

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7./8:691.168

Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси

С.Ю. Андронов¹, В.В. Столяров¹, Ш.Н. Валиев², А.В. Кочетков³

Сергей Юрьевич Андронов, Виктор Васильевич Столяров

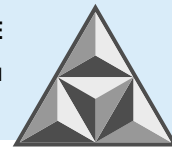
¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов,
Российская Федерация
atomic08@yandex.ru, stolyarov_v_v@mail.ru

Шерали Назаралиевич Валиев

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва,
Российская Федерация
vshn2014@gmail.com

Андрей Викторович Кочетков

³Российский дорожный научно-исследовательский институт (РОСДОРНИИ), Москва, Российская Федерация,
soni.81@mail.ru

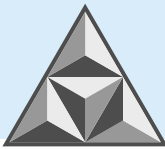


Распределение длин нитей полиакрилонитрильного ровинга описано в формате теории риска нормальным законом. Оптимальная длина фибры определяется экспериментально и зависит от вида волокнистого материала, его дозировки в процентах по массе асфальтобетонной смеси и плотности волокна. Для обоснования закона распределения длины нитей фибры использованы статистические методы определения среднеквадратического отклонения длины нарезанных нитей на специальном режущем оборудовании. Произведена оценка риска и надежности армирования асфальтобетонной смеси фиброй полиакрилонитрильного волокна. Установлено, что плотность нитей полиакрилонитрильного волокна влияет на разброс закона распределения длин нитей следующим образом: чем больше плотность, тем меньше среднеквадратическое отклонение длин нарезанной фибры; чем плотнее нити полиакрилонитрильного фиброволокна, тем меньше вариация разброса длин нарезанных нитей.

Ключевые слова: автомобильная дорога, риск, фибра, армирование смеси, закон распределения, длина нитей, асфальтобетон

Для цитирования:

Андронов С.Ю., Столяров В.В., Валиев Ш.Н., Кочетков А.В. Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 55-65.
URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



SCIENTIFIC ARTICLE

Substantiation of the distribution law and statistical characteristics of the fiber filaments lengths for reinforcing asphalt concrete mixture

S.Yu. Andronov¹, V.V. Stolyarov¹, Sh.N. Valiev², A.V. Kochetkov³

Sergey Yu. Andronov, Viktor V. Stolyarov

¹Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

atomic08@yandex.ru, stolyarov_v_v@mail.ru

Sherali N. Valiev

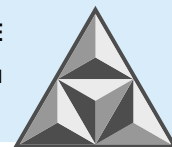
²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

vshn2014@gmail.com

Andrey V. Kochetkov

³Russian Road Scientific-Research Institute (ROSDORNII), Moscow, Russia

soni.81@mail.ru

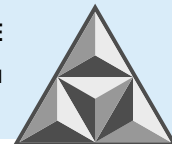


The paper describes the distribution of polyacrylonitrile roving filaments lengths in terms of risk theory by the normal distribution law. We identify the optimal fiber length experimentally. However, it depends on the type of fibrous material, its optimal dosage as a percentage by weight of asphalt concrete mixture, and fiber density. Also research dwells on the statistical methods of identifying the standard deviation of the cut length of fibre filaments on special cutting equipment which provides the substantiation of the law of distribution of fibre filament lengths. The results ensure the risk assessments and reliability of reinforcement of asphalt concrete mixture with polyacrylonitrile fiber. Moreover, according to the research, density of polyacrylonitrile fiber filaments affects the spread of the distribution law of the lengths of the filaments as follows: the higher the density, the lower the standard deviation of the cut fibre lengths; the denser the polyacrylonitrile fibre filaments, the lower the variability of the cut filament lengths.

Key words: highway, risk, fiber, reinforcement of the mixture, distribution law, thread length, asphalt concrete

For citation:

Andronov, S.Yu., Stolyarov, V.V., Valiev, S.N. & Kochetkov, A.V. (2023) Substantiation of the distribution law and statistical characteristics of the fiber filaments length for reinforcing asphalt concrete mixture, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 55-65 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023



ВВЕДЕНИЕ

Как показали результаты лабораторных испытаний при нарезке волокон фибры, даже при тщательной настройке режущего оборудования невозможно обеспечить постоянную длину нитей. Нарезаемое волокно поступает из жгута (ровинга), скрученного в нескольких плоскостях. В связи с этим нарезки волокна остаются изогнутыми, а искусственно выпрямленные образцы имеют разброс по длине.

В качестве нормативного документа, разработанного с участием авторов данной статьи, приняты Методические рекомендации по технологии армирования асфальтобетонных покрытий добавками базальтовых волокон (фиброй) при строительстве и ремонте автомобильных дорог (распоряжение Росавтодора от 11.01.2002 № 12-р).

Краткий обзор по теме исследований дан в [1-8].

Публикации в зарубежных наукометрических базах данных представлены в [9-15].

Цель работы – установить влияние длины нитей на эффективность армирования асфальтобетонной смеси. Для реализации необходимо выполнить статистический анализ длин нарезки фибры, вводимой в асфальтобетонную смесь, и установить закон распределения, по которому оценивается точность нарезки, с учетом оценки риска скручивания нитей в узлы (ведет к потере армирования асфальтобетонной смеси) и риска нарезки мелких нитей (возможно измельчение до порошка, при этом асфальтобетон не будет армирован).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Допустимый разброс длин нитей, как и среднее значение, близкое к оптимальному для армирования асфальтобетона, определяли на основе оценок риска и допуска последнего в процессе нарезки и перемешивания (армирования) смеси.

Длина фибры определялась экспериментально; таковая зависит от вида волокнистого материала, его дозировки в процентах от массы асфальтобетонной смеси, плотности волокна.

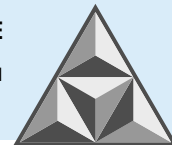
Для обоснования закона распределения использованы статистические методы определения средних значений и среднеквадратического отклонения длины нарезанных нитей на специальном режущем оборудовании.

Для анализа брали полиакрилонитрильное волокно в нарезанных ровингах от ООО Холдинговая компания «Композит». При контроле нарезки фибры из полиакрилонитрильного волокна стремились получить среднюю длину 12 мм, для которой физико-механические свойства армированного асфальтобетона соответствуют требуемым.

В соответствии с этим разделом рассмотрены нити при нормированных значениях плотности внесистемной единицей измерения текс.

Основные статистические параметры и методы их определения на примере фибры полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс

Нарезанную фибру полиакрилонитрильного волокна ожидаемой (номинальной) длиной 12 мм распушали и выполняли замер штангенциркулем длины выпрямленных отрезков нитей. Суммарное количество нарезанных нитей, подлежащих статистической обработке в одном массиве, при обосновании приемлемого закона распределения, колебалось от 60 до 90 штук, что отвечало требуемому числу нитей в выборках, определяемому по формуле:



$$n = \frac{\sigma_{\ell}^2 \cdot t^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

где σ_{ℓ} – среднее квадратичное отклонение длин нарезанных нитей в выборке, мм;

t – коэффициент значимости; при доверительной вероятности 95%, $t = 1.96 \approx 2$;

Δ – желаемая (ожидаемая) точность средней величины параметра.

Примеры длин нарезанных нитей (1/2 полной выборки) даны в табл. 1.

Таблица 1. Примеры длин (ℓ_i) нарезанных нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс (с 1 по 28 нарезку)

Table 1. Examples of lengths (ℓ_i) of cut filaments of polyacrylonitrile fibre with a density of 0.56 tex (1 to 28 cuts)

Номер измеренной нити	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длина, мм	11.6	12.4	11.8	12.3	10.4	12.5	11.5	10.8	12.6	12.2	12.7	9.5	12.1	11.5
Номер измеренной нити	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Длина, мм	8.7	11.1	12.5	11.6	14.8	12.8	11.5	12.0	11.4	11.3	13.2	13.3	12.8	10.1

Статистическая обработка длин кусочков нитей фибры в результате нарезки приведена в табл. 2. При применении мультипликативного метода и метода суммирования замеренные значения длин нитей распределяют по разрядам (см. табл. 2) в графе 3 «абсолютная частота». Вычисление данных в графе 4 основывается на значениях в графе 3. Первое значение переносится из графы 3 в графу 4, затем к нему прибавляется второе значение из графы 3. Суммирование значений продолжают до последнего числа в графе 3. Контроль вычислений в графе 4 заключается в равенстве последнего числа в этой графе и суммарного количества измеренных (вычисленных) величин n . Данные в графе 5 вычисляют так же, как в графе 4.

Таблица 2. Пример статистической обработки длин нарезанных кусочков нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс

Table 2. Example of statistical processing of cut lengths of polyacrylonitrile fibre filament pieces with density 0.56 tex

Разряды интервалов	Середина разряда U_m	Абсолютная частота, h_m	Частичная сумма, S_m	Накопленная частота, T	Середина условного интервала, l_m	Произведения		
						$l_m \cdot h_m$	l_{m2}	$l_{m2} \cdot h_m$
8÷9	8.5	1	1	1	-4	-4	16	16
9÷10	9.5	3	4	5	-3	-9	9	27
10÷11	10.5	10	14	19	-2	-20	4	40
11÷12	11.5	30	44	63	-1	-30	1	30
12÷13	12.5 = XA	33	77	140	0	0	0	0
13÷14	13.5	8	85	225	1	8	1	8
14÷15	14.5	2	87	312	2	4	4	8
15÷16	15.5 = UK	1	88	400	3	3	9	9
$d = 1$		$n = 88$	$M = 400$	$\Sigma T = 1165$		$B = -48$		$A = 138$

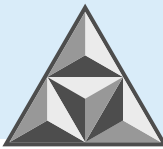
Контроль вычислений в графе 5 осуществляется подобно предыдущему (см. табл. 2). Расчет среднего значения и среднее квадратического отклонения исследуемого параметра показан ниже.

Обработка данных табл. 2 выполнена с использованием известных приемов математической статистики:

Метод суммирования:

– среднее значение:

$$\ell_{\text{cp}} = U_K - d \left(\frac{M}{n} - 1 \right) = 15.5 - 1 \cdot \left(\frac{400}{88} - 1 \right) = 11.95 \text{ мм};$$



– дисперсия:

$$\sigma_{\ell}^2 = \frac{d^2}{n-1} (2 \sum T - M - \frac{M^2}{n}) = \frac{1^2}{88-1} (2 \cdot 1165 - 400 - \frac{400^2}{88}) = 1.287 \approx 1.285 \text{ мм}^2;$$

– среднее квадратическое отклонение: $b_{\ell} = 1.134$ мм.

Мультипликативный метод:

– среднее значение:

$$\ell_{\text{ср}} = X_A + \frac{d}{n} B = 12.5 + \frac{1}{88} \cdot (-48) = 11.95 \text{ мм};$$

– дисперсия:

$$\sigma_{\ell}^2 = \frac{d^2}{n-1} (A - \frac{B^2}{n}) = \frac{1^2}{88-1} (138 - \frac{48^2}{88}) = 1.285 \text{ мм}^2;$$

– среднее квадратическое отклонение: $b_{\ell} = 1.134$ мм.

Сравнение эмпирического распределения с теоретическим законом распределения (по критерию Пирсона) показано в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение фактического распределения длин нарезанных кусочков нитей фибры с законом нормального распределения

Table 3. Comparison of the actual distribution of cut lengths of fibre filament pieces with the normal distribution law

Разряды интервалов	Абсолютная частота, h_m	Вероятность попадания измерений в разряд, P_i	Теоретическое количество измерений в разряде ($n_i = P_i \cdot n$)	$\chi^2 = \frac{(h_m - n_i)^2}{n_i}$
8÷10	4	0.0361	3.1768	0.2133
10÷11	10	0.1506	13.2528	0.7984
11÷12	30	0.3336	29.3568	0.0141
12÷13	33	0.3051	26.4080	1.6455
13÷14	8	0.1410	12.4080	1.5660
14÷16	3	0.0336	2.9568	0.0006
$d = 1$	$n = 88$	$\sum P_i = 1,0000$		$\sum \chi^2 = 4,2379$

*Примечание. Первый и последний разряды имеют интервал $d = 2$, так как менее трех попаданий в графу h_m в данной таблице не допускается (это приводит к увеличению степеней свободы, в результате чего делается ошибочный вывод о сходимости эмпирического и теоретического распределений, когда сходимость отсутствует).

Вероятность P_i в табл. 3 вычисляли по формуле Симпсона:

$$P_i = \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{6 \cdot m} [(y_0 + y_{2m}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{2m-2}) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{2m-1})]. \quad (2)$$

В формуле (2) применяли параметр $m = 2$.

Тогда

$$P_i = \frac{b-a}{12} [(y_0 + y_4) + 2 \cdot y_2 + 4(y_1 + y_3)], \quad (3)$$

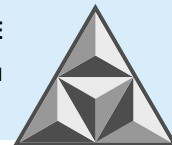
где b и a – правая и левая границы длины нитей фибры в разрядах интервалов (см. табл. 3);

y_0, y_1, \dots, y_4 – ординаты точек, определяемые по формуле:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ell_i - \ell_{\text{ср}})^2}{2 \cdot \sigma^2}} \Big|_{ab}. \quad (4)$$

Например, при границах нитей от 11 до 12 мм имеем: $a = 11$, $b = 12$ и при четырех интервалах имеем пять значений ℓ_i (11.00; 11.25; 11.50; 11.75; 12.00).

Применяя формулы (4) и (3), с учетом известных параметров распределения $\ell_{\text{ср}}$ и b_{ℓ} определили $P_i = 0.3336$ (см. табл. 3).



При сравнении с нормальным законом распределения также применяли формулу вида

$$P_i = \Phi\left(\frac{\ell_{i+1} - \ell_{cp}}{\sigma_\ell}\right) - \Phi\left(\frac{\ell_i - \ell_{cp}}{\sigma_\ell}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(u)$ – функция Лапласа;

ℓ_i и ℓ_{i+1} – левая и правая границы длин нитей в разрядах (см. табл. 3);

ℓ_{cp} и σ_ℓ – средняя длина нитей фибры и среднеквадратичное отклонение длин нитей, установленные по методике, как это представлено в табл. 2, или с использованием других формул математической статистики.

На рис. 1 показано сравнение гистограммы длин нитей фибры и плотности нормального их распределения.

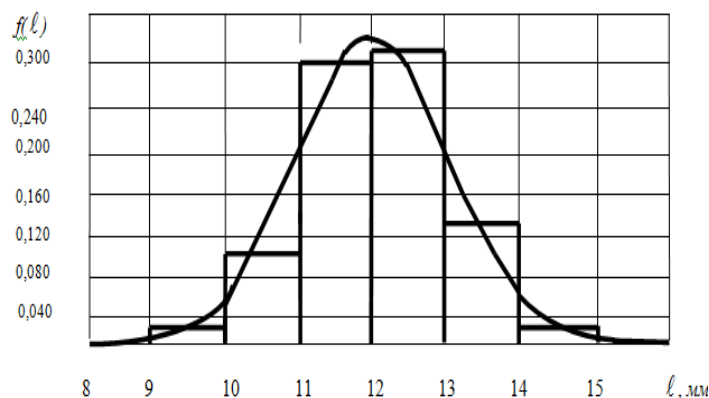


Рис. 1. Гистограмма длины волокон нарезанной фибры и плотность нормального распределения

Figure 1. Histogram of cut fibre length and density of normal distribution

Для теоретического распределения число степеней свободы определяли:

$$\nu = k - r, \quad (6)$$

где k – число разрядов (в табл. 3 $k = 6$);

r – число наложенных связей (для нормального закона распределения $r = 3$).

Получаем $\nu = 6 - 3 = 3$. Из таблиц χ^2 -распределения при $\chi^2 = 4.2379$ и $\nu = 3$ выписываем вероятность $P = 0.25$, по которой устанавливаем соответствие теоретического закона распределения результатам измерений (гистограмме):

- отличное соответствие при $P > 0.5$;
- хорошее соответствие при $P = 0.3 \div 0.5$;
- удовлетворительное соответствие при $P = 0.1 \div 0.3$;
- неудовлетворительное соответствие при $P < 0.1$.

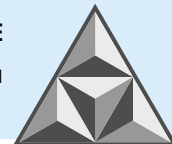
Так как для приведенного примера $P = 0.25$, то соответствие гистограммы плотности нормального распределения следует считать удовлетворительным.

Для сравнения теоретического и эмпирического распределения использовали также критерий Романовского:

$$R = \frac{\chi^2 - \nu}{\sqrt{2\nu}}. \quad (7)$$

Если критерий Романовского меньше 3, гипотеза о соответствии фактической кривой теоретическому закону распределения принимается.

В противном случае (при $R \geq 3$) делают вывод, что выбранный теоретический закон распределения не соответствует результатам измерения.



Согласно этому критерию,

$$R = \frac{4,2379 - 3}{\sqrt{2 \cdot 3}} = 2.4495.$$

Так как $2.4495 < 3$, нормальное распределение согласуется с результатами экспериментальных данных (с гистограммой).

В табл. 4 дано сравнение статистических данных средних (оптимальных) значений и среднеквадратических отклонений длин нитей полиакрилонитрильного волокна, которые необходимы для оценки риска и надежности дисперсного армирования асфальтобетонной смеси с учетом различной плотности данного волокна.

Таблица 4. Сравнение полученных статистических данных средних (оптимальных) значений и среднеквадратичных отклонений длин нитей полиакрилонитрильного волокна

Table 4. Comparison of statistical data obtained of average (optimum) values and standard deviations of polyacrylonitrile fibre filament lengths

Плотность, текс	0.17	0.33	0.56	0.68
Средняя длина нитей, мм	11.84	12.19	11.95	12.06
Среднеквадратическое отклонение длин нитей, мм	1.583	1.470	1.134	1.119

Общее решение, учитывающее возникновение при четырех значениях плотностей (0.17, 0.33, 0.56 и 0.68 текс) одного оптимального значения длин нитей (12 мм), устанавливает предельно допустимое среднеквадратическое отклонение оптимальных длин нитей полиакрилонитрильного волокна $\sigma_{\ell}^{opt} = 2.496$ мм при $c_V^{opt} = 0.208$.

Таким образом, параметры ℓ_{opt} , σ_{ℓ}^{opt} и c_V^{opt} определены по всем четырем выборкам; результаты представлены в табл. 4.

ВЫВОДЫ

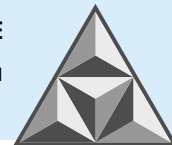
Распределение длин нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью нитей 0.56 текс описано в теории риска нормальным законом.

Установлено, что для оценки риска и надежности армирования асфальтобетонной смеси фиброй полиакрилонитрильного волокна (при плотности 0.56 текс) следует применять параметры $\ell_{CP} = 11.95$ мм и $\sigma_{\ell} = 1.134$ мм (для других плотностей результаты исследований показаны в табл. 4).

На основании проведенных исследований выявлено, что плотность нитей полиакрилонитрильного волокна влияет на разброс закона распределения длин нитей следующим образом: чем выше плотность (в текс), тем меньше среднеквадратическое отклонение длин нарезанной фибры; чем плотнее нити полиакрилонитрильного фиброволокна, тем меньше вариация разброса длин нарезанных нитей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Янковский Л.В., Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е.** Техническое нормирование макрошероховатости дорожных покрытий автомобильных и лесовозных дорог: монография. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. 321 с.
2. **Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В.** Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим // *Строительные материалы*. 2020. № 4-5. С. 62-67.



3. **Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В.** Технология производства и применения дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с базальтовой фиброй // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 70-75.
4. **Андронов С.Ю., Алферов В.И., Кочетков А.В.** Совершенствование методов введения фиброволокон в горячие и холодные асфальтобетонные смеси // *Вестник евразийской науки*. 2020. Т. 12, № 2. С. 2.
5. **Пат. 170486 Российская Федерация, МПК В28С 5/40.** Приставка для обработки фиброволокна перед введением его в дорожно-строительную армируемую смесь / С.Ю. Андронов, А.А. Артеменко, Н.Е. Кокодеева. Опубл. 26.04.2017.
6. **Пат. 171296 Российская Федерация, МПК В28С 5/40.** Узел подготовки фиброволокна для приготовления дорожно-строительной смеси / С.Ю. Андронов, А.А. Артеменко, С.В. Арзамасцев. Опубл. 29.05.2017.
7. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кокодеева Н.Е., Козин А.С., Пачина О.В.** Битумная суспензия: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. 192 с.
8. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020612667 Российская Федерация.** TST-РИСК / Н.Е. Акулова, Н.В. Шеголева, В.В. Столяров. Опубл. 28.02.2020.
9. **Kokodeeva N., Vasiliev Y., Kotlyarsky E., Kochetkov A., Andronov S.** Impact study of basalt and polyacrylonitrile fibercon performance characteristics of asphalt concrete // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1258. P. 473-485.
10. **Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong.** Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. 3(5). DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Materials (Basel)*. 2018. 11(11). P. 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Clara Celauro, Filippo Praticò.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials*. 2018. 170. P. 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang.** Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology // *Applied Sciences*. 2018. 8(11). P. 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. 159. P. 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Applied Sciences*. 2018. 8(12). P. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.

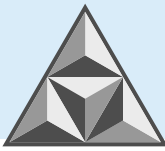
Поступила в редакцию 14.07.2023

Одобрена после рецензирования 19.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

REFERENCES

1. **Yankovskiy, L.V., Kochetkov, A.V. & Kokodeeva, N.E.** (2019). *Technical regulation of macro-roughness of road surfaces of automobile and logging roads*. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta (in Russian).
2. **Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. & Kochetkov, A.V.** (2020) Highway repair with the use of fluorinated asphalt concrete mixtures with dispersed binde, *Stroitel'nye materialy*, (4-5), pp. 62-67 (in Russian).
3. **Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. & Kochetkov, A.V.** (2020) Technology of production and application of dispersed-reinforced asphalt concrete mixtures with basalt fiber, *Stroitel'nye materialy*, (3), pp. 70-75 (in Russian).
4. **Andronov, S.Yu., Alferov, V.I. & Kochetkov A.V.** (2020) Improving the methods of introducing fiber fibers into hot and cold asphalt concrete mixtures, *Vestnik evrazijskoy nauki*, 12(2), pp. 2 (in Russian).
5. **Andronov S.Yu., Artemenko A.A. & Kokodeeva, N.E.** (2017) *An attachment for processing fiber before introducing it into a road-building reinforced mixture*. RU 170486 (in Russian).



6. **Andronov, S.Yu., Artemenko, A.A. & Arzamastsev, S.V.** (2017) *Fiber-fiber preparation unit for the preparation of road-building mix.* RU 171296 (in Russian).
7. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F., Kokodeeva, N.E., Kozin, A.S. & Pachina, O.V.** (2019) *Bitumen suspension.* Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t (in Russian).
8. **Akulova, N.E., Shchegoleva, N.V. & Stolyarov, V.V.** (2020) *TST-RISK.* RU 2020612667 (in Russian).
9. **Kokodeeva, N., Vasiliev, Y., Kotlyarsky, E., Kochetkov, A. & Andronov, S.** (2021) Impact study of basalt and polyacrylonitrile fibercon performance characteristics of asphalt concrete, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, (1258), pp. 473-485.
10. **Di, Yu, Wensheng, Wang, Yongchun, Cheng & Yafeng, Gong.** (2016) Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5). DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan & Chunfeng, Zhu** (2018) Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber–Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles, *Materials (Basel)*, 11(11), 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Clara, Celauro & Filippo, Praticò** (2018) Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses, *Construction and Building Materials*, 170, pp. 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Chunyu, Liang & Shurong Wang** (2018) Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology, *Applied Sciences*, 8(11), 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao, Qin, Aiqin, Shen, Yinchuan & Guo, Zhennan, Li** (2018) Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers, *Construction and Building Materials*, 159, pp. 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng, Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan** (2018) Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles, *Applied Sciences*, 8(12), 2581. DOI: 10.3390/app8122581.

Received 14.07.2023

Approved after reviewing 19.09.2023

Accepted 22.09.2023