

*Шакирзянов Д. И.,*

*Ухтинский государственный технический университет,*

*доцент кафедры Механики, к.т.н.*

*Бурмистров В. А.,*

*Ухтинский государственный технический университет,*

*доцент кафедры Механики, к.т.н.*

*Задворнов В. Ю.,*

*Пермский национальный исследовательский*

*политехнический университет,*

*начальник лаборатории кафедры Автомобильные дороги и мосты*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ В ЩЕБЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ОСНОВАНИЙ И ПОКРЫТИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

*Аннотация: Щебеночные основания и покрытия - наиболее распространенный тип конструкций дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог Северо-Западного региона.*

*Основным видом каменного материала, используемого при строительстве, реконструкции, ремонта и содержании лесовозных автомобильных дорог является щебень. От его качества (прочности, морозостойкости, гранулометрического состава) напрямую зависят потребительские свойства лесовозных автомобильных дорог (ровность, коэффициент сцепления и т.д.) и их долговечность.*

*В Российской Федерации производство каменных материалов составляет около 140 млн. м<sup>3</sup> в год, причем примерно половина этого количества потребляется дорожно-строительной отраслью.*

*Ключевые слова: щебеночные покрытия, дорожные одежды, лесовозные автомобильные дороги, каменные материалы.*

*Shakirzyanov D. I.*

*Ukhta State Technical University,*

*Associate Professor of the Department of Mechanics,*

*Burmistrov V. A.,*

*Ukhta State Technical University,*

*Associate Professor of the Department of Mechanics,*

*candidate of technical sciences*

*Zadvornov V. Yu.,*

*Perm national research polytechnic university,*

*Head of Laboratory of the Department of Highways and Bridges*

**DETERMINATION OF STRUCTURAL CONNECTIONS IN  
CRUSHED STONE MATERIALS OF BASES AND COATINGS  
OF LOGGING ROADS**

*Annotation: Crushed stone bases and surfaces are the most common type of road surface structures for logging roads in the North-West region.*

*The main type of stone material used in the construction, reconstruction, repair and maintenance of logging roads is crushed stone. The consumer properties of logging roads (evenness, adhesion coefficient, etc.) and their durability directly depend on its quality (strength, frost resistance, granulometric composition).*

*In the Russian Federation, the production of stone materials is about 140 million m<sup>3</sup> per year, with about half of this amount consumed by the road construction industry.*

*Key words: crushed stone pavements, road surfaces, logging roads, stone materials.*

Одной из особенностей всех щебеночных слоев дорожных одежд является их дискретная структура, т. е. составные частицы материала не связаны между собой или же эти связи являются слабыми. Однако существующие нормативные документы и исследователи делят каменные материалы лишь на легко- и трудноуплотняемые и регламентируют только их прочностные свойства. При этом упругая деформация конструктивного слоя лесовозной автомобильной дороги назначается в зависимости от его толщины и прочности и совсем не учитывает связность или раздробленность материала, происхождение и структурные связи между его частицами.

Помимо кондиционных материалов, выпускаемых промышленностью, в регионах имеются значительные запасы местных каменных материалов из малопрочных горных пород. Теоретически такой материал вполне пригоден для создания высокоплотных конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, однако для получения лучших результатов необходимо изучить свойства материала и его поведение в тех или иных эксплуатационных условиях.

Таким образом разработка технологии создания конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из местных малопрочных щебеночных материалов и повышение их транспортно-эксплуатационного качества позволяет повысить устойчивость функционирования региональной лесотранспортной сети путем влияния на элемент  $U_2$  - «транспортно-эксплуатационные показатели сети».

Под материалом с дискретной (зернистой) структурой понимаем такой материал, сила внутренних связей частиц которого многократно превышает

их внешнюю связь между собой. Такому материалу характерны свойства сыпучих сред, состоящие из множества отдельных более или менее однородных частиц, которые по физическим свойствам занимают промежуточное положение между твердыми телами и жидкостями.

Все возможные виды взаимодействия частиц между собой в малопрочном щебеночном материале можно разделить на физические и цементирующие.

При рассмотрении физических связей рассматриваем только механическое взаимодействие между его составными частицами. На сегодняшний день отсутствует единая расчетная механическая модель дискретного тела, кроме решений для частых случаев, таких как упругое тело, пластическое тело и т. д.

В дискретных средах механическое взаимодействие между его составными частицами оценивается числом контактов. Для идеальной среды, состоящей из одномерных сфер наибольшее возможное число связей между сферами, может составить двенадцать.

В случае, когда зерно материала имеет неидеальную (несферическую) форму, число контактов будет зависеть от межзерновой пустотности материала. По данным *W.F. Murphy* для числа контактов между зернами около 14 необходимое значение межзерновой пустотности дискретного материала должно составить не менее 0,20.

Чаще всего, это значение находится в пределах от 0,26 до 0,78. На рисунке 1 отображены обобщенные данные по изменению контактного числа частиц в зависимости от межзерновой пустотности материала, без учета изменения формы и размеров частиц.

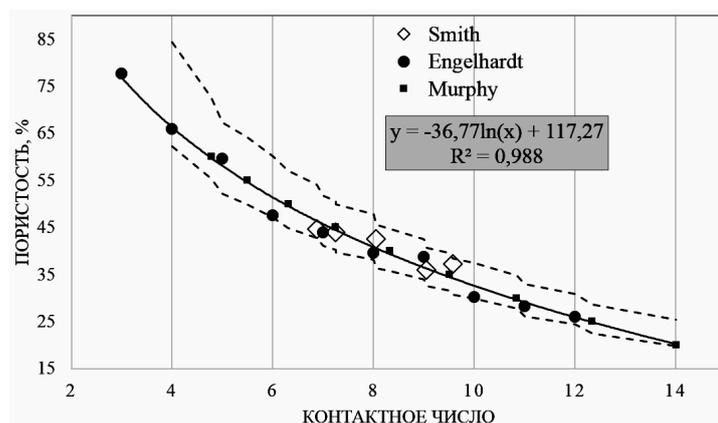


Рисунок 1 – Обобщенная зависимость контактного числа от пористости материала (по *Murphy, W.F., Smith, Engelhardt*)

На основании исследований можно сделать следующие выводы: число контактов увеличивается с уменьшением межзерновой пустотности, материала; упакованные случайным образом частицы в виде сфер имеют среднее значение контактов, от 6,9 до 9,1; значение контактного числа варьируется от 4 до 12.

В общем виде зависимость числа контактов от межзерновой пустотности, по данным *Murphy, W.F.* имеет вид:

$$C = C_0 + 9,7 \cdot (p_0 - p)^n, \quad (1)$$

где  $C_0$  – число контактов на начальной стадии уплотнения;  $p_0$  – межзерновая пустотность на начальной стадии уплотнения;  $P$  – межзерновая пустотность уплотненного материала ( $p_0 \geq p$ );  $n$  – показатель степени.

Для идеализированных дискретных сред параметры уравнения (1) соответствуют значениям  $C_0 = 4,46$ ,  $p_0 = 0,384$ ,  $n = 0,48$ .

Рассмотрим уложенный слой, состоящий из одномерных плотно расположенных частиц сферической формы. При этом межзерновые пустоты не заполнены и все частицы имеют точки взаимного касания. Частицы являются абсолютно твердыми телами и их деформации не учитываются.

Для этого случая В. В. Мелеванский предлагает оценивать усилие на контактах между верхней частицей и каждой из трех нижних, на которые она опирается в виде

$$N = \frac{\sqrt{2}}{4} p_0 d^2 \approx 0,35 p_0 d^2, \quad (2)$$

где  $p_0$  – внешнее давление, МПа;  $d$  – диаметр частицы, мм.

В случае трех частиц, когда верхнее зерно опирается на два нижних, и внедряется между ними, наибольшую величину усилия можно оценить по выражению:

$$N = \frac{Q}{2 \left( \sin \frac{\beta}{2} + f \cos \frac{\beta}{2} \right)} \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол между осью действия силы и нормальной реакции частицы;  $f$  – коэффициент трения;  $Q$  – внешнее давление.

В случае взаимодействия между двумя частицами, в виде двух идеальных сфер радиусом  $R$  (см. рисунок 3) нормальное и касательное напряжения при взаимодействии между двумя частицами можно выразить в виде:

$$S_n = \frac{\partial F}{\partial z}; \quad S_\tau = \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4)$$

где  $S_n$  – нормальное напряжение, МПа;  $S_\tau$  – касательное напряжение, МПа;  $z$  – длина укорочения радиуса частицы, мм;  $x$  – смещение частицы относительно центра, мм.

Используя данные модели Герца-Миндлина (*Hertz-Mindlin*) оценку нормальных и касательных напряжений между частицами можно выразить в виде:

$$S_n = \frac{4Ga}{1-\nu}; \quad S_\tau = \frac{8Ga}{2-\nu}, \quad (5)$$

где  $G$  – модуль сдвига между частицами, МПа;  $a$  – радиус зоны контакта, мм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

В этом случае радиус зоны контакта  $a$  и нормальное перемещение  $z$ , определяются следующими уравнениями:

$$a = \left[ \frac{3FR}{8G} (1-\nu) \right]^{1/3}; \quad z = \frac{a^2}{R}, \quad (6)$$

где  $F$  – сдерживающая сила между частицы, МПа;  $R$  – радиус частицы, мм.

При давлении  $P$ , действующем на материал, удерживающая сила  $F$  между частицами будет равна:

$$F = \frac{4\pi \cdot R^2 P}{C(1-\phi)}, \quad (7)$$

где  $P$  – давление на образец материала, МПа;  $R$  – радиус частицы, мм;  $C$  – контактное число;  $\phi$  – межзерновая пустотность, %.

При деформации дискретного материала увеличение числа контактов с одной стороны приводит к увеличению приращения давления  $dp$ , а с другой к уменьшению приращения деформации  $de$ .

В общем виде этот процесс описывается уравнением:

$$de = \frac{dp}{L} \left[ \frac{1}{(p_c + p)^n} + \frac{1}{(p_s - p)^m} \right], \quad (8)$$

где  $L$  – величина, характеризующая жесткость сыпучего тела;  $e$  – относительная деформация;  $p_c$  – начальное уплотнение;  $p_s$  – предел несущей способности;  $n$  и  $m$  – показатели степени, зависящие от размера и формы частиц.

Радиус частиц в процессе измельчения постоянно изменяется. Поэтому, для возможности расчета контактных усилий между частицами, изменение среднего значения радиуса определяем по выражению:

$$R_i = R_0 \cdot \frac{(f_i^{0-5} + f_i^{5-10} + f_i^{10-20})}{100}, \quad (9)$$

где  $R_i$  – средний радиус частиц на  $i$ -ом цикле приложения нагрузки, мм;  $R_0$  – средний радиус частиц до уплотнения, мм;  $f_i^{0-5}$  – процент фракции 0-5 мм на  $i$ -ом цикле приложения нагрузки;  $f_i^{5-10}$  – процент фракции 5-10 мм на  $i$ -ом цикле приложения нагрузки;  $f_i^{10-20}$  – процент фракции 10-20 мм на  $i$ -ом цикле приложения нагрузки.

Показателем измельчения частиц каменного материала является количество образующихся при уплотнении мелких частиц: для щебня фракции 10-20 мм это частицы размером <5 мм; для фракции 20-40 мм частицы размером <10 мм; для фракции 40-70 мм частицы <20 мм.

Дискретная среда будет обладать прочностью, которая зависит не только от размера, формы частиц, но и от межзерновой пустотности. Для оценки зернового состава с минимальными значениями межзерновой пустотности воспользуемся исследованиями Фуллера и Андреасена:

$$A = 100 \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^n, \quad (10)$$

где  $A$  – содержание частиц меньших, чем размер  $d$ ;  $d$  – крупность зерен той фракции, для которой вычисляется ее содержание в смеси, мм;  $D$  – максимальный размер частиц, мм;  $n$  – степень кривой максимальной плотности по Фуллеру  $n = 0,5$ , по Андреасену  $n = 0,37$  (для пространственного распределения).

Таким образом со стороны физических связей работа слоя из дискретного материала в конструкциях дорожных одежд лесовозных дорог зависит от плотности упаковки, размера и формы (кубовидная, пластинчатая) зерен материала.

Помимо физических связей у ряда каменных материалов, к которым относятся продукты дробления слабых известняков, золы уноса, активные шлаки, металлургический шлам и другие зернистые побочные продукты промышленности возникает особый вид связей – цементирующие.

Цементирующие связи возникают в неорганических материалах как в процессе их уплотнения, так и после, в результате протекания химических реакций. Необходимым условием уплотнения слоя из местных малопрочных щебеночных материалов является присутствие воды, являющейся реагентом для протекания реакции.

Под цементирующей способностью понимают свойство горной породы в размолотом состоянии (в виде порошка), при смешивании с водой, образовывать тесто, которое после высыхания приобретает некоторую связность. Цементирующая способность считается хорошей, если показатель времени прохождения образца через металлическое сито 2 мм свыше 180 с, средней, если показатель 60–180 с и низкой, если показатель до 60 с (таблица 2).

Способность к омоноличиванию позволяет не только повысить качество конструктивного слоя при строительстве, но и при эксплуатации. Это приводит к увеличению общего модуля упругости дорожной одежды и может расцениваться как предпосылка для увеличения транспортно-эксплуатационного состояния лесовозной автомобильной дороги.

Для расчета контактных усилий, возникающих между частицами малопрочных каменных материалов, с учетом принятых допущений средний расчетный радиус частицы  $R_c$  определяется по формуле:

$$R_c = R_0 \cdot (1 - k_i) + \frac{R_i a_i}{100}, \quad (11)$$

где  $R_0$  – средний радиус частиц до уплотнения, мм;  $R_i$  – средний радиус частиц на  $i$ -ом цикле приложения нагрузки, мм;  $k_i$  – степень измельчения;  $a_i$

– параметр учета цементации,  $a_i = \frac{f_i^{0-0,25}}{100}$ ;  $f_i^{0-0,25}$  – содержание щебня фракции  $< 0,25$  мм, %.

Таблица 2 – Характеристика каменной пыли, способной к цементации,

по виду каменного материала

Характеристика	Каменный материал		
	Гранитный щебень	Известняковый щебень	Доломитовый щебень
Цементирующая способность, сек.*/оценка	70/слабая	210/сильная	225/сильная
Примечание: * - время частичного прохода образца в водной среде через металлическое сито 2 мм			

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, А. П. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Т. I / А.П. Васильев [и др.]. – М.: Информавтодор, 2005. – 236 с.
2. ВСН 24-88 Технические правила ремонта и содержания автомобильных дорог / Введ. – 1989.01.01 – М.: Транспорт, 1989. – 198 с.
3. Кручинин, И. Н. Математическая модель для расчета параметров ходовой части лесотранспортных и лесозаготовительных машин // Изв. высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2006. – N 1. – С. 52-57.