

*Шакирзянов Д. И.,*

*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*

*Бурмистров В. А.,*

*Ухтинский государственный технический университет,*

*доцент кафедры Механики, к.т.н.*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ  
УПЛОТНЕННОГО СЛОЯ ЩЕБЕНОЧНЫХ ОСНОВАНИЙ И  
ПОКРЫТИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

*Аннотация: В процессе уплотнения щебеночных оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог, на материал воздействуют как статическая, так и динамическая нагрузка. При этом время импульса, с учетом деформации уплотняемого материала, зависит от периода колебаний вибровозбудителя, а время контакта материала с вальцом катка от размера длины контакта и скорости движения.*

*Ключевые слова: Математическая модель, уплотненный слой, щебеночные покрытия, лесовозные автомобильные дороги.*

*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*

**MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION OF COMPACTED LAYER  
OF CRUSHED STONE BASES AND COVERINGS  
OF LOGGING ROADS**

*Abstract: During the process of compaction of crushed stone bases and coverings of logging roads, the material is affected by both static and dynamic loads. In this case, the pulse time, taking into account the deformation of the compacted material, depends on the oscillation period of the vibration exciter, and the contact time of the material with the roller roller on the size of the contact length and the speed of movement.*

*Key words: Mathematical model, compacted layer, crushed stone pavements, logging roads.*

Основные технические характеристики уплотняющей техники, применяемой в Северо-Западном регионе приведены в таблице 1.

В процессе уплотнения виброкатком на поверхность действует общая сила, состоящая из статической, от веса катка и динамической составляющей:

$$P = P_{ст} + P_{дин} , \quad (1)$$

где  $P_{ст}$  – статическая нагрузка, кН,  $P_{дин}$  – динамическая нагрузка, кН.

Таблица 1 – Технические характеристики уплотняющей техники используемой  
в Уральском регионе

Наименование характеристики	Среднее значение параметра	Диапазон выборки
Рабочий вес (эксплуатационная масса), кг	14500	10500 - 16700
Центробежная сила на вибровозбудителе (вынуждающая сила) $P_{ц}$ , кН	207	65 - 300
Статическая линейная нагрузка на валец $P_{ст}$ , кгс/см	34,6	24 - 36
Рабочая скорость $V$ , км/ч	1.5-7.5	2,8 - 14
Амплитуда колебаний вибратора, мм	1,61	0,3 - 2,0
Частота колебаний вибратора $\nu$ , Гц	30	24 - 36
Длина хорды пятна контакта $l$ , см	3,0	1,0-5,0
Ширина вальца $b$ , м	2,07	1,7 - 2,37

С точки зрения уплотняемого материала важно не только силовое воздействие, но и время приложения импульса.

Время импульса, с учетом деформации уплотняемого материала определяется по выражению:

$$t_{возд} = (0,5 \dots 1,0)T, \quad (2)$$

где  $T$  – период колебания вибровозбудителя, с

При движении виброкатка уплотняемый материал находится в контакте с вальцом в течении времени:

$$t_{конт} = S_{кон}/v_{рх}, \quad (3)$$

где  $S_{кон}$  – длина контакта вальца с материалом, м,  $v_{рх}$  – скорость рабочего хода катка, м/с.

При этом длина контакта вальца катка с материалом соответствует размеру наибольшей фракции материала. В нашем случае исследуемый материал содержит наибольшую фракцию 20 ... 40 мм, поэтому пятно контакта принимается равным 50 мм, и по мере уплотнения каменного материала эта величина уменьшается до 10 мм.

С учетом того, что  $t_{возд} = t_{конт}$  количество циклов воздействия на уплотняемый материал можно определить по выражению:

$$n_{ц} = t_{конт}/T \quad (4)$$

Интенсивность воздействия (нагрузки) на материал будет равна:

$$N = n_{ц} P_{дин} \quad (5)$$

Количество циклов приложения нагрузки на первых проходах катка максимально и снижаются со значения 3,6 на первом до 1,0 на пятом проходе. Несмотря на то, что нормальное давление под вальцом увеличивается от прохода к проходу, степень воздействия на материал уменьшается.

В модели использовались эмпирические зависимости изменения зернового состава и пористости в щебенистом слое, полученными в лабораторных условиях на роллерном компакторе, с учетом требований нормативно-технической документации.

Нагрузка на образец материала  $P_i$  с учетом выражения ( ) содержит как постоянную статическую, так и динамическую составляющую, которая воздействуя на образец при каждом  $i$ -ом цикле приложения нагрузки рассчитывается по следующей формуле:

$$P_i = P' \cdot \left( 1 + \left( \frac{z_i}{n_{ц}} - 1 \right) \cdot d \right), \quad (6)$$

где  $d$  – доля динамической нагрузки,  $d = P_{дин}/P_{ст}$ ;  $P'$  – нагрузка, пересчитанная на площадку контакта сектора с материалом, МПа;  $z_i$  – количество воздействий сектора на материал по длине контакта ( $z_i = 1, 2, 3 \dots n_{ц}$ , кроме последнего значения, при котором  $z = n_{ц}$ );  $n_{ц}$  – количество циклов нагрузки,  $n_{ц} = f(v_{рх}; t_{возд}; T)$ .

Межзерновая пустотность щебеночного слоя определяется расчетным путем на основании значений истинной плотности зерен и плотности уплотненного образца:

$$\Pi = \left( 1 - \frac{\rho_{обр}}{\rho_{ист}} \right), \quad (7)$$

где  $\rho_{обр}$  – плотность уплотненного образца, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{ист}$  – истинная плотность зерен щебня, г/см<sup>3</sup>.

Оценка межзерновой пустотности в эксплуатационных условиях (неравномерность воздействия нагрузок, влияние бокового распора) учитывается путем введения эмпирического коэффициента  $K_c$ , который будет учитывать объемный сдвиг зерен. В этом случае межзерновая пустотность определится как:

$$\Pi_i^c = \left( \frac{V_d \cdot (K_c - 1)}{100} + 1 \right)_i, \quad (8)$$

где  $\Pi_i$  – межзерновая пустотность на  $i$ -ый цикл, %;  $K_c$  – коэффициент

объемного сдвига зерен  $K_c = \frac{V_{обр}}{V_{бок}}$ ;  $V_d$  – коэффициент влияния уплотняющего сектора на образец материала;  $V_{обр}$  – объем образца, см<sup>3</sup>;  $V_{бок}$  – объем вытесненных сдвигом зерен, см<sup>3</sup>;

Коэффициент влияния уплотняющего сектора на образец материала с учетом размеров длины контакта:

$$V_d = 1 - \left( \frac{D_c}{D_{обр}} \right)^2, \quad (9)$$

где  $D_c$  – диаметр уплотняющего сектора роллерного компактора, см;  $D_{обр}$  – эквивалентный диаметр образца материала, см

На рисунках 1 – 3 и в таблице 2 представлены изменения межзерновой пустотности и параметры уравнений регрессии в зависимости от количества приложения нагрузки для щебней различной прочности марки 400, 800 и 1000.

Результаты получены в лабораторных условиях на роллерном компакторе.

На рисунке 2 и в таблице 2 представлены кривые зернового состава малопрочного известнякового щебня марки 400 в зависимости от количества приложения нагрузки, полученные в лабораторных условиях.

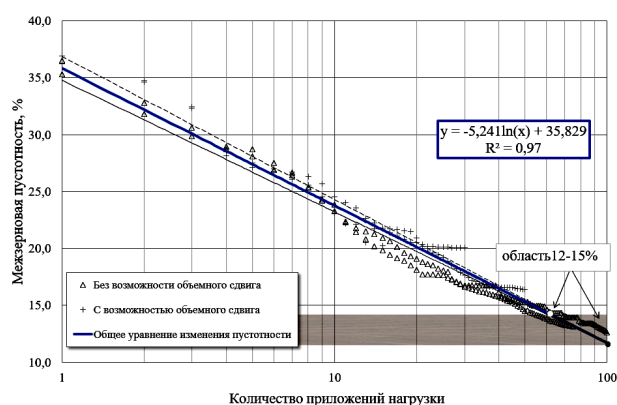


Рисунок 1 – Изменение межзерновой пустотности в зависимости от количества приложения нагрузки для доломитового щебня марки 1000

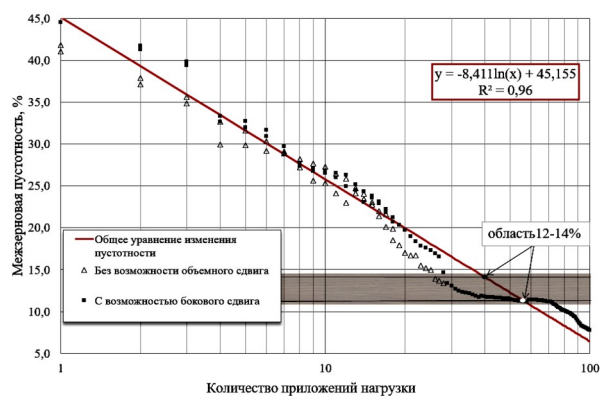


Рисунок 2 – Изменение межзерновой пустотности в зависимости от количества приложения нагрузки для известнякового щебня марки 400.

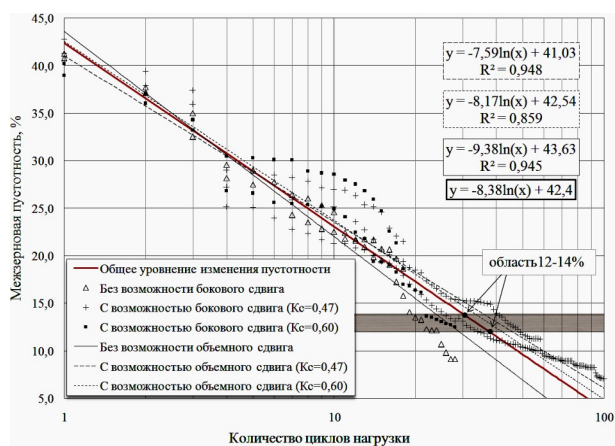


Рисунок 3 – Изменение межзерновой пустотности в зависимости от количества

приложения нагрузки для гранитного щебня марки 800.

Таблица 2 – Параметры уравнений зависимостей изменения межзерновой пустотности, представленных на рисунках 4-6.

Материал	Изменение межзерновой пустотности		
	параметр a	параметр p b	R <sup>2</sup>
Доломитовый щебень, марка 1000	-5,241	35,829	0,97
Гранитный щебень, марка 800	-8,380	42,40	0,96
Известняковый щебень, марка 400	-8,411	45,155	0,96
Примечание: Изменение пустотности подчиняется логарифмической зависимости $y = a \cdot \ln(x) + b$			

Экспериментальные зависимости по изменению межзерновой пустотности и зернового состава, полученные в лабораторных условиях легли в основу общей математической модели уплотнения местных щебеночных материалов в покрытиях и основаниях лесовозных автомобильных дорог.

Таблица 3 - Зерновой состав после испытания в лабораторной установке известнякового щебня марки 400

Количество приложения нагрузки	Количество частиц меньше фракции, %				
	40	20	10	5	0
3	100	39,5	20,4	12,6	0
5	100	44,1	23,7	15,3	0
7	100	49,4	27,5	18,0	0
10	100	56,3	31,4	21,2	0
15	100	61,2	37,3	25,3	0
20	100	63,7	39,9	28,1	0

Наличие бокового распора оказывает существенное влияние на зерновой состав и межзерновую пустотность слоя. Боковой распор позволяет протекать деформациям как в сплошной среде, но с меньшим нарушением контактов между зёрнами.

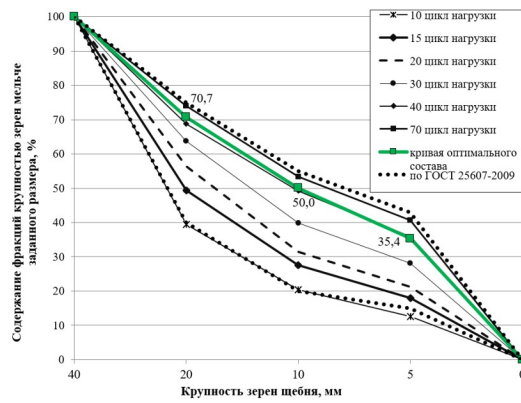


Рисунок 4 – Кривые зернового состава малопрочного известнякового щебня марки 400 в зависимости от количества приложения нагрузки

С целью приближения решений, полученных на математической модели к реальным условиям в модель, введем параметр, характеризующий влияние бокового распора на формирование уплотненного конструктивного слоя. Будем оценивать влияние бокового распора за счет изменения плотности слоя. Потери плотности при уплотнении с учетом возможности бокового сдвига определим как

$$\Delta = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{эталон}}}, \quad (10)$$

где  $\rho_i$  – плотность образца, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{эталон}}$  – плотность образца, полученного в условиях невозможного объемного сдвига зерен щебня, г/см<sup>3</sup>.

Эталоном для сравнения послужил образец, сжатие которого проводилось в условиях невозможного объемного сдвига зерен.

На рисунке 5 представлены зависимости потери плотности слоя от количества приложения нагрузки при различном объемном сдвиге.



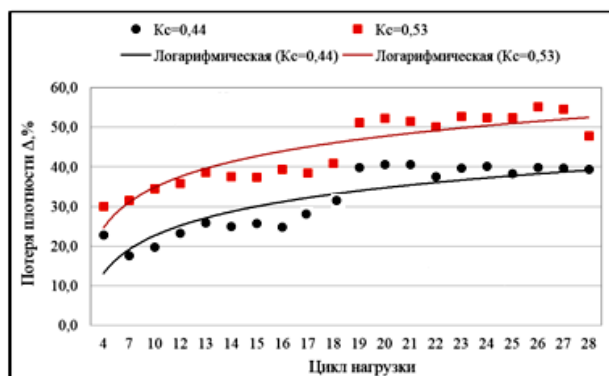


Рисунок 5– Зависимости потери плотности слоя из известнякового щебня марки 400 от количества приложения нагрузки при различных условиях объемного сдвига

Как видно из представленных данных возможность объемного сдвига частиц оказывает существенное влияние (от 20 до 40%) на степень его окончательного уплотнения.

Полученные данные использовались при составлении модели уплотнения дискретного материала. Структурная схема математической модели представлена на рисунке 6.

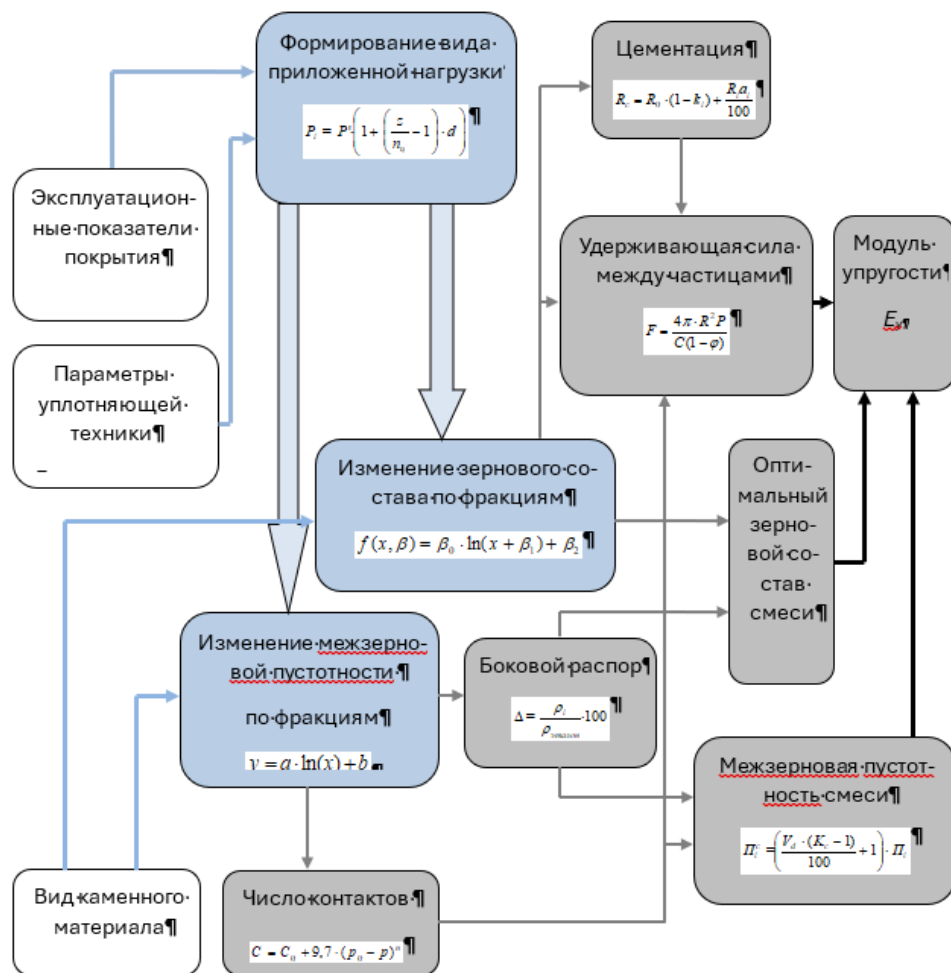


Рисунок 6 – Структурная схема математической модели формирования уплотненного слоя щебеночных оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог

## 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.