

Обзорная статья/ Review article

УДК 677.076.4

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-22-31>

CC BY 4.0

Многокритериальная оптимизация свойств нетканого строительного утеплителя из шерстяных волокон

Константин Эдуардович Разумеев¹ , Наталия Алексеевна Королева¹ , Наталья Евгеньевна Федорова¹ ,
Дмитрий Владимирович Сичевой² 

¹ Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Российская Федерация

² Российский сельскохозяйственный центр, Москва, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: fedorova-ne@rguk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Сейчас остро стоят вопросы по обеспечению производств отечественными материалами, не уступающими по качеству импортным аналогам, для строительства и восстановления разрушенного жилья и социальных объектов в новых регионах России, требуются строительные материалы, в том числе утеплители. Теплоизоляторы из овечьей шерсти являются экологичными, легко утилизируемыми и возобновляемыми, для придания огне- и биостойкости их следуют обработать соответствующими препаратами на этапе отделки при производстве. **Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выбран нетканый термоскрепленный материал из волокон грубой и полугрубой шерсти и бикомпонентных полиэфирных волокон в качестве связующего, представляющий собой перспективное направление в разработке экологически чистых и эффективных тепло- и звукоизоляционных материалов, ключевую роль в формировании их эксплуатационных свойств играет пористая структура, в частности, наличие наноструктуры – нанопор и каналов, проведен эксперимент с использованием матрицы планирования КОНО-2, получены регрессионные модели свойств нетканого полотна, для каждой модели была проведена оптимизация с использованием среды MathCAD, затем выполнена многокритериальная оптимизация с использованием метода построения комплексного показателя эффективности, проведен эксперимент по приданию негорючести и огнестойкости оптимальному образцу нетканого полотна. **Результаты.** Разработана технология получения объемных нетканых теплоизоляционных полотен строительного назначения, проведена многокритериальная оптимизация для определения образца с наилучшими эксплуатационными свойствами: повышенной воздухопроницаемостью, прочностью и достаточной растяжимостью. **Заключение.** Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методов многокритериальной оптимизации для анализа текстильных процессов, использование комплексного безразмерного показателя позволило подобрать оптимальные параметры производства нетканого строительного утеплителя из шерсти, обеспечивающие соответствие требуемым эксплуатационным характеристикам по основным показателям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительный утеплитель, технология производства, шерстяные волокна, свойства, оптимизация, эксплуатационные свойства, оптимальный образец

БЛАГОДАРНОСТИ: работа проведена в рамках выполнения Госзадания 1025022600174-0-2.5.6 «Разработка комплекса мероприятий и научное сопровождение производства полного цикла по переработке овечьей шерсти в Российской Федерации, с интеграцией компетенций отечественной научно-образовательной школы по технологии, дизайну и моде продукции из шерсти», при финансировании Минобрнауки России.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Разумеев К.Э., Королева Н.А., Федорова Н.Е., Сичевой Д.В. Многокритериальная оптимизация свойств нетканого строительного утеплителя из шерстяных волокон. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(1):22–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-22-31>. – EDN: LGNRBD.

Multi-criteria optimization of properties of non-woven construction thermal insulation from wool fiber

Konstantin E. Razumeev¹ , Natalia A. Koroleva¹ , Natalia E. Fedorova^{1*} , Dmitry V. Sichevoy² 

¹ Russian State University named after A.N. Kosygin, Moscow, Russian Federation

² Russian Agricultural Centre, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: fedorova-ne@rguk.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, there are urgent issues of providing production facilities with domestic materials that are not inferior in quality to imported analogues. Materials for construction, including thermal insulation materials, are required for the building and restoration of damaged property and social facilities in the new regions of Russia. Sheep wool thermal insulators are environmentally friendly, easily recyclable and renewable. They should be treated with appropriate preparations at the finishing stage during production to ensure fire and bio-resistance. **Materials and methods.** A non-woven thermally bonded material composed of coarse and semi-coarse wool fibers and bicomponent polyester fiber as a binder was chosen as the object of research, which is a promising direction in the development of environmentally friendly and efficient thermo- and acoustic insulation materials. A key role in the formation of their operating ability is played a porous structure, in particular, the presence of a nanostructure – nanopores and channels. An experiment was conducted using the KONO-2 planning matrix, regression models of non-woven fabric properties were obtained. Optimization was performed for each model using MathCAD environment, then multi-criteria optimization was performed using the method of constructing an integrated efficiency indicator, an experiment was conducted to impart incombustibility and fire resistance to an optimal non-woven fabric sample. **Results.** A technology for producing volumetric non-woven thermal insulation sheets for construction purposes has been developed. Multi-criteria optimization has been performed to determine the sample with the best performance properties: increased breathability, strength, and sufficient stretchability. **Conclusion.** The results obtained confirm the applicability of using multicriteria optimization methods for the analysis of textile processes, the use of a complex dimensionless indicator made it possible to select optimal parameters for the production of non-woven construction thermal woolen insulation, ensuring compliance with the required performance characteristics according to the main indicators.

KEYWORDS: building thermal insulation, production technology, coarse fibers, properties, optimization, operating ability, optimal design

ACKNOWLEDGEMENTS: the work was carried out within the framework of the State assignment 1025022600174-0-2.5.6 "Development of a set of measures and scientific support for the full cycle production of sheep wool processing in the Russian Federation, with the integration of the competencies of the national scientific and educational school on technology, design and fashion of wool products", funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

FOR CITATION:

Razumeev K.E., Koroleva N.A., Fedorova N.E., Sichevoy D.V. Multi-criteria optimization of properties of non-woven construction thermal insulation from wool fiber. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(1):22–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-22-31>. – EDN: LGNRBD.

ВВЕДЕНИЕ

Сейчас остро стоит потребность в производстве отечественных материалов, которые бы не уступали по качеству импортным аналогам.

С февраля 2022 г. в отношении России введено большое количество санкций, касающихся доступа на финансовые рынки к технологиям и экспорту и импорту широкой номенклатуры товаров. Санкции оказывают прямое и опосредованное влияние на экономическую ситуацию в стране, на отдельные отрасли промышленности, включая легкую промышленность. Ограничение доступа к сырьевой базе текстильной промышленности, полуфабрикатам

и ограничение поставок и технической поддержки оборудования отрасли способствовало сдерживанию развития производства [1].

В новых регионах России сейчас активно ведется строительство и восстановление разрушенного жилья и социальных объектов, что требует большого количества строительных материалов, в том числе утеплителей. Их использование позволяет достичь теплоизоляции, что важно в холодное время года, при этом снижаются расходы на отопление и в помещении становится более комфортно. Также утеплитель выполняет функцию звукоизоляции, что актуально для офисных помещений и многоквартирных домов.

На данном этапе одной из перспектив развития легпрома, согласно «Стратегии развития текстильной и швейной промышленности Российской Федерации до 2035 года» [1], необходимо поддерживать традиционное текстильное производство, использующее натуральное сырье, чтобы сохранить отрасль и постепенно переориентировать ее на новые задачи. Успешное долгосрочное развитие возможно только совместно с развитием производства смесовых текстильных материалов на основе отечественных химических волокон.

В представленной работе объектом исследования был выбран нетканый материал из волокон шерсти с добавлением бикомпонентных полиэфирных волокон в качестве связующего.

Область применения строительных утеплителей довольно обширна: утепление стен, перекрытий, полов, кровли, примыкания стены к кровле, фасадов, емкостей, теплотрасс, заделка щелей и стыков и др. Выбор утеплителя зависит от того, какая теплоизоляция будет производиться: внешняя или внутренняя. Для внешних работ утеплитель должен быть прочным и долговечным, не бояться механических воздействий, влаги, ветра и перепадов температур, а для внутренних работ должен хорошо пропускать воздух, не задерживать внутри влагу, быть экологичным и негорючим.

Нетканые строительные материалы, состоящие из шерстяных волокон, связанных между собой бикомпонентными полиэфирными волокнами, представляют собой перспективное направление в разработке экологически чистых и эффективных тепло- и звукоизоляционных материалов. Ключевую

роль в формировании их эксплуатационных свойств играет нанопористая структура, в частности, наличие нанопор и каналов.

О возможности и целесообразности использования нанотехнологий (а также и био-, информационных, когнитивных технологий) в многочисленных отраслях текстильной и легкой промышленности начиная с 2011 года профессором Г.Е. Кричевским опубликована серия трудов [2–5], которые, по нашему мнению, пока не получили ни должной высокой оценки, ни серьезного отклика в трудах исследователей нового поколения.

Весьма перспективным видится стремительное развитие технологий в сфере производства нетканых материалов. Из работ отечественных ученых и практиков требующими внимания следует признать монографии [6–7].

Строительные утеплители достаточно разнообразны [8] (рис. 1). По форме они могут быть в виде плит, рулонов, шнура, насыпные и напыляемые, фасонные. По структуре различают сыпучие, ячеистые и волокнистые теплоизоляторы. Изделия сыпучего или зернистого типа имеют строение в виде отдельных гранул, к ним можно отнести перлитовый песок, керамзит и различные порошковые материалы, их используют для утепления горизонтальных поверхностей. Ячеистое строение характеризуется наличием макропор (ячеек), присущим пенополиуретану, пенопласту и т.п. Наиболее перспективными являются утеплители на базе волокнистого состава. Они могут быть из органического или неорганического сырья.

К неорганическим утеплителям относится минеральная вата. В зависимости от исходного мине-

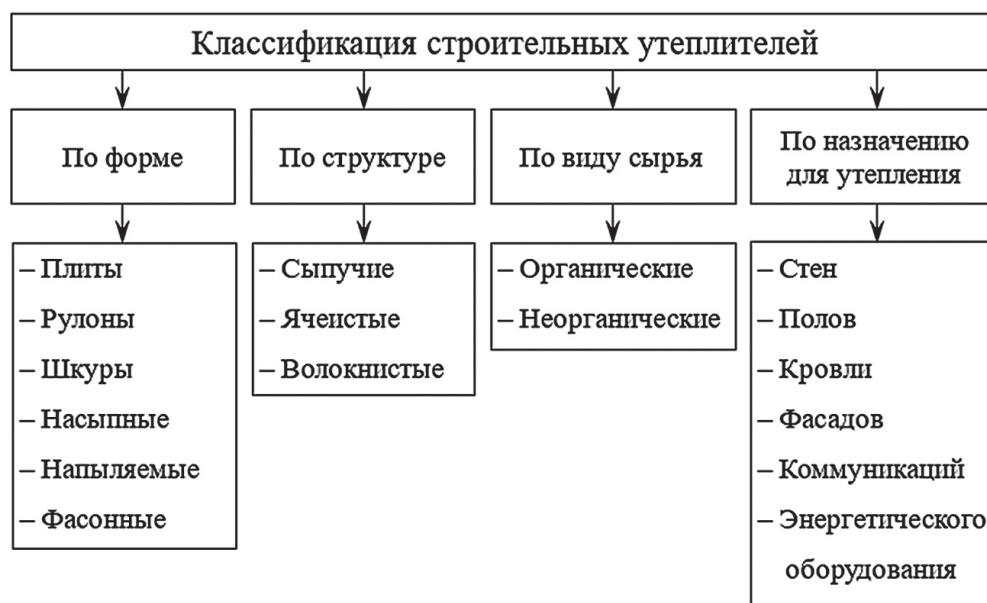


Рис. 1. Классификация строительных утеплителей

рального вещества различают стекловату, каменную или базальтовую вату и шлаковую вату. Главное преимущество таких теплоизоляторов по сравнению с органическими – высокая пожаробезопасность, устойчивость к плесени и грибку. Однако стекловата быстрее теряет свои характеристики под воздействием влаги, а также требует использование средств индивидуальной защиты при монтаже. Шлаковата в жилищном строительстве не применяется, так как содержит вредные для человека примеси серы. Таким образом, из всех минеральных утеплителей предпочтение отдается каменной вате. Кроме теплоизоляции стен, полов, скатных и плоских кровель используется для огнезащиты стальных колонн и балок, воздуховодов, железобетонных перегородок.

Для внутренней отделки помещения лучше подходят органические утеплители. К ним относятся материалы на основе отходов деревообрабатывающей отрасли (опилки, стружка), бумажной макулатуры (целлюлоза), овечьей шерсти, пробки и некоторых других природных материалов. Теплоизоляторы из овечьей шерсти являются экологичными, легко утилизируемыми и возобновляемыми [9], для придания огне- и биостойкости их следует обработать соответствующими препаратами на этапе отделки при производстве.

Сегодня во многих странах наблюдается острая проблема с утилизацией шерсти мясных пород овец. Зачастую такая шерсть просто выбрасывается из-за отсутствия в ближайшей доступности предприятий по переработке.

Предлагается использовать шерстный покров от отечественных мясных и мясошерстных пород овец, являющийся по современной классификации шерсти [8] шерстью, в основном, полугрубошерстной и грубошерстной для производства нетканого строительного утеплителя.

МЕТОДОЛОГИЯ

В качестве объекта исследования выбран нетканый термоскрепленный материал из волокон шерсти с добавлением в качестве связующего бикомпонентных полиэфирных волокон [11, 12].

Шерстяное волокно имеет уникальную структуру [13], которая создана природой. Говоря о наноразмерности волокон шерсти, понятно, что само волокно макроскопическое, однако его ключевые структурные компоненты, определяющие свойства, имеют наноразмер.

Волокно овечьей шерсти имеет сложное многоуровневое строение. Природная наноструктура, полученная в результате эволюции, наделяет шерстяное волокно уникальными, ценными для человека свойствами.

Наноразмерные элементы волокна включают: кератиновые фибриллы (в частности: протофибриллы и микрофибриллы шерсти имеют диаметр около 20 и 60–70 нм, соответственно), прочные, нитевидные структуры, состоящие из белков кератина, обеспечивают волокну механическую прочность и упругость. Кератиновые промежуточные филаменты, а также взаимодействие наноразмерных фибрилл и аморфного матрикса придают шерсти уникальное сочетание прочности и эластичности. Т.н. чешуйки (кутикула), поверхность этих чешуек имеет сложный нанорельеф, который существенно влияет на сцепление волокон между собой и на гидрофобные свойства.

Интересна и важна для нашего исследования нанопористая структура волокон, внутри волокна существует сеть нанопор и каналов, что позволяет шерсти поглощать и удерживать влагу, также при переработке быть хорошим проводником для молекул красителей при крашении.

Нужно отметить практическое значение и применение в нанотехнологиях данного волокна как отдельно, так и в рецептурных смесях. Понимание наноразмерности шерсти позволяет создавать новые материалы, имитируя структуру шерсти для создания синтетических волокон с аналогичными свойствами, наночастицы можно внедрять в нанопоры волокна, создавая текстильные полотна с заданными свойствами.

Шерстяные волокна имеют естественную пористость, обладают микро- и нанопористой структурой, обусловленной их сложноорганизованной морфологией. Поры способствуют удержанию воздуха, обеспечивая высокие теплоизоляционные свойства. В процессе формирования нетканого полотна между шерстяными и бикомпонентными полиэфирными волокнами образуется развитая система пор различного размера, включая нанопоры. В процессе плавления и кристаллизации полимера могут образовываться нанопоры в структуре связующего, увеличиваться межволоконное пространство. В качестве дополнения к исследованию возможно создание дополнительных нанопор путем модификации шерстяных или полиэфирных волокон.

Наличие нанопор оказывает влияние на следующие свойства нетканых строительных материалов: теплоизоляция, звукоизоляция, воздухопроницаемость.

В дополнение можно отметить, что увеличение пористости, в том числе за счет нанопор, снижает плотность материала, делая его более легким и удобным в использовании. Нанопоры увеличивают площадь поверхности материала, повышая его способность к сорбции влаги и газов, что может быть полезно для регулирования микроклимата в помещении и очистки воздуха.

Нанопоры, заполненные воздухом, значительно снижают теплопроводность материала, поскольку воздух является плохим проводником тепла. Увеличение количества нанопор приводит к улучшению теплоизоляционных характеристик. Нанопористая структура способствует рассеиванию звуковых волн, повышая звукопоглощающие свойства материала, также обеспечивает достаточную воздухопроницаемость материала, регулируя влажность в помещении и предотвращая образование конденсата.

Для проведения двухфакторного эксперимента использовалась матрица планирования КОНО-2, так как она имеет хорошие статистические характеристики и включает небольшое число опытов. Обработка результатов эксперимента позволила получить математические модели зависимости свойств нетканого полотна от поверхностной плотности холста (X_1) и доли вложения бикомпонентных волокон (X_2).

Выбраны интервалы варьирования факторов, для поверхностной плотности холста он составил в натуральном выражении от 150 до 350 г/м², а для доли вложения бикомпонентных волокон – от 20 до 40%. Определим значения факторов в центре интервала

$$X_{ci} = (X_{ni} + X_{oi}) / 2, \quad (1)$$

где X_{ni} – нижнее значение i -го фактора в интервале варьирования;

X_{oi} – верхнее значение i -го фактора в интервале варьирования.

Тогда $X_{o1} = (150 + 350)/2 = 250$ г/м², $X_{o2} = (20 + 40)/2 = 30\%$.

Выполним перевод натуральных значений факторов в кодированные:

$$x_i = (X_i - X_{ci}) / I_i, \quad (2)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора;

X_i – натуральное значение i -го фактора;

I_i – шаг изменения i -го фактора.

$$I_i = (X_{oi} - X_{ni}) / 2. \quad (3)$$

Тогда $I_1 = (350 - 150)/2 = 100$ г/м², $I_2 = (40 - 20)/2 = 10\%$.

По формуле (2) получено соответствие кодированных факторов натуральным значениям: кодированное значение фактора, равное -1 , соответствует нижнему значению фактора в натуральном выражении, 0 – центральному значению, $+1$ – верхнему значению.

Матрица планирования КОНО-2 подразумевает проведение опытов в точках, сочетающих все возможные комбинации нижнего, центрального, верхнего уровней первого и второго факторов. Так как

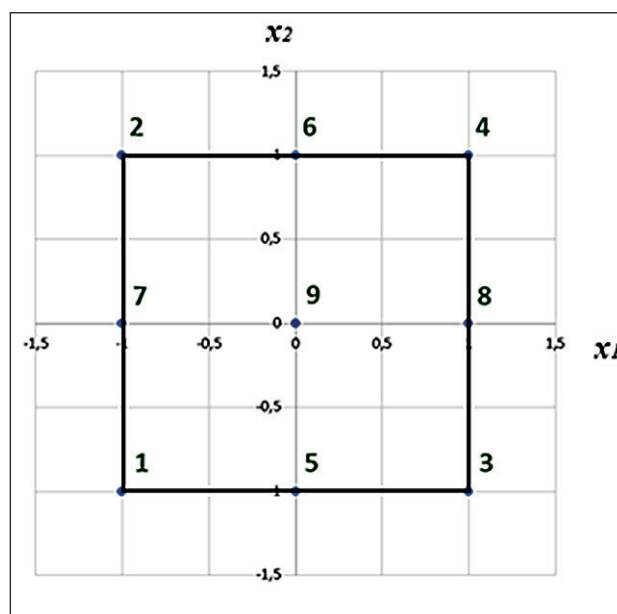


Рис. 2. Уровни варьирования факторов для матрицы планирования КОНО-2

факторов два, они имеют три уровня варьирования, то количество опытов будет равно девяти. Данные точки представлены на рисунке 2 для кодированных значений. Цифрами пронумерован порядок проведения опытов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с планом КОНО-2 были выработаны девять образцов нетканых полотен, проведены исследования их свойств, обработаны результаты экспериментов [14] и получены математические модели для пяти критериев [15, 16], представленные в таблице 1.

Строительный утеплитель должен обладать повышенной воздухопроницаемостью, что говорит о большом количестве пор, следовательно, о хорошей теплоизоляции рассматриваемого материала. Также полотно должно быть прочное и достаточно растяжимое, чтобы предотвратить его разрушение при деформации.

Для каждой модели была проведена оптимизация [14] с использованием среды MathCAD. Найлены значения факторов в кодированном виде (табл. 2), при которых функции достигают максимальных значений с учетом двухсторонних ограничений $-1 \leq x_1 \leq 1$, $-1 \leq x_2 \leq 1$.

Как видно из табл. 2, результаты вычислений для каждого критерия в отдельности показали разные оптимальные точки. Таким образом, перед нами стоит многокритериальная задача для определения образца с наилучшими эксплуатационными свойствами.

Таблица 1. Математические модели свойств нетканого полотна

№	Свойство (критерий оптимизации)	Регрессионные модели с кодированными значениями факторов
1	Воздухопроницаемость	$Q(x_1, x_2) = 87,6 - 23,0x_1 - 6,3x_2 + 18,7x_1^2 - 3,3x_2^2 + 0,3x_1x_2$
2	Абсолютная разрывная нагрузка в продольном направлении	$F_L(x_1, x_2) = 100,70 - 3,78x_1 + 51,50x_2 + 21,78x_1^2 - 2,72x_2^2 - 26,42x_1x_2$
3	Абсолютная разрывная нагрузка в поперечном направлении	$F_B(x_1, x_2) = 24,81 + 3,00x_1 + 8,61x_2 + 9,11x_1^2 - 7,06x_2^2 - 10,33x_1x_2$
4	Относительное разрывное удлинение в продольном направлении	$\varepsilon_L(x_1, x_2) = 50,44 - 0,83x_1 - 9,89x_2 - 7,17x_1^2 + 12,00x_2^2 + 6,17x_1x_2$
5	Относительное разрывное удлинение в поперечном направлении	$\varepsilon_B(x_1, x_2) = 75,07 + 3,56x_1 - 21,44x_2 - 3,11x_1^2 + 17,89x_2^2 - 5,75x_1x_2$

Таблица 2. Результаты оптимизации для каждого критерия

Критерий	Максимальное значение функции F_{jmax}	Кодированные значения факторов для F_{jmax}	
		x_1	x_2
$Q, \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$	132,6	-1	-1
F_L, H	201,5	-1	+1
F_B, H	37,0	+1	-0,122
$\varepsilon_L, \%$	74,0	-0,488	-1
$\varepsilon_B, \%$	120,6	+1	-1

Существуют различные методы решения таких задач, которые делятся на две группы. В первой группе многокритериальная задача преобразуется в однокритериальную тем или иным способом: с помощью выделения главного критерия, построения комплексного показателя эффективности или последовательной оптимизации частных показателей эффективности. Методы второй группы находят решение многокритериальной задачи путем определения множества компромиссных вариантов. К этой группе относится подход, предложенный итальянским экономистом В. Парето, основанный на понятии парето-оптимальных решений [18].

Для решения нашей задачи выберем метод построения комплексного показателя эффективности, что предполагает объединение всех частных показателей. Объединение критериев в комплексный показатель осуществляется с помощью формулы [19]:

$$F_c(X) = \sum_{i=1}^k c_j F_j(X), \quad (4)$$

где c_j – весовые коэффициенты, знак которых зависит от совпадения целей оптимизации частных показателей эффективности с комплексным (при совпадении целей знак положительный, при несовпадении – отрицательный); $F_j(X)$ – частный показатель.

Коэффициенты c_j безразмерны, для решаемой задачи приняты равнозначные значения коэффициентов для всех частных показателей, т.е. $c_j = 0,2$.

В нашем случае частные показатели эффективности имеют различную размерность. Поэтому для составления функции, характеризующей комплексный показатель, необходимо перейти от $F_j(X)$ к безразмерной форме $\Psi_j(X)$.

При известных минимальных F_{jmin} и максимальных F_{jmax} значениях частных показателей эффективности преобразование в безразмерную форму осуществляется по формуле:

$$\Psi_j(X) = \frac{F_j(X) - F_{jmin}}{F_{jmax} - F_{jmin}}. \quad (5)$$

Формула комплексного показателя (4) с учетом выражения (5) примет вид:

$$F_c(X) = \sum_{i=1}^k c_j \Psi_j(X). \quad (6)$$

Расчеты проводились в среде MathCAD с помощью встроенных функций для выполнения оптимизации. Максимальные значения для каждого критерия были определены ранее (табл. 2), потребовалось найти минимальные значения критериев. Результаты занесены в таблицу 3.

Таблица 3. Определение минимальных значений для каждого критерия

Критерий	Минимальное значение функции F_{jmin}	Кодированные значения факторов для F_{jmin}	
		x_1	x_2
$Q, \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}^2$	71,1	0,607	+1
$F_L, \text{ Н}$	40,6	-0,520	-1
$F_B, \text{ Н}$	4,3	-0,732	-1
$\varepsilon_L, \%$	38,7	-1	0,669
$\varepsilon_B, \%$	65,5	-1	0,439

Тогда безразмерная форма частных показателей примет вид:

1. Воздухопроницаемость

$$\Psi_1(x_1, x_2) = 0,268 - 0,374x_1 - 0,102x_2 + 0,304x_1^2 - 0,054x_2^2 + 0,005x_1x_2.$$

2. Абсолютная разрывная нагрузка в продольном направлении

$$\Psi_2(x_1, x_2) = 0,374 - 0,023x_1 + 0,320x_2 + 0,135x_1^2 - 0,017x_2^2 - 0,164x_1x_2.$$

3. Абсолютная разрывная нагрузка в поперечном направлении

$$\Psi_3(x_1, x_2) = 0,627 + 0,092x_1 + 0,263x_2 + 0,279x_1^2 - 0,216x_2^2 - 0,316x_1x_2.$$

4. Относительное разрывное удлинение в продольном направлении

$$\Psi_4(x_1, x_2) = 0,333 - 0,024x_1 - 0,280x_2 - 0,200x_1^2 + 0,340x_2^2 + 0,175x_1x_2.$$

5. Относительное разрывное удлинение в поперечном направлении

$$\Psi_5(x_1, x_2) = 0,174 + 0,065x_1 - 0,389x_2 - 0,056x_1^2 + 0,325x_2^2 - 0,104x_1x_2.$$

Комплексный показатель в соответствии с формулой (6) и значениями коэффициентов c_j примет следующий вид:

$$F_c(X) = 0,355 - 0,053x_1 - 0,038x_2 + 0,092x_1^2 + 0,076x_2^2 - 0,081x_1x_2. \quad (7)$$

Проведем оптимизацию функции (7) с учетом двусторонних ограничений $-1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1$. Определение точки оптимума комплексного показателя выполнено в среде MathCAD с помощью функции Maximize, найдены координаты этой точки $x_1 = -1, x_2 = 1$ (рис. 3).

Линии равного уровня функции комплексного показателя представлены на рисунке 4.

Тогда оптимальное значение поверхностной плотности холста в натуральном выражении составит $150 \text{ г}/\text{м}^2$, что соответствует нижнему уровню первого фактора, а доля вложения бикомпонентных волокон – 40%, что соответствует верхнему уровню второго фактора. При этом рассмотренные свойства строительного утеплителя из шерсти будут иметь следующие значения: $Q = 119,4 \text{ м}^3/(\text{мин}\cdot\text{м}^2)$, $F_L = 201,46 \text{ Н}$, $F_B = 42,8 \text{ Н}$, $\varepsilon_L = 40,15\%$, $\varepsilon_B = 70,6\%$.

Для придания огне- и биостойкости образцы следует обработать соответствующими препаратами на этапе отделки при производстве.

В работе был проведен эксперимент по приданию негорючести и огнестойкости оптимальному образцу нетканого полотна, выбранному в результате предварительного эксперимента по оптимизации.

В качестве продукта для придания огнестойкости был выбран антипирен Фогинол-2, представляет собой смесь водорастворимых солей анионноактивных фосфорсодержащих соединений. Испытания на огнестойкость проводили по международному стандарту FAR 25853, при вертикальном расположении испытуемого образца.

Результаты эксперимента показали, что при любом режиме нанесения антипирена на объемное нетканое полотно наблюдается повышение показателей огнестойкости и негорючести. Образцы, пропитанные антипиреном, по сравнению с необработанным исходным меньше выделяют горючих газов, отсутствует каплепадение, меньше зона обугливания.

$x_{\max} := \text{Maximize}(F, x_1, x_2)$

Точка оптимума

$$x_{\max} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Определение точки оптимума комплексного показателя

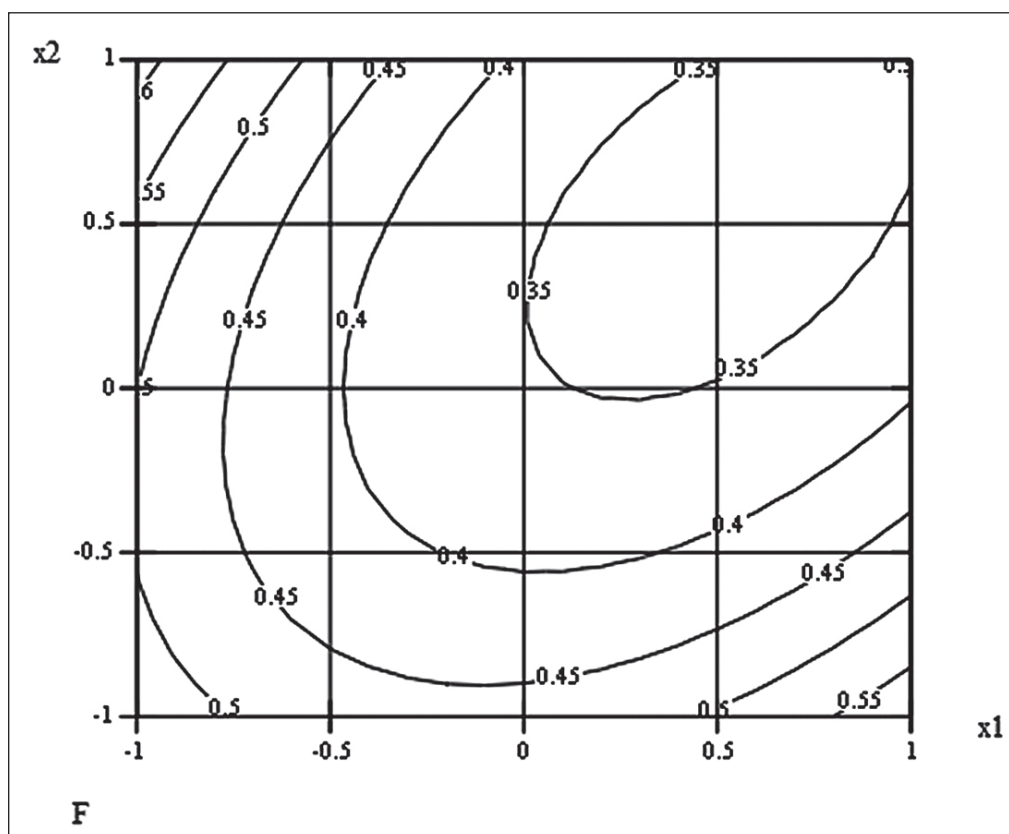


Рис. 4. Линии равного уровня

При удалении источника горения происходит быстрое самозатухание образцов.

Пропитка антипиреном создает защитную пленку на волокнах и в структуре нетканого полотна, которая препятствует процессу горения:

- снизить вероятность воспламенения нетканого полотна при возникновении источника горения;
- значительно снизить распространение пожара;
- увеличить время покидания места пожара.

ВЫВОДЫ

Разработана технология получения объемных нетканых теплоизоляционных полотен строительного назначения, в качестве сырья для получения нетканых полотен использовалась смесь волокон, состоящая из шерстяного сырья, грубой и полугрубой отечественной овечьей шерсти и легкоплавкого бикомпонентного полиэфирного волокна.

Проведена многокритериальная оптимизация для определения образца с наилучшими эксплуатационными свойствами: повышенной воздухопроницаемостью, прочностью и достаточной растяжимостью.

Проведен эксперимент по приданию негорючести и огнестойкости оптимальному образцу нетканого полотна.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методов многокритериальной оптимизации для анализа текстильных процессов.

В частности, использование комплексного безразмерного показателя позволило подобрать оптимальные параметры производства нетканого строительного утеплителя из шерсти, обеспечивающие соответствие требуемым эксплуатационным характеристикам по всем пяти ключевым показателям.

Изучение и оптимизация нанопористой структуры нетканых строительных материалов из шерсти и бикомпонентных полиэфирных волокон является важным направлением для разработки новых материалов с улучшенными тепло- и звукоизоляционными свойствами, способствующих созданию комфортного и экологически безопасного жилья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительные утеплители являются важной составляющей современных технологий. Исследования в области нанопористых нетканых строительных материалов из шерсти и бикомпонентных полиэфирных волокон открывают широкие перспективы для создания новых материалов с улучшенными

эксплуатационными характеристиками: разработку методов контроля и управления формированием нанопористой структуры для достижения оптимального сочетания тепло- и звукоизоляционных свойств.

Использование экологически чистых и возобновляемых материалов, таких как шерсть, служит для создания энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Радаев В.В., Голованова С.В., Конрой Н.В., Котельникова З.В. *Стратегия развития текстильной и швейной промышленности Российской Федерации до 2035 года*. Нац. Исследовательский университет «Высшая школа экономики». Москва: Издательство: Изд. дом Высшей школы экономики. 2024;488. ISBN: 978-5-7598-2998-0, <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2998-0> – EDN: MUXITA.
2. Кричевский Г.Е. *Нано-, био-, химические технологии в производстве нового поколения волокон, текстиля и одежды*. – 1-е изд. Москва: 2011;528.
3. Кричевский Г.Е. *Все или почти все о текстиле. Технический, защитный и медицинский текстиль и одежда*. Учебное пособие Т. 3. Москва: Издательство Рос. заоч. ин-т текстил. и лег. пром-сти. 2013. 240 с. ISBN 978-5-91146-814-9.
4. Кричевский Г.Е. *Теория. Основы нанотехнологий*. Основы нанотехнологий: учебное пособие. Т. 1. Москва: Издательство: Грин Принт. 2022;570, ISBN 978-5-907286-70-2.
5. Кричевский Г.Е. *Теория, основы нанотехнологий. Использование нанотехнологий в различных областях науки и техники*. Основы нанотехнологий: учебное пособие. Т. 2. Москва: Издательство: БОС.: Грин Принт. 2022;726, ISBN 978-5-907286-85-6.
6. Трещалин Ю.М., Трещалин М.Ю. *Физика нетканых материалов*. Москва: Издательство: БОС. 2024;172 с. ISBN: 978-5-905117-79-4. – EDN: YERTUN.
7. Пророкова Н.П., Иванов В.В. *Инновационные физико-химические способы модификации нетканых материалов*. Монография. Москва: Издательство: БОС. 2025;400.
8. ГОСТ 16381-2022. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация. Общие технические требования.
9. Fedorova N.E., Razumeev K.E. Modeling of fiber movement track in needle system. *Fibre Chemistry*. 2024; 56(2):95-97. <https://doi.org/10.1007/s10692-024-10525-y> – EDN: PABFEF.
10. ГОСТ 30702-2000. Шерсть. Торговая сельскохозяйственно-промышленная классификация. – Минск: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001;16.
11. Разумеев К.Э. Сырье для предприятий шерстяной отрасли промышленности: *Конспект лекций, 2-е издание*. Москва: Издательство МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2003;205.
12. Разумеев К.Э., Калямина Е.Ю., Аниськова В.А., Федорова Н.Е., Егоров М.А., Козлов А.А. Получение нетканых материалов технического назначения. *Химические волокна*. 2023;2:67-70.
13. Korolev N.A., Razumeev K.E., Polyakova T.I., Fedorova N.E., Wagner V.I. Comparative analysis of air-permeability of nonwovens produced by various technologies from secondary polyester fibers. *Fibre Chemistry*. 2023; 55(3):142-145. <https://doi.org/10.1007/s10692-023-10448-0> – EDN: ZOTTSS.
14. Севостьянов А.Г. *Методы и средства исследований механико-технологических процессов*. Учебник для вузов. Москва: Издательство МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2007;648.
15. Москвина А.В., Королева Н.А. Исследование свойств строительного теплоизоляционного нетканого материала из шерсти. *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием (ИНТЕКС – 2025)*. Москва: Издательство ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». 2025. Часть 2. С. 90–93. – EDN: MRJXOW.
16. Москвина А.В., Королева Н.А. Оптимизация физико-механических свойств строительного нетканого утеплителя из шерсти // Сборник научных трудов Всероссийского конкурса «Лучшая научно-исследовательская работа в области текстильного материаловедения, оценки и обеспечения качества одежды» (24–31 марта 2025 г.). – М: РГУ им. А.Н. Косыгина. 2025;112-117. – EDN: YILRMC.
17. Севостьянов П.А. *Динамика и модели основных процессов прядения: Рыхление, очистка, смешивание, кардо- и гребнечесание, вытягивание, дискретизация, штапельирование, кручение, намотка, перематка*. Монография. – Москва: ООО «КЛУБ-ПЕЧАТИ». 2021;592. ISBN: 978-5-00181-060-5. – EDN: HGBVTT.

18. Королева Н.А., Полякова Т.И., Грязнова Е.В., Голайдо С.А. Многокритериальная оптимизация параметров нетканого геотекстиля для укрепления откосов земляного полотна. *Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности*. 2021;5(395):217–222. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_5_217 – EDN: PLPSEJ.

19. Королева Н.А., Полякова Т.И. Методы решения задач многокритериальной оптимизации в текстильной промышленности. *Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности» III Международного Косыгинского Форума «Современные задачи инженерных наук»* (20–21 октября 2021 г.). Москва: Издательство РГУ им. А.Н. Косыгина. Том 2., 2021. С. 89–92. – EDN: MOORLC.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Разумеев Константин Эдуардович – доктор технических наук, профессор кафедры Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство.), Вице-президент Международной и Российской инженерных академий, академик МИА и РИА, Москва, Российская Федерация, ker2210@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2455-9748>

Королева Наталия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и художественного оформления текстильных изделий Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Российская Федерация, koroleva-na@rguk.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5814-8661>

Федорова Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и художественного оформления текстильных изделий Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), член-корреспондент Российской инженерной академии, Москва, Российская Федерация, fedorova-ne@rguk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0273-5938>

Сичевой Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, ФГБУ «Российский сельскохозяйственный центр», член-корреспондент Российской инженерной академии, Москва, Российская Федерация, dmitriy.sichevoy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-1198-939X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Разумеев К.Э. – научное консультирование, развитие методологии.

Королева Н.А. – концепция исследования, написание исходного текста.

Федорова Н.Е. – доработка текста, итоговые выводы.

Сичевой Д.В. – проектное администрирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.09.2025; одобрена после рецензирования 08.02.2026; принята к публикации 13.02.2026.