

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.731.85

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59

Метод деформируемого симплекса применительно к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава

Е.С. Буданова, В.А. Ярмолинский, Е.А. Гриценко, Е.С. Егоров

Екатерина Сергеевна Буданова^{1*,2}, Владимир Аполенарьевич Ярмолинский², Егор Сергеевич Егоров¹

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация,

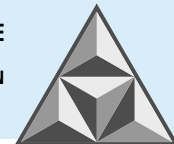
²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

budanovae@ystu.ru, 1057289@madiasu.onmicrosoft.com, egoroves@ystu.ru*

Елена Александровна Гриценко³

³Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация

gritsenko.lena@yandex.ru



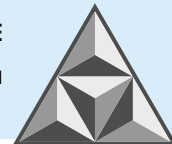
Исследованы факторы, влияющие на эффективность применения технологии холодного ресайклинга для ремонта автомобильных дорог. Изучено влияние состава асфальтогранулобетона на его прочность при непрямом растяжении на раскол и коэффициент водостойкости. Применен способ оценки порядка поверхности отклика в ортогональном планировании для двух факторов; на плоскости приведены аргументы столбчатых диаграмм с численными значениями функции и аппликатами. С использованием метода деформируемого симплекса получена характеристика ожидаемой трехмерной формы поверхности отклика. Результаты исследований позволяют минимизировать время, необходимое для проведения проектных работ в области дорожного строительства, и добиться существенной экономии материалов и трудовых ресурсов.

Ключевые слова: холодный ресайклинг, асфальтогранулобетонная смесь, дорожная одежда, скелетный материал, прочность, водостойкость, планирование эксперимента

Для цитирования:

Буданова Е.А., Ярмолинский В.А., Гриценко Е.А., Егоров Е.С. Метод деформируемого симплекса применительно к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 46-59.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59

The deformable simplex method applied to the study of strength and water resistance of asphalt granuloconcrete depending on its composition

E.S Budanova, V.A. Yarmolinsky, E.A. Gritsenko, E.S. Egorov

Ekaterina Sergeevna Budanova^{1*}, Vladimir Apolenaryevich Yarmolinsky², Egor Sergeevich Egorov¹

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

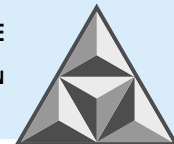
²Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russian Federation

budanovaes@ystu.ru^{}, 1057289@madiasu.onmicrosoft.com, egoroves@ystu.ru*

Elena Aleksandrovna Gritsenko³

³Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

gritsenko.lena@yandex.ru



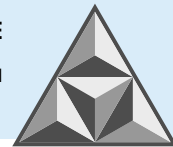
The paper investigates the factors affecting the effectiveness of cold recycling technology for road repair. The authors have investigated the effect of asphalt granuloconcrete composition on indirect split tensile strength and water resistance coefficient. The authors applied the method of response surface order estimation in orthogonal planning for two factors. The arguments of bar diagrams with numerical values of the function and applications are given on the plan view. Using the deformable simplex method, the authors constructed and characterised the expected three-dimensional shape of the response surface. The results minimise the time required for design work in road construction and achieve significant savings on materials and labour.

Keywords: cold recycling, asphalt granular concrete mix, road pavement, strength, water resistance, experiment planning

For citation:

Budanova E.A., Yarmolinsky V.A., Gritsenko E.A., Egorov E.S. The deformable simplex method applied to the study of strength and water resistance of asphalt granuloconcrete depending on its composition // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 46-59. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59



ВВЕДЕНИЕ

Холодный ресайклинг был разработан в 1930-х годах в США как альтернативный метод восстановления асфальтобетонных покрытий холодным способом. В России такая технология впервые применена под руководством Г.С. Бахраха на опытных участках трассы М1 «Беларусь». В 2002 году были разработаны первые «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации». С момента возникновения и по настоящее время технология холодного ресайклинга развивается по двум направлениям: первое – модернизация техники и способов регенерации, второе – расширение рецептур применяемых смесей [1, 2].

Развитие технологии, с точки зрения появления оборудования различных модификаций по мощности, производительности и автоматизации, обусловлено достижением цели создания конструктивных дорожных слоев с высокими физико-механическими свойствами.

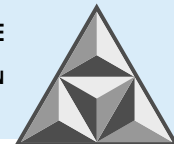
Существенную роль в эффективности применения холодного ресайклинга играет рационально подобранный состав асфальтогранулобетонной смеси. Данный вопрос на сегодняшний день остается открытым [3-7]. Нормативные документы, регламентирующие холодную регенерацию, носят рекомендательный характер, и не учитывают процесс структурообразования материалов, что препятствует дальнейшему прогнозированию эксплуатационных свойств конструктивного слоя дорожной одежды [8].

При выполнении работ по холодному ресайклингу необходимо предварительное проектирование состава смеси с учетом требований к исходному сырью. Компонентами, входящими в состав смеси, являются асфальтогранулят и/или переработанный асфальтобетон (RAP), скелетный материал, вяжущее, вода, а также (в отдельных случаях) минеральный порошок и улучшающие добавки.

Подбор состава включает назначение вида и количества вяжущего, а также определение рационального гранулометрического состава смеси. В действующих нормативных документах в качестве вяжущих фигурируют как минеральные, так и органические вещества, или же их комбинация; при этом отсутствуют сведения, в каких случаях следует применять тот или иной вариант. В части назначения количества вяжущего также присутствуют неточности: оно находится в диапазоне 2-4% сверх массы минерального заполнителя, при этом неясно, когда требуется использовать 2% вяжущих, а в каких условиях рекомендуется увеличить расход до 4%.

Помимо основных компонентов в составе асфальтогранулобетона, часто возникает необходимость дополнительного введения в него щебня, песка или щебеночно-песчаной смеси [9]. Вводимый каменный материал качественно отличается от гранул асфальтогранулята, а следовательно, различна их способность к участию в процессах структурообразования. Компонентный и агрегатный составы смеси формируют тип макроструктуры материала и его физико-механические свойства. Структурообразование асфальтогранулобетонов, являющихся сложными композитами, в настоящее время до конца не изучено, что связано с большим количеством факторов и эффектов взаимодействия компонентов смеси, степень влияния которых затруднительно прогнозировать на этапе проектирования состава [4].

Обеспечение эффективности холодного ресайклинга конструктивных слоев дорожных одежд особенно важно в неблагоприятных природно-климатических условиях эксплуатации автомобильных дорог. Избыточность увлажнения, частые переходы температур через нулевую отметку в совокупности с интенсивными динамическими нагрузками создают особые условия для обеспечения заданных уровней надежности региональных и межмуниципальных автомобильно-дорожных сетей страны [10].



Целью исследования является изучение формы и порядка поверхностей отклика функциональных зависимостей физико-механических свойств асфальтогранулобетона от количества вяжущего и доли асфальтогранулята. Задачи подобного рода решаются с использованием нелинейного программирования, при этом подходящим является метод деформируемого симплекса [11].

В основу теории планирования эксперимента заложены вероятностно-статистические методы, которые позволяют назначить минимально необходимое число опытов и порядок их проведения для получения количественной зависимости между изучаемым параметром и факторами, на него влияющими.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Математическая задача планирования эксперимента состоит в написании уравнения поверхности отклика, оценке порядка и наличия экстремальных областей и точек в назначенной области варьирования факторов. Количество опытов, необходимых для построения поверхности отклика при ортогональном планировании, определялось ее порядком и числом факторов. Его можно оценить по уравнениям:

$$\text{– для поверхностей первого порядка: } n = 2^k; \quad (1)$$

$$\text{– для поверхностей второго порядка: } n = 2^k + 2 \cdot k + n_0, \quad (2)$$

где k – число факторов;

n_0 – число опытов в центре плана.

При неизвестном порядке поверхности отклика, чтобы сэкономить материалы и трудовые ресурсы, планирование следует начинать с линейной зависимости функции от факторов, а в случае неадекватности линейного уравнения экспериментальным данным формируют опытную матрицу второго порядка.

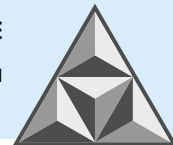
Таким образом, перед планированием эксперимента с выводом математического уравнения, включающего свободный член, линейные коэффициенты, эффекты взаимодействия и квадратичные эффекты, представляет интерес оценить ожидаемый порядок функциональной зависимости.

Порядок поверхности отклика в ортогональном планировании для двух факторов можно наглядно оценить на объемном 3d-графике при построении на плоскости аргументов столбчатых диаграмм с численными значениями функции и соединении их вершин линиями-аппликатами, по прямолинейности или изгибу которых можно охарактеризовать форму поверхности отклика. Чтобы построить такой график для двух факторов, необходимо провести девять испытаний.

Количество опытов для оценки формы поверхности можно уменьшить проведением исследований в вершинах начального и деформированного симплекса и в центре плана с построением 3d-диаграмм, соединяя вершины линиями-аппликатами. Для испытаний функции двух переменных необходимо провести семь опытов.

Значительное влияние на свойства асфальтогранулобетона оказывает добавление в качестве вяжущего портландцемента с совместным введением щебеночно-песчаной смеси (ЩПС), при этом снижение доли асфальтогранулята оказывает положительное влияние на прочность получаемых образцов.

Для построения исходного симплекса и последующего проведения опытов в качестве факторов назначены портландцемент М500 (ПЦ) и скелетный материал – ЩПС. Размерные координаты и интервалы варьирования факторов ПЦ (x_1) и ЩПС (x_2) в центре начального симплекса даны в табл. 1.

**Таблица 1.** Интервал варьирования и значения факторов**Table 1.** Variation interval and values of factors

Фактор	Значение фактора в центре начального симплекса, $x_{i/0}$, %		Интервал варьирования фактора, Δx_i , %
ПЦ	$x_{1/0}$	2 сверх массы	2
ЩПС	$x_{2/0}$	50 к массе асфальтогранулята	50

Количество опытов в начальном симплексе принято $k + 1$. При числе факторов $k = 2$ число опытов равно $2 + 1 = 3$ и начальным симплексом является треугольник.

Экспериментальные цилиндрические образцы асфальтогранулобетонной смеси диаметром 101.6 мм, высотой (63.5 ± 2.5) мм и массой 1150 г изготовлены с применением уплотнителя Маршалла в соответствии с методикой, изложенной в ОДМ 218.6.1.005-2021 (Приложение Б).

В качестве параметра оптимизации приняты предел прочности при непрямом растяжении и коэффициент водостойкости. Испытание экспериментальных образцов выполняли с учетом сроков достижения ими проектного возраста 7 сут. (рис. 1).



Рис. 1. Процесс испытания опытных образцов: а – водонасыщение; б – термостатирование; в – испытание на гидравлическом прессе

Fig. 1. Testing process of prototypes: a – water saturation; b – thermostating; c – hydraulic press test

Для определения коэффициента водостойкости опытные образцы разделены на две экспериментальные группы по три образца в каждой:

- группа 1 – образцы, выдержанные на воздухе;
- группа 2 – водонасыщенные образцы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

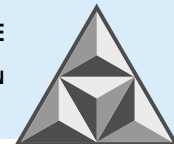
Факторы определены нами в каждом опыте начального симплекса:

Опыт № 1.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/1} = K_1 = \sqrt{\frac{1}{2i(i+1)}} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 1(1+1)}} = 0.5.$$

$$x_{1/1} = x_{1/0} + C_{1/1} \cdot \Delta x_1 = 2 + 0.5 \cdot 2 = 3.00\%.$$



– Фактор X_2 :

$$C_{2/1} = K_2 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 2(2+1)}} = 0.29.$$

$$x_{2/1} = 50 + 0.29 \cdot 50 = 64.50\%.$$

Опыт № 2.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/2} = -R_1 = -\sqrt{\frac{i}{2(i+1)}} = -\sqrt{\frac{1}{2(1+1)}} = -0.5.$$

$$x_{1/2} = x_{1/0} + C_{1/2} \cdot \Delta x_1 = 2 - 0.5 \cdot 2 = 1.00\%.$$

– Фактор X_2 :

$$C_{2/2} = K_2 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 2(2+1)}} = 0.29.$$

$$x_{2/2} = 50 + 0.29 \cdot 50 = 64.50\%.$$

Опыт № 3.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/3} = 0.$$

$$x_{1/3} = x_{1/0} + C_{1/3} \cdot \Delta x_1 = 2 + 0 \cdot 2 = 2.00\%.$$

– Фактор X_2 :

$$C_{2/3} = -R_2 = -\sqrt{\frac{i}{2(i+1)}} = -\sqrt{\frac{2}{2(2+1)}} = -0.57.$$

$$x_{2/3} = 50 - 0.57 \cdot 50 = 21.50\%.$$

Значения факторов в опытах 1-3 начального симплекса представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения факторов в начальном симплексе

Table 2. Factor values in the initial simplex

№ опыта в начальном симплексе	Значение фактора в начальном симплексе, %	
	X_1 (ПЦ)	X_2 (Щ/АГ)
1	3.00	64.50
2	1.00	64.50
3	2.00	21.50

Для дальнейшего исследования влияния состава асфальтогранулобетона на его свойства выполнено расширение факторного пространства за счет деформации начального симплекса с коэффициентами растяжения его вершин $\alpha_{\text{раст}} = 0.5$ и сжатия $\alpha_{\text{сж}} = -0.5$.

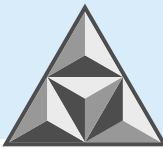
Преобразованная формула вычисления координаты новой вершины симплекса в отраженной точке определена:

$$x_{i \text{ нов}} = \left(2 \cdot \frac{\sum x_{ij}}{k} \right) - x_{i \text{ зам}}, \quad (3)$$

где $x_{i \text{ нов}}$ – координата новой точки (новой вершины) симплекса для i -переменной;

$x_{i \text{ зам}}$ – координата заменяемой точки;

$(\sum x_{ij})/k$ – среднее значение из координат всех вершин симплекса, кроме заменяемой.



Среднее значение из координат всех k -вершин симплекса находят в соответствии с формулой:

$$\frac{\sum x_{ij}}{k} = \bar{x}_i, \quad (4)$$

При деформации симплекса значения новых координат отраженной точки $\ddot{x}_{i \text{ нов}}$ вычислены по формуле:

$$\ddot{x}_{i \text{ нов}} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}), \quad (5)$$

где α – коэффициент деформации (растяжения или сжатия) симплекса.

Опыт № 4.

Растяжение симплекса относительно вершины 1.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{1.0 + 2.0}{2} = 1.50\%;$$

$$\ddot{x}_{1/4} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 1.5 + 0.5(1.5 - 3.0) = 0.75\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64,5 + 21,5}{2} = 43.00\%;$$

$$\ddot{x}_{2/4} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 43 + 0.5(43 - 64.5) = 32.25\%.$$

Опыт № 5.

Растяжение симплекса относительно вершины 2.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 2.0}{2} = 2.50\%;$$

$$\ddot{x}_{1/5} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 2.5 + 0.5(2.5 - 1.0) = 3.25\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64,5 + 21,5}{2} = 43.00\%;$$

$$\ddot{x}_{2/5} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 43.0 + 0.5(43.0 - 64.5) = 32.25\%.$$

Опыт № 6.

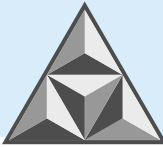
Растяжение симплекса относительно вершины 3.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 1.0}{2} = 2.00\%;$$

$$\ddot{x}_{1/6} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 2.0 + 0.5(2.0 - 2.0) = 2.00\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:



$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64.5 + 64.5}{2} = 64.50\%;$$

$$\ddot{x}_{2/6} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 64.5 + 0.5(64.5 - 21.5) = 86.00\%.$$

Опыт № 7.

Для определения координат вершины 7 внутри начального симплекса произведено сжатие его относительно вершины 3 с коэффициентом сжатия $\alpha_{\text{сж}} = -0.5$ и для факторов X_1 (ПЦ) и X_2 (ЩПС) выполнены расчеты:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 1.0}{2} = 2.00\%;$$

$$\ddot{x}_{1/7} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 2.0 - 0.5(2.0 - 2.0) = 2.00\%;$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64.5 + 64.5}{2} = 64.50\%;$$

$$\ddot{x}_{2/7} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 64.5 - 0.5(64.5 - 21.5) = 43.00\%.$$

Вычисленные значения в каждом опыте представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения факторов в деформированном симплексе

Table 3. Factor values in the deformed simplex

№ опыта	Значение фактора в опыте, %	
	X_1 (ПЦ)	X_2 (ЩПС)
1	Начальный симплекс	
2		
3		
4	0.75	32.25
5	3.25	32.25
6	2.00	86.00
7	2.00	43.00

Область варьирования факторов отражена на рис. 2.

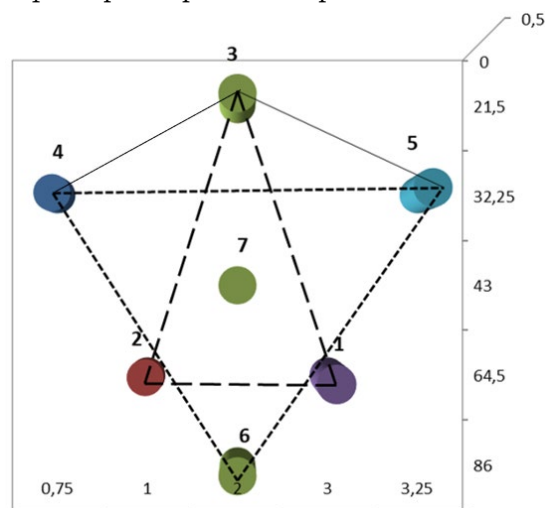
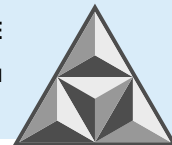


Рис. 2. Область варьирования значений факторов эксперимента: опыты 1-3 – начальный симплекс; опыты 4-6 – растянутый симплекс; опыт 7 – сжатые условия опыта 3

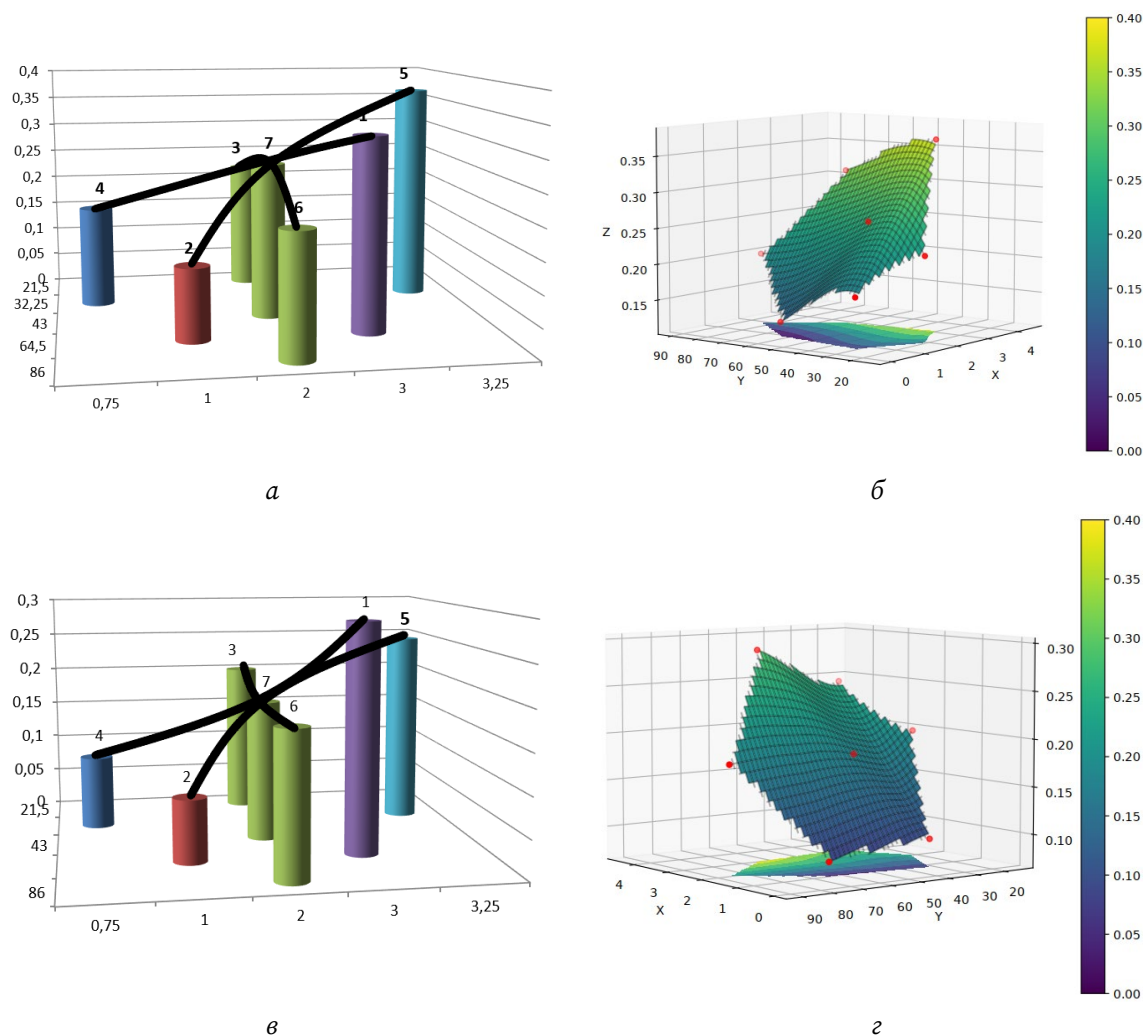
Fig. 2. The range of variation of values for the experiment factors: experiments 1-3 – initial simplex; experiments 4-6 – stretched simplex; experiment 7 – compressed conditions of experiment 3

Результаты испытаний образцов асфальтогранулобетона на предел прочности при непрямом растяжении и водостойкость приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Прочность и водостойкость при различном составе асфальтогранулобетона**Table 4.** Strength and water resistance with different compositions of asphalt granulocrete

№ опыта	Значение фактора в опыте, %		Среднее значение предела прочности на растяжение, $R_{\text{раст}}$, МПа		Коэффициент водостойкости (TRS)
	X_1 (ПЦ)	X_2 (ЩПС)	Группа 1	Группа 2	
1	3.00	64.50	0.32	0.29	0.91
2	1.00	64.50	0.12	0.08	0.67
3	2.00	21.50	0.22	0.20	0.91
4	0.75	32.25	0.17	0.10	0.56
5	3.25	32.25	0.37	0.25	0.68
6	2.00	86.00	0.20	0.18	0.90
7	2.00	43.00	0.26	0.18	0.69

Зависимость прочности при непрямом растяжении образцов асфальтогранулобетона групп 1 (выдержанные на воздухе) (а, б) и 2 (водонасыщенные) (в, г) от расхода ПЦ и доли ЩПС показана в табл. 5 и на рис. 3.

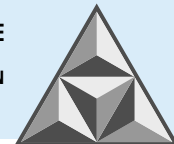
**Рис. 3.** Зависимость прочности образцов групп 1 (а, б) и 2 (в, г) от расхода ПЦ и ЩПС:

а, в – в виде столбчатой диаграммы; б, г – трехмерная поверхность;

— — профили аппликаты по вершинам 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Fig. 3. Dependence of group 1 (a, b) and group 2 (c, d) samples' strength on Portland cement and crushed stone-sand mixture consumption: a, c – as a column diagram; b, d – three-dimensional surface;

— — profiles of applications on the tops of 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

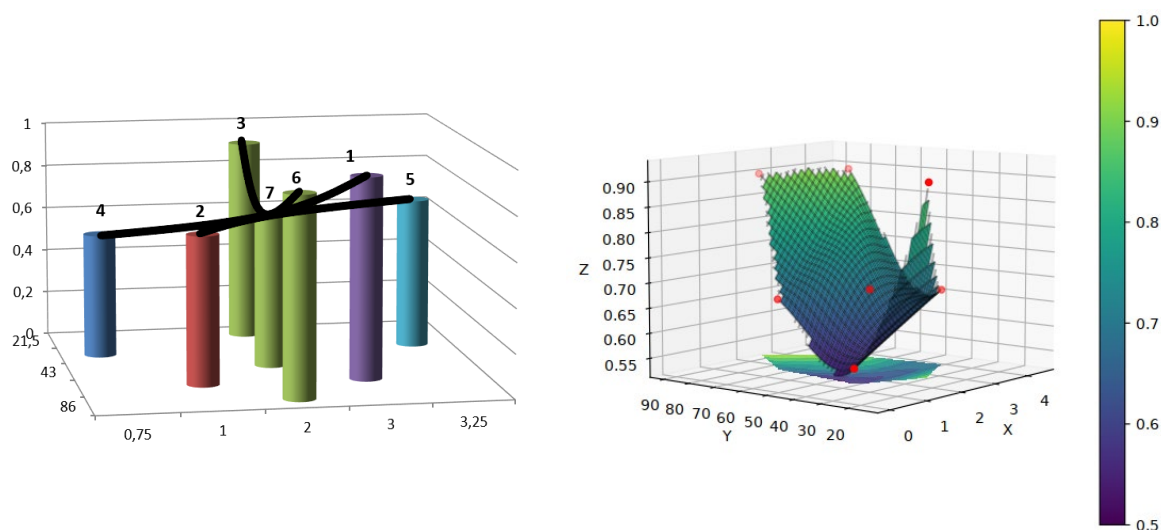
**Таблица 5.** Зависимость прочности образцов групп 1 и 2 от расхода портландцемента и щебеночно-песчаной смеси**Table 5.** Dependence of group 1 and 2 samples' strength on Portland cement and crushed stone-sand mixture flow rate

Расход ПЦ, %	Прочность образцов из группы 1 / группы 2, при различном содержании скелетного материала (ЩПС), %				
	21.50	32.25	43.00	64.50	86.00
0.75		0.17 / 0.10			
1.00				0.12 / 0.08	
2.00	0.22		0.26 / 0.18		0.20 / 0.18
3.00				0.32 / 0.29	
3.25		0.37			

Коэффициент водостойкости оценен нами как отношение значений прочности образцов группы 2 (водонасыщенные) к значению прочности образцов группы 1 (выдержанные на воздухе). Зависимость коэффициента водостойкости от расхода портландцемента и доли скелетного материала показана в табл. 6 и отражена на рис. 4.

Таблица 6. Зависимость водостойкости образцов от расхода портландцемента и щебеночно-песчаной смеси**Table 6.** Dependence of water resistance of samples on the consumption of Portland cement and crushed stone-sand mixture

Расход ПЦ, %	Содержание ЩПС, %				
	21.50	32.25	43.00	64.50	86.00
0.75		0,56			
1.00				0.67	
2.00	0.91		0.69		0.90
3.00				0.91	
3.25		0.68			

**Рис. 4.** Зависимость водостойкости образцов от расхода ПЦ и ЩПС:

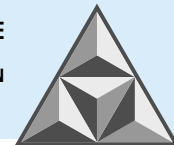
a – в виде столбчатой диаграммы, *б* – трехмерная поверхность;

— — профили аппликаты по вершинам 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Fig. 4. Dependence of water resistance of samples on the flow rate of Portland cement and crushed stone-sand mixture: *a* – as a bar diagram, *b* – three-dimensional surface;

— — profiles of applications on the tops 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Полученные значения коэффициента водостойкости асфальтогранулобетона доказывают прямое влияние рассматриваемых факторов в заданном пространстве на функцию отклика. Гиперповерхность отклика функциональной зависимости коэффициента водостойкости отвечает направляющей параболы второго порядка (поверхность второго порядка).



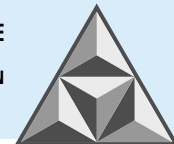
ВЫВОДЫ

Применение метода деформируемого симплекса (метод Нелдера-Мида) к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава обеспечивает экономию материальных ресурсов и времени за счет сокращения числа опытов. Полученные поверхности функции отклика не являются плоскостями, что свидетельствует о нелинейной зависимости отклика от варьирования факторов. Зависимости второго порядка характеризуются такими поверхностями, как сфера, параболоид, эллипсоид, гиперболоид, цилиндр и конус.

Поверхность отклика зависимости прочности асфальтогранулобетона от входящих компонентов в виде столбчатых диаграмм близка по форме к сегменту чаши и гиперболического параболоида, а для коэффициента водостойкости – к направляющей параболы цилиндра. Однако при отражении результатов в виде поверхности сглаживания прослеживаются искривления, свидетельствующие о зависимостях более высокого порядка или влиянии внешних факторов вне выбранного факторного пространства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ярмолинский В.А., Буданова Е.С.** Холодный ресайклинг дорожных конструкций: учеб. пособие / Москва: Московский автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т, 2024. 112 с.
2. Технология холодного ресайклинга [Электронный ресурс]. – URL: http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/_RU (дата обращения 12.11.2024).
3. **Никишин В.Е.** Опыт применения ресурсосберегающей технологии холодного ресайклинга // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 1 (40). С. 15-18.
4. **Ярмолинский В.А., Буданова Е.С.** Влияние состава асфальтогранулобетонных смесей на эффективность холодного ресайклинга // *Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та*. 2024. № 2 (77). С. 3-10.
5. **Буданова Е.С., Ярмолинский В.А.** Холодный ресайклинг. Повышение эффективности использования на территории РФ // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 2. С. 54-67. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5042/view>. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54 (дата обращения 12.12.2024).
6. **Ярмолинский В.А., Жабкин М.О.** Выбор оптимального количества вяжущего при холодном ресайклинге асфальтобетонных покрытий // *Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та*. 2021. № 2 (65). С. 49-55.
7. **Лазарева Т. Л.** Оптимизация состава холодной асфальтобетонной смеси с целью повышения эффективности ремонтных работ на автомобильных дорогах юга Дальнего Востока / Т. Л. Лазарева, Н. И. Ярмолинская // *Транспорт: наука, техника, управление: науч. информ. сб.* 2020. № 6. С. 9-14. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-06-2.
8. **Буданова Е.С., Ярмолинский В.А., Борисов А.С., Кучинов Н.С.** Проблемы эффективного применения технологии холодного ресайклинга дорожных одежд // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, № 1. С. 31-42.
9. **Яконцева О.В., Щепетева Л.С.** Влияние зернового состава асфальтобетона на показатели физико-механических свойств // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2020. № 3. С. 71-76. DOI: 10.15593/24111678/2020.03.09.
10. **Кудрявцев А.Н.** Учет структурных разрушений неукрепленного каменного материала оснований при проектировании дорожных одежд: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 213 с.



11. **Елсуфьев К.А., Муравьева Я.И., Вдовых П.Е.** Метод оптимизации Нелдера-Мида // *Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сб. статей IX Межд. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Пенза, 30 декабря 2017 года. Ч. 1.* Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 113-116.

Поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 06.03.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025

REFERENCES

1. **Yarmolinsky, V.A. and Budanova, E.S.** (2024), *Kholodniy resayikling dorozhnykh konstruktsey: ucheb. posobie* [Cold recycling of road structures: textbook], Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University, 112 p. (in Russian).
2. Technology of cold recycling [Electronic resource]. Available at: http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/_RU (accessed 12.11.2024) (in Russian).
3. **Nikishin, V.E.** (2020), "Experience of application of resource-saving cold recycling technology", *Technical regulation in transport construction*, vol. 1, no. 40, pp. 15-18 (in Russian).
4. **Yarmolinsky, V.A. and Budanova, E.S.** (2024), "Impact of asphalt granuloconcrete mixes composition on the efficiency of cold recycling", *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University*, vol. 2, no. 77, pp. 3-10 (in Russian).
5. **Budanova, E.S. and Yarmolinsky, V.A.** (2022), "Cold recycling. Improving the efficiency of use in the territory of the Russian Federation", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 2, pp. 54-67 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022 (In Russian) (accessed 12.12.2024).
6. **Yarmolinsky, V.A. and Zhabkin, M.O.** (2021), Selection of the optimal amount of binder during cold recycling of asphalt concrete pavements, *Bulletin of Moscow Automobile and Road State Technical University*, vol. 2, no. 65, pp. 49-55 (in Russian).
7. **Lazareva, T.L. and Yarmolinskaya, N.I.** (2020), "Optimisation of cold asphalt-concrete mixture composition to improve the efficiency of repair works on motor roads in the south of the Far East", *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchno. inform. sb.*, no. 6, pp. 9-14. DOI 10.36535/0236-1914-2020-06-2 (in Russian).
8. **Budanova, E.S., Yarmolinsky, V.A., Borisov, A.S. and Kuchinov, N.S.** (2024), "Challenges of effective use of cold-in-place recycling technology of road pavements", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 31-42 (in Russian).
9. **Yakontseva, O.V. and Shchepeteva, L.S.** (2020), "Influence of asphalt concrete grain composition on physical and mechanical properties", *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, no. 3, pp. 71-76. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09> (in Russian).
10. **Kudryavtsev, A.N.** (2021), Consideration of Structural Fractures of Unreinforced Stone Base Material in Design of Road Pavements. Diss. of cand. tech. sc. Moscow, Russia, 213 p.
11. **Elsufiev, K.A., Muravyeva, Ya.I. and Vdovikh, P.E.** (2017), 'Nelder-Mida optimisation method', *Breakthrough scientific research: issues, patterns, perspectives: collection of proceedings of IX Mezhd. nauch.-prakt. conf.: in 4 parts. Penza, 30 December 2017, part 1, Penza: 'Nauka i Prosveshchenie'*, pp. 113-116 (in Russian).

Received 21.01.2025

Approved 06.03.2025

Accepted 14.03.2025