

Ряпухин В.Н., канд. техн. наук, Павленко Н.В.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ПЕРЕХОДНОГО ТИПА ИЗ ДИСКРЕТНЫХ И МАЛОСВЯЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрена методика усовершенствования расчета на прочность дорожных одежд переходного типа из дискретных и малосвязных материалов. Приведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в данной области. Представлены практические рекомендации по использованию методики при оценке прочности дорожных одежд переходного типа как для вновь проектируемых, так и для существующих конструкций.

**Ключевые слова:** дорожная одежда, дискретный материал, прочность, надежность, коэффициент распределительной способности, теория упругости, модуль упругости.

**Анотація.** У статті розглянута методика удосконалення розрахунку на міцність дорожнього одягу перехідного типу з дискретних і малозв'язних матеріалів. Наведено основні результати теоретичних та експериментальних досліджень в даній області. Представлені практичні рекомендації щодо використання методики при оцінці міцності дорожнього одягу перехідного типу як для знов запроєктованих, так і для існуючих конструкцій.

**Ключові слова:** дорожній одяг, дискретний матеріал, міцність, надійність, коефіцієнт розподільчої здатності, теорія пружності, модуль пружності.

**Annotation.** The article describes the method of calculation for strength improvements pavement transition from the discrete materials. The main results of theoretical and experimental research in this area. Provides practical advice on the use of methods for assessing the strength of the pavement as the transition to newly designed and existing structures.

**Keywords:** road pavement, the discrete material, durability, reliability and capacity factor of the distribution, the theory of elasticity, modulus of elasticity.

Дорожных одежд переходного типа на всю толщину устраиваются из дискретных и малосвязных материалов, которые невозможно отнести к классу сплошных материалов, и они не работают на изгиб. Для сплошных материалов

разработаны решения теории упругости слоистых систем, на которых основываются практически все методы расчета дорожных одежд.

С увеличением расчетной нагрузки на дорогах участились случаи отказа дорожных одежд. Зачастую причиной отказа является именно специфическое напряженно-деформированное состояние дискретных слоев, что не учитывается в решении теории упругости. Разработанные решения механики зернистых сред показывают эти особенности, но решения, во многом, носят полуэмпирический характер и требуют проведения предварительных экспериментальных исследований.

Поэтому до настоящего времени теоретическая база и математический аппарат методов расчета нежестких дорожных одежд основываются на линейной теории упругости. Для учета, в какой-то мере, специфики поведения зернистых слоев под нагрузкой в методы расчета вводят поправочные коэффициенты, прежде всего в форме коэффициентов запаса прочности. Однако, это не выход из положения, так как не всегда известна величина погрешности при определении главных напряжений в зернистом или малосвязном слое и, соответственно, достоверность величины напряжений сдвига в слоях из малосвязных материалов не определена.

Основываясь на вышесказанном, повышение надежности расчета нежестких дорожных одежд переходного типа на сдвиг в грунтах земляного полотна и в слоях из малосвязных материалов является актуальной практической задачей.

Для решения задачи повышения надежности расчетов нежестких дорожных одежд переходного типа на прочность следует выделить следующие направления:

- на основе базовых решений теории упругости для многослойных систем разработать усовершенствованное решение, учитывающее специфику распределения усилий в дискретной среде;

- установить природу, физический смысл и метод определения параметра, характеризующего и учитывающего механизм контактного взаимодействия в дискретных материалах слоев;

- разработать практические рекомендации по уточнению расчетов дорожных одежд переходного типа с дискретными слоями.

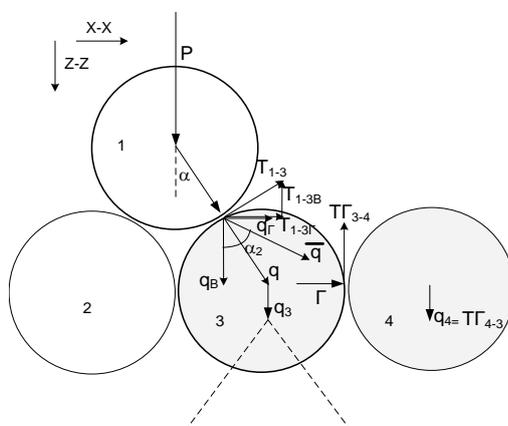
Анализ существующих моделей распределения нагрузки по глубине дискретного слоя [1-4] позволили сделать вывод о недостаточно полном учете структуры (тип связей) между частицами материала в слое. В связи с этим

возникает необходимость учета характера связей и взаимодействия зерен слоя, в том числе это могут быть пленки вяжущего, воды, ПАВ на контакте зерен.

В конструкциях дорожных одежд переходного типа различаем контактную и контактно-коагуляционную структуру, которые характеризуются наличием и величиной сил трения-сцепления на контакте зерен. Если структура слоя контактно-коагуляционная, то в решение помимо коэффициента трения  $\mu$  автором предложено вводить и коэффициент сцепления  $c$ , действующий на площадь контактирования частиц (пятно контакта). Усовершенствование схемы распределения усилий между зёрнами предполагает учитывать следующие моменты (рис.1) [5]: чем больше будет трение –сцепление на контакте, тем больше будет касательная реакция на контакте ( $T_{1-3}$ ) и угол наклона равнодействующей ( $\alpha_2$ ). В результате увеличится боковая сила  $\Gamma$  и уменьшится вертикальная  $q_3$ .

В общей сложности с уменьшением размеров зерна общая поверхность контактирования увеличивается, это приводит к тому, что мелкозернистый материал под нагрузкой начинает вести себя как связный, т.е. ближе к теории упругости. По этому принципу мелкозернистый материал близок по поведению к сплошному под нагрузкой, а крупнозернистый подчиняется закону зернистых сред.

Предложенная схема распределения усилий в дискретном слое позволяет прогнозировать основные параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) слоя. В дальнейшем это можно использовать для расчета на прочность конструкций дорожных одежд переходного типа из зернистых и малосвязных материалов. При этом необходимо оценить количественный и качественный анализ распределительной способности среды с учетом специфики распределения усилий в различных структурах.



**Рисунок 1** – Схема перераспределения усилий в массиве при возникновении трения-сцепления на контактах

Автором установлено, что оценивать число контактов на определенной глубине необходимо, как отношение толщины слоя к средневзвешенному диаметру зерна скелетообразующей фракции, получив так называемую относительную толщину слоя или количество рабочих рядов ( $n$ ), отойдя тем самым от общепринятой увязки диаметра штампа и толщины слоя.

Для оценки распределительной способности был выбран показатель концентрации напряжений по глубине (толщине слоя) как отношение контактного напряжения под штампом к максимальному контактному напряжению на нижней границе слоя. Результат моделирования идеализированной схемы распределения напряжений представлен в таблице 1 и на рисунке 2.

**Таблица 1** -Значения падения контактных напряжений по глубине в теоретико-идеализированной модели

Радиус штампа, $r$ , см	Толщина слоя, $h$ см	Диаметр фракции, см	Относительная толщина слоя $n$	$\sigma$ контактные напряжения под штампом, кг/см <sup>2</sup>	$\sigma$ контактные напряжения на глубине кг/см <sup>2</sup>	Падение напряжений $K$ , раз
1,5	3	0,5	6	1,46	0,14	10,43
1,5	3	0,7	4	2,92	0,714	4,09
1,5	3	1,0	3	5,55	2,17	2,55

Граничные условия рассмотренных моделей: при  $n=1$   $K=1$ ,  $n=0$   $K=1$ . Это означает, что на поверхности слоя падения нагрузки нет. Если весь слой состоит из одного зерна, то нагрузка не распределяясь передалась на подошву этого слоя.

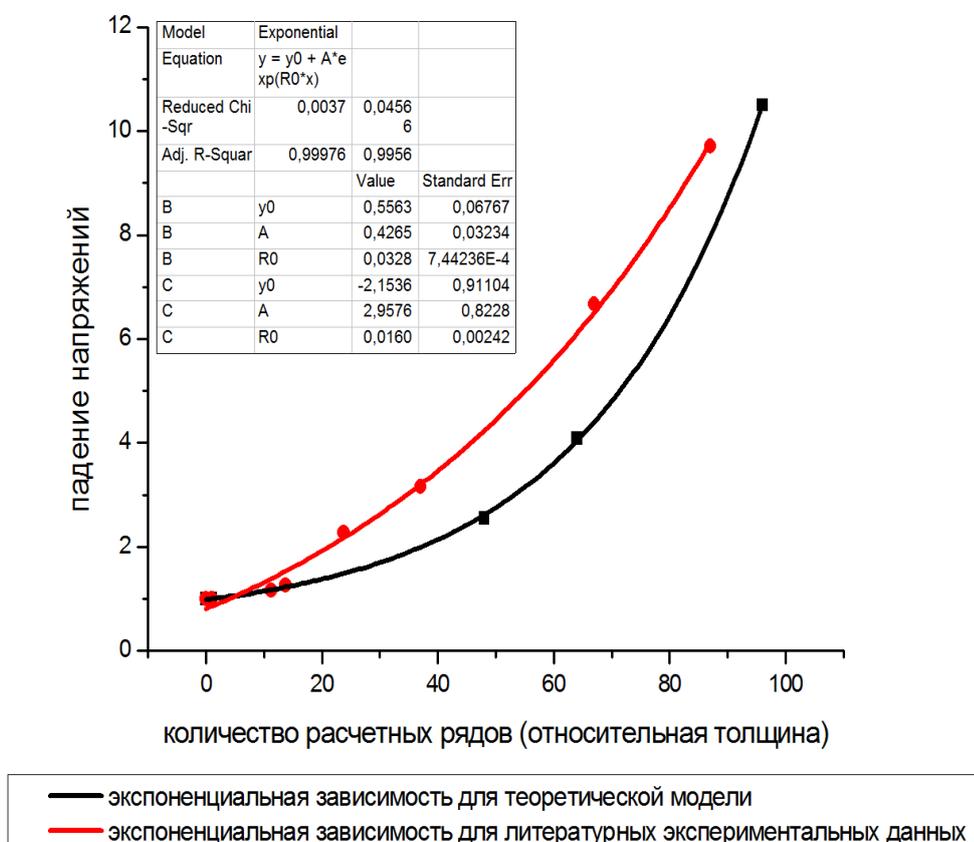
Качественная и количественная оценка концентрации напряжений от относительного размера фракций и толщины слоя подтверждают гипотезу автора, что увеличение размера фракций ведет к концентрации напряжений по глубине. Подтверждено, что передача нагрузки происходит только через точки непосредственного контактирования, как при несогласованных поверхностях. Использование в массиве мелкозернистых материалов дает значительное увеличение площади удельной поверхности  $\Delta S$  и рассеивает напряжения в массиве за счет появления больших сил трения-сцепления на контактах. Представленная схема является теоретически-идеализированной, так как в реальной конструкции невозможно добиться укладки дискретного материала с четкой схемой упаковки и достоверно оценить количество контактов в массиве.

Для оценки адекватности этих закономерностей распределения напряжений в несвязных материалах и возможности переноса теоретических выводов в реальные условия необходим сравнительный анализ.

В качестве моделей используем литературные данные об исследовании напряженно-деформированного состояния двух и трехслойных моделей дорожных одежд со слоями из дискретных материалов на действие статической и подвижной нагрузок колесом автомобиля [6-8].

Аналогично, как и для идеализированной расчетной схемы передачи нагрузки в массиве, определялось отношение толщины слоя к средневзвешенному размеру скелетообразующей фракции (относительную толщину слоя) и для экспериментальных моделей. В качестве оценки скорости падения напряжений возьмем отношение напряжения по оси нагрузки под штампом к напряжению на глубине нахождения датчика.

Для наглядной демонстрации сходимости обеих кривых теоретическо-идеализированной модели и экспериментальной (по литературным данным) выбрано увеличение масштаба рядов для идеализированной модели в 16 раз. В результате графически зависимости для обоих случаев будут выглядеть следующим образом (рис 2) [9].



**Рисунок 2** - Зависимости скорости падения напряжений теоретическо-идеализированной модели и экспериментальной по литературным моделям

Наглядно видно, что теоретическая и экспериментальная кривые практически совпадают.

Из анализа полученных результатов следует, что скорость падения (концентрация) напряжений в дискретном массиве напрямую связана с размером фракции зерна и толщиной массива. Установлено, что эти параметры возможно увязать через относительную толщину слоя как условное количество рабочих рядов из скелетообразующих фракций слоя.

Введение в расчет НДС конструкций переходного типа параметра распределительной способности материала скажется на изменении составляющих тензор напряжений по глубине и эквивалентного модуля конструкции. Параметр распределительной способности материала слоя введен в расчет напряжений по глубине конструкции, так и в расчет эквивалентного модуля упругости конструкции.

Автором, совместно с проф. Плевако В.П. была решена задача НДС слоев из дискретных материалов, используя коэффициент распределительной способности «С»[10,11]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -q \left( 1 - \frac{c\zeta}{\rho(c\zeta)} + \frac{c\zeta}{\rho(c\zeta)^3} \right); \\ \sigma_r = \sigma_\beta &= -\frac{q}{2} \left\{ \left[ \nu + (1+\nu)c^2 \right] \left( 1 - \frac{c\zeta}{\rho(c\zeta)} \right) + \left[ \nu - (1+\nu)c^2 \right] \left( 1 - \frac{c\zeta}{\rho(c\zeta)^3} \right) \right\}; \\ u_{z \max} &= \frac{q\delta(1-\nu^2)}{cE_1} \Delta,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\zeta = \frac{z}{\delta}$ ;  $\rho(\zeta) = \sqrt{1+\zeta^2}$ ;  $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_m + \Delta^*$ ;

$$\Delta_i = c \frac{E_1}{E_i} [F(\zeta_i) - F(\zeta_{i+1})]; \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$\Delta^* = c \frac{1-\nu_n^2}{1-\nu^2} \frac{E_1}{E_n} F^*(\zeta_{m+1}); \quad \zeta_i = \frac{l_i}{\delta}; \quad \chi = \frac{h}{\delta}.$$

Тут обозначено

$$F(x) = \left[ 2 + \left( 1 + \frac{\nu}{1-\nu} c^2 \right) \frac{cx}{\rho(cx)} [\rho(cx) - cx] \right];$$

$$F^* = \left[ 2 + \left( 2 - \frac{1-2\nu_n}{1-\nu_n} c \right) \frac{c\chi}{\rho(c\chi)} [\rho(c\chi) - c\chi] \right].$$

В результате предложенного усовершенствованного решения имеем возможность для любых конструкций дорожных одежд из несвязных материалов установить действительное значение вертикальных напряжений и

эквивалентного модуля упругости с учетом коэффициента распределительной способности дискретных материалов, что соответствует их реальному поведению под нагрузкой.

Для определения коэффициента распределительной способности «С» предложено учитывать относительная толщина слоя  $n$  определяется как отношение толщины слоя к диаметру скелетообразующей фракции:

$$n=h/\delta, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина слоя, мм

$\delta$  - средний диаметр скелетообразующей фракции, мм

Средний размер скелетообразующей фракции слоя определяется как средневзвешенная величина по результатам анализа гранулометрического состава материала слоя.

Использования параметра распределительной способности дискретного материала в решении НДС конструкций дорожных одежд позволяет делать следующие заключения:

- при использовании разработанного решения для дискретных систем в режиме теории упругости, то есть «с»=1, подтверждается, что не влияет значение модуля упругости слоя на НДС системы. Влияние на распределение напряжений осуществляется за счет коэффициента распределительной способности материала слоя;

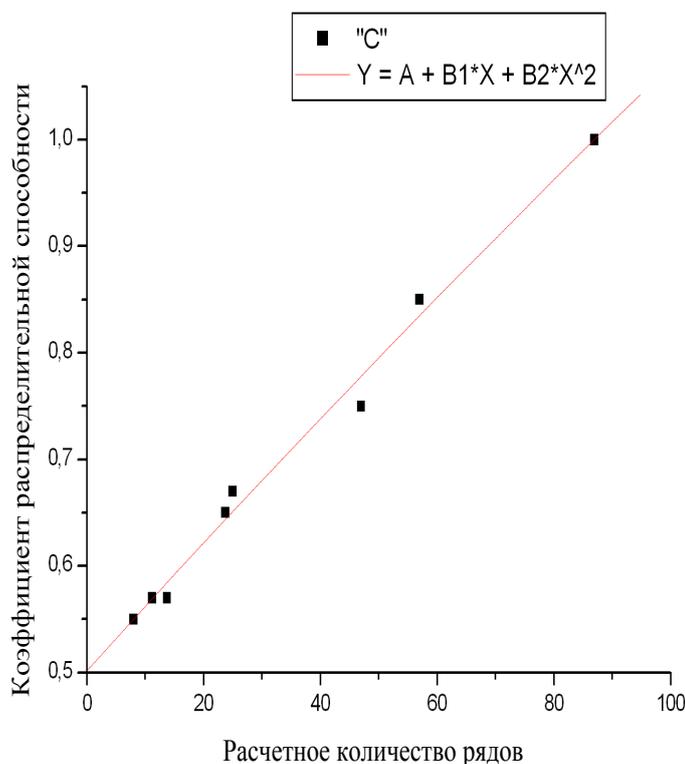
- установлено, что значение коэффициента «с» колеблется в пределах от 0,5 до 1 для различного контактирования частиц материала слоя и в зависимости от размера фракции материала.

- в результате сравнения экспериментальных данных прогибов поверхности конструкций дорожных одежд и значений эквивалентных модулей, полученных при расчете, получено подтверждение того факта, что теория упругости в значении и сущности параметра  $E_{\text{экв}}$  не учитывает особенность их работы, как дискретных. Поэтому, при расчетах необходимо учитывать, что  $E_{\text{экв}}$  конструкций переходного типа по справочным значениям [12] отличаются от действительных значений на величину коэффициента распределительной способности;

- значение коэффициента распределительной способности «с» является единым как при определении напряженного состояния, так и деформированного состояния конструкции из дискретных слоев. Таким

образом, схема распределения напряжений по глубине и прогиб (деформация) слоя зависят только от разложения касательных усилий с учетом трения-сцепления на контактах зерен материала слоя.

Построена зависимость коэффициента распределительной способности «с» от относительной толщины слоя и представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3** - Зависимость коэффициента «с» от относительной толщины слоя конструкции

Зависимость аппроксимирована полиномом второй степени в виде:

$$y=A+B_1x+B_2x^2, \quad (4)$$

где  $B_1=0,00682$ ,  $B_2=-0,0000188$ ,  $A=0,50645$ .

Сходимость =0,9305.

Для практической проверки предложенного усовершенствованного решения был проведен ряд экспериментальных исследований, в ходе которых определено наличие и численная величина чаши прогиба конструкции из дискретных материалов. По одной из гипотез исследования, в реальности при

испытаниях под нагрузкой конструкций переходного типа, мы имеем дело не с прогибом, который характеризуется наличием чаши прогиба и кривизны поверхности, а с осадкой штампа за счет переупаковки зерен дискретного материала. Подтверждение данного предположения позволит установить тот факт, что на самом деле речь идет не о модуле упругости несвязного материала, а о дискретном модуле деформирования. Это подтвердит, что дискретный материал под нагрузкой ведет себя не как упругая плита, не работает на изгиб, а перераспределяет усилия между зернами, поэтому законы теории упругости не могут быть в полной мере справедливы для таких конструкций.

В ходе экспериментальных исследований на моделях дорожной одежды из несвязных материалов (щебень одноразмерный, отсев и песок) установлены коэффициенты распределительной способности для дискретных слоев в конструкциях по предложенной методике и они проверены и подтверждены сравнением по эквивалентному модулю конструкции, определенного по существующей методике [12]. В связи с этим предложенные рекомендации по обработке экспериментальных данных и назначению распределительной способности несвязных слоев могут быть использованы при оценке прочности конструкций дорожных одежд переходного типа на сдвиг. Также сопоставлены экспериментальные модели с моделями других исследователей из научной литературы [6-8] и проведен их анализ. Введение слабых коагуляционных связей в дискретный массив более ощутимо для мелкозернистых материалов и грунтов. Для материалов с выраженной дискретной структурой наличие таких связей незначительно, повлияет только на деформирование массива, но не на его напряженное состояние. Так как малые коагуляционные связи не приведут к образованию существенных конгломератов, которые повлияют на увеличение диаметра скелетообразующей фракции.

Практические рекомендации по использованию усовершенствованного расчета на прочность дорожных одежд переходного типа, являются логическим завершением проведенного диссертационного исследования, в которых изложен алгоритм определения распределительной способности дискретного материала в слое и его учет при расчете на прочность конструкций дорожных одежд переходного типа.

Усовершенствованный метод расчета на прочность дорожных одежд переходного типа рекомендуется использовать как для вновь проектируемых конструкций, так и для существующих конструкций с дальнейшей необходимостью их вскрытия для оценки гранулометрического состава, послойного определения модулей слоев и измерения прогиба конструкции.



**Рисунок 4** - Блок-схема последовательности действий при оценке прочности конструкции дорожной одежды переходного типа на сдвиг

### **Вывод**

Представлены ключевые позиции по усовершенствованию расчета на прочность дорожных одежд переходного типа на основе разработанного теоретического решения и уточненной схемы передачи усилий в слоях конструкций из дискретных материалов. Предложенная методика может быть использована как для проектируемых конструкций (с целью повышения

точности при расчетах на прочность), так и для существующих дорожных одежд (для оценки их фактического состояния).

### Литература

1. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве.- М.: Стройиздат, 1966. – 319 с.
2. Батраков О.Т., Кравченко В.Г. Прочность грунтощебеночных слоев дорожных одежд. Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1971, №2. – С.35-138.
3. Роу П. Теоретический смысл и наблюдаемые величины деформационных параметров грунта. Механика. Новое в зарубежной науке.ч.2, Определяющие законы механики грунтов.- М.: Мир, 1975. –С.76-143.
4. Руднянский С. Н. «Проектирование нежестких дорожных одежд с учетом нелинейности материалов зернистых слоев», дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков, 1987. – 349 с.
5. Павленко Н.В. Механизм распределения усилий в слоях дорожных одежд переходного типа из дискретных и малосвязных материалов, Науковий вісник будівництва, вип.52, Харків ХДТУБА ХОТВ АБУ 2009, С.113-116.
6. Баранов Д.С. Измерительные приборы, методика и некоторые исследования распределения давления в песчаном грунте, Госстрой издат, 1959.
7. Болштянский М.П. Экспериментальное исследование напряжений в неоднородном грунте. Автореферат диссертации. Новосибирск. 1962.
8. Ряпухин В.Н. «Исследования методов проектирования дорожных одежд, содержащих прослойки из дискретных материалов». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Харьков, ХАДИ, 1972. – 260 с.
9. Павленко Н.В. Усовершенствование расчета малосвязных материалов в конструкциях дорожных одежд переходного типа. Проблемы развития городской среды: Научно-технический сборник/-К.:НАУ, 2012.- Вип.7. – С.177-181.
10. Павленко Н.В., Ряпухин В.М., Плевако В.П. Напряжений і деформований стани дорожніх одягів перехідного типу з дискретних матеріалів // Науковий вісник будівництва / Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2008. – Вип.47. – С.161-171.
11. Pavlenko Nadezhda, Ryapuhin Vitaly Development of calculation method of non-rigid pavement of transition type from discrete materials according to the contact scheme of efforts' transmission in designs' layers. Transbaltica 2011/ Proceedings of the 7<sup>th</sup> international scientific conference. May 5-6, 2011. Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. Vilnius: Technica, 2011. – P.249-252.
12. ВБН В.2.3-218-186-2004. «Дорожній одяг нежорсткого типу».