

**А.В. Кочетков**

Пермский государственный технический университет

**Н.Е. Кокодеева**

Саратовский государственный технический университет

**П.Б. Рапопорт, Н.В. Рапопорт**

ООО Центр дорожных технологий «Дорэксперт» (г. Новосибирск)

**И.Г. Шашков**

Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж)

## **СОСТОЯНИЕ СОВРЕМЕННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

*Рассматриваются вопросы современного состояния нормативно-методического обеспечения расчета и конструирования дорожных одежд.*

***Ключевые слова:** дорожная одежда, нормативно-методическое обеспечение, методы расчета.*

Конструкция дорожной одежды, как и любое инженерное сооружение, должна быть достаточно надежной и соответствовать определенным эксплуатационным требованиям [1]. Конструкция дорожной одежды определяется применяемыми при проектировании методами расчета и конструирования дорожных одежд. Все существующие методы расчета можно объединить в три группы.

1. *Эмпирические методы*, по которым толщину дорожной одежды назначают исходя из опыта службы конструкций на дорогах разных категорий без теоретических обоснований, но с учетом особенностей грунтов земляного полотна, климатических и гидрологических условий. Делятся на две подгруппы:

1) методы, основанные на дорожной классификации грунтов (метод группового индекса и т.п.);

2) методы, использующие результаты крупномасштабных испытаний дорожных одежд на опытных полигонах и наблюдений за эксплуатацией дорожных одежд в самых различных географических регионах (методы ААШТО, Института асфальта, Caltrans, Бюро общественных дорог (США), Центральной лаборатории путей сообщения (Франции), ОДН 218.046–01 (РФ) и др.). Эмпирические методы распространены во многих странах в различных вариантах, хотя во многом и несовершенны, они дают надежные результаты только в тех условиях, для которых были ранее разработаны.

2. *Полуэмпирические методы*, согласно которым при анализе напряженного состояния дорожной одежды используют допущения и условные расчетные схемы, а также эмпирические зависимости между напряжениями и деформациями, с одной стороны, и параметрами внешней нагрузки – с другой (метод СоюздорНИИ, метод расчета по предельным относительным удлинениям и др.).

3. *Теоретические методы*, основанные на решениях задач механики слоистых систем. В качестве расчетной схемы в них принято многослойное упругое полупространство. Вводимые в теоретические формулы расчетные характеристики материалов для получения надежных результатов определяют экспериментальным путем (методы ВСН 46–83, фирмы «Шелл» (1963, 1974 гг.), ОДН 218.046–01 и др.). Теоретические методы обладают большей общностью, но содержат ряд коэффициентов, которые устанавливаются из опыта. Поэтому наибольшей надежностью отличаются комбинированные методы, в основе которых лежат решения теории упругости, так как других, более приемлемых, решений в настоящее время пока не имеется.

Для дорожников за рубежом на современном этапе характерно снижение интереса к совершенствованию теории расчета дорожных одежд. Большое влияние на это оказали проведенные в США в период с 1958 по 1960 г. Ассоциацией сотрудников дорожных управлений штатов обширные испытания в штате Иллинойс опытных участков разных дорожных одежд проездами автопоездов до полного разрушения. В результате этих испытаний накоплены обширные материалы о работоспособности различных их конструкций. В решениях XVIII Международного дорожного конгресса 1984 г. в Сиднее отмечалось, что методы расчета дорожных одежд с теоретической точки зрения достигли совершенства, но эффективность их использования в большей степени

зависит от точности, с которой могут быть определены расчетные параметры грунтов и материалов конструктивных слоев дорожных одежд.

Эти решения повлекли за собой перераспределение финансовых потоков с научных работ, направленных на усовершенствование теории расчета дорожных одежд на работы, нацеленные на усовершенствование и разработку методик определения параметров грунта и материалов конструктивных слоев дорожных одежд. В СССР, а потом и в РФ работы по усовершенствованию методов расчета продолжались, так были разработаны ВСН 46–83 (1983 г.) и ОДН 218.046–01 (2001 г.), которые направлены на обеспечение требуемого уровня надежности и долговечности с учетом ресурсных возможностей.

Нежесткие дорожные одежды с асфальтобетонным покрытием, согласно современным представлениям, рассчитываются с помощью так называемой осесимметричной задачи теории упругости (обобщенная задача Буссинеска 1885 г.). Задача Буссинеска – это определение напряженно-деформированного состояния однородного упругого многослойного полупространства, каждый слой которого характеризуется своим модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Решение этой задачи получено в предположении, что дорожные одежды работают в стадии обратимых деформаций, асфальтобетонное покрытие является сплошной плитой без швов и трещин, и колеса автомобиля движутся по нему в достаточном удалении от края покрытия.

В 1919 г. Терезава (Япония) решил ту же самую задачу, что и Буссинеск, но для случая, когда нагрузки на поверхность передаются через гибкий штамп. Свое решение Терезава получил в квадратурах с помощью метода интегральных преобразований Фурье–Бесселя, возможность применения которого обусловлена тем, что для нежестких дорожных одежд напряжения и перемещения на бесконечном удалении от места приложения нагрузки обращаются в нуль (колеса автомобиля движутся в достаточном удалении от края покрытия). Из теории упругости известно, что решение осесимметричной задачи будет найдено, если удастся решить бигармоническое уравнение в частных производных относительно неизвестной функции  $\Phi(r, z)$ :  $\nabla^4 \Phi(r, z) = 0$ , где  $\nabla^4$  – бигармонический оператор Лапласа в цилиндрических координатах  $r$  и  $z$ .

Сущность интегрального преобразования Фурье–Бесселя заключается в том, чтобы, проинтегрировав «с весом» в виде функции Бесселя приведенное уравнение, получить из него уравнение в обыкновенных производных, решить которое значительно проще, чем исходное.

Найдя эту функцию, потом уже не составит особого труда найти все компоненты тензора напряжений и вектора упругого смещения, воспользовавшись решением Артура Лява.

Это решение было распространено на более сложную конструкцию, а именно на полупространство, поверх которого уложена «тонкая» плита или «пластинка» неограниченной протяженности в плане.

Д. Бурмистер (1943–1945 гг., США) опубликовал решения применительно к 2- и 3-слойным полупространствам. Бурмистер, как и Терезава, воспользовался методом интегральных преобразований Фурье–Бесселя. Эти решения стали реализовываться в США, а затем и в других странах.

В Великобритании Фоксом были получены по решению Бурмистера численные значения в нижнем слое двухслойного полупространства компоненты тензора напряжений. Вильсон и Вильяме предложили принципиально новый метод расчета как жестких, так и нежестких дорожных одежд исходя из двух критериев предельного состояния: изгиба покрытия и сдвига в основании. Второй критерий был предложен также Н.П. Пузыревским (1923 г., Петербургский государственный университет путей сообщения).

Р.М. Раппопорт (1948 г.) получила решение задачи, которую рассматривал Бурмистер, методом отличным от метода Бурмистера. При этом она решила еще и плоскую задачу. Б.И. Коган (1953 г., Харьковский автомобильно-дорожный институт) получил решение, аналогичное тому, что ранее получил Бурмистер, но более простыми формулами, так как по громоздким формулам Бурмистера произвести практические вычисления было нельзя. Б.И. Коган рассмотрел также задачу о воздействии касательной осесимметричной нагрузки, приложенной к поверхности слоистого полупространства.

Идеи Вильсона и Вильямса были развиты А.М. Кривисским и П.И. Теляевым. В основу своих исследований они положили решение Б.И. Когана. Однако в начале 60-х гг. прошлого столетия авторы этого метода от него фактически отказались, ввиду того, что метод основан на предположении о том, что конструкции должны работать в стадии полностью обратимых деформаций.

В результате многолетних исследований в СССР, а потом и в РФ были последовательно созданы практические методы расчета дорожных одежд («Метод расчета дорожных одежд ДорНИИ» (1941 г.) ВСН 46–60, ВСН 46–72, ВСН 46–83, «Методические указания по расчету нежестких дорожных одежд» (1998 г.), ОДН 218.046–01, МОДН 2–2001).

Выполненные в последние годы исследования, основанием для которых явилось колееобразование на дорогах, были направлены на возможность учета наличия необратимых деформаций, проявляющихся на асфальтобетонных покрытиях. Однако, как в ранее разработанных, так и в предложенных в последнее время методах расчета, существенного отхода от классических решений теории упругости пока не наблюдается.

Современные методы проектирования дорожных одежд практически не учитывают сложное (неосесимметричное) напряженное состояние многослойных систем при горизонтальных нагрузках. М.А. Железниковым получено приближенное решение этой задачи, но без учета различия в модулях упругости различных слоев дорожной одежды.

Методы расчета дорожных одежд исходят из представления, что напряженно-деформированное состояние (НДС) дорожной одежды под действием автомобильной нагрузки может быть выражено решениями теории упругости для слоистого полупространства с учетом условий сопряжения на контактах слоев. В основу принята формула для определения величины сжатия элементарного слоя

$$dl = \frac{1}{E}(\sigma Z \times dZ), \quad (1)$$

где  $dl$  – сжатие элементарного слоя толщиной  $dZ$ ;  $\sigma Z$  – напряжения в слоях дорожной одежды;  $E$  – модуль деформативности, обобщенная характеристика деформативных свойств материала, показывающая, какую нагрузку может выдержать материал без образования пластических деформаций.

Если внешняя нагрузка  $p$  (давление на поверхности) такова, что сжатие происходит за счет сближения частиц материала без бокового выпора, то в зависимости от абсолютной величины сжатия модуль деформативности  $E$  может быть либо модулем деформации, либо модулем упругости материала. Если нагрузка  $p$  такова, что материал работает в упругой стадии деформирования, тогда  $dl$  – это упругая деформация, а  $E$  – это модуль упругости  $E_y$ . Если производить дальнейшее увеличение нагрузки, то после ее снятия останется какая-то часть не восстановившейся деформации – пластическая деформация. Материал начинает работать в упругопластической стадии деформирования, и  $E$  – это модуль деформации материала  $E_d$ . При дальнейшем, самом незначительном увеличении нагрузки происходит пластическое течение материала с образованием боковых выпоров (рис. 1).

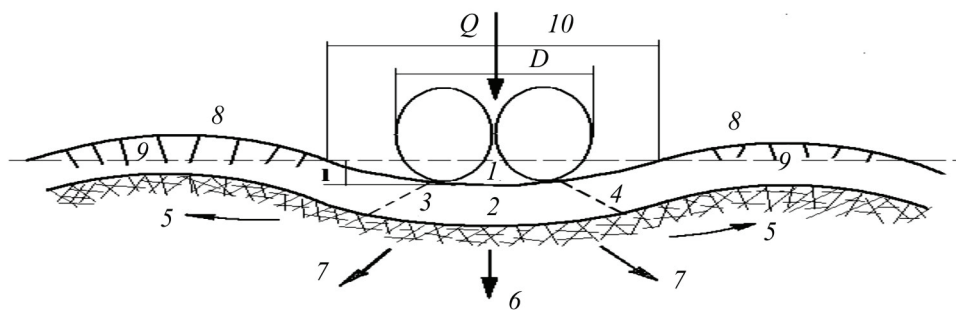


Рис. 1. Деформация дорожной одежды: 1 – осадка дорожной одежды; 2 – сжатие; 3 – растяжение; 4 – срез; 5 – выпирание; 6 – уплотнение грунта; 7 – направление сжатия грунта; 8 – растяжение; 9 – трещины; 10 – чаша прогиба

В случае, если напряженно-деформированное состояние характеризуется линейной (или условно линейной) зависимостью между напряжением и осадкой сжатия (деформации обратимы), модуль деформативности принимается равным модулю упругости. При дальнейшем увеличении нагрузки связь между напряжением и деформацией приобретает нелинейную зависимость. Кроме обратимых (упругих) осадок сжатия появляются остаточные осадки, свидетельствующие о нарастании пластических деформаций. Напряженно-деформированное состояние переходит в упруго-пластическую стадию. Их характеристикой является модуль деформации. Практические методы определения модуля деформативности и модуля упругости асфальтобетона и зернистых сред, дающие результаты с приемлемой точностью, до сего времени не разработаны.

Полное сжатие массива определится как

$$l = \frac{1}{E} \int_a^b \sigma Z dZ. \quad (2)$$

Пределы интегрирования в данном случае определяют толщину сжимаемого массива. Таким образом, определив величину сжатия  $l$  и сравнив с допусаемым значением, можно сделать вывод о правильности конструирования дорожной одежды. Необходимо найти функцию распределения напряжений  $\sigma Z$  в слоях дорожной одежды под нагрузкой.

Распределение напряжений в однородном и слоистом полупространстве различное, и поэтому для слоистого полупространства не пригодны формулы, полученные для изотропного полупространства.

Для определения деформации многослойной дорожной одежды с неоднородными свойствами слоев ее необходимо привести к эквивалентному однородному массиву, чтобы можно было воспользоваться формулами Буссине и других авторов.

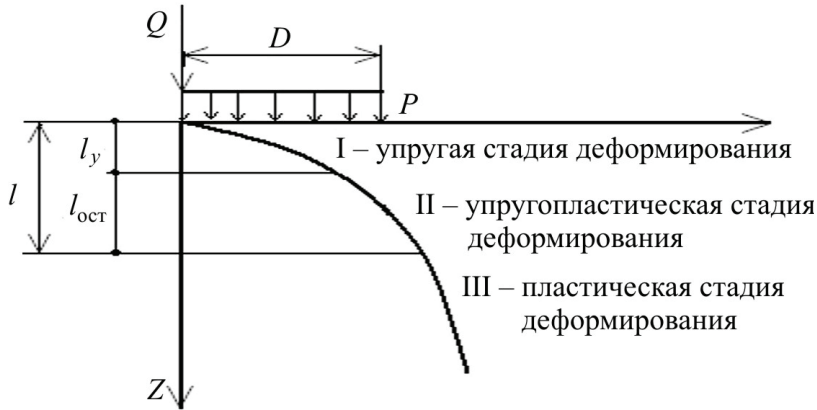


Рис. 2. Стадии деформирования дорожной конструкции

Метод ОДН 218.046–01 основан на приведении реальной многослойной конструкции дорожной одежды к эквивалентной двухслойной. За основу принято рассмотрение упругого полупространства, решение пространственной задачи подменяется плоской в продольном направлении дороги. Деформации в продольном направлении рассматриваются в отрыве от деформаций поперечных. В качестве расчетной модели дорожной одежды принято слоистое линейно-деформируемое упругое полупространство, на поверхность которого действует вертикальная нагрузка, распределенная равномерно по площади круга, что дает основание использовать для теоретического исследования полного напряженно-деформированного состояния всех видов слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна методы теории упругости. Различные усовершенствования этой расчетной схемы, используемые сегодня, основаны, как правило, на абсолютизации свойств одних элементов и отбрасывании тех особенностей строения системы, которые на первый взгляд относительно слабо влияют на ее напряженно-деформированное состояние.

В результате решения смешанной задачи теории упругости и механики зернистых сред в ряде исследований были получены формулы, позволяющие определить все тензоры напряжений и перемещения произвольной точки любого слоя системы в условиях пространственного осесимметричного и плоского напряженного состояния.

Состояние изученности работы слабосвязных зернистых материалов в слоях дорожной одежды пока не позволило разработать для них метод расчета, достаточно полно учитывающий особенности поведения этих материалов. Указанные особенности связаны с дискретностью структуры зернистых материалов и проявляются как в характере распределения этими материалами приложенного к ним давления, так и в изменении прочностных характеристик такого рода материалов в зависимости от того, как они размещены в слоистой конструкции и каковы деформативные свойства окружающих слоев.

Слои, состоящие из слабосвязных зернистых материалов, не способны сопротивляться напряжениям. Зернистым материалам присущи особенности, объяснить которые с точки зрения механики сплошной среды не представляется возможным. Если зерна, составляющие среду, расположены достаточно плотно, то любая последующая деформация приведет к уменьшению плотности, т.е. к проявлению эффекта *дилатансии*. В расчетных уравнениях существующего полуэмпирического метода расчета нежестких дорожных одежд это явление учитывается с помощью коэффициента Пуассона, полагая его равным величине, найденной из результатов испытаний на трехосное сжатие с учетом «защемления» его в одежде. Результаты испытаний на двух- и трехосное сжатие различных зернистых заполнителей показали, что стеснение деформаций придает заполнителю так называемое кажущееся увеличение прочности порядка в 1,5–2,5 раза в том числе и обеспечивает дополнительную прочность при сдвиге. Эти исследования создают предпосылки для учета дискретных свойств материалов и явления дилатансии, так как в настоящее время пока не создан теоретически обоснованный метод расчета промежуточных слоев из зернистых слабосвязных материалов. Существует теоретический метод расчета для дорожных одежд переходного типа из зернистых материалов, который разработан эмпирическим путем.

В таблице [2] представлены расчеты вертикальных нормальных напряжений по Буссине, по эмпирической формуле М.Я. Якунина при  $a = 1$  и при  $a = 2,5$  и в соответствии с гиперболическим законом. Данные, представленные в таблице, показывают, что ни одна из анализируемых зависимостей не может быть рекомендована для использования, так как погрешность определения напряжений меняется по глубине и составляет до 250 %.



Методика проектирования нежестких дорожных одежд, представленная в ОДН 218.046–01, является собой эклектику (смесь) различных по своей сути методов: расчета по разрушающим нагрузкам, по допускаемым напряжениям и по предельным состояниям.

### Распределение вертикальных нормальных напряжений под круглым штампом

Z/D	Относительные напряжения $\sigma Z/p$			
	Ж. Буссине	М.Я. Якунин $a = 2,5$	М.Я. Якунин $a = 1,0$	Гиперболический закон
0,2	0,949/100 %	0,909/95,7 %	0,962/101,4 %	0,961/101,3 %
0,5	0,646/100 %	0,615/95,2 %	0,8/123,8 %	0,786/121,7 %
1,0	0,284/100 %	0,286/102,1 %	0,5/208,3 %	0,42/147,9 %
1,5	0,146/100 %	0,151/103,4 %	0,308/210,9 %	0,181/124 %
2,0	0,087/100 %	0,091/104,6 %	0,2/229,9 %	0,071/81,6 %
2,5	0,057/100 %	0,06/105,3 %	0,138/242,1 %	0,027/47,4 %
3,0	0,04/100 %	0,042/105 %	0,1/250 %	0,010/25 %

Прочность конструкции количественно оценивается величиной коэффициента прочности. Принято, что отказ дорожной одежды, связанный с недостаточной ее прочностью, может возникнуть в результате:

1) накопления до истечения заданного срока службы конструкции под воздействием касательных напряжений, возникающих в конструктивных слоях и подстилающем грунте от транспортной нагрузки, недопустимых остаточных деформаций с потерей ровности поверхности покрытия и соответствующим снижением скорости движения;

2) усталостных разрушений монолитных слоев конструкции под воздействием растягивающих напряжений от многократного приложения транспортной нагрузки с последующей интенсивной потерей дорожной одеждой транспортно-эксплуатационных свойств до истечения заданного срока службы.

В качестве предельного состояния используется напряженно-деформированное состояние верхних связных слоев покрытия (первое предельное состояние) и грунтового основания (второе предельное состояние). Критерием этого является допустимая величина обратимого прогиба, определяемая либо по первому, либо по второму предельному состоянию. По величине допустимого упругого прогиба вычисляют до-

пустимый (требуемый) модуль упругости дорожной конструкции. При этом прогиб покрытия принимается за обобщающую характеристику сопротивления дорожной одежды нагрузкам.

### **Список литературы**

1. Стандарты на методы испытаний, применяемые в дорожной отрасли, в свете современных требований / П.Б. Рапопорт, Н.В. Рапопорт, О.Г. Таскаев // Методы оценки соответствия. – 2009. – № 4. – С. 29–33.

2. Маркуц В.М. К вопросу расчета вертикальных напряжений в однородном полупространстве // Пути совершенствования эксплуатационных качеств автомобильных дорог и повышения безопасности движения: докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Волгоград, 1989. – Ч. 1. – С. 121–122.

Получено 18.03.2011