

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ НА СДВИГОУСТОЙЧИВОСТЬ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПОМОЩЬЮ СЧЕТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

## ANALYSIS OF THE EFFECT OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ASPHALT CONCRETE LAYERS ON THE SHEAR RESISTANCE OF ROAD PAVEMENTS BY THE COUNTING EXPERIMENT

**А. В. Ладышев,**  
старший преподаватель  
Белорусского национального  
технического университета,  
г. Минск, Беларусь

*Особенности структуры асфальтобетона обуславливают сложность моделирования его работы при проведении исследований и практических расчетов, что приводит зачастую к ошибкам в проектировании дорожных одежд. Данный дорожно-строительный материал обладает сложным комплексом реологических свойств, которые необходимо учитывать при определении расчетных сроков службы и уровней надежности конструкций.*

*В статье рассмотрены такие особенности деформационной работы асфальтобетона как физическая нелинейность и различие свойств материала при растяжении и сжатии в условиях высоких расчетных температур.*

*The features of structure of bitumen concrete cause the complexity of modeling of its work during research and practical calculations, which often leads to errors in the designing of road pavement. This road-building material has a complex aggregate of rheological properties, which must be taken into account when determining the estimated service lives and levels of structural reliability.*

*In the article there are considered such features of deformation function of bitumen concrete as a physical nonlinearity and a difference in material properties under tension and compression in conditions of high design temperatures.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Многолетний опыт обследований дорожных одежд улиц города Минска и других населенных пунктов Республики Беларусь показывает, что одной из основных причин преждевременного выхода конструкций из строя являются сдвиговые деформации, проявляющиеся в основном в виде колеи или наплывов. Данные дефекты значительно снижают уровень безопасности движения, потребительские качества покрытия и имеют зачастую критический характер, когда требуется немедленное принятие мер по их устранению. При проектировании конструкций дорожных одежд для выполнения текущего или капитального ремонта улиц высоких категорий (М, А и Б согласно классификации ТКП 45-3.03-227 [1]) в 90 % случаев необходимо предусматривать меры по ликвидации и дальнейшему предотвращению сдвиговых дефектов. Ситуация объясняется известными факторами: повышением осевых нагрузок транспортных средств; увеличением интенсивности движения; высокими летними температурами; режимом движения с большим количеством участков раз-

гона и торможения. Эффективно проблема решается путем устройства жестких дорожных одежд, применение которых оправданно имеет поддержку на государственном уровне. Однако в условиях городского транспортного строительства устройство цементобетонных покрытий имеет ряд ограничений и недостатков, поэтому технологии проектирования асфальтобетонных высокопрочных покрытий по-прежнему являются важными и перспективными направлениями в дорожном строительстве.

Для увеличения устойчивости нежестких покрытий к сдвиговым деформациям при проектировании нежестких конструкций требуется точно определить условия работы каждого слоя и его напряженно-деформированное состояние при заданном режиме нагружения. Традиционно в существующей нормативной документации (ТКП 45-3.03-112 [2] и ТКП 45-3.03-3-2004 [3]) при проверке критерия сдвигоустойчивости в качестве расчетных характеристик материалов применяются модули упругости, которые предполагают прямо пропорциональную зависимость между напряжением и деформацией. Однако асфальтобетон является сложным по своей структуре материалом, деформирование которого происходит по сложной зависимости, обусловленной сочетанием упругих, вязких и пластических связей. Следовательно, моделирование деформационного поведения с помощью модулей упругости может иметь существенную погрешность.

Таким образом, целью настоящей работы является выявление погрешности в оценке сдвиговой устойчивости асфальтобетона в случае проведения расчета без учета особенностей деформационного поведения материала. В качестве исследуемых параметров в работе приняты физическая нелинейность и различие свойств материала при растяжении и сжатии.

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Первым рассмотренным фактором является то, что при расчетах дорожных одежд на прочность, свойства асфальтобетона при сжатии и при растяжении принимаются одинаковыми либо фигурируют в расчетах отдельно друг от друга. Реальная же ситуация такова, что асфальтобетон и другие материалы, включающие органические вяжущие, сочетают в себе свойства дискретных (зернистых) материалов и свойства реологических, упруговязкопластических систем. Эта особенность приводит к серьезному различию в поведении данного материала при растяжении и сжатии. Графически суть явления изображена на рисунке 1, где график 1 отображает равенство деформационных характеристик при растяжении (квадрант I) и сжатии (квадрант III), а графики 2 и 3 характеризуют их различие. Наиболее ярко данное свойство проявляется при высоких расчетных температурах, соответствующих условиям появления сдвиговых деформаций.

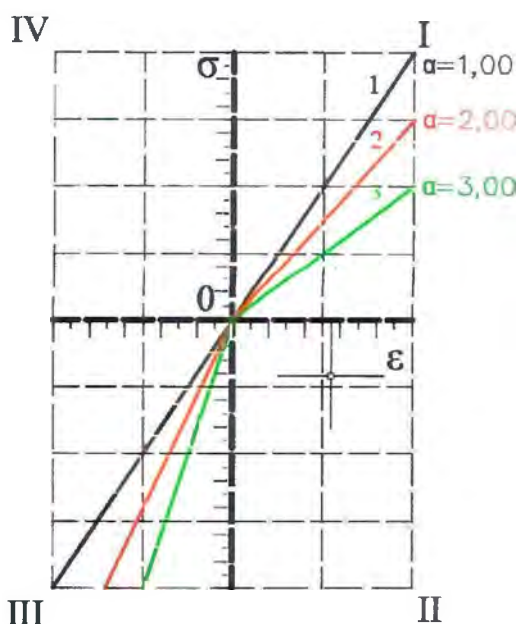


Рисунок 1 – Различие свойств на растяжение и сжатие

При проведении исследования различие свойств на растяжение и сжатие будет характеризоваться коэффициентом  $\alpha$ , определяемым по формуле

$$\alpha = \frac{E_c}{E_p}, \quad (1)$$

где  $E_c$  – модуль упругости материала на сжатие, МПа;  $E_p$  – модуль упругости материала на растяжение, МПа.

Вторым фактором, рассмотренным в рамках исследования, является физическая нелинейность свойств асфальтобетона. Это означает, что кривая деформирования (в координатах напряжение – деформация либо нагрузка – перемещение) имеет нелинейный вид (кривая 2 на рисунке 2). Поэтому конструирование дорожных одежд с использованием в качестве расчетных характеристик модулей упругости материалов (характеризуется кривой 1 на рисунке 2) имеет значительные погрешности. Следует отметить, что рассматриваемое явление также в большей степени проявляется при высоких расчетных температурах.

При проведении исследования нелинейность свойств будет характеризоваться коэффициентом  $\eta$ , определяемым по формуле

$$\eta = S_1/S_2, \quad (2)$$

где  $S_1$  – площадь фигуры на графике деформирования, соответствующая нелинейной работе материала (заключенная между кривыми 1 и 2);

$S_2$  – полная площадь фигуры на графике деформирования под кривой 2, соответствующей прямо пропорциональной зависимости.

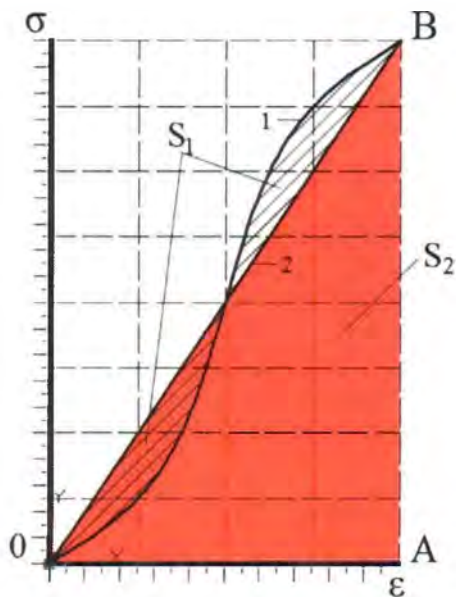


Рисунок 2 – Физическая нелинейность свойств

### ХОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования рассмотрена модель дорожной одежды с трехслойным асфальтобетонным покрытием, где параметры деформационных свойств  $\alpha$  и  $\eta$  варьировались в заданных пределах для каждого слоя.

Для выполнения исследования был применен метод конечных элементов (МКЭ), который позволил учесть и применить в расчетах приведенные деформационные особенности асфальтобетона.

Модель дорожной одежды для проведения расчетов была создана в системе аналитического проектирования MSC.PATRAN. Задача статики в нелинейной постановке была решена посредством пакета конечно-элементного анализа MSC.MARC. Геометрическая модель дорожной одежды насчитывает шесть слоев: три слоя покрытия, два слоя основания и слой рабочей зоны земляного полотна. Базовые расчетные характеристики конструкции приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики базовой конструкции

Номер слон	Конструктивный элемент	Толщина, м	Модуль упругости при температуре 50 °С, МПа	Коэффициент Пуассона
1	Покрытие	0,06	500	0,40
2	Покрытие	0,06	500	0,40
3	Покрытие	0,06	500	0,40
4	Основание	0,32	400	0,30
5	Основание	0,50	100	0,30
6	Земляное полотно	1,00	50	0,30

Выбранная геометрическая модель в большой степени отражает типовую модель дорожной одежды улиц высоких категорий Республики Беларусь. Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнялись от действия равномерно распределенной транспортной нагрузки  $P$ , соответствующей нагрузке на ось расчетного автомобиля 11,5 т (расчетная нагрузка А2 [2]). Нагрузка была приложена только в вертикальной плоскости, горизонтальная составляющая не учитывалась. Одинаковые толщины и характеристики слоев покрытия приняты для облегчения анализа данных проведенных расчетов.

Объектом исследования является покрытие дорожной одежды. Параметры деформационных свойств  $\alpha$  и  $\eta$  варьировались в пределах трех значений для каждого слоя, указанных в таблице 2. Было проведено два полных факторных эксперимента, в рамках которых определены параметры напряженно-деформированного состояния покрытия для всех комбинаций в трех слоях значений параметра  $\alpha$  (расчеты 11-127) и параметра  $\eta$  (расчеты 21-227). В таблице 3 приведены все комбинации параметров.

Таблица 2 – Диапазон значений параметров деформационных свойств

Вариация значений	Параметр $\alpha$	Параметр $\eta$
Значение № 1	1,00	0,00
Значение № 2	2,00	0,06
Значение № 3	3,00	0,11

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При выполнении исследования предполагалось, что сдвигустойчивость конструктивного слоя будет обеспечена, если в результате воздействия транспортной нагрузки при расчетных значениях температуры не будет происходить деформирование структуры материала от действия касательных напряжений [4]. То есть касательные напряжения не будут вызывать изменение формы конструктивного слоя и появление пластических деформаций. Оценка сдвигустойчивости велась путем определения коэффициента запаса прочности по формуле, которая является преобразованием закона Мора – Кулона,

$$K_3 \leq \frac{|\sigma| \cdot \operatorname{tg} \varphi + C}{\tau_{\max}}, \quad (3)$$

где  $K_3$  – расчетный коэффициент запаса прочности;  
 $\sigma$  – нормальные напряжения, МПа;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения материала (для всех слоев покрытия значение принято равным 35°), град;  
 $C$  – сила внутреннего сцепления материала (для всех слоев покрытия значение принято равным 0,30 МПа), МПа;  
 $\tau_{\max}$  – максимальные касательные напряжения, МПа.  
 Максимальные касательные напряжения и соответствующие им нормальные напряжения опре-

Таблица 3 – Сочетание параметров для расчетов

Номер расчета	Слой 1	Слой 2	Слой 3
1(2) <sub>1</sub>	Значение 1	Значение 1	Значение 1
1(2) <sub>2</sub>	Значение 2	Значение 1	Значение 1
1(2) <sub>3</sub>	Значение 3	Значение 1	Значение 1
1(2) <sub>4</sub>	Значение 1	Значение 2	Значение 1
1(2) <sub>5</sub>	Значение 2	Значение 2	Значение 1
1(2) <sub>6</sub>	Значение 3	Значение 2	Значение 1
1(2) <sub>7</sub>	Значение 1	Значение 3	Значение 1
1(2) <sub>8</sub>	Значение 2	Значение 3	Значение 1
1(2) <sub>9</sub>	Значение 3	Значение 3	Значение 1
1(2) <sub>10</sub>	Значение 1	Значение 1	Значение 2
1(2) <sub>11</sub>	Значение 2	Значение 1	Значение 2
1(2) <sub>12</sub>	Значение 3	Значение 1	Значение 2
1(2) <sub>13</sub>	Значение 1	Значение 2	Значение 2
1(2) <sub>14</sub>	Значение 2	Значение 2	Значение 2
1(2) <sub>15</sub>	Значение 3	Значение 2	Значение 2
1(2) <sub>16</sub>	Значение 1	Значение 3	Значение 2
1(2) <sub>17</sub>	Значение 2	Значение 3	Значение 2
1(2) <sub>18</sub>	Значение 3	Значение 3	Значение 2
1(2) <sub>19</sub>	Значение 1	Значение 1	Значение 3
1(2) <sub>20</sub>	Значение 2	Значение 1	Значение 3
1(2) <sub>21</sub>	Значение 3	Значение 1	Значение 3
1(2) <sub>22</sub>	Значение 1	Значение 2	Значение 3
1(2) <sub>23</sub>	Значение 2	Значение 2	Значение 3
1(2) <sub>24</sub>	Значение 3	Значение 2	Значение 3
1(2) <sub>25</sub>	Значение 1	Значение 3	Значение 3
1(2) <sub>26</sub>	Значение 2	Значение 3	Значение 3
1(2) <sub>27</sub>	Значение 3	Значение 3	Значение 3

делались в соответствии с теорией напряженно-деформированного состояния твердых тел исходя из определенных методом конечных элементов значений главных напряжений. Пример распределения касательных напряжений по толщине конструкции дорожной одежды приведен на рисунке 3.

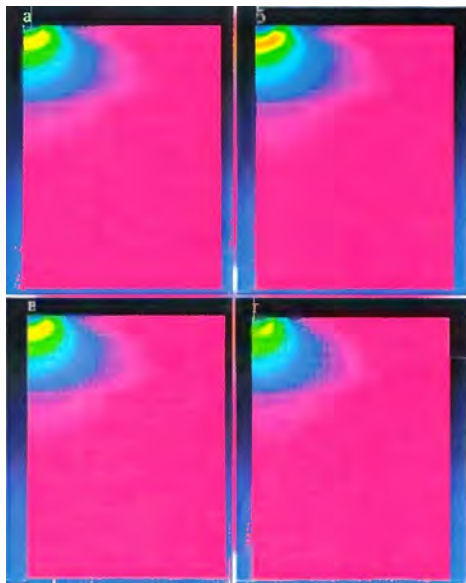


Рисунок 3 – Распределение касательных напряжений по толщине конструкции дорожной одежды: а – расчет № 1; б – расчет № 1<sub>1</sub>; в – расчет № 2; г – расчет № 2<sub>1</sub>

В таблице 4 представлены результаты расчетов конструкций, где варьировался параметр  $\alpha$  (серия № 1), характеризующий различие свойств при растяжении и сжатии, а также варьировался параметр  $\eta$  (серия 2), характеризующий нелинейность свойств.

Таблица 4 – Результаты расчетов

Номер расчета	Номер слоя	Серия № 1			Серия № 2		
		$\tau$ , МПа	$\sigma$ , МПа	$K$	$\tau$ , МПа	$\sigma$ , МПа	$K$
1	1	0,22	-0,37	2,50	0,22	-0,37	2,50
	2	0,21	-0,27	2,31	0,21	-0,27	2,31
	3	0,20	-0,22	2,33	0,20	-0,22	2,33
2	1	0,23	-0,37	2,39	0,22	-0,38	2,53
	2	0,21	-0,26	2,31	0,21	-0,27	2,33
	3	0,19	-0,22	2,33	0,20	-0,23	2,34
3	1	0,24	-0,37	2,34	0,23	-0,39	2,45
	2	0,21	-0,26	2,31	0,21	-0,28	2,37
	3	0,19	-0,22	2,33	0,20	-0,24	2,37
4	1	0,23	-0,38	2,49	0,22	-0,36	2,51
	2	0,22	-0,26	2,20	0,20	-0,27	2,41
	3	0,19	-0,22	2,34	0,20	-0,23	2,34
5	1	0,24	-0,38	2,38	0,22	-0,36	2,56
	2	0,22	-0,25	2,18	0,21	-0,28	2,41
	3	0,19	-0,21	2,34	0,20	-0,24	2,35
6	1	0,24	-0,38	2,33	0,23	-0,37	2,48
	2	0,22	-0,25	2,18	0,21	-0,29	2,44
	3	0,19	-0,21	2,34	0,20	-0,24	2,37
7	1	0,23	-0,38	2,49	0,21	-0,34	2,56
	2	0,22	-0,26	2,15	0,21	-0,29	2,39
	3	0,19	-0,22	2,35	0,20	-0,25	2,39
8	1	0,24	-0,38	2,38	0,21	-0,34	2,62
	2	0,22	-0,25	2,13	0,21	-0,29	2,38
	3	0,19	-0,21	2,35	0,20	-0,25	2,39
9	1	0,24	-0,39	2,33	0,22	-0,35	2,54
	2	0,22	-0,24	2,13	0,21	-0,30	2,38
	3	0,19	-0,21	2,35	0,20	-0,26	2,40
10	1	0,22	-0,38	2,57	0,23	-0,37	2,43
	2	0,22	-0,27	2,28	0,22	-0,31	2,33
	3	0,22	-0,23	2,08	0,18	-0,22	2,52
11	1	0,23	-0,38	2,46	0,23	-0,37	2,47
	2	0,21	-0,27	2,27	0,21	-0,26	2,35
	3	0,22	-0,23	2,06	0,18	-0,23	2,55

12	1	0,23	-0,38	2,41	0,24	-0,39	2,40
	2	0,21	-0,26	2,27	0,20	-0,27	2,39
	3	0,22	-0,22	2,05	0,18	-0,24	2,55
13	1	0,22	-0,38	2,56	0,23	-0,36	2,44
	2	0,22	-0,27	2,17	0,21	-0,30	2,44
	3	0,22	-0,22	2,06	0,18	-0,23	2,51
14	1	0,23	-0,38	2,45	0,22	-0,36	2,49
	2	0,22	-0,26	2,15	0,21	-0,31	2,44
	3	0,22	-0,22	2,05	0,18	-0,24	2,52
15	1	0,24	-0,39	2,41	0,23	-0,37	2,43
	2	0,22	-0,26	2,15	0,21	-0,33	2,46
	3	0,22	-0,21	2,05	0,18	-0,24	2,54
16	1	0,22	-0,39	2,55	0,21	-0,33	2,48
	2	0,23	-0,26	2,13	0,20	-0,28	2,43
	3	0,22	-0,22	2,06	0,20	-0,28	2,54
17	1	0,23	-0,39	2,45	0,21	-0,34	2,55
	2	0,23	-0,26	2,11	0,21	-0,28	2,41
	3	0,22	-0,21	2,06	0,19	-0,25	2,54
18	1	0,24	-0,39	2,40	0,22	-0,35	2,48
	2	0,23	-0,25	2,10	0,21	-0,29	2,42
	3	0,22	-0,21	2,06	0,19	-0,25	2,55
19	1	0,22	-0,38	2,59	0,23	-0,37	2,42
	2	0,22	-0,28	2,26	0,23	-0,30	2,21
	3	0,23	-0,22	1,96	0,19	-0,26	2,51
20	1	0,23	-0,38	2,48	0,23	-0,37	2,46
	2	0,22	-0,27	2,25	0,22	-0,29	2,25
	3	0,23	-0,21	1,96	0,19	-0,27	2,52
21	1	0,23	-0,38	2,44	0,24	-0,38	2,40
	2	0,22	-0,27	2,25	0,22	-0,29	2,31
	3	0,23	-0,21	1,95	0,19	-0,27	2,56
22	1	0,22	-0,38	2,58	0,23	-0,35	2,43
	2	0,23	-0,27	2,15	0,21	-0,30	2,37
	3	0,23	-0,21	1,96	0,20	-0,27	2,48
23	1	0,23	-0,39	2,48	0,22	-0,36	2,48
	2	0,23	-0,26	2,14	0,22	-0,31	2,38
	3	0,23	-0,20	1,96	0,20	-0,28	2,49
24	1	0,23	-0,39	2,43	0,23	-0,37	2,43
	2	0,23	-0,26	2,13	0,21	-0,31	2,43
	3	0,23	-0,20	1,96	0,20	-0,28	2,52

25	1	0,22	-0,39	2,58	0,22	-0,33	2,47
	2	0,23	-0,27	2,11	0,22	-0,31	2,40
	3	0,23	-0,21	1,96	0,20	-0,28	2,49
26	1	0,23	-0,39	2,47	0,21	-0,33	2,54
	2	0,23	-0,26	2,09	0,22	-0,32	2,41
	3	0,22	-0,20	1,96	0,20	-0,28	2,49
27	1	0,24	-0,39	2,42	0,22	-0,35	2,49
	2	0,23	-0,26	2,09	0,22	-0,32	2,44
	3	0,22	-0,20	1,96	0,19	-0,25	2,51

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обработки данных таблицы 4 можно сделать следующие выводы:

1. Анализ влияния различия деформационных характеристик асфальтобетона (изменение параметра  $\alpha$ ), позволяет выявить общую закономерность, что увеличение разности свойств при сжатии и растяжении приводит к снижению сдвигоустойчивости каждого конструктивного слоя. Данные тенденции представлены на графиках рисунка 4. Наименьшие показатели коэффициента запаса верхних слоев характерны для конструкций 16 и 19 ( $K_s = 2,33$ ), наибольшие – для конструкций 122 и 125 ( $K_s = 2,58$ ). Наименьшие показатели коэффициента запаса промежуточных слоев характерны для конструкций 126 и 127 ( $K_s = 2,09$ ), наибольшие – для конструкций 11, 12 и 13 ( $K_s = 2,31$ ). Наименьшие показатели коэффициента запаса нижних слоев характерны для конструкций 119-127 ( $K_s = 1,96$ ), наибольшие – для конструкций 11, 18 и 19 ( $K_s = 2,35$ ).

2. Анализ влияния физической нелинейности асфальтобетона (параметра  $\eta$ ), позволяет выявить общую закономерность, что увеличение данного параметра для верхнего слоя приводит к снижению его сдвиговой устойчивости. Для промежуточного и нижнего слоев увеличение нелинейности приводит к повышению сдвигоустойчивости. Данные тенденции представлены на графиках рисунка 5. Наименьший показатель коэффициента запаса верхнего слоя характерен для конструкции 221 ( $K_s = 2,40$ ), наибольший – для конструкции 28 ( $K_s = 2,62$ ). Наименьший показатель коэффициента запаса промежуточного слоя характерен для конструкции 219 ( $K_s = 2,21$ ), наибольший – для конструкции 215 ( $K_s = 2,46$ ). Наименьший показатель коэффициента запаса нижнего слоя характерен для конструкции 21 ( $K_s = 2,33$ ), наибольший – для конструкции 221 ( $K_s = 2,56$ ).

3. По результатам исследования можно сделать общий вывод, что различие свойств на растяжение и сжатие и нелинейность свойств материала существенно влияют на напряженно-деформированное состоя-

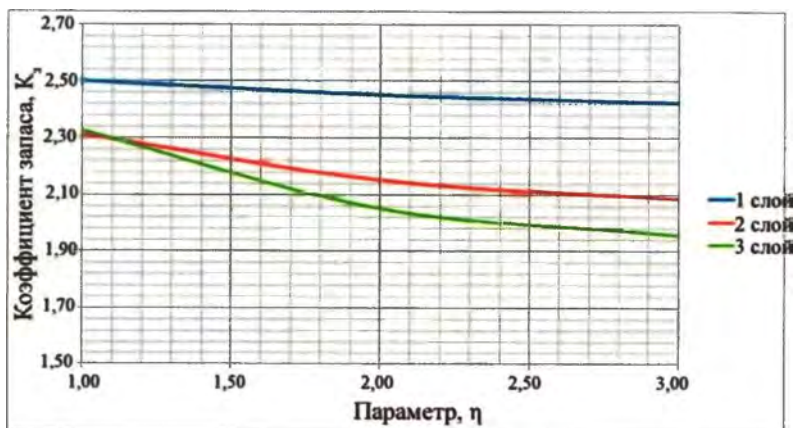


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента запаса от параметра  $\alpha$

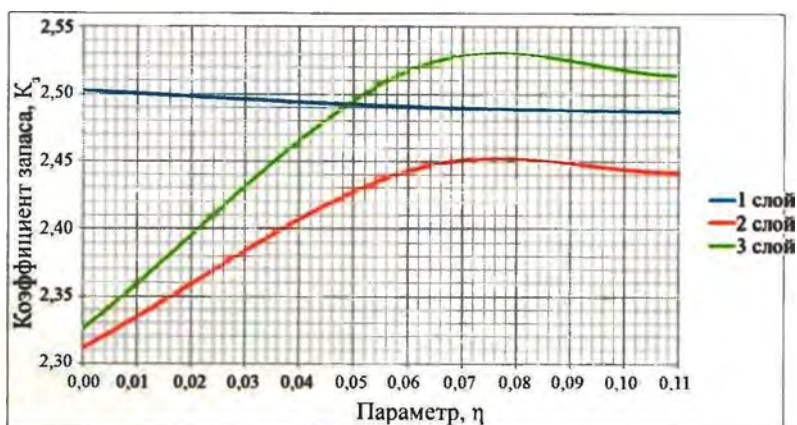


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента запаса от параметра  $\eta$

ние конструкций и, как следствие, на свдигустойчивость дорожных одежд. В зависимости от сочетания исследуемых параметров (таблица 4) для каждого слоя коэффициент запаса прочности варьировался в пределах от 10 % до 20 %. Следовательно, более глубокий учет деформационных характеристик асфальтобетонных при конструировании дорожных одежд может открыть существенные резервы для решения проблемы колееобразования на транспортных объектах с высокой транспортной нагрузкой.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-3.03-227-2010 (02250).
2. Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды. Нормы проектирования : ТКП 45-3.03-112-2008 (02250).
3. Проектирование дорожных одежд улиц населенных пунктов : ТКП 45-3.03-3-2004 (02250).
4. Веренько, В.А. Деформации и разрушения дорожных покрытий: причины и пути устранения / В. А. Веренько. – Минск : Беларус. энцыкл. імя П. Броўкі, 2008. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 25.05.2017.