

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7/8

# Влияние плотности и длины нарезки базальтовой фибры на риск спутывания нитей

**С.Ю. Андронов<sup>1</sup>, В.В. Столяров<sup>1</sup>, Я.М. Белозеров<sup>1</sup>,  
А.В. Кочетков<sup>2,\*</sup>, И.Г. Шашков<sup>3</sup>**

**Сергей Юрьевич Андронов, Виктор Васильевич Столяров, Ярослав Михайлович Белозеров**

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Российская Федерация

*atomic08@yandex.ru, stolyarov\_v\_v@mail.ru, ybm-20@mail.ru*

**Андрей Викторович Кочетков**

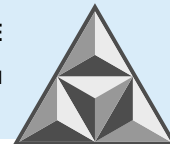
<sup>2</sup>Российский дорожный научно-исследовательский институт (РОСДОРНИИ), Москва, Российская Федерация

*soni.81@mail.ru\**

**Игорь Геннадиевич Шашков**

<sup>3</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация

*soni.81@mail.ru*

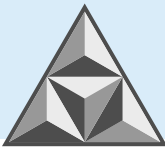


*Проведена оценка влияния плотности и длины нарезки базальтовой фибры на риск спутывания нитей. Средние значения длин нитей базальтовой фибры не превышают критических величин. Гистограмма распределения длин базальтовой фибры соответствует нормальному распределению с оценкой «отлично». Установлено наличие предельно допустимой островершинности распределения длин распушенных базальтовых нитей. Ожидаемый риск спутывания нитей меньше допустимого риска. Следовательно, дисперсное армирование фиброй из базальтового волокна при требуемом уровне надежности допустимо.*

**Ключевые слова:** базальтовая фибра, асфальтобетон, армирование, риск, плотность, длина нитей, закон распределения

**Для цитирования:**

Андронов С.Ю., Столяров В.В., Белозеров Я.М., Кочетков А.В., Шашков И.Г. Влияние плотности и длины нарезки базальтовой фибры на риск спутывания нитей // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 43-58. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1\\_2024](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024)



SCIENTIFIC ARTICLE

# The effect of basalt fiber cutting density and length on the risk of thread entangling

**S.Yu. Andronov<sup>1</sup>, V.V. Stolyarov<sup>1</sup>, Ya.M. Belozerov<sup>1</sup>,  
A.V. Kochetkov<sup>2,\*</sup>, I.G. Shashkov<sup>3</sup>**

**Sergey Yu. Andronov, Viktor V. Stolyarov, Yaroslav M. Belozerov**

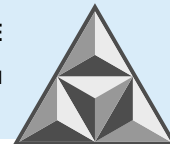
<sup>1</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia  
*atomic08@yandex.ru, stolyarov\_v\_v@mail.ru, ybm-20@mail.ru*

**Andrey V. Kochetkov**

<sup>2</sup>Russian Road Scientific-Research Institute (ROSDORNII), Moscow, Russia  
*soni.81@mail.ru\**

**Igor G. Shashkov**

<sup>3</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russia  
*soni.81@mail.ru*

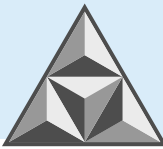


*The paper concerns with an assessment of the effect of basalt fiber cutting density and length on the risk of thread entangling. The average lengths of basalt fiber filaments do not exceed critical values. The histogram of the basalt fiber length distribution corresponds to the normal distribution with an excellent rating. The research ascertained the maximum permissible imperfection of the distribution of lengths of fluffed basalt filaments. Hence, expected risk of thread entangling is lower than permissible one. Therefore, it is acceptable to implement dispersed reinforcement of this fiber from basalt fiber at the required level of reliability.*

**Keywords:** basalt fiber, asphalt concrete, reinforcement, risk, density, thread length, distribution law

**For citation:**

Andronov S.Yu., Stolyarov V.V., Belozerov Ya.M., Kochetkov A.V., Shashkov I.G. (2024) The effect of basalt fiber cutting density and length on the risk of thread entangling. *Smart Composite in Construction*, 5(1), pp. 43-58 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1\\_2024](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v5n1_2024)



## ВВЕДЕНИЕ

Как показали результаты лабораторных испытаний, при нарезке волокон базальтовой 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 базальтового волокна остаются изогнутыми, а выпрямленные искусственно, имеют некоторый разброс по длине. Это вызывает необходимость оценить влияние плотности и длины нарезки базальтовой фибры на риск спутывания нитей.

Целью настоящего исследования является разработка теоретического обоснования возможности стабильного и устойчивого характера производства фиброасфальтобетонных смесей и функциональной устойчивости фиброасфальтобетона.

Для достижения этой цели необходимо выполнить статистический анализ длин нарезки базальтовой фибры и установить закон распределения длин нитей. Согласно установленному закону распределения, следует определить требуемую точность нарезки нитей, используя оценку риска их скручивания в узлы, что приводит к потере однородности армирования асфальтобетонной смеси.

В такой постановке тема исследования обладает признаками научной новизны и практической ценности.

Допустимый разброс длин базальтовых нитей, как и среднее значение, близкое к оптимальной длине для армирования асфальтобетона, будем оценивать с учетом риска в процессе нарезки и перемешивания (армирования) смеси.

Оптимальная длина базальтовой фибры определяется экспериментально и зависит от вида волокнистого материала, его дозировки в процентах по массе асфальтобетонной смеси и плотности волокна.

Краткий обзор по теме исследований проведен [1-6] и закреплен документально [7, 8]. Публикации в зарубежных наукометрических базах данных представлены перечнем [9-15].

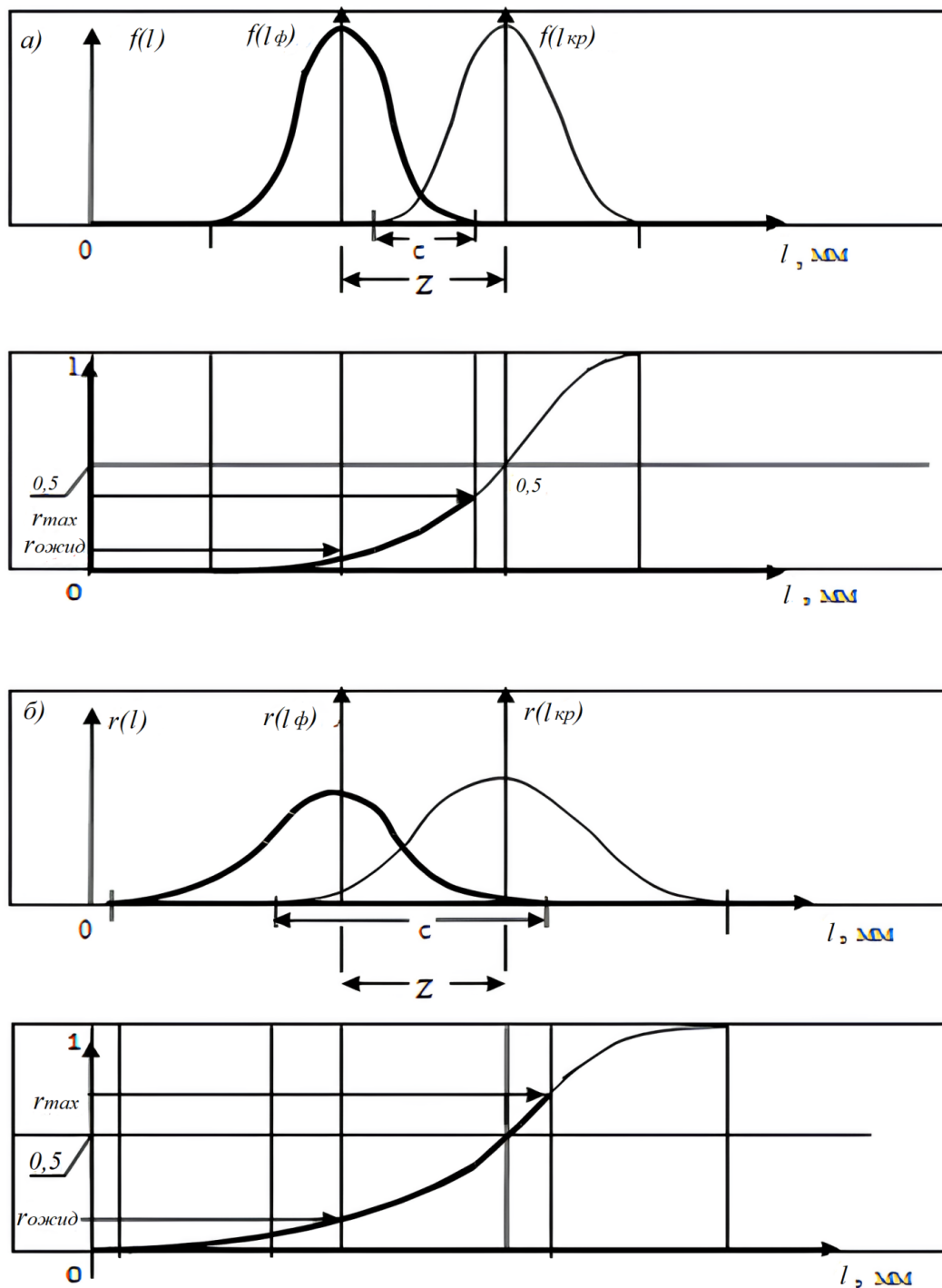
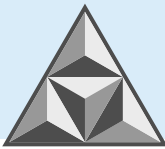
Работа является продолжением начатого цикла исследований в указанной области [16].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве нормативного документа 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)», разработанные при участии авторов настоящей статьи.

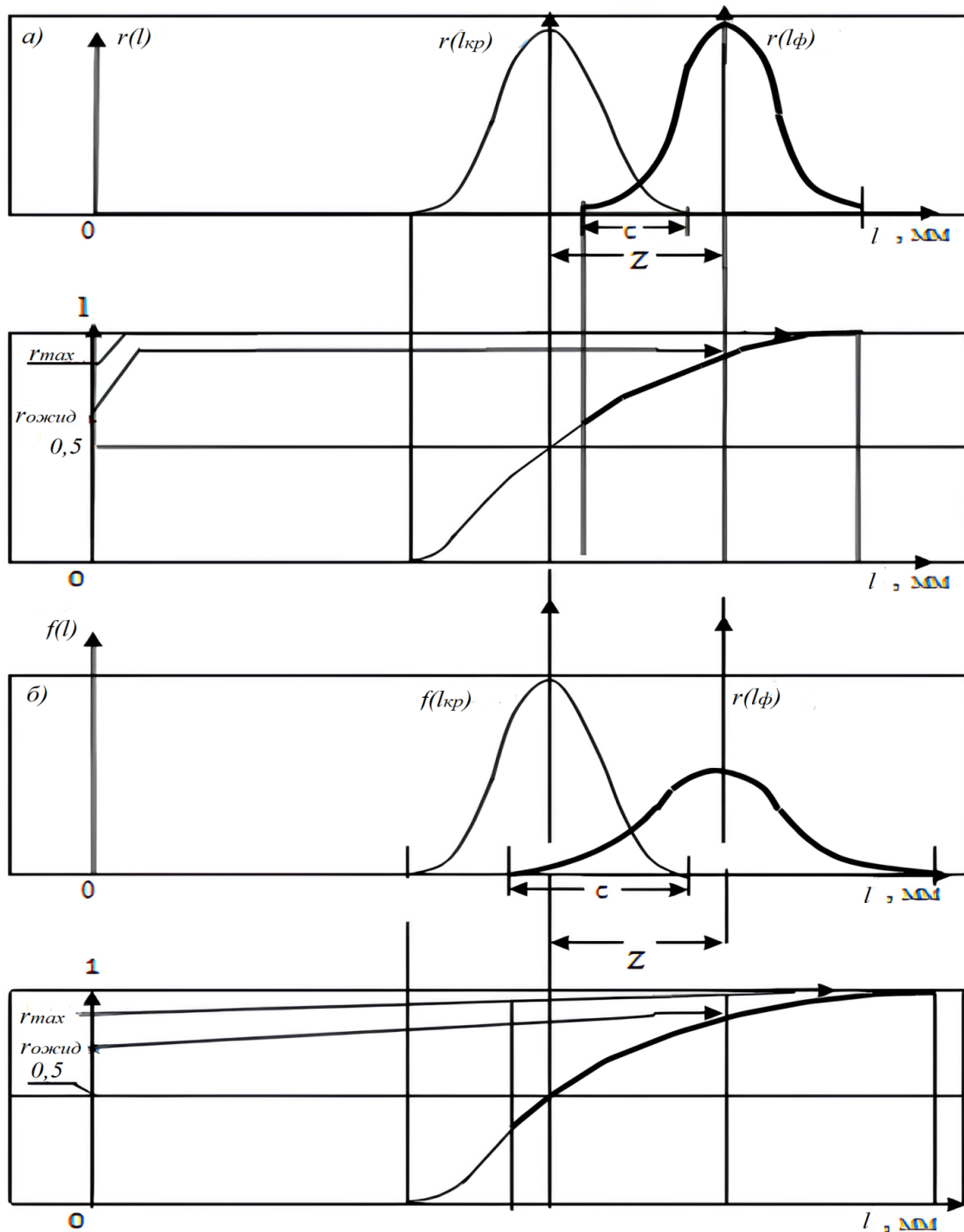
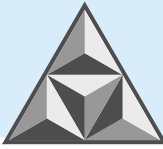
Нарезку нитей производили слайсером итальянской фирмы «Beckers» под углом 90°. В данном типе слайсера электрический привод обеспечивал вращение дискового ножа, а каретка с нарезаемой фиброй передвигалась вручную к вертикально расположенному лезвию. При этом фибру на подходе к дисковому ножу прижимали к каретке мастерком.

Для обоснования закона распределения использованы статистические методы определения средней длины и среднеквадратического отклонения для нитей базальтовой фибры. На рис. 1, а, б и 2, а, б показано, как работает теория риска при сравнении фактического закона с критическим распределением, когда среднее значение фактического параметра  $l_{cp}^{\phi}$  ниже значения критического параметра  $l_{cp}^{кр}$ . Критическое распределение представляет собой распределение параметра, соответствующего риску 50%, и неподвижно, если значения  $u$ ,  $l_{opt}$  и  $C_V^1$ , описанных в [1, 2] и ниже, являются неизменными.



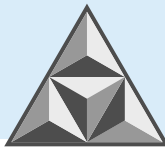
**Рис. 1.** Оценка риска нарушения дисперсного армирования асфальтобетонной смеси, подготовленной (нарезанной) фиброй по условию  $l_{cp} < l_{кр(max)}$ : а - при полном или близком соответствии средней длины нитей оптимальной длине ( $l_{cp} \cong l_{опт}$ ) и соответствии среднеекватрического отклонения длин нитей допустимому среднеекватрическому отклонению ( $\sigma_{l_\phi} \cong \sigma_{l_{доп}}$ ); б - при полном или близком соответствии средней длины нитей оптимальной длине ( $l_{cp} \cong l_{опт}$ ) и значительном несоответствии среднеекватрического отклонения нитей допустимому среднеекватрическому отклонению ( $\sigma_{l_\phi} \gg \sigma_{l_{доп}}$ )

**Fig. 1.** Assessment of dispersion reinforcement disturbance of an asphalt concrete mixture prepared (cut) with fiber according to the condition  $l_{cp} < l_{кр(max)}$ : а - at full or close compliance of the average thread length with the optimum thread length ( $l_{cp} \cong l_{опт}$ ) and compliance of the average square deviation of thread lengths with the permissible average square deviation ( $\sigma_{l_\phi} \cong \sigma_{l_{доп}}$ ); б - at full or close compliance of the average thread length with the optimum thread length ( $l_{cp} \cong l_{опт}$ ) and significant non-compliance of the average standard deviation of threads with the permissible standard deviation ( $\sigma_{l_\phi} \cong \sigma_{l_{доп}}$ )



**Рис. 2.** Оценка риска нарушения дисперсного армирования асфальтобетонной смеси нарезанной фиброй:  
 а – при превышении средней длины нитей среднего значения критической длины и при соответствии среднеквадратического отклонения длин нитей допустимому значению среднеквадратического отклонения ( $\sigma_{l_\phi} \cong \sigma_{l_{доп}}$ );  
 б – при том же соотношении нарезанных и критических средних длин нитей и максимальном превышении среднеквадратического отклонения нарезанных длин нитей над допустимым среднеквадратическим отклонением ( $\sigma_{l_\phi} \gg \sigma_{l_{доп}}$ )

**Fig. 2.** Assessment of dispersion reinforcement disturbance of an asphalt concrete mixture prepared with (cut) fiber:  
 a – at exceeding the average thread length of the average critical length value at compliance of the average standard deviation of thread lengths with the permissible value of the average standard deviation ( $\sigma_{l_\phi} \cong \sigma_{l_{доп}}$ ); b – with the same ratio of the cut and critical average lengths of the threads and at maximum excess of the average standard deviation of cut threads over the permissible standard deviation ( $\sigma_{l_\phi} \gg \sigma_{l_{доп}}$ )



Среднее значение критического параметра  $l_{cp}^{kp}$  для случая, когда требуется выдерживать соотношение  $l_{cp}^{\phi} < l_{cp}^{kp}$ , определяли по формулам [2]:

- при коэффициенте вариации фактических и критических длин нитей, отвечающих неравенству  $C_V^l \neq l/u$ :

$$l_{кр(макс)} = 2 \cdot l_{опт} - \frac{\sqrt{l_{опт}^2 + [u^2 \cdot (C_V^l)^2 - 1] \cdot (l_{опт}^2 - u^2 \cdot \sigma_{l_{опт}}^2) - l_{опт}}}{u^2 \cdot (C_V^l)^2 - 1}; \quad (1)$$

- при коэффициенте вариации фактических и критических длин нитей, равных по значению  $C_V^l = l/u$ :

$$l_{кр(макс)} = 2 \cdot l_{опт} - \frac{l_{опт}^2 - u^2 \cdot \sigma_{l_{опт}}^2}{2 \cdot l_{опт}}, \quad (2)$$

где  $l_{опт}$  – оптимальная длина нарезаемых нитей (для базальтового волокна 15 мм, установлена по лучшим физико-механическим показателям);

$\sigma_{l_{опт}}$  – среднеквадратическое отклонение оптимальной длины нитей фибры, которое отвечает оптимальным значениям при коэффициентах вариации этих длин, соответствующих  $C_V^{l_{опт}} = 0.155$  для базальтового волокна.

Статистические данные и расчеты по формулам теории риска показали, что допустимые отклонения оптимальных длин нитей от центров группирования, рассчитанные совместно при всех оптимальных плотностях, не должны превышать 20.8% и быть меньше 15.5% для полиакрилонитрильного и базальтового волокна соответственно; то есть, при всех рассмотренных в данном исследовании плотностях нитей, среднеквадратические отклонения для оптимальных длин нитей определяются в базальтовом волокне как

$$\sigma_{l_{опт}} = 0.155 \cdot l_{опт};$$

$u$  – квантиль подынтегральной функции, который математически зависит от требуемого уровня надежности [1, 3] (или величины допустимого риска) для последнего года службы покрытия с дисперсным армированием (табл. 1).

**Таблица 1.** Оценка допустимого риска при требуемом уровне надежности

**Table 1.** Assessment of acceptable risk at reliability goal

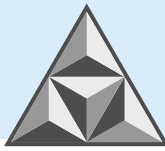
Требуемая надежность	$P_n$	0.98	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75
Допустимый риск	$r$	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
Функция Лапласа	$\Phi(u)$	0.48	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
Квантиль	$u$	2.05	1.645	1.283	1.034	0.844	0.675

Например, при уровне надежности  $P_n = 0.95$  получаем  $u = 1.645$ . Следовательно, допустимая величина риска снижения качества армирования составит  $r_{доп} = 1 - P_n = 1 - 0.95 = 0.05$ .

При  $C_V^l = l/u$  во втором многочлене формулы (1) возникает неопределенность типа 0/0. Второй многочлен формулы (2) раскрывает эту неопределенность. Для этого в формуле (1) берут частные производные числителя и знаменателя по переменной  $C_V^l$  и оставляют их в числителе и знаменателе новой формулы, если при условии  $C_V^l = l/u$  отношение производных не приводит к неопределенности 0/0. В противном случае берут вторые производные (возможно, и более высоких степеней), пока данный тип неопределенности не раскроют. В данном случае первые производные дали ожидаемый результат.

По формуле (2) определяют значение параметра  $l_{кр}$  в точке с переменной  $C_V^l = l/u$ , в которой основная формула (1) не дает ответа. При всех других значениях коэффициента





вариации (даже при бесконечно близком к  $1/u$ ) критический параметр определяется, в данных исследованиях – это критическая длина нитей.

Среднеквадратическое отклонение критического модуля упругости определяют по формуле:

$$\sigma_{l_{кр(макс)}} = C_V^{l_{кр(макс)}} \cdot l_{кр(макс)}, \quad (3)$$

где  $C_V^{l_{кр(макс)}} = C_V^{l_\phi} = \sigma_{l_\phi}/l_{кр}$ ; только при этом равенстве закон распределения критической переменной  $l_{кр(макс)}$  будет обладать эквивалентной однородностью с законом распределения фактической переменной ( $l_\phi$ ), а все расчетные показатели  $l_{кр}$  и  $l_{кр(макс)}$ ,  $\sigma_{l_\phi}$  и  $\sigma_{l_{кр}}$  – принадлежать к одной совокупности (сопоставимы).

Поэтому перед использованием формул (1) – (3) необходимо определить значение коэффициента вариации длин нитей в нарезанной фибре по зависимости  $C_V^{l_\phi} = \sigma_{l_\phi}/l_{кр}$ , используя для этого статистические данные (например, приведенные в табл. 2, 4).

На рис. 3, а, б показано сравнение фактического распределения  $f(l_\phi)$  с критическим распределением  $f(l_{кр})$  нитей, при котором среднее значение длин нитей равно оптимальному значению (или близко к нему) и среднеквадратическое отклонение длин нитей либо равно допустимому значению (см. рис. 1, а), либо незначительно отличается от него (см. рис. 1, б). Нити при смешивании с асфальтобетоном начнут спутываться друг с другом, но риск нарушения армирования, даже в области длинных нитей, будет ниже 50%, (см. рис. 1, а). В том случае, когда среднеквадратическое отклонение нитей ощутимо превысит допустимое значение (см. рис. 1, б), максимальные длины нитей приведут к превышению риска их спутывания в 50%. Следует помнить, что ожидаемый риск всегда соответствует среднему значению длин нарезанных нитей (см. рис. 1, а, б и рис. 2, а, б).

На рис. 2, а, б показаны случаи, когда среднее значение нарезанных нитей больше среднего значения их критического распределения. При этом риск спутывания максимальных длин нитей стремится к единице, а ожидаемый риск (соответствует среднему значению длин нитей) находится на участке от 0.5 до 1.0. Допускать ситуацию, отражаемую на рис. 2, а, б, нельзя: такая нарезка неминуемо приведет к браку.

Во всех перечисленных случаях формула теории риска едина и при нормальном распределении имеет вид:

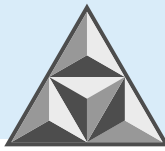
$$r = 0.5 - \Phi \left( \frac{l_{кр(макс)} - l_{кр}}{\sqrt{\sigma_{l_{кр(макс)}}^2 + \sigma_{l_{кр}}^2}} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – риск нарушения дисперсного армирования, определяемый в зависимости от требуемого уровня надежности ( $P_n$ ), вида фибры, оптимальной длины нитей ( $l_{опт}$ ), которая входит в расчетные формулы (1) и (2), а также от средней длины и среднеквадратического отклонения длин нитей, определяемых методами математической статистики. Формула (4) описывает нормальную работу армированного асфальтобетона, когда выполняется условие  $l_{кр(макс)} \gg l_{кр}$ , и выдает неприемлемые значения при соотношении  $l_{кр} > l_{кр(макс)}$  и тем более при  $l_{кр} \gg l_{кр(макс)}$ ;

$l_{кр(макс)}$  – среднее значение критической длины фибры, определяемое в зависимости от требуемого уровня надежности  $P_n$ , оптимальной длины нитей  $l_{опт}$  и фактического коэффициента вариации нарезанных нитей  $C_V^{l_{кр}}$ ;

$l_{кр}$  и  $\sigma_{l_{кр}}$  – параметры распределения нарезанных нитей, определяемые методами математической статистики;

$\sigma_{l_{кр(макс)}}$  – параметр критического распределения (устанавливается по максимальному ограничению длин нитей), определяемый по формуле (3).



Для обоснования видов фибры, которую можно будет применять при различных уровнях надежности дорожных одежд нежесткого типа, выполним ряд расчетов ожидаемого риска недостижения требуемого уровня армирования по описанным алгоритмам. Эти расчеты также необходимы для подтверждения работоспособности формул (1)–(3) и обоснования требуемых параметров нарезки нитей. Выполним также оценку риска спутывания длинных нитей в процессе дискретного армирования фиброй асфальтобетонной смеси, приготовленной для устройства нежесткого армированного покрытия.

Оптимальная дозировка базальтового волокна в ровингах производства ООО «Ижбазальт» в асфальтобетонной смеси составляла 0.4% (по массе смеси). Плотность базальтового волокна – 240 текс, оптимальная длина нарезки – 15 мм.

Описание технологических процессов приготовления базальтовой фибры аналогично алгоритму приготовления нарезок полиакрилонитрильного волокна [16]. Отличие заключается лишь в том, что оптимальная и приближающаяся к ней средняя длина нарезок базальтового волокна отвечает 15.00 мм, а среднеквадратическое отклонение длин нарезок – как правило, в несколько раз меньше. Изначально готовили 60 нарезок, измеряли длины нитей, определяли их среднее значение и среднеквадратическое отклонение [16].

При этом стремились, чтобы среднее значение длин базальтовых нитей было близким к 15 мм (оптимальная длина, установленная на основе анализа физико-механических свойств армированного асфальтобетона). При расчетном параметре  $\sigma_l$  и заданных значениях параметров  $t$  и  $\Delta$  определяли требуемое число нитей ( $n$ ). При условии  $n \leq 60$  число выполненных измерений (60) считали достаточным. В противном случае (при  $n > 60$ ) определяли (в первом приближении) дополнительное число измерений по выражению  $m = n - 60$  и нарезали недостающее число нитей ( $m$ ). Повторно определяли среднее значение и среднеквадратическое отклонение по всему массиву выборки ( $n_2 = 60 + m$ ).

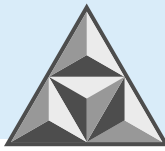
Исследования для проверки действующего закона распределения длин распущенных нитей проводили при каждой плотности трижды с базальтовым волокном (при оптимальной длине нитей). Лучше всех других законов (Вейбулла, гамма-распределения, Шарлье) подходил нормальный закон распределения (с оценками «удовлетворительно» и «хорошо»). Всего нами получено 12 распределений оптимальных длин нитей (15 мм) базальтового волокна.

В табл. 2 дан пример статистической обработки длин базальтовых нитей.

**Таблица 2.** Пример статистической обработки длин распущенных кусочков фибры базальтового волокна со средним значением близким к оптимальной длине

**Table 2.** Statistical data processing of lengths of basalt fiber fluffed pieces with an average values close to the optimal lengths

Разряды интервалов	Середина разряда, $U_m$	Абсолютная частота, $h_m$	Частичная сумма, $S_m$	Накопленная частота, $T$	Середина условного интервала, $l_m$	Произведения		
						$l_m \cdot h_m$	$l_m^2$	$l_m^2 \cdot h_m$
11÷12	11.5	1	1	1	-3	-3	9	9
12÷13	12.5	6	7	8	-2	-12	4	24
13÷14	13.5	18	25	33	-1	-18	1	18
14÷15	14.5 = $X_A$	30	55	88	0	0	0	0
15÷16	15.5	19	74	162	1	19	1	19
16÷17	16.5	6	80	242	2	12	4	24
17÷18	17.5 = $U_K$	3	83	325	3	9	9	27
$d = 1$		$n = 83$	$M = 325$	$\Sigma T = 859$		$B = 7$		$A = 121$



Следует отметить, что предельно допустимая асимметрия гистограмм, приводящая к появлению удовлетворительной сходимости нормального распределения с гистограммами, фиксировалась редко. Она возникала как следствие предельно допустимой островершинности распределения длин распущенных нитей. Однако ниже средней («удовлетворительная сходимость») оценка соответствия нормальному закону не опускалась [16].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические расчеты выполнены нами с использованием следующих методов.

*Метод суммирования:*

– среднее значение:

$$l_{cp} = U_K - d \left( \frac{M}{n} - 1 \right) = 17.5 - 1 \left( \frac{325}{83} - 1 \right) = 14.58 \text{ мм};$$

– дисперсия:

$$\sigma_1^2 = \frac{d^2}{n-1} \left( 2 \sum T - M - \frac{M^2}{n} \right) = \frac{1^2}{83-1} \left( 2 \cdot 859 - 325 - \frac{325^2}{83} \right) = 1.468;$$

– среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma_1 = 1.212 \text{ мм};$$

*Мультипликативный метод:*

– среднее значение:

$$l_{cp} = X_A + \frac{d}{n} B = 14.5 + \frac{1}{83} \cdot 6 = 14.57 \text{ мм};$$

– дисперсия:

$$\sigma_1^2 = \frac{d^2}{n-1} \left( A - \frac{B^2}{n} \right) = \frac{1^2}{83-1} \left( 121 - \frac{7^2}{83} \right) = 1.468;$$

– среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma_1 = 1.212 \text{ мм};$$

где  $U_k, D, M, X_a, A, B$  – показатели из табл. 2.

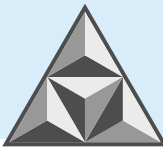
Сравнение эмпирического распределения с нормальным законом распределения по критерию Пирсона представлено в табл. 3.

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

**Table 3.** Comparison of the actual length distribution of cut pieces of basalt fiber threads with the law of normal distribution

Разряды интервалов	Абсолютная частота, $h_m$	Вероятность попадания измерений в разряд, $P_i$	Теоретическое количество измерений в разряде ( $n_t = P_i \cdot n$ )	Критерий Пирсона $\chi^2 = \frac{(h_m - n_t)^2}{n_t}$
11÷13	7	0.0961	7.9763	0.1195
13÷14	18	0.2222	18.4426	0.0106
14÷15	30	0.325	26.9750	0.3392
15÷16	19	0.2443	20.2769	0.0804
16÷17	6	0.0922	7.6526	0.3569
17÷18	3	0.0202	1.6766	1.0446
$d=1$	$n=83$	$\sum P_i = 1.0$		$\sum \chi^2 = 1.9512$

*Примечание:* Первый разряд имеет интервал  $d = 2$ , так как меньше трех попаданий в графу  $h_m$  в данной таблице не допускается.

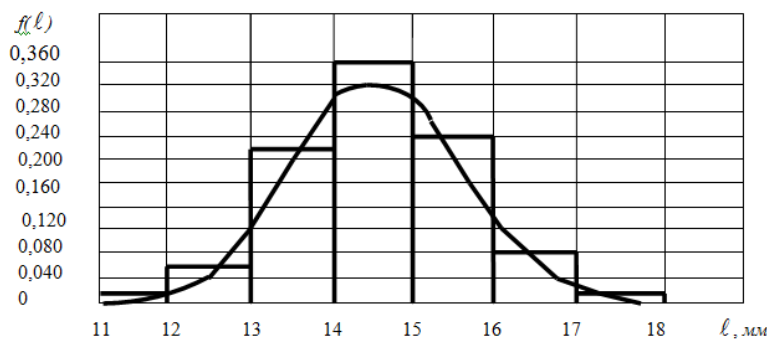


В свою очередь, на рис. 3 показано сравнение гистограммы длин нитей базальтовой фибры с плотностью нормального распределения.

Для теоретического распределения число степеней свободы ( $\nu$ ) определяли по формуле:

$$\nu = k - r, \quad (5)$$

где  $k$  – число разрядов ( $k = 6$ );  $r$  – число наложенных связей (для нормального закона распределения  $r = 3$ ). Таким образом,  $\nu = 6 - 3 = 3$ .



**Рис. 3.** Гистограмма длины волокон нарезанной базальтовой фибры и плотность нормального распределения  
Fig. 3. Histogram of fibre length of cut basalt fibres and normal distribution density

По таблицам  $\chi^2$ -распределения (таблица Пирсона; <https://www.matematicus.ru/teoriya-veroyatnosti/tablitzy/tablitza-pirsona>), при  $\chi^2 = 1.9512$  и  $\nu = 3$ , получили вероятность  $P = 0.62$ . Так как при  $P > 0.5$  соответствие теоретического закона распределения результатам измерений (гистограмме) считается отличным, зафиксирована наивысшая оценка соответствия.

По критерию Романовского, получено полное соответствие фактического распределения длин базальтовых нитей нормальному закону:

$$R = \frac{\chi^2 - \nu}{\sqrt{2\nu}} = \frac{1.9512^2 - 3}{\sqrt{2 \cdot 3}} = 0.33.$$

Как видим,  $R = 0.33 < 3$  [17, 18] (Хуснутдинов, Р.Ш. Математическая статистика: учеб. пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. 205 с.). Гистограмма распределения длин базальтовой фибры соответствует нормальному распределению с оценкой «отлично».

На основе проведенных исследований установлено влияние плотности нитей базальтового волокна на разброс распределения длин нитей (табл. 4).

**Таблица 4.** Влияние плотности нитей базальтового волокна на разброс распределения длин нитей

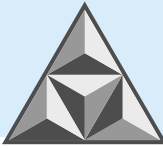
**Table 4.** Effect of basalt fibre thread density on the variability of thread length distribution

Плотность, текс	54	120	240
Средняя длина нитей, мм	14.49	14.58	14.45
Среднеквадратическое отклонение длин нитей, мм	1.385	1.212	1.194

Его можно кратко сформулировать следующим образом: чем выше плотность нитей базальтового волокна (текс), тем меньше среднеквадратическое отклонение длин нарезанной фибры (мм) (см. данные табл. 4).

*Расчет и оценка риска спутывания длинных нитей при армировании асфальтобетона базальтовой фиброй*

Исходные данные: плотность базальтового волокна равна 120 текс; средняя длина нитей  $l_{cp} = 14.58$  мм; среднеквадратическое отклонение длин нитей  $\sigma_{l_{\phi}} = 1.212$  мм; требуемый уровень надежности на последний год срока службы  $P_n = 0.95$  и значение квантиля  $u = 1.645$ ,



что соответствует требуемому уровню надежности; допустимая величина риска снижения качества армирования:  $r_{\text{доп}} = 1 - P_n = 1 - 0.95 = 0.05$ ; оптимальная длина нитей базальтовой фибры  $l_{\text{опт}} = 15$  мм; коэффициент вариации оптимальных длин нитей при всех плотностях базальтовой фибры  $C_V^{l_{\text{доп}}} = 0.155$ .

1. На основе исходных данных устанавливаем фактический коэффициент вариации длин нарезанных нитей фибры по зависимости:

$$C_V^l = \frac{\sigma_{l_\phi}}{l_{\text{ср}}} = \frac{1.212}{14.58} = 0.086.$$

Фактический коэффициент вариации нарезанных нитей фибры при данной плотности находится в допуске коэффициента вариации оптимальных длин нитей ( $0.086 < 0.155$ ). Коэффициент вариации 0.155 является максимально допустимым, так как он установлен по совокупности всех возможных плотностей нитей базальтового волокна.

2. Определяем среднеквадратическое отклонение оптимальных длин нитей при максимально допустимом коэффициенте вариации:

$$\sigma_{l_{\text{доп}}} = C_V^{l_{\text{доп}}} \cdot l_{\text{опт}} = 0.155 \cdot 15 = 2.325 \text{ мм.}$$

Так как фактическое среднеквадратическое отклонение длин нитей фибры, установленное методами математической статистики, равно 1.212 мм, неравенство  $1.212 < 2.325$  показывает, что все статистические параметры длин нитей допустимы.

3. По требуемому уровню надежности на последний год эксплуатации данного дорожного покрытия определяем значение отношения  $1/u$ , с которым сравниваем параметр  $C_V^l = 0.086$  при выборе расчетной формулы (1) или (2).

Так как  $1/u = 1/1.645 = 0.608$  и имеем неравенство  $0.086 \neq 0.608$ , расчетной является формула (1), для применения которой выполняется условие  $C_V^l \neq 1/u$ :

$$l_{\text{кр(макс)}} = 2 \cdot l_{\text{опт}} - \frac{\sqrt{l_{\text{опт}}^2 + [u^2 \cdot (C_V^l)^2 - 1] \cdot (l_{\text{опт}}^2 - u^2 \cdot \sigma_{l_{\text{опт}}}^2)} - l_{\text{опт}}}{u^2 \cdot (C_V^l)^2 - 1} =$$

$$= 2 \cdot 15 - \frac{\sqrt{15^2 + [1.645^2 \cdot 0.086^2 - 1] \cdot (15^2 - 1.645^2 \cdot 2.325^2)} - 15}{1.645^2 \cdot 0.086^2 - 1} = 19.123 \text{ мм.}$$

4. Определяем среднеквадратическое отклонение критических длин нитей:

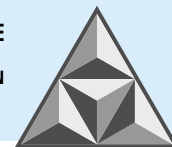
$$\sigma_{l_{\text{кр(макс)}}} = C_V^{l_{\text{кр}}} \cdot l_{\text{кр(макс)}} = 0.086 \cdot 19.123 = 1.644 \text{ мм.}$$

5. Риск спутывания нитей в процессе дисперсного армирования устанавливаем по формуле (4):

$$r = 0.5 - \Phi\left(\frac{l_{\text{кр(макс)}} - l_{\text{ср}}}{\sqrt{\sigma_{l_{\text{кр(макс)}}}^2 + \sigma_{l_{\text{ср}}}^2}}\right) = 0.5 - \Phi\left(\frac{19.123 - 14.58}{\sqrt{1.644^2 + 1.212^2}}\right) = 0.5 - \Phi(2.224) = 0.5 - 0.4870 = 0.013.$$

Ожидаемый риск спутывания нитей меньше допустимого риска ( $0.013 < 0.050$ ). Следовательно, дисперсное армирование данной фиброй из базальтового волокна при требуемом уровне надежности 0.950 возможно (допустимо).

6. Фактический уровень надежности армирования базальтовой фиброй  $P_{n_\phi} = 1 - r_\phi = 1 - 0.013 = 0.987$  больше требуемого уровня надежности ( $0.987 > 0.950$ ). Утверждать, что и следующий уровень надежности (0.980) достигнут, нельзя, пока не будут



выполнены расчеты по формуле (1) при соответствующем значении квантиля ( $u = 2.05$ ) и определены расчетные значения фактического риска спутывания нитей и фактического уровня надежности армирования.

7. Выполним по этой же методике проверку риска спутывания нитей и уровней надежности при других плотностях базальтовых нитей (табл. 5).

**Таблица 5.** Проверка риска спутывания нитей и уровней надежности при других плотностях базальтовых нитей

**Table 5.** Verifying thread entangling risk and safety levels at other basalt thread densities

Плотность волокна, текс	Фактические параметры нитей фибры		Критические параметры нитей фибры		Риск потери армирования (риск спутывания нитей)	Уровень надежности армирования
	средняя длина, $l_{cp}$ , мм	стандарт отклонения, $\sigma_{l_f}$ , мм	средняя критическая длина, $l_{kp}$ , мм	стандарт критических длин, $\sigma_{l_{kp(max)}}$ , мм		
54	14.49	1.385	19.182	1.822	0.020	0.980
120	14.58	1.212	19.123	1.212	0.013	0.987
240	14.45	1.194	19.101	1.578	0.009	0.991

Если при нарезании базальтовых нитей будет получено соотношение  $l_{cp} > l_{kp(max)}$ , возникнет ситуация, показанная на рис. 2, а, б, то есть ожидаемый риск превысит 50%. При большом увеличении среднего значения нитей относительно критического значения ( $l_{cp} \gg l_{kp(max)}$ ) риск стремится к единице. Будет получен результат, отраженный на рис. 2, а, б. Отметим, что средние длины нитей базальтовой фибры никогда не превышали критических величин и группировались около отметки 15.00 мм.

## ВЫВОДЫ

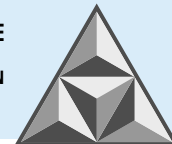
1. Оптимальная длина нитей при всех плотностях базальтового волокна равна 15.00 мм. Общее решение, учитывающее возникновение при трех значениях плотностей (54, 120 и 240 текс) одного оптимального значения длин нитей (15 мм), устанавливает предельно допустимое значение среднеквадратического отклонения оптимальных длин нитей базальтового волокна  $\sigma_l^{opt} = 2.325$  мм при  $C_V^{l_{opt}} = 0.155$ . Средние значения длин нитей базальтовой фибры не превышали критических величин.

2. Гистограмма распределения длин базальтовой фибры соответствует нормальному распределению с оценкой «отлично». В распределении длин распушенных базальтовых нитей установлена предельно допустимая островершинность.

3. Ожидаемый риск спутывания нитей меньше допустимого ( $0.013 < 0.050$ ); следовательно, дисперсное армирование асфальтобетона фиброй из базальтового волокна при требуемом уровне надежности 0.950 возможно (допустимо).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Янковский Л.В., Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е. Техническое нормирование макрошероховатости дорожных покрытий автомобильных и лесовозных дорог: монография / под общ. ред. Л.В. Янковского. 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.

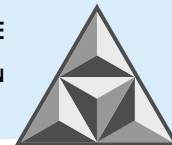


3. **Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В.** Технология производства и применения дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с базальтовой фиброй // Строительные материалы. 2020. № 3. С. 70-75.
4. **Андронов С.Ю., Алферов В.И., Кочетков А.В.** Совершенствование методов введения фиброволокон в горячие и холодные асфальтобетонные смеси // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12, № 2. С. 2.
5. Патент на полезную модель № 170486 У1 РФ. Приставка для обработки фиброволокна перед введением его в дорожно-строительную армируемую смесь / **Андронов С.Ю., Артеменко А.А., Кокодеева Н.Е. и др.** Оpubл. 26.04.2017.
6. Патент на полезную модель № 171296 У1 РФ. Узел подготовки фиброволокна для приготовления дорожно-строительной смеси / **Андронов С.Ю., Артеменко А.А., Арзамасцев С.В. и др.** Оpubл. 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 / под ред. Ю.Э. Васильева, Н.Е. Кокодеевой. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. 192 с.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020612667 РФ. TST-РИСК / **Акулова Н.Е., Щеголева Н.В., Столяров В.В.** Оpubл. 28.02.2020.
9. **Andronov S., Kokodeeva N., Vasiliev Y., Kotlyarsky E., Kochetkov A.** Impact study of basalt and polyacrylonitrile fibercon performance characteristics of asphalt concrete // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Т. 1258. С. 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. DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan and Chunfeng Zhu.** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // Materials. 2018. Vol. 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. Vol. 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. 2028. Vol. 8(11). P. 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao Qin, Ai Qin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 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-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // Applied Sciences. 2018. Vol. 8(12). P. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.
16. **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, № 3. С. 55-65.  
URL: [https://drive.google.com/file/d/14QOFySop\\_RkqhnBY5BZ-gPqnCbgBJM8a/view](https://drive.google.com/file/d/14QOFySop_RkqhnBY5BZ-gPqnCbgBJM8a/view) (in Russian).
17. Таблица Пирсона. URL: <https://www.matematicus.ru/teoriya-veroyatnosti/tablitsey/tablitza-pirsona> (дата доступа: 19.02.2024).
18. **Хуснутдинов Р. Ш.** Математическая статистика: учебное пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. 205 с.

*Поступила в редакцию 01.02.2024*

*Одобрена после рецензирования 06.03.2024*

*Принята к опубликованию 11.03.2024*



## REFERENCES

1. **Yankovskiy, L.V., Kochetkov, A.V. & Kokodeeva, N.E.** (2019) *Technical regulation of the 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 fiber-containing asphalt concrete mixtures with dispersed binder, *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 evrazijskoj nauki*, 12(2), p. 2 (in Russian).
5. **Andronov, S.Yu., Artemenko, A.A., Kokodeeva, N.E. et al.** (2017) *An attachment for processing fiber before introducing it into a road-building reinforced mixture*. Utility model patent RU 170486 U1 (in Russian).
6. **Andronov, S.Yu., Artemenko, A.A., Arzamascev S.V. et al.** (2017) *An attachment for processing fiber before introducing it into a road-building reinforced mixture*. Utility model patent RU 171296 U1 (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*. Certificate of registration of the computer program RU 2020612667 (in Russian).
9. **Andronov, S., Kokodeeva, N., Vasiliev, Y., Kotlyarsky, E. & Kochetkov, A.** (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)*. 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*, 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-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, *Applied Sciences*, 8(12), p. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.
16. **Andronov, S.Yu., Stolyarov, V.V., Valiev, Sh.N. & Kochetkov, A.V.** (2023) The length of fiber strands for reinforcing asphalt concrete mix, *Smart composites in construction*, 4(3), pp. 55-65 [online]. Available at: [https://drive.google.com/file/d/14QOFySop\\_RkqhnBY5BZ-gPqnCbgBJM8a/view](https://drive.google.com/file/d/14QOFySop_RkqhnBY5BZ-gPqnCbgBJM8a/view) (in Russian).
17. Pearson's table | Matematicus [online]. Available at: <https://www.matematicus.ru/teoriya-veroyatnosti/tablitzy/tablitza-pirsona> (accessed: February 19, 2024) (in Russian).
18. **Khusnutdinov, R. S.** (2019) *Mathematical statistics*. Moscow: *Infra-M* (in Russian).

Received 01.02.2024

Approved after reviewing 06.03.2024

Accepted 11.03.2024