наблюдений (3) приняла следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + \\ & + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{124} X_1 X_2 X_4 + \\ & + b_{134} X_1 X_3 X_4 + b_{234} X_2 X_3 X_4 + b_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4, \end{aligned} \quad (5)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{1234}$ – коэффициенты регрессии при кодированных переменных X_i .

Таблица 1. План проведения экспериментов и его результаты

№ серии	Факторы в натуральном масштабе				Факторы в кодированных переменных				Среднее значение результатов \bar{y}_i
	x_1	x_2	x_3	x_4	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	50	50	50	50	-1	-1	-1	-1	2,74
2	50	50	150	50	-1	-1	1	-1	2,29
3	50	150	50	50	-1	1	-1	-1	2,73
4	50	150	150	50	-1	1	1	-1	2,68
5	150	50	50	50	1	-1	-1	-1	2,39
6	150	50	50	150	1	-1	-1	1	2,70
7	150	150	50	50	1	1	-1	-1	2,26
8	150	150	150	50	1	1	1	-1	0,06
9	50	50	50	150	-1	-1	-1	1	3,64
10	50	50	150	150	-1	-1	1	1	2,52
11	50	150	50	150	-1	1	-1	1	3,39
12	50	150	150	150	-1	1	1	1	3,06
13	150	150	50	150	1	1	-1	1	3,15
14	150	50	150	150	1	-1	1	1	2,91
15	150	50	150	50	1	-1	1	-1	2,01
16	150	150	150	150	1	1	1	1	-0,34

В матрице плана экспериментов столбцы факторов в кодированных переменных X_1, X_2, X_3, X_4 взаимно ортогональны.

Значение среднего выборочного \bar{y}_i для i -той серии экспериментов рассчитывались по формуле

$$y_i = \frac{1}{3}(y_{i1} + y_{i2} + y_{i3}), \quad i = \overline{1,16}, \quad (6)$$

где y_{ij} ($j = \overline{1,3}$) – привес антипирена в j -том результате i -той серии экспериментов.

В соответствии с [10] коэффициенты регрессии (5) вычислялись по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{y}_i; \quad b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} \bar{y}_i; \quad (7)$$

$$b_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} \bar{y}_i, \quad j \neq k; \quad (8)$$

$$b_{jkl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} X_{il} \bar{y}_i, \quad j \neq k \neq l; \quad (9)$$

$$b_{1234} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{i1} X_{i2} X_{i3} X_{i4} \bar{y}_i, \quad (10)$$

где X_{ij} – элемент матрицы плана эксперимента (кодированные переменные), расположенный в i -той строке и j -том столбце. По итогам вычислений получили следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 2,386 - 0,493X_1 - 0,263X_2 - 0,488X_3 + 0,241X_4 - 0,347X_1X_2 + 0,245X_1X_3 - \\ & - 0,000X_1X_4 - 0,271X_2X_3 + 0,000X_2X_4 - 0,103X_3X_4 + 0,419X_1X_2X_3 + \\ & + 0,000X_1X_3X_4 + 0,094X_2X_3X_4 + 0,000X_1X_2X_4 - 0,142X_1X_2X_3X_4. \end{aligned} \quad (11)$$

Далее с помощью критерия Стьюдента была проверена значимость полученных коэффициентов $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{1234}$. Среднеквадратичное отклонение коэффициентов определяли по формуле

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_y^2}{n \cdot m}}, \quad (12)$$

где S_y^2 – дисперсия воспроизводимости, характеризующая ошибку всего эксперимента и равная

$$S_y^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = 0,053. \quad (13)$$

При числе степеней свободы $n(m-1) = 16 \cdot 2 = 32$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Стьюдента составило $t_{\text{кр}} = 2,037$. Поэтому, при полученном среднеквадратичном отклонении коэффициентов $S_{\text{коэф}} = 0,033$, значимый коэффициент b регрессии (11) необходимо удовлетворяет условию $|b| > t_{\text{кр}} S_{\text{коэф}} = 0,067$. Следовательно, коэффициенты $b_{14}, b_{24}, b_{134}, b_{124}$ оказались незначимы, и уравнение регрессии в кодированных переменных (11) имеет $r = 12$ значимых коэффициентов:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 2,386 - 0,493X_1 - 0,263X_2 - 0,488X_3 + 0,241X_4 - 0,347X_1X_2 + 0,245X_1X_3 - \\ & - 0,271X_2X_3 - 0,103X_3X_4 + 0,419X_1X_2X_3 + 0,094X_2X_3X_4 - 0,142X_1X_2X_3X_4. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученное уравнение (14) проверяли на адекватность по критерию Фишера. Для чего вычислили остаточную дисперсию

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2 = 0,065, \quad (15)$$

где \tilde{y}_i – значение привеса антипирена, вычисленное по уравнению регрессии (14) для i -той серии эксперимента. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ по числу степеней свободы $n(m-1) = 32$ меньшей дисперсии $S_y^2 = 0,053$ и числу степеней свободы $n-r = 4$ большей дисперсии $S_{\text{ост}}^2 = 0,065$ определили критическое значение критерия Фишера $F_{\text{кр}} = 2,668$. Расчетное значение критерия Фишера [11] составило

$$F_{расч} = \frac{S_{ост}^2}{S_y^2} = \frac{0,065}{0,053} = 1,229. \quad (16)$$

Таким образом, выполнение условия $1,229 = F_{расч} \leq F_{кр} = 2,668$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ позволило признать адекватность модели наблюдений (14).

Интерпретацию модели можно производить только тогда, когда она записана в кодированных переменных. Только в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов, и мы можем по величине коэффициентов судить о степени влияния того или иного фактора. Чем больше абсолютная величина коэффициента, тем больше фактор влияет на отклик (изучаемый параметр). Следовательно, можно расположить факторы по величине их влияния. Знак «плюс» у коэффициента свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора растет величина отклика, а при знаке «минус» – убывает. Таким образом, вид регрессии (14) позволяет утверждать, что увеличение фактора X_4 приведет к увеличению привеса антипирена после огнезащитной обработки. Вклад факторов X_1, X_3 незначительный, их наличие в травильной композиции приводит к ухудшению показателя привеса.

Для получения математической модели в натуральных переменных в уравнение регрессии (14) вместо X_j подставили их выражения из формул (4):

$$\begin{aligned} y = & 2,228512916 - 0,002242325x_1 - 0,000050658x_2 - 0,002084808x_3 + 0,025499858x_4 + \\ & + 0,000001125x_1x_2 + 0,000002498x_1x_3 - 0,000219918x_1x_4 + 0,000074667x_2x_3 + \\ & + 0,000141418x_2x_4 + 0,000205960x_3x_4 - 0,000001078x_1x_2x_3 - 0,000001956x_1x_2x_4 + \\ & + 0,000002400x_1x_3x_4 + 0,000001524x_2x_3x_4 + 2,276273333x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (17)$$

Для улучшения свойств травильной композиции, то есть приближения к максимальному значению величины $y(x) = y(x_1, x_2, x_3, x_4)$ привеса антипирена, использовался метод Бокса-Уилсона [12]. Начав движение из центра плана ПФЭ $x^{(0)}$ и двигаясь по направлению градиента функции (17) $\text{grad } y(x) = \left(\frac{\partial y(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial y(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial y(x)}{\partial x_4} \right)$ с шагом $a = 1,0$ по закону $x^{(k+1)} = x^{(k)} + a \text{ grad } y(x^k)$, перешли в точку с координатами $x_1 = 52$ г/л [HCl]; $x_2 = 50$ г/л [H₂SO₄]; $x_3 = 50$ г/л [CH₃COOH]; $x_4 = 148$ г/л [H₃PO₄]. Привес антипирена при использовании вышеуказанных оптимальных, согласно проведенному ПФЭ, концентраций травителя составил 3,559 г/см². Следует отметить, что в условиях проведенного полнофакторного эксперимента значения переменных $x_j, j = \overline{1,4}$, варьировались в промежутке от 50 до 150 г/л.

Вывод. При изменении рецептуры травителя, в соответствии с полученными концентрациями компонентов травления, определяющими максимальное количество закрепившегося на полимере антипирена при оптимизации ПФЭ по методу Бокса-Уилсона, получен новый состав травления полиэфирного материала, обеспечивающий хемопривязку к полиэфирному материалу неорганического антипирена в количестве, достаточном для достижения устойчивого огнезащитного эффекта.

Проведенный полнофакторный эксперимент позволяет утверждать, что существенный вклад в эффективность активации полиэфирной поверхности вносят фосфорная и соляная кислоты, находящиеся в определенном соотношении друг к другу. Тогда как концентрации уксусной и серной кислот имеют второстепенное значение.

Эти результаты получены впервые и позволяют наметить пути направленного содействия рецептур растворов травления ПЭМ, обеспечивающих хемоактивацию поверхности полимера по отношению к последующему нанесению огнезащитной композиции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перепелкин, К.Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К.Е. Перепелкин // Рос. хим. ж. им. Д.И. Менделеева, 2002. – Т. XLVI. – С. 31–48.
2. Мадорский, С.М. Термическое разложение органических полимеров: пер. с англ. / С.М. Мадорский. – М.: Мир, 1967. – 328 с.
3. Морыганов, А.П. Разработка новых способов получения и модификации перспективных текстильных материалов на основе отечественного сырья / А.П. Морыганов // Химия. – 1998. – № 1 (13). – С. 82–87.
4. Синягин, М.Н. Новое в области физической модификации химических волокон, создание перспектив ассортимента тканей / М.Н. Синягин. – М., 1979. – 220 с.
5. Сырбу, С.А. Разработка огнезащитных составов для текстильных материалов / С.А. Сырбу, В. А. Бурмистров, Д.Б. Самойлов // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – Вып. 5 (39). – С. 7–15.
6. Лукьянов, А.С. Эффективная огнезащитная обработка текстильных материалов на основе полиэфира / А.С. Лукьянов // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2017. – № 4. – С. 65–76.
7. Рева, О.В. Зависимость эффективности огнезащиты нетканого полиэфирного материала от химической природы азот-фосфорсодержащего антипирена / О.В. Рева [и др.] // Вестник БГУ. – Серия 2, Химия. Биология. География. – 2017. – С. 85–94.
8. Халтуринский, Н.А. Горение полимеров и механизм действия антипиренов / Н.А. Халтуринский, Т.В. Попова, А.А. Берлин // Успехи химии. – 1984. – Т. 53 – № 2. – С. 326–346.
9. Асатурян, В.И. Теория планирования эксперимента / В.И. Асатурян. – М: Радио и связь, 1983. – 248 с.
10. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 31 с.
11. Гайдадин, А.Н. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований: метод. указания / сост. А.Н.Гайдадин, С.А.Ефремова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 16 с.
12. Хохманов, К.М. Основы планирования эксперимента: методическое пособие / сост. К.М. Хохманов, Восточно-Сибирский гос. технологический ун-т, РФ. – Улан-Удэ, 2001. – 93 с.

THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE SURFACE PREPARATION FOR POLYESTER MATERIALS BY THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF THE EXPERIMENT

Olga Reva, PhD in Chemistry Sciences, Associate Professor

Aliaksandr Lukyanov

Dmitrii Aristovich, PhD in Technical Sciences

The state educational establishment «University of Civil Protection
of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Valentina Bogdanova, Grand PhD in Chemistry Sciences, Professor

The institutions of the Belarusian State University
«Research Institute of Physical and Chemical Problems», Belarus, Minsk

Alexander Platonov, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection
of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. In this article it is shown that the main contribution to the provision of subsequent chemical interaction between the surface of the treated material and the flame retardant composition is made by a certain ratio of hydrochloric acid and phosphoric acid at the stage of etching of the material.

Methods. The article describes the method of mathematical design of the experiment, during the application of which the components of the etching composition and their concentrations were determined, which have a determining effect on the reactivity of the surface of polyethylene terephthalate.

Findings. The carried out full-factor experiment allows to state that a significant contribution to the efficiency of the activation of the polyester surface is made by phosphoric and hydrochloric acids, which are in a certain ratio to each other. While the concentrations of acetic and sulfuric acids are of secondary importance.

Application field of research. The results of the study can be used in the formulation of the flame retardant composition for the textile industry.

Conclusions. When changing the etchant formulation, in accordance with the obtained concentrations of the etchant components determining the maximum amount of the flame retardant retained on the polymer while optimizing the PFE by the Box-Wilson method, a new etching composition of the polyester material is obtained, providing chemically bonding to the polyester material of the inorganic flame retardant in an amount sufficient to achieve a stable fire-retardant effect.

Key words: polyester material, fire retardant treatment, phosphorus-nitrogen-containing flame retardants, mathematical planning, full-factor experiment, technological scheme.

(The date of submitting: September 25, 2017)

REFERENCES

1. Perepelkin K.E. Sovremennyye khimicheskiye volokna i perspektivy ikh primeneniya v tekstil'noy promyshlennosti [Modern chemical fibers and prospects for their use in the textile industry]. *Ros. khim. zh. im. D.I. Mendeleeva*. Vol. XLVI. Pp. 31–48. (rus)
2. Madorskiy S.M. *Termicheskoe razlozhenie organicheskikh polimerov* [Thermal decomposition of organic polymers]: transl. from English. Publ. house «Mir», 1967. 328 p. (rus)
3. Moryganov A.P. Razrabotka novykh sposobov polucheniya i modifikatsii perspektivnykh tekstil'nykh materialov na osnove otechestvennogo syr'ya [Development of new methods for obtaining and modifying promising materials based on domestic raw materials]. *Khimiya*, 1998. No. 1 (13). Pp. 82–87. (rus)
4. Sinyagin M.N. Novoe v oblasti fizicheskoy modifikatsii khimicheskikh volokon, sozdanie perspektiv assortimenta tkaney [New in the field of physical modification of chemical fibers, creation of prospects for the assortment of tissues]. Moscow, 1979. 220 p. (rus)
5. Syrбу S.A. Burmistrov V.A., Samoylov D.B. Razrabotka ognezashchitnykh sostavov dlya tekstil'nykh materialov [Development of fire retardant compounds for textile materials]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*, 2011. Issue 5 (39). 7 p. (rus)
6. Luk'yanov A.S. Effektivnaya ognezashchitnaya obrabotka tekstil'nykh materialov na osnove poliefira [Effective fire retardant treatment of textile materials based on polyester]. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy*, 2017. No. 4. 94 p. (rus)
7. Reva O.V. Zavisimost' effektivnosti ognezashchity netkanogo poliefirnogo materiala ot khimicheskoy

- prirody azot-fosforsoderzhashchego antipirena [Dependence of the effectiveness of fireproofing of non-woven polyester material on the chemical nature of the nitrogen-phosphorus-containing flame retardant]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2017. 78 p. (rus)
8. Khalturinskiy N.A., Popova T.V., Berlin A.A. Gorenje polimerov i mekhanizm deystviya antipirenov [Combustion of polymers and the mechanism of action of flame retardants]. *Uspekhi khimii*. 1984. Vol. 53. No 2. Pp. 326–426. (rus)
 9. Asaturyan V.I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta* [Theory of experiment planning]. Moscow: Radio i svyaz'. 1983. 248 p. (rus)
 10. Sautin S.N. *Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Planning an experiment in chemistry and chemical technology]. Leningrad: Khimiya. 1975. 31 p. (rus)
 11. Gaydadin A.N., Efremova S.A. *Primenenie polnogo faktornogo eksperimenta pri provedenii issledovaniy* [Application of the full factorial experiment in the conduct of research]: a method. directions. VolgGTU. Volgograd. 2008. 11 p. (rus)
 12. Khokhmanov K.M. *Osnovy planirovaniya eksperimenta* [Basics of experiment planning]: methodical manual. East-Siberian State Technological University, RF. Ulan-Ude. 2001. 38 p. (rus)