

УДК 543.395:677.075

Н.С. СКАЛОЗУБОВА, О.Я. СЕМЕШКО, Ю.Г. САРИБЕКОВА

Херсонский национальный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА

В работе представлены результаты оптимизации технологического процесса подготовки трикотажного полотна на основе математического планирования эксперимента.

С помощью полного факторного эксперимента оптимизирован композиционный состав ПАВ, обеспечивающий максимальные показатели при подготовке трикотажного полотна

Ключевые слова: трикотажное полотно, капиллярность, полный факторный эксперимент.

Н.С. СКАЛОЗУБОВА, О.Я. СЕМЕШКО, Ю.Г. САРИБЕКОВА

Херсонский национальный технический университет

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА

В роботі представлено результати оптимізації технологічного процесу підготовки трикотажного полотна на основі математичного планування експерименту.

За допомогою повного факторного експерименту оптимізовано композиційний склад ПАВ, що забезпечує максимальні показники при підготовці трикотажного полотна

Ключові слова: трикотажне полотно, капілярність, повний факторний експеримент.

N.S. SKALOZUBOVA, O.YA. SEMESHKO, J.G. SARIBYEKOVA

Kherson National Technical University

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF PREPARATION OF KNITTED FABRICS

The paper presents results of optimization of technological process of preparation of knitted fabrics on the basis of mathematical experiment planning.

Using a full factorial experiment optimized composition of surfactants, providing maximum performance in the preparation of knitted fabrics

Key words: knitted fabric, capillarity, full factorial experiment.

Постановка проблеми

В современном трикотажном производстве широкое применение находят препараты, в основе которых содержатся поверхностно-активные вещества (ПАВ). Количество вводимых препаратов значительно влияют на процесс подготовки трикотажного полотна: повышается капиллярность, увеличивается степень фиксации красителя на полотне.

Высокая эффективность действия современных текстильных вспомогательных веществ, для совершенствования подготовки текстильных материалов заключается в разработке композиционного состава с целенаправленно заданными свойствами.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из важнейших факторов улучшения качества готовых изделий является совершенствование стадии подготовки трикотажных полотен к последующему колорированию и заключительной отделке.

В последнее время ученые разрабатывают новые технологии и композиционные составы для подготовки трикотажных полотен, шерстяного волокна, хлопчатобумажных тканей, отличающиеся от традиционных.

В работе [1] проведена оценка моющего действия трехкомпонентной смеси ПАВ, основанная на определении параметров моющего действия и предложена моющая композиция для очистки шерстяных изделий.

Авторами [2] были подобраны оптимальные параметры для подготовки трикотажного полотна с применением ферментов: pH, температура, концентрация фермента.

В работах [3-5] была разработана композиция для подготовки целлюлозосодержащих тканей на основе эффективных эмульгаторов и смачивателей, способствующих удалению с поверхности хлопчатобумажного волокна восковых веществ и остатков кутикулярной пленки.

Ранее проведенными исследованиями [6, 7] с помощью симплекс-решетчатого плана Шеффе было установлено оптимальное соотношение компонентов различных классов ПАВ для создания

композиции ПАВ для эффективного проведения процесса подготовки хлопчатобумажного трикотажного полотна.

Установлено, что применение данной композиции обеспечивает максимальные показатели смачивающей и моющей способности трикотажного полотна, а также обеспечивает повышение степени фиксации активного красителя при последующем крашении.

Формирование цели исследования

Цель работы состояла в разработке оптимального режима применения разработанной композиции ПАВ и определения основных технологических параметров процесса подготовки хлопчатобумажного трикотажного полотна путем математического планирования эксперимента [7-9].

Изложение основного материала исследования

Целью оптимизации процесса подготовки трикотажного полотна является определение таких технологических параметров подготовки, которые обеспечивали максимум критерия оптимизации ($\hat{y}$) в данном случае капиллярности подготовленного полотна и степень фиксации активного красителя на волокне с помощью математического планирования эксперимента, а именно полного факторного эксперимента (ПФЭ).

ПФЭ – эксперимент, в котором реализуются все возможные комбинации рассматриваемых уровней факторов, а результаты оцениваются с помощью статистического анализа. По результатам ПФЭ находят значения коэффициентов уравнения регрессии, в том числе свободного члена и коэффициентов, характеризующих линейные эффекты и эффекты взаимодействия факторов всех порядков.

Ранее проведенными исследованиями [6, 7] установлено, что эффективность процесса подготовки зависит от трех основных факторов: концентрации композиционного состава ПАВ (С, г/л), температуры (°С) и времени (τ, мин.) подготовки.

Для получения математической зависимости влияния концентрации композиционного состава ПАВ, температуры и времени на качество подготовки трикотажного полотна проводили полный факторный эксперимент типа 2^3 , состоящий из 8 опытов. Исходные значения факторов были выбраны на основании ранее проведенных исследований [8-11].

Факторы, их уровни и интервалы варьирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования факторов

Обозначение	Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования, ε
		-1	0	+1	
С	Концентрация композиционного состава ПАВ, г/л	0,5	1,5	2,5	1
Т	Температура, °С	96	98	100	2
τ	Время, мин.	15	20	25	5

Значения факторов в «звездных» точках были найдены с помощью соотношения (1), характеризующего связь именованных и кодированных величин:

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где x_i – кодированное значение фактора (безразмерная величина);

c_i и c_{0i} – натуральные значения факторов (соответственно его текущее значение и значение на нулевом уровне);

ε – натуральное значение интервала варьирования фактора.

$$x_1 = \frac{C - 1,5}{1}; \quad (2)$$

$$x_2 = \frac{T - 98}{2}; \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{\tau - 20}{5}. \quad (4)$$

Значение этих соотношений позволило построить рабочую матрицу, где приведены именованные значения факторов.

В качестве критериев оптимизации выбрана капиллярность трикотажного полотна после подготовки. Рабочая матрица и матрица планирования представлены в табл. 2.

Таблиця 2

Данные матрицы планирования и рабочей матрицы

№ опыта	Матрица планирования			Рабочая матрица		
	x_1	x_2	x_3	C	T	τ
1	+1	+1	+1	2,5	100	25
2	-1	+1	+1	0,5	100	25
3	+1	-1	+1	2,5	96	25
4	-1	-1	+1	0,5	96	25
5	+1	+1	-1	2,5	100	15
6	-1	+1	-1	0,5	100	15
7	+1	-1	-1	2,5	96	15
8	-1	-1	-1	0,5	96	15

Результаты эксперимента с двумя повторениями в каждой точке приведены в табл. 3

Таблиця 3

Данные наблюдений

№ опыта	Значение					
	y_1	y_2	$\bar{y}$	$(y - \bar{y})^2$	$\hat{y}$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	165	165	165	0	165,00	0,0000
2	170	171	170,5	0,25	170,50	0,0000
3	170	170	170	0	169,75	0,0625
4	169	170	169,5	0,25	169,75	0,0625
5	175	175	175	0	175,00	0,0000
6	170	169	169,5	0,25	169,50	0,0000
7	180	180	180	0	179,75	0,0625
8	180	179	179,5	0,25	179,75	0,0625
			$\Sigma = 1379$	$\Sigma = 1$		$\Sigma = 0,25$

При построении модели первого порядка находили численные коэффициенты уравнения (2) для случая $k=3$:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (5)$$

где b_0 – свободный член;

b_1, b_2, b_3 – линейные коэффициенты;

b_{12}, b_{13}, b_{23} – коэффициенты двойного (парного) взаимодействия;

b_{123} – коэффициент, характеризующий взаимодействие трех факторов.

По величине линейных коэффициентов можно судить о степени влияния отдельных факторов на величину критерия оптимизации. Чем больше величина b_i для соответствующего фактора, тем сильнее его влияние. Важно учитывать также знак этих коэффициентов: если коэффициент b_i имеет положительный знак, то увеличение соответствующего фактора должно способствовать росту значения критерия оптимизации; наоборот, при отрицательном знаке линейного коэффициента увеличение значения соответствующего фактора будет снижать величину критерия – оптимизации.

Определение свободного члена осуществляют по уравнению:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}, \quad (6)$$

где y_u – значения параметра оптимизации в том же опыте;

N – число опытов в матрице.

Линейные коэффициенты регрессии рассчитывают по следующей формуле:

$$b_i = \frac{\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}}{\frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N}}, \quad (7)$$

где x_{iu} – значения фактора x_i в u -м опыте.

Коэффициенты регрессии, характеризующие парное взаимодействие, рассчитываются согласно формуле (4):

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N} . \quad (8)$$

Уравнение регрессии, которое описывает зависимость капиллярности трикотажного полотна от условий его подготовки, принимает следующий вид:

$$\hat{y} = 172,375 + 0,125x_1 - 2,375x_2 - 3,875x_3 - 0,125x_1x_2 - 1,125x_1x_3 - 1,375x_2x_3 - 1,375x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Дисперсия воспроизводимости характеризует ошибку всего эксперимента и при одинаковом числе наблюдений равном 2 ($n=2$) определяется по формуле:

$$s_y^2 = \frac{2 \sum_{u=1}^N (y_{ui} - \bar{y}_u)^2}{N} . \quad (10)$$

Знание дисперсии s_y^2 , характеризующей ошибку воспроизводимости, дает возможность оценить значимость коэффициентов уравнения, что позволяет рассмотреть вопрос о возможности упрощения последующей работы путем отсеивания части факторов. Оценка значимости коэффициентов регрессии связана с построением доверительных интервалов. Существует правило: коэффициент уравнения регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. При оценке доверительных интервалов пользуются выражением:

$$P(b_i - \Delta b_i \leq \beta_i \leq b_i + \Delta b_i) = \alpha , \quad (11)$$

где α – доверительная вероятность того, что найденное расчетом значение коэффициента b_i отличается от истинного значения коэффициента (β_i) на величину, которая не превышает погрешности в оценке коэффициентов (Δb_i).

Таким образом, доверительным интервалом коэффициента регрессии является интервал его значений от $b_i - \Delta b_i$ до $b_i + \Delta b_i$.

Для 95%-ной доверительной вероятности Δb_i в случае линейных моделей определяется из следующего соотношения:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot s_{b_i} . \quad (12)$$

где t – критерий Стьюдента для доверительной вероятности 95% при $N=8$ равен 2,37;

s_{b_i} – дисперсия, связанная с ошибками при определении коэффициентов регрессии, определяется по формуле:

$$s_{b_i} = \sqrt{\frac{s_y^2}{N \cdot n}} . \quad (13)$$

Таким образом, находим значения дисперсий согласно формул 7 и 10:

$$s_y^2 = \frac{2 \cdot 1}{8} = 0,25 .$$

$$s_{b_i} = \sqrt{\frac{0,25}{8 \cdot 2}} = 0,125$$

Доверительный интервал составляет по формуле (9):

$$\Delta b_i = \pm 2,37 \cdot 0,125 = \pm 0,296$$

Далее определяем доверительные интервалы:

$$\beta_0 = +172,375 \pm 0,296 ;$$

$$\beta_1 = +0,125 \pm 0,0296 ;$$

$$\beta_2 = -2,375 \pm 0,296$$

$$\beta_3 = -3,875 \pm 0,296 ;$$

$$\beta_{12} = -0,125 \pm 0,296 ;$$

$$\beta_{13} = -1,125 \pm 0,296 ;$$

$$\beta_{23} = -1,375 \pm 0,296 ;$$

$$\beta_{123} = -1,375 \pm 0,296 .$$

Сравнение коэффициентов регрессии по абсолютной величине с учетом соответствующих доверительных интервалов показало, что в уравнении (6) можно считать значимыми все коэффициенты, кроме b_1 и b_{12} . После отсеивания незначимых коэффициентов уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$\hat{y} = 172,375 - 2,375x_2 - 3,875x_3 - 1,125x_1x_3 - 1,375x_2x_3 - 1,375x_1x_2x_3 \quad (14)$$

Гипотезу об адекватности проверяли по критерию Фишера:

$$F_{расч} = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (15)$$

где s_{ad}^2 – дисперсия адекватности.

Дисперсия адекватности определяется как отношение суммы квадратов отклонений среднего значения от значений, найденных по уравнению регрессии, и числа степеней свободы, связанного с дисперсией адекватности:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N n \cdot (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - k - 1} \quad (16)$$

$$s_{ad}^2 = \frac{2 \cdot 0,25}{8 - 3 - 1} = 0,125.$$

Значение критерия Фишера:

$$F_{расч} = \frac{0,125}{0,25} = 0,5.$$

Зная число степеней свободы для большей ($f_{ad}=4$) и меньшей ($f_E=8$) дисперсий (знаменатели формул 8 и 13), находим табличное значение критерия Фишера [10] для 95%-ной доверительной вероятности: $F_{табл}=3,84$. Сравнение табличного и расчетного значения критерия Фишера ($F_{табл} > F_{расч}$) показывает, что уравнение (11) можно считать адекватным с доверительной вероятностью 95%.

После перевода уравнения (14) к именованным величинам с учетом выражений (2)-(4) уравнение, описывающее зависимость капиллярности трикотажного полотна от концентрации композиционного состава ПАВ, температуры и длительности процесса подготовки принимает следующий вид:

$$y = +168,5 - 265 \cdot C - 0,1875 \cdot T - 5,625 \cdot \tau + 2,75 \cdot C \cdot T + 13,25 \cdot C \cdot \tau + 0,0687 \cdot T \cdot \tau - 0,1375 \cdot C \cdot T \cdot \tau. \quad (17)$$

Анализ уравнения регрессии позволяет сделать вывод, что на критерий оптимизации (капиллярность трикотажного полотна) в выбранном факторном пространстве оказывают влияние все факторы. Полученная математическая модель процесса подготовки трикотажного полотна свидетельствует о том, что искомое значение критерия оптимизации – капиллярность трикотажного полотна – находится в пределах исследуемого факторного пространства.

Согласно полученному уравнению регрессии (17) в исследуемом факторном пространстве зависимость капиллярности трикотажного полотна y от концентрации композиционного состава ПАВ C и длительности процесса подготовки τ при температуре 96 и 100°C приобретает вид трехмерных плоскостей (поверхность отклика), которые представлены на рис. 1.

Анализ поверхности отклика позволяет сделать вывод, что при температуре 96°C в пределах концентрации композиционного ПАВ от 0,5 до 2,5 г/л при длительности обработки трикотажного полотна в течение 15-25 мин. можно достичь капиллярности 164-176 мм. Так, при данной температуре 96°C даже при минимальных значениях концентрации ПАВ и длительности процесса (0,5 г/л и 15 мин. соответственно) капиллярность составляет 165 мм, что превышает требования ГОСТ. Следовательно, возможно снижение температуры процесса подготовки, что, с учетом нынешних цен на энергоносители, положительно скажется на себестоимости готового трикотажа.

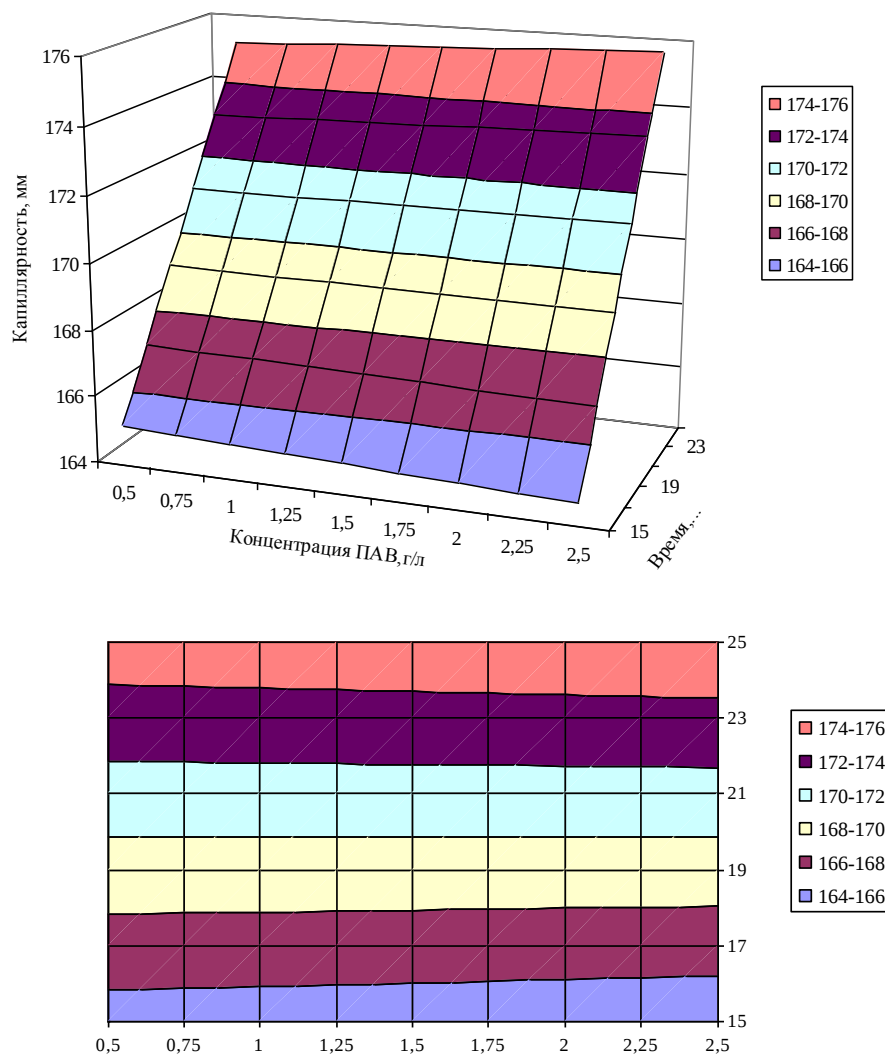


Рис. 1. Поверхность отклика зависимость капиллярности трикотажного полотна от концентрации композиционного состава ПАВ и длительности процесса подготовки при температуре 96°C

Выводы

В результате проведенной работы установлена целесообразность применения композиционного состава в процессе подготовки трикотажного полотна.

На основании математического планирования эксперимента рассчитано уравнение регрессии, которое описывает зависимость капиллярности трикотажного полотна от концентрации композиционного состава ПАВ, температуры и длительности процесса подготовки. Анализ поверхности отклика, описывающей данное уравнение, показывает, что при температуре 96°C, при минимальных значениях концентрации ПАВ 0,5 г/л и длительности процесса 15 мин. возможно достичь капиллярности трикотажного полотна 165 мм, что превышает требования ГОСТ.

Список использованной литературы

1. Кулаков О.І. Розробка мийних засобів для первинної обробки вовни на основі поверхнево-активних речовин вітчизняного виробництва / О.І. Кулаков, А.В. Єрмолаєва, Ю.Г. Сарибєкова // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №6. – С. 80-84.
2. Wang Q. Optimizing bioscouring condition of cotton knitted fabrics with an alkaline pectinase from *Bacillus subtilis* WSHB04-02 by using response surface methodology // Q. Wang, X. Fan, Z. Hua, J. Chen // Biochemical Engineering Journal. – 2007. – Vol. 34(2) – P. 107-113.
3. Параска О. А. Аналіз методів визначення мийної здатності поверхнево-активних речовин / О.А. Параска, С.А. Карван, О.І. Кулаков // Вісник ХНУД. – 2006. – №2. – С. 83-87.
4. Zhiguo H. Physicochemical Properties and Phase Behavior of Didecyltrimethylammonium Chloride/Alkyl Polyglycoside Surfactant Mixtures / H. Zhiguo, Y. Xiuquan, L. Yong, W. Jiajia, G. Yuyang // Journal of Surfactants and Detergents. – 2015. – Vol. 18, Issue 4, P. 641-649.

5. Kovalchuk N. Surfactant-enhanced spreading: Experimental achievements and possible mechanisms / N. Kovalchuk, A. Trybała, O. Arjmandi-Tash, V. Starov // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. – Vol. 233, Issue 8, P. 155-160.
6. Skalozubova N. Development of the composition of surfactants for the preparation of knitted fabrics / N. Skalozubova, A. Kunik, O. Semeshko, J. Saribyekova, S. Myasnikov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – №4/6(82). – P. 29-36.
7. Семешко О.Я. Композиційний склад поверхнево-активних речовин для підготовки бавовняного трикотажного полотна / О.Я. Семешко, Н.С. Скалозубова, Р.С. Серветник: тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції [«Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність»], (Херсон, 27-28 жовтня 2016 р.). – Херсонський національний технічний університет, 2016. – С. 102-103.
8. Ахназарова С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 320 с.
9. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
10. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
11. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное пособие. – М.: Наука, 1971. – 192 с.