УДК 677.076.4
DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_217

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕТКАНОГО ГЕОТЕКСТИЛЯ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF NONWOVEN GEOTEXTILES FOR STRENGTHENING THE SLOPES OF THE SUBGRADE

Н.А. КОРОЛЕВА, Т.И. ПОЛЯКОВА, Е.В. ГРЯЗНОВА, С.А. ГОЛАЙДО

N.A. KOROLEVA, T.I. POLYAKOVA, E.V. GRYAZNOVA, S.A. GOLAJDO

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: koroleva-na@rguk.ru; polyakova-ti@rguk.ru; gryaznova-ev@rguk.ru; golajdo-sa@rguk.ru

Цель исследования заключается в проектировании нетканого геотекстиля для укрепления откосов земляного полотна с оптимальными параметрами разрывных характеристик.

Задачи исследования: изучить виды защитных конструкций, используемых для укрепления земляного полотна; рассмотреть последовательность укладки материалов при укреплении откосов с помощью объемных георешеток; предложить полотно, которое может быть использовано в данной конструкции в качестве геотекстиля; спланировать и провести эксперимент по определению механических свойств (разрывная нагрузка по длине и ширине полотна, разрывное удлинение по длине и ширине полотна) иглопробивного нетканого материала; выполнить обработку результатов эксперимента и получить математические модели четырех параметров механических свойств; проанализировать методы многокритериальной оптимизации; провести многокритериальную оптимизацию параметров нетканого геотекстиля; дать рекомендации по производству нетканого геотекстиля с оптимальными разрывными характеристиками.

В исследовании применен метод многокритериальной оптимизации с помощью комплексного показателя эффективности; эксперимент проводился по матрице планирования КОНО-2.

В результате определены оптимальные параметры нетканого геотекстиля: разрывная нагрузка по длине полотна 849,9 Н, по ширине полотна – 286,9 Н, разрывное удлинение по длине полотна 104,5 %, по ширине полотна – 178,6 % при поверхностной плотности 250 г/м^2 и числе проколов 196 см$^{-2}$.

The purpose of the study is to design a nonwoven geotextile for strengthening the slopes of the subgrade with optimal parameters of breaking characteristics.

Research objectives: to study the types of protective structures used to strengthen the subgrade; consider the sequence of laying materials when strengthening slopes using volumetric geogrids; offer a canvas that can be used in this design as a geotextile; plan and conduct an experiment to determine the mechanical properties (breaking load along the length and width of the web, breaking elongation along the length and width of the web) of a needle-punched nonwoven fabric; to process the results of the experiment and obtain mathematical models of four parameters of mechanical properties; consider methods of multi-criteria optimization; to carry out multi-criteria optimization of the parameters of nonwoven geotextile; give recommendations for the production of non-woven geotextiles with optimal breaking characteristics.

In the study the method of multi-criteria optimization with a complex performance indicator was used; the experiment was carried out according to the planning matrix KONO-2.

As a result, the optimal parameters of nonwoven geotextile were determined: breaking load along the length of the cloth 849,9 N, along the width of the cloth – 286,9 N, breaking elongation along the length of the cloth 104,5%, along the width of the cloth – 178,6% at a surface density of 250 g/m^2 and the number of punctures 196 cm^{-2}.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, комплексный показатель, регрессионная модель, нетканые материалы, геотекстиль.

Keywords: multi-criteria optimization, complex indicator, regression model, nonwovens, geotextile.

Защитные конструкции, используемые для укрепления земляного полотна, могут быть разных видов:

- решетчатые, сборные, облегченные, с заполнением ячеек растительным грунтом;
- конструкции из объемных георешеток с заполнением ячеек растительным грунтом;
- термозащитные слои;
- конструкции из набрызг-бетона по металлической сетке [1].

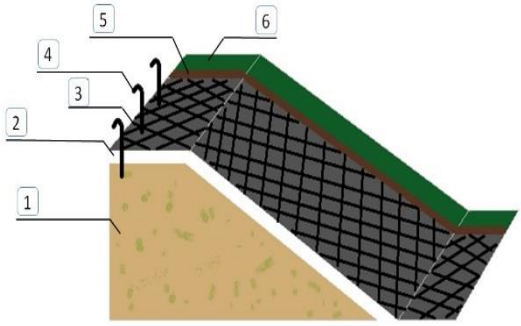

Рис. 1

Один из таких видов формируют следующим образом (рис. 1 – схема укладки материалов при укреплении откосов): на выровненную поверхность 1 укладывают геотекстиль 2, затем размещают объемную георешетку 3. Крепление георешетки к склону и между собой производится с помощью анкеров 4. Далее ячейки георешетки засыпают растительным грунтом 5, поверх которого сеют газон 6 [2].

Для использования в качестве геотекстильных полотен подходят нетканые иглопробивные материалы, так как они обладают требуемыми разрывными характеристиками. Кроме того, в отличие от тканых полотен такой способ производства позволяет сократить технологический цикл за счет использования волокон без выработки пряжи, что приводит к уменьшению себестоимости материала.

Для проведения оптимизации были выработаны образцы полотна и проведены испытания этих образцов на разрывной машине [3]. В

качестве факторов были выбраны поверхностная плотность полотна (x_1) и число проколов (x_2). В табл. 1 представлены натуральные и кодированные значения факторов. Для проведения эксперимента была использована матрица планирования КОНО-2 [4], [5].

Таблица 1

Условия проведения эксперимента	Натуральные значения факторов		Кодированные значения факторов	
	X_1, г/м^2	X_2, см$^{-2}$	x_1	x_2
Интервал варьирования фактора	100	100	1	1
Верхний уровень фактора	350	300	+1	+1
Основной уровень фактора	250	200	0	0
Нижний уровень фактора	150	100	-1	-1

В табл. 2 приведены средние значения параметров, определенных на разрывной машине РТ-250: разрывная нагрузка по длине $\overline{P}_L$ и ширине $\overline{P}_B$ полотна; разрывное удлинение нетканого материала по длине $\overline{\varepsilon}_L$ и ширине $\overline{\varepsilon}_B$ полотна [6].

Таблица 2

Номер опыта	x_1	x_2	$\overline{P}_L$, Н	$\overline{P}_B$, Н	$\overline{\varepsilon}_L$, %	$\overline{\varepsilon}_B$, %
1	–	–	334,3	35,3	103,7	149,7
2	+	–	918,0	206,0	93,0	174,7
3	–	+	351,7	119,7	101,0	118,0
4	+	+	929,3	428,7	87,0	139,7
5	–	0	342,3	110,3	112,7	150,0
6	+	0	920,3	353,7	96,0	167,3
7	0	–	730,0	118,0	98,3	185,3
8	0	+	741,7	268,0	83,7	154,0
9	0	0	733,7	227,7	115,0	174,0

В итоге обработки результатов эксперимента получены регрессионные модели с кодированными значениями факторов для четырех критериев.

1. Разрывная нагрузка по длине полотна

$$P_L = 733{,}74 + 283{,}89x_1 + 6{,}72x_2 - 102{,}44x_1^2 + 2{,}06x_2^2 - 1{,}5x_1x_2.$$

2. Разрывная нагрузка по ширине полотна:

$$P_B = 229{,}19 + 117{,}39x_1 + 56{,}11x_2 + 3{,}72x_1^2 - 21{,}11x_2^2 - 10{,}50x_1x_2.$$

3. Разрывное удлинение по длине полотна:

$$\varepsilon_L = 107{,}96 - 6{,}89x_1 - 13{,}44x_2^2.$$

4. Разрывное удлинение по ширине полотна:

$$\varepsilon_B = 177{,}93 + 10{,}67x_1 - 16{,}33x_2 - 21{,}22x_1^2 - 10{,}22x_2^2.$$

Подбор оптимальных параметров нетканого полотна в данном случае приводит к многокритериальной задаче, так как необходимо выполнить требования к материалу

по нескольким разрывным характеристикам.

Методы решения многокритериальных задач можно разделить на две группы. В первой группе многокритериальная задача тем или иным способом преобразуется в одну или несколько однокритериальных задач. Во второй группе осуществляется построение множества компромиссных решений непосредственно многокритериальной задачи [7...9].

Построение комплексного показателя эффективности предполагает объединение всех частных показателей, что позволяет преобразовать многокритериальную оптимизационную задачу в однокритериальную. Объединение критериев в комплексный показатель осуществляется с помощью формулы [6]:

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

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, то есть $c_j = 0{,}25$.

В нашем случае частные показатели эффективности (нагрузка и удлинение) имеют различную размерность. Поэтому для составления функции, характеризующей комплексный показатель, необходимо перейти к безразмерной форме $F_j(X)$, то есть к $\psi_j(X)$.

Если известны минимальные F_{jmin} и максимальные F_{jmax} значения частных показателей эффективности, то преобразование в безразмерную форму осуществляется по формуле [10]:

$$\psi_j(X) = \frac{[F_j(X) - F_{jmin}]}{[F_{jmax} - F_{jmin}]}. \qquad (2)$$

С учетом выражения (2) формула комплексного показателя (1) примет вид:

$$F_c(X) = \sum_{i=1}^{k} c_j \psi_j(X). \qquad (3)$$

Так как для каждого критерия получена регрессионная модель, то для всех частных показателей можно определить максимальное и минимальное значение. Выполним оптимизацию полученных моделей для всех критериев с учетом двухсторонних ограничений:

$$-1 \le x_1 \le 1,$$
$$-1 \le x_2 \le 1.$$

Расчеты проведены в среде MathCAD с помощью функций Maximize и Minimize. В табл. 3 приведены максимальные и минимальные значения функций для всех частных показателей.

Таблица 3

Вид функции (показателя)	Минимальное значение функции F_{jmin}	Кодированные значения факторов для F_{jmin}		Максимальное значение функции F_{jmax}	Кодированные значения факторов для F_{jmax}	
		x_1	x_2		x_1	x_2
P_L	341,3	–1	–1	922,5	1	1
P_B	27,8	–1	–1	374,8	1	1
ε_L	101,1	1	0	114,8	–1	0
ε_B	119,5	–1	1	185,8	0,25	–0,80

Далее перейдем к безразмерной форме частных показателей.

1.

2. Разрывная нагрузка по длине полотна:

$$\psi_1(X) = 0{,}675 + 0{,}488x_1 + 0{,}012x_2 - 0{,}176x_1^2 + 0{,}004x_2^2 - 0{,}003x_1x_2.$$

3. Разрывная нагрузка по ширине полотна:

$$\psi_2(X) = 0{,}580 + 0{,}338x_1 + 0{,}162x_2 + 0{,}110x_1^2 - 0{,}061x_2^2 - 0{,}031x_1x_2.$$

4. Разрывное удлинение по длине полотна:

$$\psi_3(X) = 0{,}501 - 0{,}503x_1 - 0{,}981x_2^2.$$

5. Разрывное удлинение по ширине полотна:

$$\psi_4(X) = 0{,}881 + 0{,}161x_1 - 0{,}246x_2 - 0{,}320x_1^2 - 0{,}154x_2^2.$$

В соответствии с формулой (3) и значениями коэффициентов c_j комплексный показатель примет вид:

$$F_c(X) = 0{,}659 + 0{,}121x_1 - 0{,}018x_2 - 0{,}121x_1^2 - 0{,}298x_2^2 - 0{,}008x_1x_2$$

Given

Ограничения

$-1 \le x1 \le 1$

$-1 \le x2 \le 1$

xmax := Maximize(F, x1, x2)

Точка оптимума

$xmax = \begin{pmatrix} 0.5 \\ -0.038 \end{pmatrix}$

$PL(xmax_0, xmax_1) = 849.934$

$Pb(xmax_0, xmax_1) = 286.928$

$EL(xmax_0, xmax_1) = 104.493$

$Eb(xmax_0, xmax_1) = 178.554$

Рис. 2

Для полученной функции проведем условную оптимизацию при наличии двусторонних ограничений $-1 \le x_1 \le 1$, $-1 \le x_2 \le 1$. На рис. 2 приведен порядок решения задачи с помощью функции Maximize в среде MathCAD. В результате максимизации комплексного показателя получены кодированные значения факторов $x_1 = 0{,}500$, $x_2 = -0{,}038$. Графическое представление функции комплексного показателя и его оптимума приведено на рис. 3 в виде линий равного уровня.

По табл. 1 определим, что поверхностная плотность полотна должна быть равна 250 г/м^2, а число проколов – 196 см$^{-2}$. При таких факторах иглопробивное полотно будет обладать оптимальными характеристиками по четырем критериям: $P_L = 849{,}9$ Н, $P_B = 286{,}9$ Н, $\varepsilon_L = 104{,}5$ %, $\varepsilon_B = 178{,}6$ %.

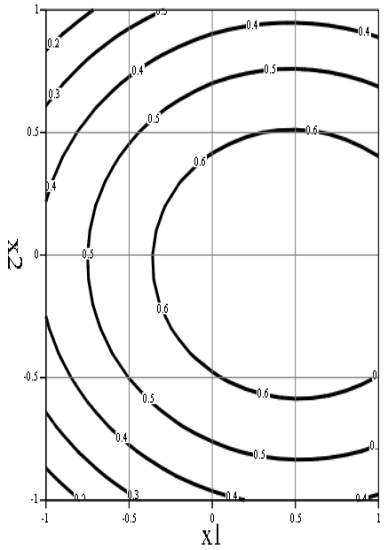

Рис. 3

ВЫВОДЫ

Результаты работы показывают возможность использования методов многокритериальной оптимизации для исследования текстильных процессов.

Рассмотренный метод с использованием комплексного безразмерного показателя позволил найти значения факторов, при которых нетканый геотекстиль будет обладать требуемыми эксплуатационными свойствами по всем четырем показателям разрывных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. СТО НОСТРОЙ 2.25.24–2011. Строительство земляного полотна для автомобильных дорог. Часть 2. Работы отделочные и укрепительные при возведении земляного полотна. – М.: Национальное объединение строителей; НП «МОД «Союздорстрой», 2012. С. 9...10.

2. *Королева Н.А., Лукашина Л.С.* Оптимизация механических свойств иглопробивного нетканого материала для укрепления откосов земляного полотна // Сб. научн. тр. Всерос. круглого стола с международным участием: Проблемы текстильной отрасли и пути их решения (22 декабря 2020 г.). – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2021. С. 109...114.

3. ГОСТ 15902.3–79. Полотна нетканые. Методы определения прочности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1979.

4. *Юхин С.С., Назарова М.В., Бойко С.Ю., Фефелова Т.Л.* Исследование технологического процесса выработки двухслойной ткани, обладающей максимальной прочностью на раздирание // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности – 2019, № 4. С. 13...17.

5. *Юхин С.С., Назарова М.В., Бойко С.Ю., Романов В.Ю.* Математическое моделирование процесса получения тканых материалов, используемых для изготовления композитов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности – 2017, № 3. С.136...140.

6. *Королева Н.А., Лукашина Л.С.* Автоматизированный анализ свойств нетканого геотекстиля для укрепления откосов земляного полотна // Сб. мат. Всерос. научн. конф. молодых исследователей с Междунар. участием: Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. Часть 1. – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2021. С. 161...164.

7. *Wan S., Dong J., Chen S.-M.* Fuzzy best-worst method based on generalized interval-valued trapezoidal fuzzy numbers for multi-criteria decision-making. // Information Sciences. – 2021, 573. P. 493…518.

8. *Noskov S.I.* Compromise Pareto Estimates of Linear Regression Parameters // Mathematical Models and Computer Simulations – 2021, 1(4). P. 586...590.

9. *Tavčar J., Cerne B., Duhovnik J., Zorko D.* A multicriteria function for polymer gear design optimization. // Journal of Computational Design and Engineering – 2021, 8(2). P. 581...599.

10. *Севостьянов А.Г., Севостьянов П.А.* Оптимизация механико-технологических процессов текстильной промышленности. – М.: Легпромбытиздат, 1991.

REFERENCES

1. STO NOSTROY 2.25.24–2011. Stroitel'stvo zemlyanogo polotna dlya avtomobil'nykh dorog. Chast' 2. Raboty otdelochnye i ukrepitel'nye pri vozvedenii zemlyanogo polotna. – M.: Natsional'noe ob"edinenie stroiteley; NP «MOD «Soyuzdorstroy», 2012. S. 9...10.

2. Koroleva N.A., Lukashina L.S. Optimizatsiya mekhanicheskikh svoystv igloprobivnogo netkanogo materiala dlya ukrepleniya otkosov zemlyanogo polotna // Sb. nauchn. tr. Vseros. kruglogo stola s mezhdunarodnym uchastiem: Problemy tekstil'noy otrasli i puti ikh resheniya (22 dekabrya 2020 g.). – M.: RGU imeni A.N. Kosygina, 2021. S. 109...114.

3. GOST 15902.3–79. Polotna netkanye. Metody opredeleniya prochnosti. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 1979.

4. Yukhin S.S., Nazarova M.V., Boyko S.Yu., Fefelova T.L. Issledovanie tekhnologicheskogo pro-tsessa vyrabotki dvukhsloynoy tkani, obladayushchey maksimal'noy prochnost'yu na razdiranie // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.– 2019, № 4. S. 13...17.

5. Yukhin S.S., Nazarova M.V., Boyko S.Yu., Romanov V.Yu. Matematicheskoe modelirovanie protsessa polucheniya tkanykh materialov, ispol'zuemykh dlya izgotovleniya kompozitov // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2017, № 3. S.136...140.

6. Koroleva N.A., Lukashina L.S. Avtomatizirovannyy analiz svoystv netkanogo geotekstilya dlya ukrepleniya otkosov zemlyanogo polotna // Sb. mat. Vseros. nauchn. konf. molodykh issledovateley s Mezhdunar. uchastiem: Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologiy v promyshlennosti. Chast' 1. – M.: RGU imeni A.N. Kosygina, 2021. S. 161...164.

7. Wan S., Dong J., Chen S.-M. Fuzzy best-worst method based on generalized interval-valued trape-zoidal fuzzy numbers for multi-criteria decision-making // Information Sciences. – 2021, 573. P. 493…518.

8. Noskov S.I. Compromise Pareto Estimates of Linear Regression Parameters // Mathematical Models and Computer Simulations – 2021, 1(4). P. 586...590.

9. Tavčar J., Cerne B., Duhovnik J., Zorko D. A multicriteria function for polymer gear design optimization. // Journal of Computational Design and Engineering – 2021, 8(2). P. 581...599.

10. Sevost'yanov A.G., Sevost'yanov P.A. Opti-mizatsiya mekhaniko-tekhnologicheskikh protsessov tekstil'noy promyshlennosti. – M.: Legprombytizdat, 1991.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума. Поступила 20.09.21.