

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С УЧЕТОМ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ
ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА**

Руководитель лаборатории оценки
транспортно-эксплуатационного состояния
автомобильных дорог

М.Ю. Горский,

руководитель лаборатории
асфальтобетонов **Г.Ф. Кадыров**
(АНО «НИИ ТСК»),

канд. техн. наук, главный инженер **А.В. Стрельцов**
(ООО «НТЦ «ГЕОТЕХНОЛОГИИ»),

канд. экон. наук, генеральный директор **Е.Н. Симчук**
(АНО «НИИ ТСК»)

Контактная информация: gorskiy@niitsk.ru;
georgijk39@gmail.com;
sntc@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы совершенствования методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом использования решения задачи теории упругости для многослойного полупространства. Приведены результаты исследований по сопоставлению существующих методик расчета параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. Даны рекомендации по применению решения для многослойного полупространства при проектировании нежестких дорожных одежд.

Ключевые слова: нежесткая дорожная одежда, многослойное полупространство, двухслойное полупространство, напряжения, деформации, расчет.

Введение

Действующая в настоящее время в Российской Федерации методика проектирования нежестких дорожных одежд [1], как и ранее действовавшие документы [2-5] для определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных конструкций, регламентирует приведение их к упрощенным расчетным схемам одно-

родного полупространства при определении прогиба конструкции и двухслойного, либо трехслойного полупространства при определении напряжений в слоях конструкции и рабочем слое земляного полотна. Причиной этому являлась чрезмерно высокая сложность вычисления напряжений и деформаций в многослойной упругой системе (при количестве слоев более 3) при воздействии на нее осесимметричной нагрузки. При этом каждое увеличение расчетной схемы на один слой приводит к существенному усложнению расчета параметров НДС конструкций. В 60-80 годах XX века для практического выполнения расчетов были разработаны номограммы для двухслойных систем по решению Б.И. Когана, а также трехслойных систем (по М.Б. Корсунскому), которые позволяли проектировщикам выполнять сложные трудоемкие расчеты определения параметров НДС вручную. Для использования в современных программных комплексах по расчету нежестких дорожных одежд номограммы оцифрованы производителями соответствующих программных продуктов. Одним из основных недостатков данного подхода является неизбежная погрешность расчета деформаций и напряжений, возникающих в многослойной конструкции дорожной одежды при ее приведении к упрощенным моделям. Кроме того, низкое качество изображения номограмм, а также «биение» графиков не позволяло получать удовлетворительные результаты при их оцифровке. В ряде случаев различные программные комплексы, использующие одни и те же номограммы, выдают значительно отличающиеся друг от друга результаты расчета.

Сравнение результатов расчетов параметров НДС, вычисленных по действующей методике, и с помощью решения теории упругости для многослойного полупространства показывает, что использование упрощенных расчетных схем вносит существенные погрешности, которые в ряде случаев приводят к получению как излишнего запаса прочности, так и наоборот, действуют в ущерб прочности, что может привести к ее преждевременному разрушению.

После ввода в действие ГОСТ 32960 [6] выявился еще один недостаток используемой в настоящее время схемы приведения многослойной дорожной одежды к двухслойной схеме при расчете по критерию упругого прогиба. Предпосылкой этому послужило то, что, согласно [6], для автомобильных дорог с капитальными дорожными одеждами нормативное давление колеса на покрытие было увеличено с 600 кПа до 800 кПа при неизменной нагрузке на ось, равной 115 кН. Увеличение давления колеса на покрытие до 800 кПа привело к уменьшению расчетного диаметра отпечатка колеса D , что, в свою очередь, повлекло увеличение отношения относительной толщины верхнего слоя двух-

слоистой системы h/D . В результате установили, что для одной и той же конструкции дорожной одежды, одинаковой нагрузке на колесо при использовании номограммы расчетный общий модуль упругости $E_{\text{общ}}$ при давлении 800 кПа выше, чем при 600 кПа при неизменном значении минимального требуемого модуля упругости E_{min} . Соответственно, появляется «излишний запас прочности» запроектированной конструкции, что приводит к необоснованному уменьшению толщины дорожной одежды по критерию упругого прогиба. Введение в 2016 г. повышающего коэффициента для E_{min} , равного $\sqrt{\frac{P}{600}} = \sqrt{\frac{800}{600}} \approx 1,155$, частично устранило, но не компенсировало полностью вышеуказанный эффект. При использовании решения для многослойного полупространства при увеличении давления колеса на покрытие необходимость ослабления дорожной одежды по критерию упругого прогиба не возникает.

В нормативно-технических документах ранее были предприняты попытки автоматизировать расчеты многослойных дорожных конструкций. Например, в [7] приведен алгоритм расчета нежестких дорожных одежд, включающий формулы расчета, а также таблицы для определения НДС дорожных одежд. Однако необходимо отметить, что приведенный в документе [7] алгоритм расчета нежестких дорожных одежд предусматривает приведение реальной многослойной конструкции к упрощенной двухслойной схеме, что приводит к погрешностям расчета и является существенным недостатком используемого метода. Причем чем больше количество слоев дорожной одежды, тем выше погрешность.

Современные научные разработки и программные комплексы позволяют проводить расчеты НДС многослойных конструкций нежестких дорожных одежд. При этом необходимость разработки единых алгоритмов расчета нежестких дорожных одежд без приведения к упрощенным схемам является актуальной задачей. Это целесообразно для того, чтобы они могли быть широко использованы проектными организациями и разработчиками программного обеспечения по расчету нежестких дорожных одежд.

Следует отметить, что в ряде ведущих зарубежных стран проектирование дорожных одежд ведется с учетом многослойности конструкции и упрощенные модели не применяются [8-9].

Анализ результатов исследований по сопоставлению существующих методик расчета параметров НДС многослойных конструкций дорожных одежд

Анализ нормативных документов [1-5], посвященных проектированию нежестких дорожных одежд, показывает, что исторически в отечественной методике проектирования при оценке напряженно-деформированного состояния использовалось решение задачи теории упругости для слоистого полупространства.

Ранее в статье [10] выполнялись сравнения результатов расчета по аналитическому решению теории упругости для однослойных и двухслойных конструкций с методом конечных элементов (МКЭ), при этом было отмечено, что МКЭ является перспективным направлением, однако обуславливает повышенные требования к квалификации специалиста, интерпретации результатов расчета и анализа погрешностей.

Отличительной особенностью подхода к расчету на прочность в отечественном методе является использование фундаментальных теоретических представлений классических теорий сопротивления материалов, механики грунтов, реологии, теории усталости и длительной прочности. В соответствии с этим расчет основан на использовании теоретически обоснованных параметров: сцепления, угла внутреннего трения, модуля упругости, прочности на растяжение при изгибе.

Однако при расчете НДС приведение многослойной конструкции к двухслойным моделям (рис. 1) и применение номограмм недостаточного качества, имеющих в определенных местах сдвиги и «биения» (рис. 2), а также накапливаемая на каждой паре слоев погрешность расчета не позволяет обеспечивать высокую точность результатов расчета.

При разработке ПНСТ 265 [2] и ПНСТ 542 [3] номограммы, применяемые в ранее действовавших документах, были переработаны с применением компьютерных программ на основе решения теории упругости для двухслойного полупространства (рис. 3), и «биения» графиков были устранены.

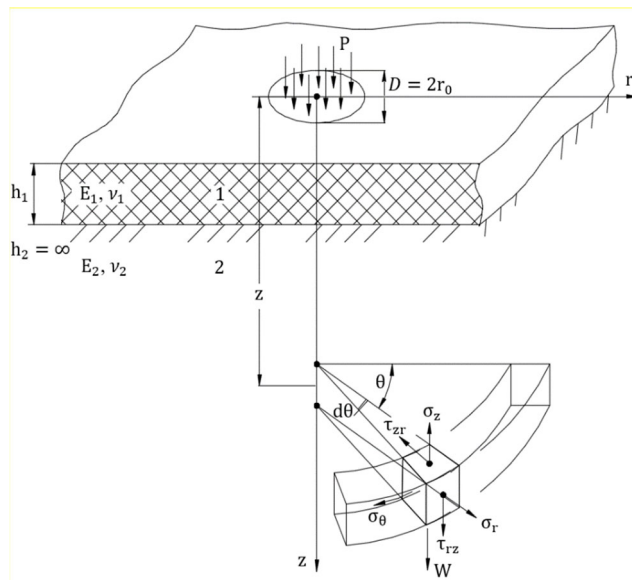


Рис. 1. Расчетная схема двухслойного полупространства

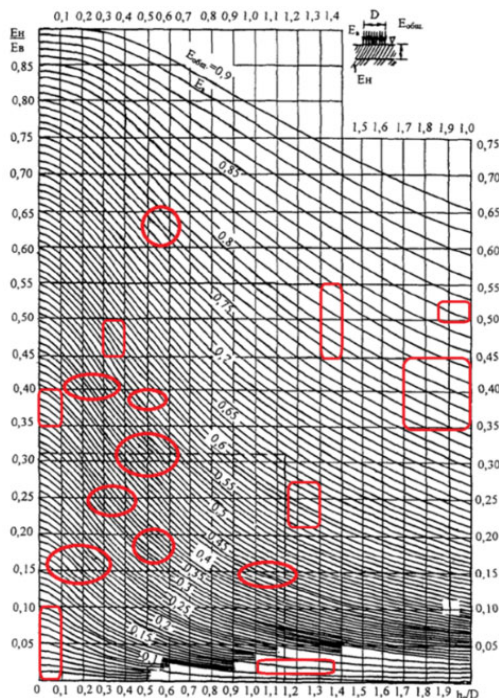


Рис. 2. «Биение» графиков номограммы для определения общего модуля упругости двухслойной системы, приведенной в ОДН 218.046-01 [3]

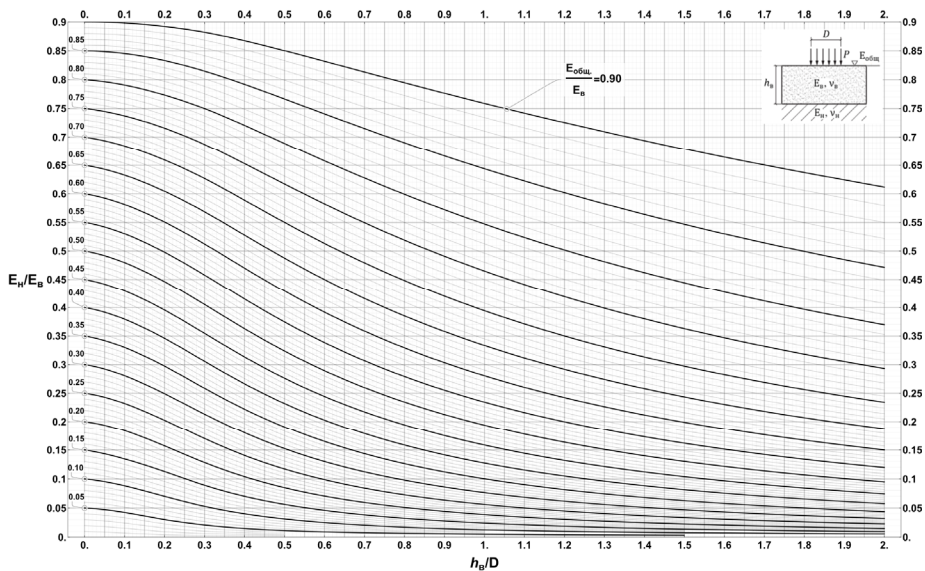


Рис. 3. Номограмма для определения общего модуля упругости $E_{\text{общ}}$ двухслойной системы, согласно [1]

Однако основная проблема методики определения параметров НДС, выражающаяся в поэтапном многократном приведении многослойной конструкции к двухслойным моделям до настоящего момента в системе проектирования, остается нерешенной. Первым практическим шагом для перехода от упрощенных моделей к расчету НДС для многослойных конструкций является разработка и применение ОДМ 218.3.1.005-2021 [11].

С целью определения возможности применения методики расчета НДС многослойной конструкции без приведения к упрощенным схемам и выбора единого алгоритма расчета, который в дальнейшем будет реализован в нормативных документах и программных продуктах, был выполнен анализ существующих методик определения параметров НДС.

В России и за рубежом разработаны различные алгоритмы решения задачи теории упругости для двухслойной и многослойной среды, нагруженной осесимметричной нагрузкой. За рубежом (Западная Европа, США) при проектировании дорожных одежд во многих странах используется решение Д. Бурмистера.

Согласно анализу, выполненному в [12, 13], на решении теории упругости многослойной среды для определения параметров НДС в ста-

тической постановке в различные годы за рубежом были разработаны программные комплексы, среди которых можно выделить:

- CHEVRON (первая версия этой программы была разработана в 1963 г. в научно-исследовательской лаборатории одноименной нефтяной компании в Калифорнии; позднее использована как блок американской программы VESYS для расчета дорожных одежд);
- BISAR (первую версию разработал Д.Л. Де Йонг (D.L. De Jong, 1973) в научной лаборатории нефтяной компании Shell в Амстердаме; ей предшествовала разработанная там же программа BISTRO);
- ELSYM5 (разработал Г. Альборн (G. Ahlborn, 1972) в Калифорнийском университете Беркли, США);
- WESLEA (DOS-версию разработал Ф. Ван Каувелерт (F. Van Cauwelaert, 1989) в Католическом университете г. Монс, Бельгия);
- JULEA (разработчик Jakob Uzan, является модифицированной версией WESLEA и интегрирована в механико-эмпирический метод расчета в 2004 году);
- KENLAYER (разработал Й.Х. Хуанг (Y.H. Huang, 1985) в университете штата Кентукки, США);
- MnLayer (разработан Л. Хазановичем и Цян (Чук) Ван (Lev Khazanovich, Qiang (Chuk) Wang, 2007) в университете штата Миннесота, США [14]).

Все перечисленные программы, кроме KENLAYER и MnLayer, позволяли определять НДС пятислойного полупространства (4 слоя на однородном полупространстве). Программа KENLAYER давала возможность рассчитывать системы с числом слоев до 19, MnLayer позволяет анализировать конструкции с более чем 20 слоями и выполнять расчеты по применяемому в США механико-эмпирическому методу [9].

В России до сих пор при определении НДС дорожных одежд используется решение лишь для двухслойной среды. Как известно, вычисление компонентов НДС для среды, состоящей более чем из трех слоев, представляет достаточно сложную задачу (рис. 4).

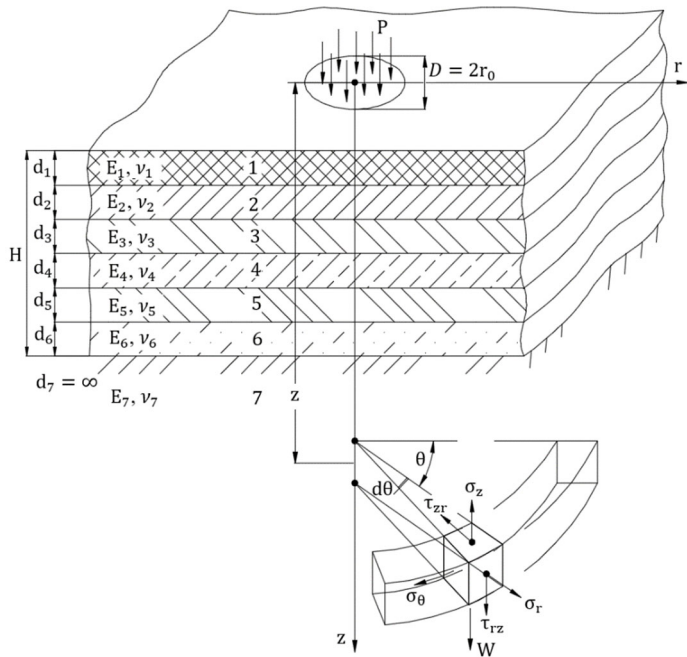


Рис. 4. Расчетная схема семислойного полупространства, нагруженного осесимметричной нагрузкой

В линейной теории упругости рассматривается задача определения НДС многослойной среды, нагруженной на поверхности осесимметричным штампом. Классическая постановка задачи основывается на допущениях: каждый слой является сплошным, деформация упругой среды вызывается только поверхностной нагрузкой. На плоскостях, разделяющих упругие слои, ставятся граничные условия, которые моделируют либо спаянный контакт (вертикальные и касательные напряжения, горизонтальные и вертикальные смещения являются непрерывными функциями от глубины), либо свободный контакт (непрерывность горизонтального смещения заменяется равенством нулю касательного напряжения).

Большинство работ, в которых получены различные представления решения упомянутой задачи, можно отнести к одному из двух направлений.

В работах, относящихся к первому способу, для исследования поставленной выше задачи используются различные интегральные преобразования и разнообразные варианты метода рекуррентных соотношений для вспомогательных функций. Таковыми, например, являются работы А.К. Приварникова [15], в которых в качестве вспомогательных

функций вводятся так называемые функции податливости, зависящие от параметров интегрального преобразования, геометрических и физических характеристик слоев, но не зависящие от нагрузки на поверхности упругого полупространства. Функции податливости находятся из системы линейных алгебраических уравнений, порядок которой не зависит от числа слоев в основании. В результате выполнения данных исследований во второй половине XX века была разработана фортран-программа, реализующая решение А.К. Приварникова и позволяющая вычислять напряжения и перемещения в упругом многослойном основании, нагруженном нормально распределенной по кругу нагрузкой. Достоинством данного программного продукта является то, что число решаемых уравнений для каждой рассматриваемой точки не возрастает пропорционально числу слоев, как в методе Бурмистера (Шапиро и Когана), а остается одним и тем же. Недостатком является невозможность оценки точности вычислений из-за недостаточного описания точного математического алгоритма в открытых источниках, и, как следствие, широкого применения данного алгоритма и программы на практике при проектировании нежестких дорожных одежд в РФ.

Сравнение упрощенной методики расчета НДС дорожной одежды с алгоритмом А.К. Приварникова для многослойных конструкций ранее рассматривалось в ряде исследований и публикаций [12], [16], [17]. В статье [16] продемонстрировано, что при расчете упругого прогиба пятислойной конструкции четырехкратное последовательное приведение к двухслойной системе привело к завышению общего модуля упругости более чем на 20 %. Возможная причина этой погрешности может быть следующая: при послойном приведении на каждом этапе использования номограммы определяли отношение h/D , принимая диаметр, равным диаметру нагруженной площади. Тем самым относительная толщина слоя h/D каждый раз завышалась, поскольку эффективный диаметр передачи давления на самом деле не остается постоянным, а увеличивается с глубиной вследствие распределения напряжений на большую площадь. Поэтому послойное приведение всегда обуславливает занижение прогиба, т.е. завышение общего модуля конструкции. Так же при расчете по сдвигу в песчаном слое основания по упрощенной модели получается парадоксальный результат, поскольку улучшение грунта рабочего слоя земляного полотна приводит к увеличению активных напряжений сдвига в песке, что вынуждает увеличивать толщину дорожной одежды. Авторы [16] указывают на недостатки упрощенной модели расчета НДС и необходимость разработки инструмента для расчета напряжений и прогибов многослойной дорожной одежды без приведения к двухслойным системам.

В ряде других исследований относительно расчета НДС многослойных конструкций были предприняты попытки поиска решения бигармонического уравнения, которое после применения к нему специальных дифференциальных операторов приводит к преобразованиям Ханкеля для напряжений и смещений в упругой среде. Такого рода решения получены в работах Б.И. Когана [18] и К.К. Туроверова [19, 20]. Если упругое основание имеет n слоев, то искомое решение должно удовлетворять системе из $4n$ граничных условий, поэтому в рассматриваемых работах получение бигармонической функции сводится к решению системы из $4n$ линейных алгебраических уравнений для вспомогательных функций. В алгоритме К.К. Туроверова порядок системы уравнений понижается до $2n$ в силу того, что исходное представление для бигармонической функции автоматически удовлетворяет условию непрерывности вертикальных и касательных напряжений. Тем не менее, формульная сложность окончательного решения задачи существенно возрастает с увеличением числа (n) слоев. Достоинством данной методики можно считать то обстоятельство, что громоздкость формул не мешает проверке подлинности решения. Дополнительно имеется возможность оценивать вычислительную устойчивость решения, например, с помощью систем символьной математики. Упомянутое обстоятельство является весьма существенным, поскольку в областях, близких к поверхности основания, и в некоторых других ситуациях получение численных значений напряжений и смещений связано с вычислением интегралов от осциллирующих функций.

Работы [19] и [20] были посвящены исследованию плоской и осесимметричной деформации многослойных оснований. При этом предположили, что:

- материал каждого слоя однороден, изотропен, подчиняется закону Гука и характеризуется своими упругими постоянными;
- толщина каждого слоя постоянна, а подстилающий слой рассматривается как упругое полупространство;
- слои неразрывно связаны на поверхности контакта.

Поставленная задача рассматривалась рядом авторов и при ее решении принципиальных трудностей не возникало. Однако известные решения приводят к сложному вычислительному процессу, который плохо приспособлен к использованию ЭВМ.

К.К. Туроверовым в работе [19] поставлена цель дать упрощение существующих решений, устраняющее в некоторой степени недостаток последних.

При решении использован метод интегральных преобразований в сочетании с методом начальных параметров. Произвольные функции от

параметра интегрирования (входящие в выражения для определения напряжений и перемещений точек различных слоев) связаны между собой цепными зависимостями.

В рамках выполнения исследований были разработаны алгоритмы на основе решения осесимметричной задачи теории упругости для многослойной среды по алгоритмам К.К. Туроверова, обеспечивающие вычисление компонентов напряженно-деформированного состояния конструкции, включающей до 7 слоев, в том числе слой подстилающего упругого полупространства, нагруженной осесимметричной нагрузкой в виде гибкого круглого штампа произвольного диаметра при отсутствии сцепления и полном сцеплении слоев. На основе данного решения и был разработан методический документ ОДМ 218.3.1.005 [11].

При решении задачи вычисляются следующие параметры:

- упругий прогиб конструкции $S_{упр}$;
- общий модуль упругости конструкции $E_{общ}$;
- нормальное вертикальное напряжение в расчетной точке $\sigma_z(r, z)$;
- нормальное радиальное напряжение в расчетной точке $\sigma_r(r, z)$;
- нормальное тангенциальное напряжение в расчетной точке $\sigma_\theta(r, z)$;
- касательное напряжение в расчетной точке $\tau_{rz}(r, z)$;
- максимальное главное напряжение в расчетной точке $\sigma_1(r, z)$;
- минимальное главное напряжение в расчетной точке $\sigma_3(r, z)$;
- активное напряжение сдвига в расчетной точке $T_{акт}(r, z)$.

Разработанные алгоритмы были реализованы в программном продукте, и с целью апробации методики и сопоставления с действующими решениями были выполнены многочисленные сравнительные расчеты определения параметров НДС дорожной конструкции для двухслойных моделей и многослойных конструкций по следующим критериям:

- расчет напряжений и деформаций, возникающих в двухслойной конструкции при воздействии осесимметричной нагрузки в виде круглого штампа по критерию упругого прогиба;
- расчет активных напряжений сдвига $\tau_{акт}$ в нижнем слое двухслойной конструкции;
- расчет растягивающих напряжений в верхнем слое двухслойной конструкции.

Для оценки сходимости результатов определения параметров НДС двухслойных моделей выполнялись сравнительные расчеты по следующим методикам:

1) По упругому прогибу и активному напряжению сдвига:

- ПНСТ 542 [1] (ПНСТ 265 [2]), рассчитанные по алгоритму К.К. Туроверова для двухслойной модели;
- номограммы ОДН 218.046-01 [3];
- таблицы «Методических рекомендаций по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа» (Приложение 2, таблица 1) [7], на **рис. 5** обозначены как «Таблица Пособия»;
- аппроксимирующие формулы «Методических рекомендаций по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа» (формулы 17, 18) [7], на **рис. 5** обозначены как «Формулы Пособия»;
- формула Барбера, приведенная в [21] (только по критерию упругого прогиба);
- формула М.Б. Корсунского (только по критерию упругого прогиба);
- формулы А.Я. Тулаева (только при расчете $T_{акт}$);
- решение А.К. Приварникова (только при расчете $T_{акт}$).

2) По критерию растяжения при изгибе:

- ПНСТ 542 [1] (ПНСТ 265 [2]), рассчитанные по алгоритму К.К. Туроверова для двухслойной модели;
- номограммы ОДН 218.046-01 [3] и ВСН 46-83 [5];
- формула М.Б. Корсунского [4].

Сравнение выполнялось для всего применяемого диапазона отношения h/D и различных исходных параметров определения НДС.

Анализ результатов сопоставительных расчетов двухслойных моделей по критерию упругого прогиба, показал, что в целом погрешности вычислений разными методами находятся в пределах 5-7 % как в сторону завышения, так и в сторону занижения результатов по сравнению с решением для двухслойного полупространства по алгоритму К.К. Туроверова (**рис. 5**). Наименьшую точность показали формулы Барбера и М.Б. Корсунского, несколько большей точностью обладают формулы [7]. Самое высокое приближение к решению К.К. Туроверова имеют графики, построенные по таблице [7] и номограмма ОДН 218.046-01 [3]. Необходимо отметить, что хорошо прослеживается «биение» графиков номограммы ОДН 218.046-01 [3]. При малых значениях $\frac{E_2}{E_1}$ погрешность вычисления эпизодически достигает 8 %, а иногда 10 %. Несмотря на то, что погрешности расчетов, на первый взгляд, невелики, они могут накапливаться при многократном приведении многослойной конструкции к расчетной двухслойной схеме и приводить к значительным погрешностям при расчете многослойной конструкции.

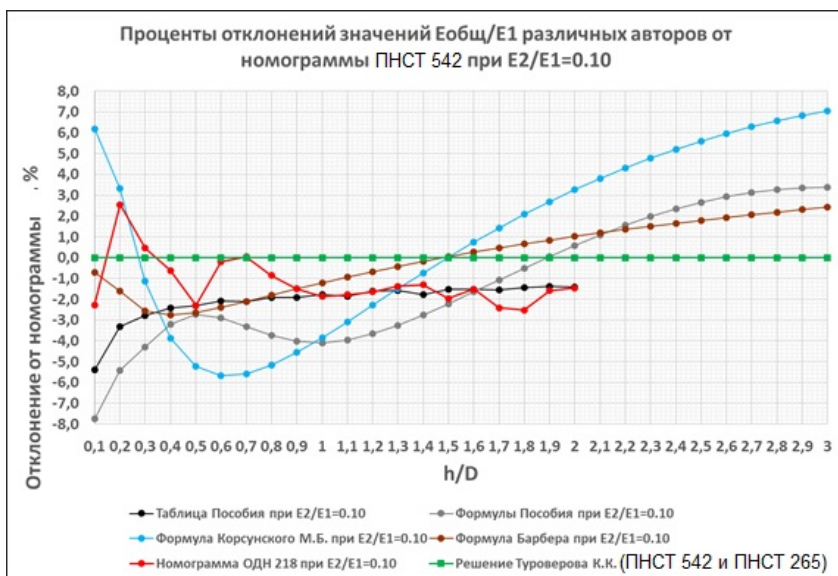


Рис. 5. Графики процентов отклонений значений $\frac{E_{общ}}{E_1}$ в зависимости от $\frac{h}{D}$ при $\frac{E_2}{E_1} = 0,05$, вычисленных по решению К.К. Туроверова (ПНСТ 542 [1] и ПНСТ 265 [2]) и другими способами

Анализ результатов сопоставительных расчетов активных напряжений сдвига в нижнем слое двухслойной конструкции показывает, что в целом погрешности вычислений разными методами достаточно высоки и достигают для различных углов внутреннего трения от минус 36,44 % до 115,38 %, по сравнению с решением для двухслойного полупространства. Наименьшую точность показали формулы из книги [7], несколько большей точностью обладают номограмма [3] и формулы «Методических рекомендаций по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа» [7]. Высокую сходимость показали результаты расчетов по алгоритмам К.К. Туроверова (ПНСТ 542 [1] и ПНСТ 265 [2]) и А.К. Приварникова.

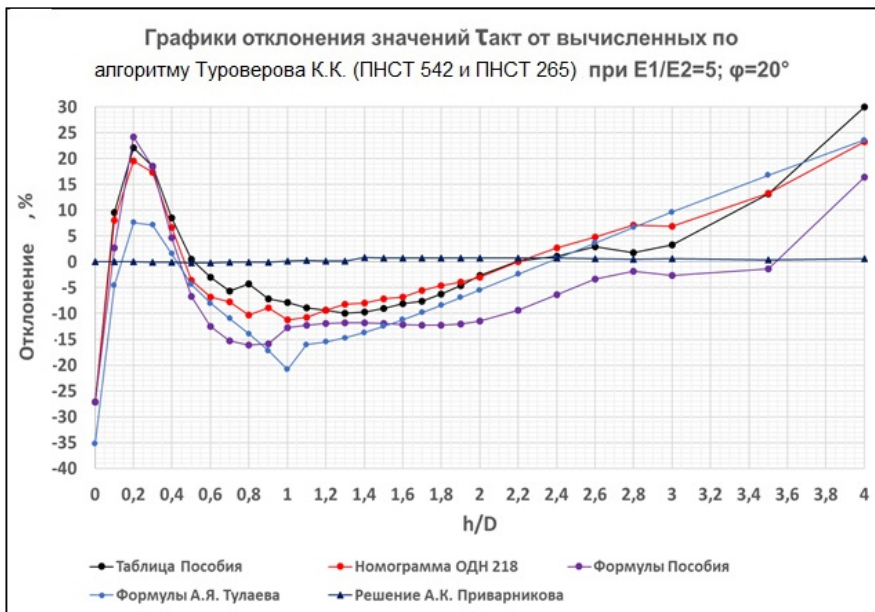


Рис. 6. Графики процентов отклонений значений $\tau_{акт}$ зависимости от $\frac{h}{D}$ при $\frac{E_1}{E_2} = 20$, $\varphi = 30^\circ$, вычисленных по алгоритму К.К. Туроверова (ПНСТ 542 [1] и ПНСТ 265 [2]) и другими способами

Анализ результатов сопоставительных расчетов растягивающих напряжений при изгибе в верхнем слое двухслойного полупространства показал:

- разница результатов расчетов по алгоритму К.К. Туроверова при $\nu_1 = 0,25$, $\nu_2 = 0,35$ и по номограммам [3] и [5] на большей части расчетного диапазона находится в пределах 2 %; при малых значениях $h_b/D < 0,6$ и $E_b/E_n < 20$ растягивающие напряжения, определенные по номограммам [3, 5], превышают вычисленные по решению К.К. Туроверова от 2 % до 10 % (рис. 7);
- увеличение коэффициента Пуассона верхнего монолитного слоя с $\nu_1 = 0,25$ до $\nu_1 = 0,35$ приводит к увеличению растягивающих напряжений в этом слое до 10-12 %.

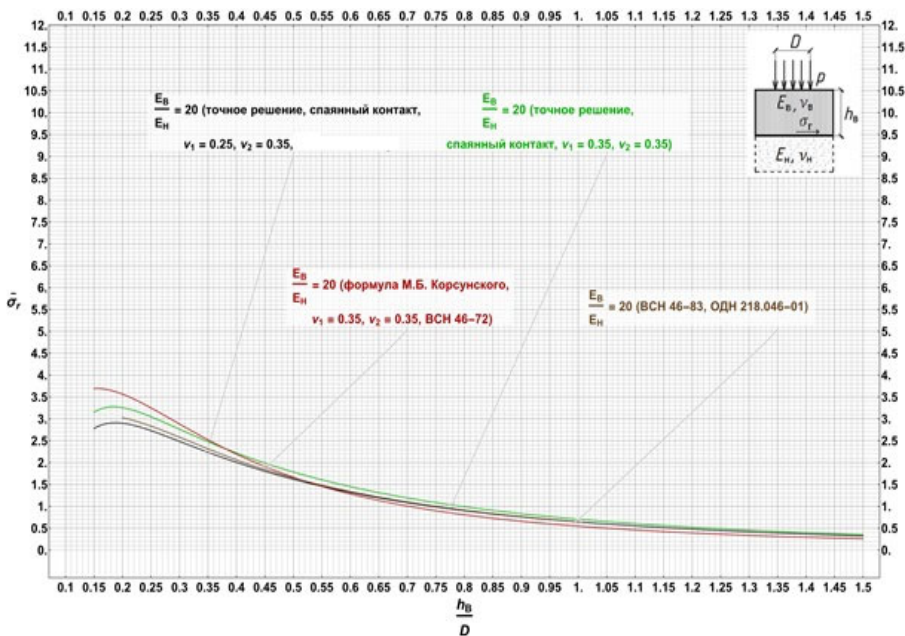


Рис. 7. Графики максимальных единичных растягивающих напряжений при изгибе в верхнем слое двухслойного полупространства, вычисленные различными способами при $E_B/E_H = 20$

С целью оценки влияния расчета многослойной конструкции относительно упрощенной методики были выполнены сравнительные расчеты конструкции дорожной одежды по следующим алгоритмам:

- методике расчета многослойной конструкции по ОДМ 218.3.1.005 [9];
- методике расчета с приведением многослойной конструкции к двухслойной по ПНСТ 542;
- зарубежному алгоритму расчета многослойной конструкции, реализованному в США (программный комплекс MnLayer [14]).

Конструкция дорожной одежды автомобильной дороги II категории и расчетные характеристики материалов слоев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов слоев дорожной одежды

Материал слоя	Толщина, см	Модуль упругости/ коэфф-т Пуассона (упругий прогиб), $E_{iup}, \text{МПа} / \nu_{iup}$	Модуль упругости/ коэфф-т Пуассона (сдвиг, динамика), $E_{isd}, \text{МПа} / \nu_{isd}$	Модуль упругости/ коэфф-т Пуассона (изгиб), $E_{irast}, \text{МПа} / \nu_{irast}$	Модуль упругости/ коэфф-т Пуассона (сдвиг, статика), $E_{ist}, \text{МПа} / \nu_{ist}$
Асфальто- бетон	4(2)*	5000/0,30	3300/0,35	6900/0,25	390/0,35
Асфальто- бетон	7	3800/0,30	2500/0,35	5300/0,25	480/0,35
Асфальто- бетон	8	3200/0,30	1800/0,35	4500/0,25	400/0,35
Щебень фракции 31,5-63 мм, с заклиной фракцион- ным мел- ким щеб- нем	40	350/0,27	350/0,27	350/0,27	350/0,27
Песок сред- ний с со- держанием пылевато- глинистой фракции 5%	55	120/0,30	120/0,30	120/0,30	120/0,30
Грунт зем- ляного по- лотна: су- глинок лег- кий		40,64/0,35	40,64/0,35	40,64/0,35	40,64/0,35

Примечание: * – в расчет принимается 2 см.

В ходе сопоставительного анализа установлено следующее:

- расчетный общий модуль упругости конструкции, рассчитанный по решению для многослойного полупространства, ниже рассчитанного по упрощенной методике [1] на 28,90 %;
- активные напряжения сдвига в грунте при динамическом действии нагрузки, рассчитанные по решению для многослойного полупространства, ниже рассчитанных по упрощенной методике

- [1] при динамическом действии нагрузки на 17,76 %, при статическом действии нагрузки – на 14,88 %;
- активные напряжения сдвига в песке при динамическом действии нагрузки, рассчитанные по решению для многослойного полупространства, выше рассчитанных по упрощенной методике [1] при динамическом действии нагрузки на 99,54 %, при статическом действии нагрузки – на 88,57 %;
 - растягивающие напряжения в монолитном слое основания, рассчитанные по решению для многослойного полупространства, ниже рассчитанных по упрощенной методике [1] на 25,8 %;
 - условия на контактах слоев асфальтобетона и щебня оказывают весьма значительное влияние на напряженное состояние монолитного слоя из асфальтобетона. При необеспеченном сцеплении слоев (гладком контакте) растягивающее напряжение в слое асфальтобетона выше на 29,9 % по сравнению со случаем надежного сцепления слоев (спаянном контакте);
 - растягивающие напряжения в монолитном слое (асфальтобетон), рассчитанные по решению для многослойного полупространства, ниже рассчитанных по упрощенной методике (для гладкого контакта на границе слоев) на 5,7 %;
 - отличия результатов расчета по алгоритму ОДМ 218.3.1.005 [11] и по программному комплексу MnLayer составили:
 - по величине упругого прогиба – 0,011 %;
 - по величине активного напряжения сдвига в грунте при динамическом действии нагрузки – 0,15 %;
 - по величине активного напряжения сдвига в песке при динамическом действии нагрузки – 0,25 %;
 - по величине активного напряжения сдвига в грунте при статическом действии нагрузки – 0,165 %;
 - по величине активного напряжения сдвига в песке при статическом действии нагрузки – 0,295 %;
 - по величине растягивающего напряжения в монолитном слое покрытия (гладкий контакт) – 0,015 %.

Полученные результаты по отдельным критериям свидетельствуют о том, что применение методики расчета для многослойных конструкций приводят к отличию в результатах от 6 до 99 % по сравнению с упрощенными методиками, что может свидетельствовать о значительном накоплении погрешностей при использовании упрощенных методик расчета НДС. Это может приводить как к недостаточной прочности рассчитываемых в настоящее время конструкций, так и к чрезмерному

запасу по отдельным критериям. Кроме того, результаты сравнения показали, что разработанный алгоритм [11] имеет высокую сходимость с современным зарубежным программным комплексом MnLayer.

Заключение

Выполненные исследования позволили разработать методику расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства и реализовать ее в программном комплексе. Разработанная методика представлена в ОДМ 218.3.1.005 [11] и указана в качестве дополнительной в ПНСТ 542 [1].

Апробация методики в период действия ПНСТ 542 [1] может способствовать дальнейшему ее развитию и широкому применению при проектировании нежестких дорожных одежд.

Сравнительные расчеты выявили недостатки упрощенных методик и показали значительное расхождение в расчетных значениях параметров НДС, определенных по упрощенной методике и методике расчета многослойного полупространства без приведения к двухслойным моделям.

Это может свидетельствовать о необходимости перехода на современные методики расчета многослойных конструкций. При этом переход на методику расчета многослойных конструкций может потребовать корректировки требуемых значений параметров НДС, что в свою очередь, может быть выполнено по результатам крупномасштабных полевых исследований с определением фактических значений параметров НДС в дорожных одеждах от колесной нагрузки. Это может быть реализовано путем строительства специальных полигонов или участков дорог, на которых будут заложены датчики определения параметров НДС и проведено сравнение фактических и расчетных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2021. – 151 с.
2. ПНСТ 265-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: Стандартинформ, 2018. – 77 с.
3. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: ФГБУ Инфрмавтодор, 2001. – 148 с.
4. ВСН 46-72. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М.: Транспорт, 1973. – 83 с.

5. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М.: Транспорт, 1985. – 152 с.
6. ГОСТ 32960-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
7. Методические рекомендации по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа. – М.: СоюздорНИИ, 1988. – 72 с.
8. RSTO 12. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen» (Нормы и правила по выбору стандартных конструкций дорожных одежд). – М.: Стандартинформ, 2010. – 52 с.
9. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (A Manual of Practice): Interim Edition/AASHTO – 2008.
10. Мерзликин А.Е. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства, применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов / А.Е. Мерзликин, Н.В. Капустников // ДОРОГИ И МОСТЫ. – № 25/1. –2011. – С. 63-72.
11. ОДМ 218.3.1.005-2021. Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. – М.: Росавтодор, 2021. – 148 с.
12. Отчет о научно-исследовательской работе: «Анализ норм проектирования дорожных одежд зарубежных стран с подготовкой рекомендаций по совершенствованию отечественных норм проектирования». Этап 4. – М.: ФГУП «РОСДОРНИИ». – С. 12-13.
13. Отчет о научно-исследовательской работе: «Разработка ОДМ «Методические рекомендации по основным алгоритмам расчета многослойных конструкций нежестких дорожных одежд». Этап 1. – «Анализ отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, а также научно-исследовательских работ, определяющих методику расчета многослойной конструкции дорожной одежды». – М.: АНО «НИИ ТСК». –27 с.
14. Khazanovich L. High-performance layered elastic analysis program / L. Khazanovich, Q. Wang / Transportation Research Record. – 2007. – Т. 2037. – №. 1. – Р. 63-75.
15. Приварников А.К. Граничные задачи теории упругости для многослойных оснований простой и сложной структуры: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04 / А.К. Приварников. – Запорожье: ЗНУ, 1990. – 84 с.

16. Радовский Б.С. Оценка погрешностей, возникающих при расчете нежестких дорожных одежд / Б.С. Радовский, А.Е. Мерзликін // ДОРОГИ И МОСТЫ. – № 35/1. – 2016. – С. 59-69.
17. Радовский Б.С. К чему приводят некоторые упрощения в методике расчета нежестких дорожных одежд по ОДН 218.046-01 / Б.С. Радовский, А.Е. Мерзликін // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 3. – С. 9-12.
18. Коган Б.И. Напряжения и деформации двухслойных и многослойных покрытий: дис. д-ра техн. наук / Коган Борис Исаевич. – Харьков, 1958.
19. Туроверов К.К. К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния упругого слоистого полупространства. – Научные труды Ленинградской ордена Ленина лесотехнической академии имени С.М. Кирова. – 1962. – № 94. – С. 87-101.
20. Туроверов К.К. К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния слоистых оснований и дорожных одежд: дис. канд. техн. наук: 05.00.00 / Туроверов Константин Константинович; Ленингр. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова. – Л., 1964. – 121 с.
21. Тулаев А.Я. Проектирование оптимальных нежестких дорожных одежд / А.Я. Тулаев, Н.Д. Татенко, Ю.С. Глибовицкий, И.Е. Закурдаев. – М.: Транспорт, 1977. – 117 с.

L I T E R A T U R A

1. PNST 542-2021. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Nezhestkie dorozhnye odezhdy. Pravila proektirovaniya. – М.: Standartinform, 2021. – 151 s.
2. PNST 265-2018. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. М.: Standartinform, 2018. – 77 s.
3. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkih dorozhnyh odezhd. М.: FGBU Informavtodor, 2001. – 148 s.
4. VSN 46-72. Instrukciya po proektirovaniyu dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa. – М.: Transport, 1973. – 83 s.
5. VSN 46-83. Instrukciya po proektirovaniyu dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa. – М.: Transport, 1985. – 152 s.
6. GOST 32960-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Normativnye nagruzki, raschetnye skhemy nagruzheniya. – М.: Standartinform, 2016. – 8 s.
7. Metodicheskie rekomendacii po avtomatizacii raschetov dorozhnyh odezhd nezhestkogo tipa. – М.: SoyuzdorNII, 1988. – 72 s.

8. *RSTO 12. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen» (Normy i pravila po vyboru standartnykh konstrukcij dorozhnykh odezhd).* – M.: Standartinform, 2010. – 52 s.
9. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (A Manual of Practice): Interim Edition/AASHTO – 2008.*
10. Merzlikin A.E. *Modelirovanie uprugogo odnorodnogo i dvuh-slojnogo poluprostranstva, primenitel'no k zadacham po raschetu dorozhnykh odezhd metodom konechnykh elementov / A.E. Merzlikin, N.V. Kapustnikov // DOROGI I MOSTY. – № 25/1. – 2011. – S. 63-72.*
11. *ODM 218.3.1.005-2021. Proektirovanie nezhestkiy dorozhnykh odezhd. Metodicheskie rekomendacii po raschetu parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mnogoslujnykh konstrukcij pri vozdejstvii kolesnykh nagruzok.* – M.: Rosavtodor, 2021. – 148 s.
12. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote: «Analiz norm proektirovaniya dorozhnykh odezhd zarubezhnykh stran s podgotovkoj rekomendacij po sovershenstvovaniyu otechestvennykh norm proektirovaniya». Etap 4.* – M.: FGUP «ROSDORNII». – S. 12-13.
13. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote: «Razrabotka ODM «Metodicheskie rekomendacii po osnovnym algoritmam rascheta mnogoslujnykh konstrukcij nezhestkiy dorozhnykh odezhd». Etap 1. – «Analiz otechestvennykh i zarubezhnykh normativno-tehnicheskikh dokumentov, a takzhe nauchno-issledovatel'skikh rabot, opredelya-yushchih metodiku rascheta mnogoslujnoj konstrukcii dorozhnoj odezhdy».* – M.: ANO «NII TSK». – 27 s.
14. *Khazanovich L. High-performance layered elastic analysis program / L. Khazanovich, Q. Wang / Transportation Research Record. – 2007. – T. 2037. – №. 1. – P. 63-75.*
15. *Privarnikov A.K. Granichnye zadachi teorii uprugosti dlya mnogoslujnykh osnovanij prostoj i slozhnoj struktury: dis. d-ra fiz.-mat. nauk: 01.02.04 / A.K. Privarnikov. – Zaporozh'e: ZNU, 1990. – 84 s.*
16. *Radovskij B.S. Ocenka pogreshnostej, vznikayushchih pri raschete nezhestkiy dorozhnykh odezhd / B.S. Radovskij, A.E. Merzlikin // DOROGI I MOSTY. – № 35/1. – 2016. – S. 59-69.*
17. *Radovskij B.S. K chemu privodyat nekotorye uproshcheniya v metodike rascheta nezhestkiy dorozhnykh odezhd po ODN 218.046-01 / B.S. Radovskij, A.E. Merzlikin // Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli. – 2016. – № 3. – S. 9-12.*
18. *Kogan B.I. Napryazheniya i deformacii dvuh-slojnnykh i mnogoslujnykh pokrytij: dis. d-ra tekhn. nauk / Kogan Boris Isaevich. – Har'kov, 1958.*
19. *Turoverov K.K. K voprosu issledovaniya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya uprugogo sloistogo poluprostranstva. – Nauchnye*

- trudy Leningradskoj ordena Lenina lesotekhnicheskoy akademii imeni S.M. Kirova. – 1962. – № 94. – S. 87-101.*
20. *Turoverov K.K. K voprosu issledovaniya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya sloistyh osnovanij i dorozhnyh odezhd: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.00.00 / Turoverov Konstantin Konstantinovich; Leningr. lesotekhn. akad. im. S. M. Kirova. – L., 1964. – 121 s.*
21. *Tulaev A.YA. Proektirovanie optimal'nyh nezhestkih dorozhnyh odezhd / A.YA. Tulaev, N.D. Tatenko, Yu.S. Glibovickij, I.E. Zakurdaev. – M.: Transport, 1977. – 117 s.*

.....

**IMPROVEMENT OF THE CALCULATION PROCEDURE
FLEXIBLE ROAD PAVEMENTS USING THE APPLICATION OF THE
ELASTICITY THEORY SOLUTION FOR
A MULTILAYER HALF-SPACE**

*Head of the Road Transport and Operational
Condition Assessment Laboratory **M.Yu. Gorsky**,
Head of the Asphalt Concrete Laboratory **G.F. Kadyrov**
(ANO «NII TSK»),*

*Ph. D. (Tech.), Chief Engineer **A.V. Streltsov**
(OOO «NTC «GEOTEKHNologii»),*

*Ph. D. (in Economics), General Director **E.N. Simchuk**
(ANO «NII TSK»)*

*Contact information: gorskiy@niitsk.ru;
georgijk39@gmail.com;
sntc@mail.ru*

The article deals with the issues of calculation procedure flexible road pavements using the application of the elastic theory solution for a multilayer half-space. The results of studies in comparison with existing methods for calculating the parameters of the stress-strain state of multilayer structures under the influence of wheel loads are presented. The recommendations on the application of the solution for a multilayer half-space when designing flexible road pavements are given.

Key words: *flexible road pavements, multilayer half-space, two-layer half-space, stresses, strains, calculation.*

Рецензент: д-р техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 03.11.2021 г.