

Моделирование и прогнозирование потребительских свойств тканей с полиуретановым покрытием**Ю. И. Марущак, Н. Н. Ясинская,
А. Н. Бизюк, А. А. Кузнецов***Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования и прогнозирования потребительских свойств тканей с пористым полиуретановым покрытием одежного назначения. Объектом исследования являлись хлопчатобумажные ткани саржевого переплетения с нанесенным на них шаберным способом полиуретановым покрытием. В результате проведения двухфакторного эксперимента при варьировании кратности пены (1,5–2,5), величины зазора между опорным валом и шабером (0,3–0,7 мм), а также температуры (60–100 °С) и продолжительности сушки (180–300 с) получены математические модели, адекватно описывающие зависимости воздухопроницаемости, паропроницаемости, жесткости и стойкости к истиранию от технологических режимов формирования покрытия. Установлено, что увеличение зазора повышает воздухопроницаемость и жесткость, а рост кратности пены снижает жесткость и стойкость к истиранию. Рекомендуемыми параметрами для производства тканей с полиуретановым покрытием, предназначенных для одежды второго слоя, являются кратность пены 2,0 и зазор 0,5 мм. Установлено, что увеличение температуры и длительности сушки приводит к росту жесткости материала вследствие уплотнения полимерной структуры, при этом максимальная стойкость к истиранию достигается в области 80–90 °С и 300 с. Наибольшая воздухопроницаемость (до 32,8 $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{с})$) наблюдается при минимальных температуре и времени, а максимум паропроницаемости (11,2 $\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{ч})$) при средних температурах и увеличенной продолжительности сушки.

На основе полученных уравнений регрессии решена обратная задача – определены технологические параметры по заданным единичным показателям качества. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность моделей, относительная погрешность прогнозирования не превысила 5 %. Результаты могут быть использованы при проектировании тканей с полиуретановым покрытием с заданными гигиеническими и эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: полиуретановое покрытие, вспененная композиция, сушка, прогнозирование свойств, математическое моделирование, шаберный способ.

Информация о статье: поступила 24 марта 2026 года.

Modeling and forecasting consumer properties of fabrics with polyurethane coating**Yulia I. Maruschak, Natallia N. Yasinskaya,
Andrey N. Bizyuk, Andrey A. Kuznetsov***Vitebsk State Technological University,
Republic of Belarus*

Abstract. This article presents the results of modeling and predicting the consumer properties of fabrics with a porous polyurethane coating for clothing. The study involved cotton twill fabrics with a polyurethane coating applied using a doctor blade. A two-factor experiment, involving varying foam expansion ratio (1.5–2.5), gap size between the support roller and doctor blade (0.3–0.7 mm), temperature (60–100 °C), and drying time (180–300 s), resulted in the development of mathematical models that adequately describe the dependence of air permeability, vapor permeability, rigidity, and abrasion resistance on the coating formation process conditions. It was found that increasing the gap increases air permeability and rigidity, while increasing foam expansion ratio reduces rigidity and abrasion resistance. The recommended parameters for the production of polyurethane-coated fabrics intended for second-layer clothing are a foam expansion ratio of 2.0 and a gap of 0.5 mm. It was found that increasing the drying temperature and duration leads to an increase in material stiffness due to the compaction of the polymer structure, with maximum abrasion resistance achieved at 80–90 °C and 300 s. The highest air permeability (up to 32.8 $\text{dm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) is observed at minimum temperature and drying time, and the maximum vapor permeability (11.2 $\text{mg}/(\text{sm}^2\cdot\text{h})$) is achieved at moderate temperatures and increased drying duration.

Based on the resulting regression equations, an inverse problem was solved: process parameters were determined based on specified individual quality indicators. Experimental testing confirmed the adequacy of the models, with the relative prediction error not exceeding 5 %. The results can be used in the design of polyurethane-coated fabrics with specified hygienic and performance properties.

Keywords: polyurethane coating, foam composition, drying, properties prediction, mathematical modeling, scraping method.

Article info: received March 24, 2026.

Введение

Одним из перспективных направлений развития легкой промышленности является расширение ассортимента отечественных текстильных материалов, способных конкурировать с импортными аналогами (Вишневецкая О.В., 2016). На сегодняшний день значительная доля современных материалов с полимерным покрытием, известных как экокожа, предназначенных для пошива одежды, ввозится из-за рубежа (Марущак Ю.И., Ясинская Н.Н., Скобова Н.В., 2023). В соответствии с этим разработка и совершенствование технологий получения тканей с полиуретановым покрытием является актуальным направлением, отвечающим стратегии импортозамещения (Ясинская Н.Н., Марущак Ю.И., Скобова Н.В., 2024).

Потребительские свойства тканей с полиуретановым покрытием определяются комплексом факторов: типом текстильной основы, природой полимерного связующего, а также технологическими параметрами нанесения и сушки покрытия. Варьирование данных параметров позволяет формировать материал с заданными свойствами. Поскольку рассматриваемые материалы предназначены для изготовления одежды второго слоя, приоритетными показателями качества являются воздухо- и паропроницаемость, обеспечивающие комфорт при носке, а также жесткость и стойкость к истиранию, определяющие формоустойчивость и долговечность изделий. Для управления технологическим процессом требуется установление зависимостей между входными факторами и выходными показателями. Это достигается методами математического моделирования.

Моделированием и прогнозированием свойств комбинированных текстильных материалов, в том числе с полимерными покрытиями занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Особый вклад в эту область внесли работы Шустова (Шустов Ю.С., 2003), Когана, Ясинской (Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г., 2015), Рыклина (Карнилов М.С., Рыклин Д.Б., 2024), Павутницкого (Павутницкий В.В., 2004; Старков, А.И. и др.,

2016), Киселева (Киселев А.М., 2010). Среди зарубежных исследователей следует отметить работы Чаттерджи, связанные с прогнозированием долговечности полиуретановых покрытий при атмосферных воздействиях (Chatterjee U., Patra S., Butola B.S., Joshi M., 2024). Однако большинство существующих работ ориентированы либо на использование поливинилхлоридных композиций, либо на текстильные материалы с покрытиями технического назначения (Gadeikyte A., Abraitiene A., Barauskas R., 2021; Goessens T., De Staelen R., Constaes D., 2015; Liu, J., et al., 2023). Получение тканей с полиуретановым покрытием одежного назначения с использованием вспененных композиций изучено в меньшей степени, а исследования зарубежных исследователей опираются на местную сырьевую базу, специфичные полимерные композиции и технологические процессы, которые отличаются от тех, что формируются и внедряются в Беларуси. Этот факт создает дополнительную актуальность исследования.

Особый интерес представляет технология получения таких материалов с использованием вспененных полимерных композиций (Теркалова Л.О., Павутницкий В.В., 2005; Kentta, E. et al., 2020). Такой способ формирования покрытия позволяет регулировать глубину проникновения полимера в структуру ткани, снижать расход полимера, управлять пористостью покрытия и, как следствие, влиять на гигиенические и эксплуатационные свойства готового материала. Указанные достоинства достигаются варьированием технологических параметров формирования покрытия. Однако, для формирования материала с заданными свойствами необходимо установить количественные зависимости между этими параметрами и показателями качества.

Целью данной работы является установление зависимостей влияния технологических режимов формирования покрытия на потребительские свойства готового материала, а также экспериментальное подтверждение адекватности полученных математических моделей и возможности использования их для прогнозирования

свойств тканей с полиуретановым покрытием.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются ткани с пористым полиуретановым покрытием одежного назначения. Нанесение полимерного покрытия осуществлялось шаберным способом (рисунок 1), который основан на удалении с поверхности ткани избытка полимерной массы с помощью специального ножа. Перед нанесением полимерная композиция подвергается механическому вспениванию до установленной кратности. Далее ткань с нанесенным покрытием подают в сушильную камеру, где осуществляется удаление избыточной влаги.

При нанесении полимерной композиции на ткань необходимо учитывать и задавать кратность пены β , величину зазора между опорным валом и шабером d (мм), температуру t ($^{\circ}\text{C}$) и продолжительность сушки T (с) (Марущак Ю.И. и др., 2023; Ясинская Н.Н. и др., 2024). В качестве основы использовали хлопчатобумажную ткань саржевого переплетения с поверхностной плотностью 270 г/м². Для формирования полиуретанового покрытия применяли вспененную композицию, основным компонентом которой является анионная полиуретано-

вая дисперсия с массовой долей сухого вещества 40 %.

Для оценки влияния технологических режимов формирования покрытия на свойства готового материала проведен двухфакторный эксперимент с использованием матрицы Коно. Выходными параметрами выбраны: воздухопроницаемость, паропроницаемость, стойкость лицевого покрытия к истиранию, жесткость по основе и утку. Для проведения многофакторного эксперимента осуществлено кодирование натуральных значений входных факторов. Методика прогнозирования основана на результатах математического моделирования.

Оценку стойкости полимерного покрытия к истиранию осуществляли на приборе ДИТ-М. В качестве абразивного материала использовали серошинельное сукно (Кудринский, Тюрин, 2022). Испытания образцов тканей с покрытием проводили при скорости вращения рабочей головки прибора 100 об/мин. Результатом измерения считали количество циклов, при котором визуально фиксировалось разрушение полимерного слоя. Жесткость тканей с покрытием измеряли на приборе ПЖУ-12М, руководствуясь ГОСТ 8977-74 «Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения

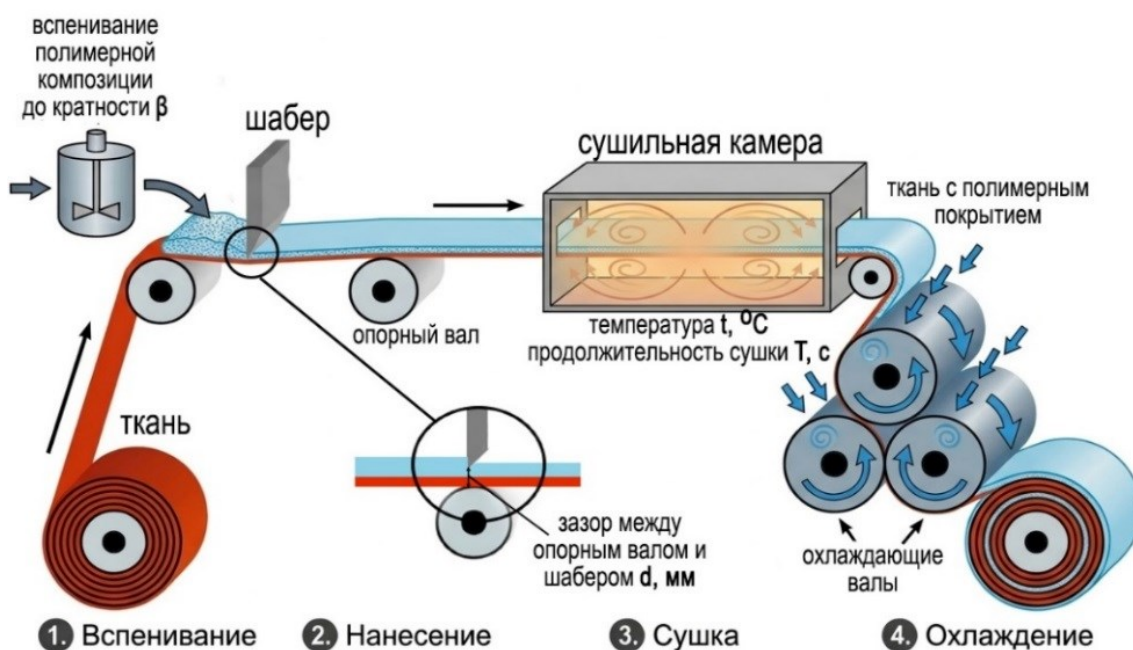


Рисунок 1 – Формирование тканей с полиуретановым покрытием шаберным способом

Figure 1 – Formation of polyurethane coated fabrics using the scraper method

гибкости, жесткости и упругости». Воздухопроницаемость материалов определяли согласно ГОСТ 12088-77 «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости». Определение паропроницаемости проводили гравиметрическим методом на анализаторе влажности «Radwag» М-50 в соответствии с требованиями ГОСТ 22900-78 «Кожа искусственная и пленочные материалы. Методы определения паропроницаемости и влагопоглощения», а также с учетом рекомендаций производителя прибора. В ходе эксперимента контролировали температуру в измерительной камере 40 °С (Марущак, Ясинская, 2024). Коэффициент паропроницаемости рассчитывали, как отношение массы водяных паров, прошедших через испытуемый образец, к площади образца и времени проведения испытания.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Для исследования влияния кратности пены полиуретановой композиции и величины зазора между опорным валом и шабером на свойства готового материала выбраны интервалы и уровни варьирования входных факторов, представленные в таблице 1.

В результате обработки экспериментальных данных в программе Statistica for Windows получены теоретико-экспериментальные зависимости выходных параметров

от параметров технологического процесса нанесения (таблица 2).

Модели характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2 > 0,9$), что подтверждает их достоверность и позволяет использовать их для прогнозирования свойств материала (Бойко А.Ф., Воронкова М.Н., 2013). Воздухопроницаемость зависит от величины зазора (X_2), причем зависимость имеет нелинейный характер, достигая максимума при зазоре 0,7 мм. Кратность пены (X_1) также оказывает положительное влияние, но менее выраженное, максимум показателя отмечается при кратности 2,5. Стойкость к истиранию повышается с уменьшением кратности пены и увеличением зазора. Жесткость материала возрастает с увеличением зазора и снижается с ростом кратности пены до 2,5. Наибольший вклад в жесткость вносит величина зазора, что объясняется увеличением толщины покрытия и степени пропитки. Паропроницаемость демонстрирует зависимость от обоих факторов, причем зазор оказывает более сильное влияние, чем кратность пены. Максимальная паропроницаемость наблюдается при средних значениях зазора (0,5 мм) и высокой кратности пены (2,5). Назначение тканей с полиуретановым покрытием – одежда второго слоя, поэтому основными свойствами являются: высокая воздухо- и паропрони-

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 1 – Levels and intervals of variation of factors

Факторы	нижний уровень (-1)	средний уровень (0)	верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
Кратность пены (β_n , X_1)	1,5	2	2,5	0,5
Величина зазора между опорным валом и шабером (h), мм, X_2	0,3	0,5	0,7	0,2

Таблица 2 – Зависимости показателей тканей с покрытием от кратности и зазора
Table 2 – Dependence of coated fabric properties on multiplicity and gap

Показатель	Модель зависимости от режимов сушки	R^2
Паропроницаемость (Π)	$\Pi = 13,64 + 0,628 \cdot X_1 + 1,735 \cdot X_2 - 0,608 \cdot X_2^2$	0,988
Воздухопроницаемость (B)	$B = 34,93 + 4,53 \cdot X_1 + 13,63 \cdot X_2 - 8,03 \cdot X_2^2$	0,993
Жесткость по основе (Go)	$Go = 7,02 - 0,62 \cdot X_1 + 0,78 \cdot X_2$	0,978
Жесткости по утку (Gu)	$Gu = 6,78 - 0,32 \cdot X_1 + 1,23 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_2^2$	0,996
Стойкость к истиранию (Is)	$Is = 263,78 - 58 \cdot X_1 + 35,17 \cdot X_2$	0,997

цаемость для обеспечения комфортного микроклимата, умеренная жесткость, достаточная для сохранения формы изделия и обеспечения драпируемости, достаточная стойкость к истиранию, соответствующая типичным эксплуатационным нагрузкам повседневной одежды. Указанным требованиям соответствует кратность пены композиции 2,0 и зазор между опорным валом и шабером 0,5 мм. Для одежных материалов кратность 2,0 обеспечивает значение показателей воздухопроницаемости 36,6 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и паропроницаемости 13,2 $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$. Зазор между опорным валом и шабером в 0,5 мм обеспечивает оптимальную жесткость материала по основе и по утку 7 сН.

Однако для получения тканей с полимерным покрытием с заданными свойствами важно определять не только параметры нанесения покрытия, но и режимы сушки. Для оценки влияния температуры и продолжительности сушки выбраны интервалы и уровни варьирования входных факторов, представленные в таблице 3.

В результате обработки экспериментальных данных получены теоретико-экспериментальные зависимости выходных параметров от параметров технологического процесса нанесения (таблица 4). Достоверность моделей подтверждается рассчитанным значением коэффициента детерминации ($R^2 > 0,9$).

Анализ представленных данных позволяет сделать выводы, что воздухопроницаемость зависит как от температуры, так и от продолжительности сушки. Минимальные значения достигаются в области высоких температур (100 °С) и продолжительной сушки (300 с), что связано с уплотнением полимерного слоя. Модель паропроницаемости указывает на наличие максимума в области средних температур (75–80 °С) и увеличенного времени сушки (300 с). Это позволяет предположить, что формирование оптимальной пористой структуры, ответственной за диффузию паров воды, требует не только умеренного воздействия температуры, но и достаточной длительности для завершения структурообразования. Жесткость по основе и утку обладает положительной линейной зависимостью от обоих факторов. Регрессионные модели подтверждают, что повышение температуры и продолжительности сушки приводит к увеличению плотности покрытия и, как следствие, к росту его жесткости. Уравнение стойкости к истиранию описывает функция отклика с максимумом в области температуры 80–90 °С и длительности 300 с. Достижение оптимальной износостойкости требует достаточной температуры (85–90 °С) и времени (300 с) для формирования покрытия с хорошей адгезией, но не превышения порога, за которым полимер становится хрупким. При снижении

Таблица 3 – Уровни и интервалы варьирования входных факторов

Table 3 – Levels and intervals of variation of input factors

Факторы	нижний уровень (-1)	средний уровень (0)	верхний уровень (+1)	интервал варьирования
Температура сушки, t (°С), X_3	60	80	100	20
Продолжительность сушки, T (с), X_4	180	240	300	60

Таблица 4 – Зависимости выходных параметров от режимов сушки

Table 4 – Dependence of output parameters on drying modes

Показатель	Модель зависимости от режимов сушки	R^2
Паропроницаемость [P2]	$P2 = 9,78 - 1,3 \cdot X_3 + 0,53 \cdot X_4 + 0,45 \cdot X_3 \cdot X_4$	0,989
Воздухопроницаемость [B2]	$B2 = 24,63 - 3,37 \cdot X_3 - 1,75 \cdot X_4 + 2,77 \cdot X_3^2$	0,984
Жесткость по основе [Go2]	$Go2 = 12,63 + 1,8 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_4$	0,950
Жесткость по утку [Gu2]	$Gu2 = 10,19 + 0,77 \cdot X_3 + 0,55 \cdot X_4$	0,952
Стойкость к истиранию [Is2]	$Is2 = 403,33 + 50,8 \cdot X_3 + 30 \cdot X_4 - 85,83 \cdot X_3^2$	0,954

температуры до 60 °С стойкость к истиранию уменьшается до 350 циклов. Предполагаемому назначению соответствует область режима: температура сушки 70–75 °С, продолжительность сушки 200–230 с. Данный режим позволяет достичь показателей: воздухопроницаемость на уровне 27–30 дм³/(м²·с), паропроницаемость в диапазоне 10,5–11,0 мг/(см²·ч), жесткость по основе 11,5–12,5 сН и по утку 9,5–10,0 сН, стойкость к истиранию 300–350 циклов.

Полученные математические модели и зависимости позволяют не только прогнозировать свойства материала при заданных технологических параметрах, но и решать обратную задачу: определять значения входных факторов для достижения требуемых значений единичных показателей (Орешина, О.А., 2021). Такая задача решается путем преобразования уравнения регрессии относительно искомого фактора. Для процесса нанесения покрытия фиксируем кратность пены (X_1), для процесса сушки – температуру (X_3), соответственно зазор между опорным валом и шабером (X_2) и продолжительность сушки (X_4) рассчитываются.

Для определения значения входного фактора, обеспечивающего заданное значение выходного показателя, решена обратная задача – аналитическое преобразование уравнения регрессии относительно искомого фактора. При фиксированном значении одного фактора ($X_1 = \text{const}$ или $X_3 = \text{const}$) уравнение регрессии приводится к квадратному (или линейному) уравнению относительно второго фактора. Решение полученных уравнений выполнено в вычислительной среде Maple с использованием встроенной функции solve, обеспечивающей аналитическое нахождение корней алгебраических уравнений. Для каждого уравнения регрессии преобразование выполнено к виду, позволяющему выразить искомым фактор через фиксированный и заданное значение единичного показателя.

При решении квадратных уравнений относительно зазора (X_2) получены по два действительных корня, что обусловлено квадратичной зависимостью показателей качества от данного фактора. Из полученных пар корней отбирается значение, лежащее внутри области варьирования фактора и технологически реализуемое. Для показателей, описываемых линейной зависимостью от зазора (жесткость по основе, стойкость к истиранию), решение обратной задачи дает единственное значение фактора.

В таблице 5 приведены уравнения для расчета величины зазора между опорным валом и шабером (X_2) при фиксированной кратности пены (X_1) и заданном единичном показателе. Модели получены с использованием кодированных значений. Область варьирования входных факторов: кратность пены X_1 [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 1,5 до 2,5. Величина зазора X_2 [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 0,3 до 0,7 мм. Температура сушки X_3 [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 60 до 100 °С. Продолжительность сушки X_4 [-1;1], что соответствует натуральным значениям от 180 до 300 с.

В таблице 6 приведены уравнения для расчета продолжительности сушки (X_4) при фиксированной температуре (X_3) и заданном единичном показателе.

Для подтверждения достоверности полученных моделей необходимо сравнение теоретических значений, рассчитанных по уравнениям регрессии, с экспериментальными значениями. Значения входных факторов выбраны не входящие в план эксперимента при построении моделей, но лежащие внутри области варьирования.

При нанесении полиуретановой композиции в качестве фиксируемого фактора выбрана кратность пены $X_1 = 0,4$, что соответствует натуральному значению 2,2. Данное значение находится в области варьирования и не совпадает с уровнями, используемыми в основном

Таблица 5 – Уравнения для расчета величины зазора между опорным валом и шабером X_2
Table 5 – Equations for calculating the gap between the support shaft and the scraper X_2

Заданный показатель	Уравнение
Паропроницаемость [П]	$1,427 \pm 0,00082\sqrt{3,618 \cdot 10^7 + 1,527 \cdot 10^6 X_1 - 2,432 \cdot 10^6 P}$
Воздухопроницаемость [В]	$0,849 \pm 0,00062\sqrt{1,308 \cdot 10^7 + 1,455 \cdot 10^6 X_1 - 3,212 \cdot 10^5 B}$
Жесткость по основе [Go]	$-9 + 0,795 \cdot X_1 + 1,282 \cdot Go$
Жесткость по утку [Gu]	$-2,05 \pm 0,017\sqrt{-66231 + 12000Gu + 3840 \cdot X_1}$
Стойкость к истиранию [Is]	$-7,5001 + 1,649 \cdot X_1 + 0,0284 \cdot Is$

Таблица 6 – Уравнения для расчета продолжительности сушки X_4
Table 6 – Equations for calculating drying time X_4

Заданная величина	Уравнение
Паропроницаемость $\{П2\}$	$\frac{2 \cdot (-489 + 65 \cdot X_3 + 50 \cdot П2)}{53 + 45 \cdot X_3}$
Воздухопроницаемость $\{B2\}$	$14,074 - 1,93 \cdot X_3 + 1,583 \cdot X_3^2 - 0,57 \cdot B2$
Жесткость по основе $\{Go2\}$	$-12,39 - 1,64 \cdot X_3 + 0,91 \cdot Go2$
Жесткость по утку $\{Gu2\}$	$-18,53 - 1,4 \cdot X_3 + 1,82 \cdot Gu2$
Стойкость к истиранию $\{Is2\}$	$-13,44 - 1,69 \cdot X3 + 2,86 \cdot X_3^2 + 0,033 \cdot Is2$

эксперименте. В качестве контролируемого свойства выбрана воздухопроницаемость. Планируемое значение принято $B_3 = 25,0 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$, которое находится в области варьирования экспериментальных значений и не совпадает с точками эксперимента. Решение уравнения обратной задачи для воздухопроницаемости дает два корня: 0,97 мм и 0,37 мм. Значение $h = 0,97 \text{ мм}$ выходит за пределы области варьирования зазора (0,3–0,7 мм). Поэтому выбрано значение $h = 0,37 \text{ мм}$, которое находится внутри области варьирования и технологически реализуемо.

Таким образом, сформирован режим для процесса нанесения покрытия:

- кратность пены 2,2 ($X_1 = 0,4$);
- зазор между опорным валом и шабером 0,37 мм ($X_2 = -0,63$).

С использованием вычислительной среды Maple рассчитаны прогнозируемые значения единичных показателей. Для проверочного режима подготовлены образцы тканей с полиуретановым покрытием. Для обеспечения корректного сравнения значений режим сушки образцов выбран с учетом установленных ранее зависимостей (Марущак Ю.И. и др., 2023; Ясинская Н.Н. и др., 2024) между кратностью пены и параметрами сушки. Установлено, что для кратности пены 2,0 рекомендуется режим температуры 80 °C и продолжительность 240 с, для кратности 2,5 – температура 60 °C и длительность 160 с. Для значения кратности пены 2,2 режим сушки определен методом линейной интерполяции – температура сушки 72 °C, длительность сушки 208 с. В качестве основы использована хлопчатобумажная ткань саржевого переплетения поверхностной плотности 270 г/м². Результаты экспериментальных и теоретических значений представлены в таблице 7. Сравнение значений

выполнено путем расчета относительной погрешности.

Средняя относительная погрешность прогнозирования для всех исследованных свойств составила 4,0 %. Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости теоретических и экспериментальных данных, относительная погрешность не превышает 5 %. Это позволяет сделать вывод об адекватности математических моделей для процесса нанесения покрытия.

Для подтверждения адекватности математических моделей процесса сушки проведена проверка по аналогичной схеме. В качестве фиксируемого фактора выбрана температура сушки $X_3 = -0,5$, что соответствует 70 °C. В качестве контролируемого фактора выбрана жесткость по основе $Go2 = 12 \text{ сН}$. Решение уравнения обратной задачи для жесткости по основе дает значения длительности сушки 200 с.

Режим для процесса сушки покрытия:

- температура сушки 70 °C ($X_1 = -0,50$);
- длительность сушки 200 с ($X_2 = -0,67$).

С использованием вычислительной среды Maple рассчитаны прогнозируемые значения единичных показателей. Для проверочного режима подготовлены образцы тканей с полиуретановым покрытием при кратности пены 2,0 и толщине зазора между опорным валом и шабером 0,5 мм. Результаты экспериментальных и теоретических значений представлены в таблице 8.

Средняя погрешность составила 4,2 %. Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости теоретических и экспериментальных данных, так как относительная погрешность не превышает 5 %. Делаем вывод об адекватности полученных математических моделей.

Таблица 7 – Значения показателей для принятого режима формирования
Table 7 – Values of the indicators for the adopted formation mode

Показатель качества	Прогнозируемое значение	Экспериментальное значение	Относительная погрешность, %
Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$	25,1	25,9	3,1
Паропроницаемость, $\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{ч}$	12,6	13,2	4,5
Жесткость по основе, сН	6,34	6,61	4,1
Жесткость по утку, сН	6,04	6,32	4,4
Стойкость к истиранию, цикл	218	210	3,8

Таблица 8 – Значения показателей для принятого режима формирования
Table 8 – Values of indicators for the adopted formation mode

Показатель качества	Прогнозируемое значение	Экспериментальное значение	Относительная погрешность, %
Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$	28,2	29,4	4,0
Паропроницаемость, $\text{мг}/\text{см}^2\cdot\text{ч}$	10,2	10,7	4,5
Жесткость по основе, сН	12,04	12,61	4,1
Жесткость по утку, сН	9,44	9,82	4,4
Стойкость к истиранию, цикл	336	320	3,8

Выводы

В результате экспериментальных исследований получены достоверные математические модели ($R^2 > 0,97$), описывающие влияние кратности пены и величины зазора между опорным валом и шабером на паропроницаемость, воздухопроницаемость, жесткость и стойкость к истиранию полиуретанового покрытия ткани. Установлено, что увеличение зазора повышает воздухопроницаемость и жесткость материала, а рост кратности пены снижает жесткость и стойкость к истиранию, при этом наибольшее влияние на свойства оказывает величина зазора. Рекомендуемыми параметрами для производства тканей с полиуретановым покрытием, предназначенных для одежды второго слоя, являются кратность пены 2,0 и зазор 0,5 мм. Установлены зависимости воздухопроницаемости и паропроницаемости, стойкости к истиранию и жесткости тканей с пористым полиуретановым покрытием от температурно-временных параметров сушки. Увеличение температуры и времени сушки приводит к росту жесткости материала вследствие уплотнения полимерной структуры. Максимальная стойкость к истиранию достигается в области

температур 80–90 °С и максимальной продолжительности сушки 300 с. Гигиенические свойства материала определяются режимом сушки нелинейно. Максимальные значения воздухопроницаемости (до 32,8 $\text{дм}^3/(\text{м}^2\cdot\text{с})$) наблюдаются при минимальных температуре и времени (60 °С, 180 с). Паропроницаемость, напротив, достигает 11,2 $\text{мг}/(\text{см}^2\cdot\text{ч})$ при средних температурах и увеличенной продолжительности процесса. Определен рациональный режим сушки для материалов одежного назначения: температура 70–75 °С, продолжительность 200–230 с.

Полученные математические модели, описывающие зависимость воздухопроницаемости, паропроницаемости, стойкости к истиранию и жесткости от технологических параметров формирования использованы для прогнозирования свойств, а также для решения обратной задачи – определения значений входных факторов по требуемым показателям качества. Преобразование уравнений регрессии выполнено с использованием вычислительной среды Maple.

Подтверждена адекватность полученных математических моделей. При сравнении экспериментальных

значений с теоретическими относительная погрешность не превысила 5 %. Предложенный подход прогнозирования свойств тканей с полиуретановым покрытием может быть использован при проектировании текстильных материалов с заданными свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Бойко, А.Ф., Воронкова, М.Н. [2013]. *Теория планирования многофакторного эксперимента*. Белгород: Изд-во БГТУ, Российская Федерация.

Вишневецкая, О.В. [2016]. Современные методы нанесения покрытия на текстиль, *Вестник Казанского технологического университета*, № 18, С. 69–72.

Карнилов, М.С., Рыклин, Д.Б. [2024]. Определение рациональных режимов процесса нанесения нановолокнистого покрытия на водорастворимую пленку методом электроформования. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 4 (50), С. 69–80.

Киселев, А.М. [2010]. Математическое моделирование процесса сжатия волокнистых материалов в массе, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 5 (326), С. 14–17.

Марущак, Ю.И., Ясинская, Н.Н., Скобова, Н.В. и Сергеев, В.Ю. [2023]. Зависимость физико-механических свойств экокож от условий формирования полимерного покрытия. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 44 (1), С. 102–113.

Орешина, О.А., Марков, А.В. [2020]. Концепция математического моделирования свойств физико-механических характеристик композиционных, *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, № 12, С. 3–6.

Павутницкий, В.В. [2004]. *Развитие теории и практики получения и применения низкократных пен в технологических процессах текстильного производства, автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.02*. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Старков, А.И., Копылов, А.И. и Матвеев, К.А. [2016]. Оценка физико-механических и технологических свойств поливинилхлоридных смол при производстве мягких искусственных кож, в условиях импортозамещения, *Дизайн и технологии*, № 54 (96), С. 52–59.

Теркалова, Л.О., Павутницкий, В.В. [2005]. Влияние пенного способа нанесения отделочных препаратов в процессах заключительной отделки на физико-механические свойства тканей, *Вестник Димитровградского института технологии, управления и дизайна*, № 1, С. 1–3.

Шустов, Ю.С. [2003]. *Разработка методов прогнозирования строения и свойств текстильных материалов с использованием теории подобия и анализа размерностей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.01*. Москва. 281 с.

Ясинская, Н.Н., Марущак, Ю.И. и Скобова, Н.В. [2024]. Влияние кратности вспенивания полиуретановой композиции и толщины нанесенного слоя на потребительские свойства искусственных кож, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 2 (410), С. 225–232.

Ясинская, Н.Н., Ольшанский, В.И. и Коган, А.Г. [2015]. *Композиционные текстильные материалы : монография*. Витебск : УО «ВГТУ», Республика Беларусь.

Chatterjee, U., Patra, S., Butola, B.S. and Joshi, M. [2024]. Reliability modeling to predict in-service weatherability of polyurethane nanocomposite coatings: Approach, comparison and validation, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 64, No. 9, pp. 4551–4565.

Gadeikytė, A., Abraitienė, A. and Barauskas, R. [2021]. Prediction of air permeability coefficient and water-vapor resistance of 3D textile layer, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 112, No. 7, pp. 1–11.

Goessens, T., De Staelen, R. and Constaes, D. [2015]. Characteristic times and inverse problems for diffusion in coated textiles, *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 9, No. 2L, pp. 349–355.

Kentta, E., Kinnunen-Raudaskoski, K., Hjelt, T., Sarlin, E., Johansson, L.-S., Vartiainen, J. and Rautkoski, H. (2020). Foam coating of abrasive particles on textile substrates with the aid of cellulose nanocrystals, *Coatings*, Vol. 10, No. 11, p. 1034.

Liu, J., Recupido, F., Lama, G.C., Oliviero, M., Verdolotti, L. and Lavorgna, M. (2023). Recent advances concerning polyurethane in leather applications: an overview of conventional and greener solutions, *Collagen and Leather*, Vol. 5, No. 1, p. 8.

REFERENCES

Boyko, A.F. and Voronkova, M.N. (2013). *Teoriya planirovaniya mnogofaktornogo eksperimenta* [Theory of planning a multifactor experiment]. Belgorod: Izd-vo BGTU, Russian Federation (In Russian).

Vishnevskaya, O.V. (2016). Modern methods of coating on textiles [Sovremennyye metody naneseniya pokrytiya na tekstil']. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, No. 18, pp. 69–72 (In Russian).

Karnilov, M.S. and Ryklin, D.B. (2024). Determination of rational modes of the process of applying nanofibrous coating on a water-soluble film by electrospinning [Opredelenie ratsional'nykh rezhimov protsessa naneseniya nanovoloknistogo pokrytiya na rastvorimuyu plenku metodom elektroformovaniya]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, No. 4 (50), pp. 69–80.

Kiselev, A.M. (2010). Matematicheskoe modelirovanie processa szhatiya voloknistykh materialov v masse [Mathematical modeling of the process of compression of fibrous materials in mass], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, No. (326), pp. 14–17 (In Russian).

Oreshina, O.A., Markov, A.V. (2020). Konceptiya matematicheskogo modelirovaniya svoystv fiziko-mekhanicheskikh karakteristik kompozitsionnykh [The concept of mathematical modeling of the properties of physical and mechanical characteristics of composites], *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal = Flight. All-Russian scientific and technical journal*, № 12, pp. 3–6.

Pavutnitsky, V.V. (2004). *Razvitie teorii i praktiki polucheniya i primeneniya nizkokratnykh pen v tekhnologicheskikh protsessakh tekstil'nogo proizvodstva* [Development of the theory and practice of obtaining and using low-expansion foams in the technological processes of textile production]: Doctoral dissertation abstract. Saint Petersburg, Russian Federation (In Russian).

Starkov, A.I., Kopylov, A.I. and Matveev, K.A. (2016). Assessment of physical-mechanical and technological properties of polyvinyl chloride resins in the production of soft artificial leather, in the context of import substitution [Otsenka fiziko-mekhanicheskikh i tekhnologicheskikh svoystv polivinilkloridnykh smol pri proizvodstve myagkikh iskusstvennykh kozh, v usloviyakh importozameshcheniya]. *Dizayn i tekhnologii = Design and Technology*, No. 54 (96), pp. 52–59 (In Russian).

Terkalova, L.O. and Pavutnitsky, V.V. (2005). The influence of the foam method of applying finishing preparations in the processes of final finishing on the physical and mechanical properties of fabrics [Vliyanie pennogo sposoba naneseniya otdelochnykh preparatov v protsessakh zaklyuchitel'noy otdelki na fiziko-mekhanicheskie svoystva tkaney]. *Vestnik Dimitrovgradskogo instituta tekhnologii, upravleniya i dizayna = Bulletin of the Dimitrovgrad Institute of Technology, Management and Design*, No. 1, pp. 1–3 (In Russian).

Shustov, Yu.S. (2003). *Razrabotka metodov prognozirovaniya stroeniya i svoystv tekstil'nykh materialov s ispol'zovaniem teorii podobiya i analiza razmernostey* [Development of methods for predicting the structure and properties of textile materials using similarity theory and dimensional analysis] : Doctoral thesis in Engineering Sciences : 05.19.01. Moscow. 281 p.

Yasinskaya, N.N., Marushchak, Yu.I. and Skobova, N.V. (2024). Influence of foaming rate of polyurethane composition and thickness of applied layer on consumer properties of artificial leather [Vliyanie kratnosti vspenivaniya poliuretanovoy kompozitsii i tolshchiny nanesennogo sloya na potrebitel'skie svoystva iskusstvennykh kozh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, No. 2 (410), pp. 225–232 (In Russian).

Yasinskaya, N.N., Olshansky, V.I. and Kogan, A.G. (2015). *Kompozitsionnye tekstil'nye materialy* [Composite textile materials]. Vitebsk: UO «VGTU», Republic of Belarus (In Russian).

Chatterjee, U., Patra, S., Butola, B.S. and Joshi, M. (2024). Reliability modeling to predict in-service weatherability of polyurethane nanocomposite coatings: Approach, comparison and validation. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 64, No. 9, pp. 4551–4565.

Gadeikytė, A., Abraitienė, A. and Barauskas, R. (2021). Prediction of air permeability coefficient and water-vapor resistance of 3D textile layer. *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 112, No. 7, pp. 1–11.

Goessens, T., De Staelen, R. and Constaes, D. (2015). Characteristic times and inverse problems for diffusion in coated textiles. *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 9, No. 2L, pp. 349–355.

Kentta, E., Kinnunen-Raudaskoski, K., Hjelt, T., Sarlin, E., Johansson, L.-S., Vartiainen, J., and Rautkoski, H. (2020). Foam coating of abrasive particles on textile substrates with the aid of cellulose nanocrystals. *Coatings*, Vol. 10, No. 11, p. 1034.

Liu, J., Recupido, F., Lama, G.C., Oliviero, M., Verdolotti, L., and Lavorgna, M. (2023). Recent advances concerning polyurethane in leather applications: an overview of conventional and greener solutions. *Collagen and Leather*, Vol. 5, No. 1, p. 8.

Информация об авторах

Information about the authors

Марущак Юлия Игоревна

Аспирант, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: tonk.00@mail.ru

Ясинская Наталья Николаевна

Доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Экология и химические технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

Бизюк Андрей Николаевич

Старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: biziuk.andrei@gmail.com

Кузнецов Андрей Александрович

Доктор технических наук, профессор, ректор Витебского государственного технологического университета, Республика Беларусь.

Yulia I. Maruschak

Postgraduate Student, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: tonk.00@mail.ru

Natallia N. Yasinskaya

Doctor of Science (in Engineering), Associate Professor, Chair of the Department "Ecology and Chemical Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: yasinskaynn@rambler.ru

Andrey N. Biziuk

Senior Lecturer at the Department "Information Systems and Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: biziuk.andrei@gmail.com

Andrey A. Kuznetsov

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Rector of Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.