

Министерство образования Российской Федерации  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)

Ростовский государственный строительный университет  
(РГСУ)

А.В.Смирнов, С.К.Иллиополов, А.С.Александров

# **ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И РАСЧЕТ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Учебное пособие**

**Под редакцией доктора техн.наук, профессора А.В. Смир-  
нова**

Омск  
Издательство СибАДИ  
2003

**А.В.Смирнов, С.К.Иллиополов, А.С.Александров**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
И РАСЧЕТ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Учебное пособие**

**Омск  
Издательство СибАДИ**

**2003**

УДК 625.73.1  
ББК 39.311  
С 50

Рецензенты: *профессор Шилов В.А. – Ростовский государственный строительный университет;*  
*профессор Шаповал А.Ф., доценты Митрофанов Н.Г., Елькин Б.П, Агейкин В.Н. – Тюменская государственная архитектурно-строительная академия;*  
*профессор Ситников Ю.М. – Совет УМО вузов РФ по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов.*

Работа одобрена редакционно-издательским советом академии в качестве учебного пособия.

**Смирнов А.В., Иллиополов С.К., Александров А.С.** Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций: Учебное пособие/Под ред. А.В.Смирнова. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 188 с.

Учебное пособие подготовлено специалистами Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ) и Ростовского государственного строительного университета (РГСУ). Пособие отвечает содержанию основной образовательной программы подготовки дипломированных специалистов по специальности 29.10.00 «Автомобильные дороги и аэродромы» направления 65.36.00 – Транспортное строительство.

Пособие будет полезным в образовании студентов, аспирантам и окажет помощь специалистам в практическом обосновании дорожных проектов.

Табл. 59. Ил. 72. Библиогр.: 85 назв.

ISBN 5-93204-124-2

© А.В.Смирнов, С.К.Иллиополов,  
А.С.Александров, 2003

© Издательство СибАДИ, 2003

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> . . . . .	4
<b>1. Предельные состояния дорожных конструкций и критерии динамической прочности и устойчивости</b> . . . . .	6
<b>2. Современные методы учета количества воздействий транспортных средств на дорожные конструкции</b> . . . . .	13
<b>3. Нагрузки от колесных транспортных средств на дороги и динамические напряжения в покрытиях</b> . . . . .	22
<b>4. Физико-математические модели системы «дорожная конструкция – грунт» при динамическом воздействии</b> . . . . .	27
4.1. Корректность и применяемость физико-математических моделей систем . . . . .	27
4.2. Реализация пространственной модели системы «дорожная конструкция – грунт» . . . . .	31
4.3. Особенности динамического напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций . . . . .	36
4.4. Численный эксперимент моделирования динамического напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций . . . . .	40
<b>5. Инженерные методы расчета дорожных конструкций на динамическую устойчивость</b> . . . . .	45
5.1. Метод динамического прогиба . . . . .	47
5.2. Энергетический метод . . . . .	65
<b>6. Расчет дорожных конструкций по критерию обеспечения требуемой ровности покрытия</b> . . . . .	77
6.1. Условия расчета дорожных конструкций . . . . .	77
6.2. Обоснование допускаемых значений неровностей дорожных покрытий . . . . .	79
6.3. Физическое моделирование упруговязкопластических свойств грунтовых оснований дорожных конструкций . . . . .	95
6.4. Краткие сведения о методах определения и численных значениях показателей реологических свойств связных грунтов. . . . .	105
6.5. Методика расчета пластической деформации, накапливаемой связным грунтом земляного полотна . . . . .	129
<b>7. Мониторинг динамической прочности и состояния дорожных конструкций</b> . . . . .	167
<b>Заключение</b> . . . . .	183
<b>Библиографический список</b> . . . . .	184

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие написано в начале 3-го тысячелетия, когда в России накоплен более чем 50-летний опыт дорожного строительства. Он включает строительство и эксплуатацию главного элемента дорог – дорожных одежд или дорожных конструкций, обеспечивающих основные потребительские свойства: проезжаемость, ровность, безопасность автомобильного движения и его эффективность. В течение этого периода возникали различные подходы и концепции к обоснованию размеров дорожных конструкций и их прочности.

Значение дорожных конструкций в дорожной сети России, необходимость их совершенствования путем исследований их работы и создания аналитического аппарата для обоснования их прочности и устойчивости трудно переоценить хотя бы потому, что к 2001 году из общей сети дорог в 909,5 тыс. км стоимость дорог России общего пользования в 584,4 тыс. км составляла 63,6 млрд руб. ( $\approx$  23 млрд \$). Эта существенная доля в национальном богатстве России будет возрастать, так как минимальный дефицит протяженности дорог Российской Федерации составляет 600 тыс. км, из которого 50% будут строиться интенсивно.

Опыт реализации президентской программы «Дороги России» за 1995-2001 годы показал, что ежегодно в России сеть дорог с твердым покрытием может увеличиваться на 11 тыс. км, а протяженность мостов на 40 км. Дорожная отрасль 1 млрд руб. возвращает России в виде прироста валового регионального продукта от 6 до 32 млрд руб.

Особенностью дорожного строительства до 2007 года и далее по планам Министерства транспорта РФ будет увеличение протяженности многополосных дорог до 8 тыс. км (автомагистрали, дороги 1 категории), что придает проблеме динамической устойчивости дорожных конструкций особое значение.

Таким образом, совершенно очевидно социальное и экономическое значение дорожных конструкций и всего, что связано с увеличением их надежности и долговечности и высокими потребительскими качествами.

Следует отметить, что учебные пособия, подобные настоящему, ранее не издавались. Их подменяли монографии или ведомственные нормы на проектирование дорожных конструкций (ВСН 46-72, ВСН 46-83, ОДН 218.046-01). Вместе с этим монография Н.Н. Иванова «Конструирование и расчет жестких дорожных одежд» [1], изданная в 80-х годах XX века, заложила основу дорожной механики как науки, создала фундамент в автodorожном образовании.

Соавторами этой монографии были выдающиеся ученые и ученики Н.Н. Иванова: Ю.М. Яковлев, А.М. Кривисский, М.Б. Корсунский, Б.С. Радовский, В.М. Сиденко, Я.А. Калужский и другие.

В 1975 г. в Сибирском автомобильно-дорожном институте была издана монография А.В. Смирнова «Динамика дорожных одежд автомобильных дорог» [2], систематизировавшая знания в части динамического поведения слоистых дорожных конструкций.

В последние годы XX столетия внимание серьезных физико-математических школ России было обращено на работу слоистых дорожных конструкций, что отражено в монографии С.К. Иллиополова, М.Г. Селезнева [3], где изложены высококорректные способы динамического расчета слоистой среды.

Но спустя почти четверть века возникла необходимость в издании учебного пособия по следующим причинам:

- изменение числа и содержания критериев прочности слоистых дорожных конструкций;
- расширение аналитической базы инженерных расчетов дорожных конструкций от теории упругости до теории упруговязкопластического деформирования слоистых сред;
- увеличение колесной нагрузки от автотранспортных средств, числа осей в автопоездах и особенно скоростей движения (до 120 км/ч);
- формирование волнового поля напряжения и деформации при кратковременном или ударном загрузении слоистой дорожной конструкции, для описания которого недостаточно уравнений статики или квазистатики;
- потребность в высокой точности и качестве инженерных расчетов дорожных конструкций в связи с их значением в обосновании геометрических размеров и увеличения точности работы дорожно-строительных машин и комплексов.

Пособие подготовлено с использованием материалов Ростовского государственного строительного университета (С.К. Иллиополов) и Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (А.В.Смирнов, А.С. Александров). Оно отражает взгляд вузовской науки на проблемы устойчивости дорожных конструкций.

# 1. ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И КРИТЕРИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Предельное состояние дорожных конструкций – *это состояние предела*, когда значения внутренних напряжений в ее слоях равны или начинают превышать сопротивление материалов. С этого момента начинается развитие деструкций и разрушений. Слоистость конструкций и использование в них связанных (монолитных) материалов или несвязанных (дискретных) определяет *вид предельного состояния* по сдвигу, растяжению при изгибе, сжатию, виброускорению колебаний и т.д. Наступлению предельного состояния предшествует период истощения работоспособности дорожной конструкции до образования первых деструкций и деформаций, еще незначительно влияющих на транспортные качества (скорость движения автотранспорта). После этого периода дорожная конструкция еще длительное время сохраняет работоспособное качество, находясь уже в запредельном состоянии и с постоянным ухудшением свойств проезжей части (ухудшение ровности, просадки, волны, выбоины). Таким образом, *предельное состояние по прочности наступает раньше истощения* полной работоспособности дорожных конструкций, а соотношение периодов времени работы конструкции до и после предельного состояния более единицы. Предельное состояние по прочности вероятно и случайно по природе. Так, прочностные свойства слоев зависят от случайного характера хода температур и изменений влагосодержания в слоях; волны сдвига могут возникать в асфальтобетонном покрытии в жаркое время года, а деформации просадок и растрескивание покрытия – в период оттаивания подстилающего одеяла связанного грунта.

Наступление предельного состояния дорожной конструкции по прочности может быть *полным и частичным, одновременным или дискретно* проявляться по слоям и во времени.

Так, на покрытиях дорог под действием транспорта в процессе эксплуатации развивается недопустимый износ, вырываются отдельные частицы шероховатых покрытий, накапливаются необратимые деформации (колея) при сохранении общей прочности слоистой конструкции. С позиций сохранения транспортных качеств дорог эти явления тоже есть предельное состояние по обеспеченной скорости движения или устойчивости к разрушению частиц покрытий (устойчивости положения). Несущие и подстилающие слои дорожной конструкции и связанные грунты земляного полотна могут в разное время под влиянием транспортной нагрузки переходить границу предельного состояния, что выражается в деформациях сдвига, осадках, постепенном накоплении остаточных деформаций. Таким образом, предельное состояние дорожной конструкции в целом *переменно в*

**пространстве и времени.** Размещение дорожных конструкций на автомагистралях и дорогах, на улицах в населенных пунктах (рис. 1.1) отличается тем, что в первом случае они чаще устраиваются на насыпи земляного полотна или в выемке и характеризуются высокоскоростным движением транспортных потоков (до 100 км/ч).

В современной инженерной механике слоистых дорожных конструкций для целей их расчета и дальнейшего мониторинга их состояния в процессе эксплуатации применяют серию показателей, характеризующих истощение их ресурса до наступления предельного состояния, или критерии прочности. Эти критерии могут быть динамическими и статическими и дополнительно подразделяются на виды напряженного состояния, частные и общие.

Общим критерием прочности дорожной конструкции является критерий общей обратимой деформативности слоистой одежды, учитывающий сумму обратимых деформаций слоев.

$$\begin{aligned}
 K_u &= \frac{|u|}{u} ; & K_u^{\text{дин}} &= \frac{|u^{\text{дин}}|}{u^{\text{дин}}} ; & K_u &= \frac{P \cdot D}{|u|} \Big/ \frac{P \cdot D}{u} ; \\
 K_u^{\text{дин}} &= \frac{P^{\text{дин}} \cdot D^{\text{дин}}}{|u^{\text{дин}}|} \Big/ \frac{P^{\text{дин}} \cdot D^{\text{дин}}}{u^{\text{дин}}} ; & & & & \\
 u &= \sum_1^M u_j ; & |u| &= \sum_1^M |u|_j , & & 
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где  $u, u^{\text{дин}}$  – общий обратимый статический и динамический прогибы поверхности дорожной конструкции;  $|u|, |u^{\text{дин}}|$  – допустимые статический и динамический прогибы поверхности дорожной конструкции, при которых транспортные качества проезжей части ухудшаются;  $P, P^{\text{дин}}, D, D^{\text{дин}}$  – удельные статическое и динамическое давления от колесной нагрузки, распределенной по кругам диаметра  $D$  в покое и  $D^{\text{дин}}$  при движении;  $K_u, K_u^{\text{дин}}$  – расчетные коэффициенты прочности (статические и динамические), которыми обладает конструкция в начале эксплуатации;

Условием обеспечения статической и динамической прочности конструкций является расчет и назначение толщины и свойств слоев в пределах:

$$K_u \leq K_u^{\text{мин}} ; K_u^{\text{дин}} \leq K_u^{\text{дин.мин}} , \tag{1.2}$$

где  $K_u^{\text{мин}}, K_u^{\text{дин.мин}}$  – коэффициенты прочности (статические и динамические), устанавливаемые опытным путем, при которых дорожная конструкция требует ремонта.

Особенностью коэффициентов прочности  $K_u, K_u^{\text{дин}}$  является то, что они оценивают конструкцию по деформациям и близки по физическому смыс-

лу к общеизвестной теории прочности твердых тел по относительным деформациям. Эти деформации (вертикальные обратимые прогибы поверхности конструкции) хорошо измеряются и являются активным средством контроля прочности в дорожном мониторинге. Вместе с этим вертикальный прогиб конструкции не является исчерпывающе информационным, так как не позволяет ответить на вопрос: за счет какого слоя получена деформация конструкции в целом.

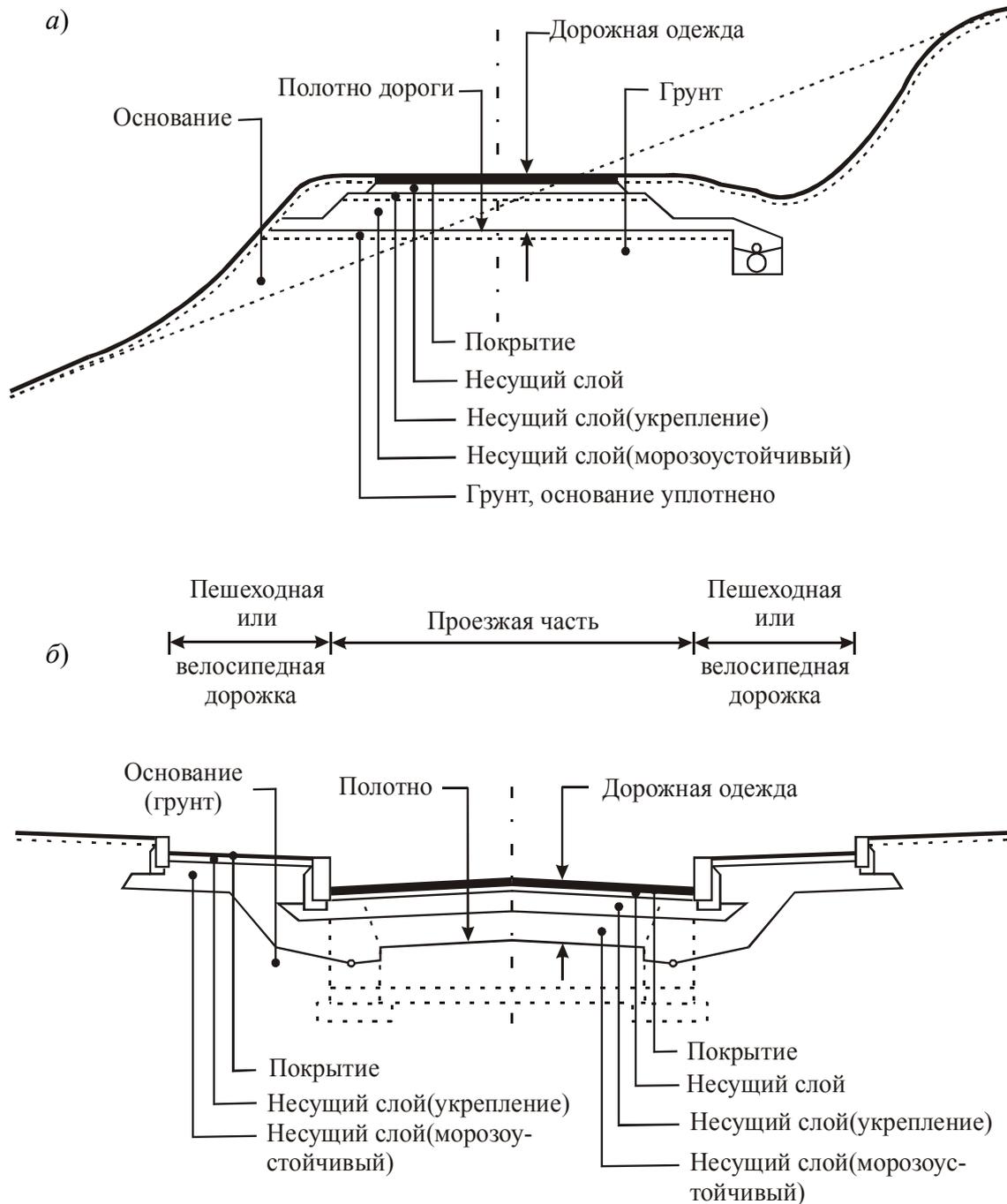


Рис. 1.1. Размещение дорожных конструкций на автомагистралях (а) и улицах (б)

Частными критериями прочности отдельных слоев конструкций (покрытий, оснований, подстилающих слоев) являются критерии по растягивающим направлениям при изгибе и активным напряжениям сдвига, значение которых больше единицы означает наступление предельных состояний в слое по этим видам покрытий:

$$K_{\sigma_r} = |R|_u / \sigma_r ; \quad K_{\tau} = |\tau| / \tau_{\sigma} , \quad (1.3)$$

где  $\sigma_r$ ,  $\tau_{\sigma}$  – растягивающее при изгибе и сдвигающее напряжения в слое от нагрузки;  $|R|_u$ ,  $|\tau|$  – расчетное сопротивление материала растяжению при изгибе или сдвигу с учетом выносливости или многократности нагружения.

К частным критериям прочности относятся: износ поверхности проезжей части  $K_{\text{изн}} = h/|h|$ , ускорения колебаний  $K_a = a/|a|$  в отдельных слоях или элементах придорожных сооружений ( $h$  и  $|h|$  – фактический и допустимый износ,  $a$  и  $|a|$  – фактическое и допускаемое ускорения колебаний). Наконец, ремонт конструкций может быть произведен по критерию накопления недопустимых деформаций на поверхности одежды. Изобилие общих и частных коэффициентов прочности и устойчивости дорожных конструкций, с одной стороны, демонстрирует глубину всестороннего инженерного обоснования их расчета, а с другой – приводит к неопределенности в принятии конкретных решений, т.е. к росту *энтропии*. На рис. 1.2 показана схема перехода дорожной слоистой конструкции, состоящей из четырех слоев, из состояния А (в начале эксплуатации) в состояние Б (в конце эксплуатации) за период времени от 0 до  $T$ , называемый сроком службы. Очевидно, что критерии общей деформации  $K_u$ , частные критерии  $K_{\sigma_r}$ ,  $K_{\tau}$ ,  $K_{\text{изн}}$  в процессе нагружения дорог, будучи первоначально больше единицы, постоянно и периодически достигают единицы и предельных состояний (РС) через время  $T_{\sigma_r}$ ,  $T_{\tau}$ , различное для каждого слоя. Поэтому достижение конструкцией состояния Б (разрушение) при соответствии его значению  $K_u^{\text{min}}$  и исчерпанию срока службы  $T$  не дает никакой гарантии строго описывать процесс разрушения, а условия расчета и конструирования дорожных конструкций 2 и 3 эмпиричны и вынуждены в связи с недостатком знаний о работе слоистых сред. Тем не менее с 70-х годов прошлого столетия до наших дней такой многокритериальный способ расчета и обоснования дорожных конструкций существует и официально применяется в инженерной практике.

В связи с этим, пытаясь доказать достаточность инженерных подходов к обоснованию прочности дорог, бессистемно и неуправляемо разрушающихся в России, Государственная дорожная служба Минтранса России ввела в 2001 г. отраслевой стандарт на проектирование дорожных одежд

нежесткого типа (ОДН 218.046-01) (табл. 1.1). Из него следует, что по сравнению прежним стандартом ВСН 46-83 коэффициенты прочности увеличены в 1,1-1,5 раза, что является эмпирическим гарантом долговечности.

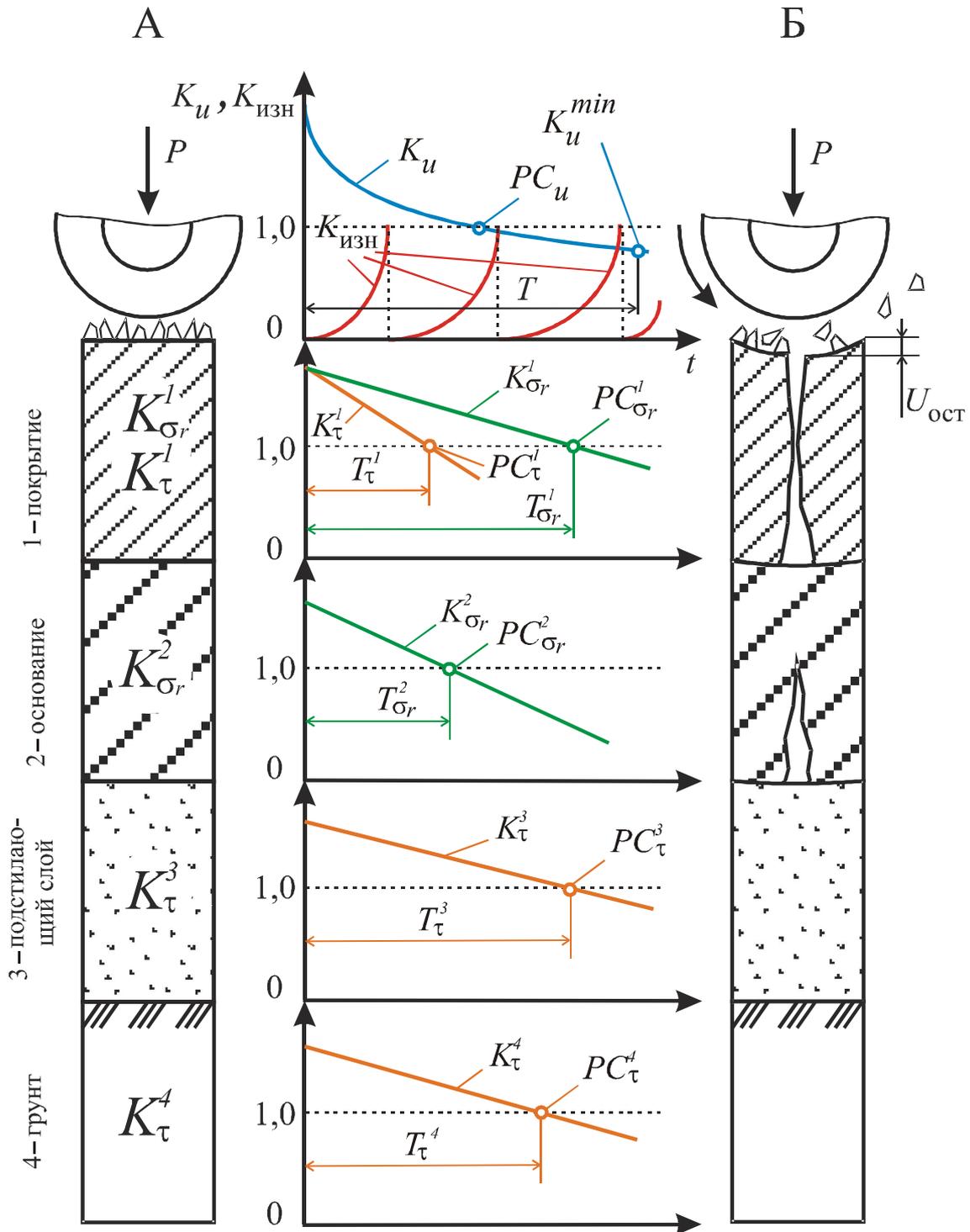


Рис. 1.2. Схема изменения критериев частной и общей прочности слоев дорожной конструкции в процессе эксплуатации

Таблица 1.1

**Требуемые минимальные коэффициенты прочности при заданных уровнях надежности для расчета дорожных одежд капитального типа по различным критериям прочности\***

Критерий прочности	Категории дороги											
	I		II		III			IV				
Доля площади деформирования проезжей части к концу эксплуатации	0,05		0,05		0,10			0,10				
Заданная надежность	0,98	0,95	0,98	0,95	0,98	0,95	0,90	0,95	0,90	0,85	0,80	
Минимальный коэффициент прочности по упругому прогибу	1,50	1,30	1,38	1,20	1,29	1,17	1,10	1,17	1,10	1,06	1,02	
Минимальный коэффициент прочности по растяжению при изгибе и критерию сдвига	1,10	1,0	1,10	1,08	1,10	1,0	0,94	1,0	0,94	0,90	0,87	

\*Приведены официальные отраслевые дорожные нормы ОДН 218.046-01 Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта РФ.

Результаты применения этого стандарта приведены в табл. 1.2, из которой следует, что назначенные размеры дорожной конструкции не подкреплены достаточной гарантией в части срока службы и не имеют какого-либо прогноза накопления неровностей (колееобразования).

Между тем практика эксплуатации дорожных конструкций в России и за рубежом упорно доказывает связь конечного состояния поверхности дороги с объемом автомобильного движения, а точнее с объемом работы по деформированию конструкций, совершаемой массой транспортных потоков. Кроме того, оказалось, что чем выше прочность слоев дорожных конструкций, тем больше их внутренняя работоспособность или потенциальная энергия, потребная для их деформирования, и стойкость к разрушающему деформированию. Два этих обстоятельства привели вначале интуитивно, а затем осознанно к возникновению в России и за рубежом новых обобщенных критериев динамической устойчивости слоистых дорожных конструкций, основанных на фундаментальных началах естествознания и выразившихся в энергетических методах расчета конструкций.

Таблица 1.2

**Результаты расчета дорожных конструкций по нормам  
Государственной службы дорожного хозяйства Министерства транспорта  
Российской Федерации**

Расчетные параметры дорожной конструкции	Категория дороги			
	I	II	III	IV
Срок службы, годы	20	20	15	15
Надежность	0,95	0,95	0,95	0,95
Интенсивность движения нагрузки группы А (100 км/ось) $N_p$ , авт./сут	3 200	3 200	1 800	1 800
Количество приложений колесной нагрузки $\sum N_p$ , авт.	7179494	7179494	2710379	3214250
Суммарная толщина конструкции, см	60	49	52	70
Толщина асфальтобетонных слоев, см	34	34	26	22
Толщина основания из укрепленной щебеночно-гравийно-песчанной смеси, см	26	15	26	–
Толщина основания из гравийной смеси, см	–	–	–	48
Требуемый модуль упругости, МПа	326	326	284	247
Коэффициенты прочности:				
по упругому прогибу $K_u$	1,61	1,61	1,6	1,36
на растяжение при изгибе $K_\sigma$	1,41	1,28	0,97	1,1
на сдвиг в грунте $K_\tau$	1,36	1,38	1,73	1,5

- Примечания:* 1. По условиям морозного пучения в конструкции дорог I и II категорий вводится морозозащитный слой из среднезернистого песка толщиной 30 см.  
2. Модуль упругости грунта земляного полотна – 46 МПа.

Термин «динамическая устойчивость» распространяется на все слои дорожной конструкции и ее поверхность и определяет устойчивость «формы и положения». Например, динамическая устойчивость формы отдельного слоя, сопротивляющегося растяжению при изгибе, – это способность слоя воспринимать многократно динамические напряжения растяжения до предела, то есть до начального трещинообразования от недостаточной выносливости. Динамическая устойчивость формы слоев дискретных оснований конструкции и связного грунта земляного полотна – это способность оснований и грунта воспринимать динамические напряжения до опасного истирания дискретных частиц в местах контактов, изменения гранулометрии и поэтому объема и образования просадок на поверхности конструкции или до чрезмерного накопления остаточных деформаций в грунте или подобном по свойствам слое.

Динамическая устойчивость «положения» определяет стойкость отдельных зерен поверхностных слоев дорожных покрытий к вырыванию из мест закрепления под непосредственным действием динамических нормальных и касательных сил, возникающих в контакте движущегося колеса

транспортного средства с поверхностью покрытия. Таким образом, динамическая устойчивость применительно к слоистым средам, каковыми являются реальные дорожные конструкции, требует в аналитическом аппарате знаний в сопутствующих областях: сопротивление материалов, механика грунтов, механика дискретных материалов, механика композитов, теория упруговязкопластичных сред, волновая динамика и др.

## 2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДЕЙСТВИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ДОРОЖНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Как отмечалось выше, специалистам в России и за рубежом уже ясно, что объем разрушений на дорогах в процессе эксплуатации связан с количеством воздействий транспортных средств. Поэтому в последнем Отраслевом стандарте России [4] даны методы учета количества транспортных средств.

В методе стандарта России суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к поверхности дорожной конструкции за период эксплуатации позволяет установить требуемый общий модуль упругости  $E_{тр}$  или требуемый упругий прогиб  $|u| = \frac{P \cdot D}{E_{mp}}$  и по их значениям и трехкритерийному методу рассчитать дорожную конструкцию.

В методе стандарта Германии [5] суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за период эксплуатации позволяет отнести дорогу к определенному строительному классу и по его значению выбрать требуемую конструкцию из альбома, минуя стадию аналитического расчета.

Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции за срок службы определяют по формуле

$$\sum N_p = f_{нол} \sum_{m=1}^n (N_{lm} K_c \cdot T_{pдг} \cdot 0,7) \cdot S_{m.сум} \cdot k_n \quad (2.1)$$

или

$$\sum N_p = 0.7 \cdot N_p \frac{K_c}{q^{(T_{сл}-1)}} T_{pдг} \cdot k_n, \quad (2.2)$$

где  $n$  – число марок автомобилей;  $N_{lm}$  – суточная интенсивность движения автомобилей  $m$ -й марки в первый год службы (в обоих направлениях), авт./сут;  $N_p$  – приведенная интенсивность на последний год срока службы, авт./сут;  $S_{m.сум}$  – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства  $m$ -й марки к расчетной нагрузке

$Q_{расч}$ , определяемый в по табл. 2.1;  $T_{рдог}$  – расчетное число дней в году, соответствующих состоянию конструкции, когда она накапливает остаточные деформации: для дорог I дорожно-климатической зоны (ДКЗ) России  $T_{рдог} = 70$  дней, II ДКЗ – 125 дней, III ДКЗ – 130-150 дней, IV ДКЗ – 205 дней;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого: для дорог I – II категорий  $k_n = 1,49$ , дорог III – IV категорий  $k_n = 1,38-1,31$ ;  $K_c$  – коэффициент суммирования, определяемый по табл. 2.2 и заданному сроку службы  $T_{сл.}$ ;  $f_{пол}$  – коэффициент учета нагруженности полос движения автотранспортом (табл. 2.3).

Таблица 2.1

**Значения коэффициента  $S_{m.сум}$**

Типы автомобилей	Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{m.сум}$
Легкие грузовые автомобили грузоподъемностью от 1 до 2 т	0,005
Средние грузовые автомобили грузоподъемностью от 2 до 5 т	0,2
Тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью от 5 до 8 т	0,7
Очень тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью более 8 т	1,25
Автобусы	0,7
Тягачи с прицепами	1,5

Таблица 2.2

**Значения коэффициента  $K_c$**

Показатель изменения интенсивности движения по годам $q$	Срок службы дорожной одежды $T_{сл.}$ , годы			
	8	10	15	20
0,90	5,7	6,5	7,9	8,8
0,92	6,1	7,1	8,9	10,1
0,94	6,5	7,7	10,0	11,8
0,96	7,0	8,4	11,4	13,9
0,98	7,5	9,1	13,1	16,6
1,00	8,0	10,0	15,0	20,0
1,02	8,6	10,9	17,2	24,4
1,04	9,2	12,0	20,0	29,8
1,06	9,9	13,2	23,2	36,0
1,08	10,6	14,5	27,2	45,8
1,10	11,4	15,9	31,7	67,3

Таблица 2.3

Значения коэффициента  $f_{пол}$ 

Число полос движения	Номер полосы		
	1	2	3
1	1,00	–	–
2	0,55	–	–
3	0,50	0,50	–
4	0,35	0,20	–
6	0,30	0,20	0,05

Величину минимального требуемого общего модуля упругости конструкции вычисляют по эмпирической формуле

$$E_{\min} = 98,65 \cdot [\lg(\sum N_p) - c], \quad (2.3)$$

где  $\sum N_p$  – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды (формулы (2.1), (2.2));  $c$  – эмпирический параметр, принимаемый равным для расчетной нагрузки на ось 100 кН – 3,55; 110 кН – 3,25; 130 кН – 3,05.

Независимо от результата, полученного по формуле (2.3), требуемый модуль упругости должен быть не менее, указанного в табл. 2.4.

Таблица 2.4

## Модуль упругости дорожной одежды

Категория дороги	Суммарное минимальное расчетное число приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу / то же на проезжую часть, млн	Требуемый модуль упругости одежды, мПа
I	750000/3,0	230
II	500000/1,0	220
III	375000/0,75	200
IV	110000/0,22	–
V	40000/0,08	–

Таким образом, для дороги I, II, III категорий по методу отраслевого стандарта России расчетное число приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу составляет соответственно  $0,75 \cdot 10^6$ ,  $0,5 \cdot 10^6$ , и  $0,375 \cdot 10^6$ , а требуемые модули упругости конструкций должны быть не менее соответственно 230, 220 и 200 мПа.

Из предыдущего видно, что в дополнение к традиционным и очевидным методикам учета объема автомобильного движения в России учитывается еще число расчетных дней в году «теплого периода», когда дорож-

ная конструкция накапливает деформации, и отклонение суммарного объема движения от среднеожидаемого.

Метод стандарта Германии предусматривает расчет суммарного объема автомобильного движения за период эксплуатации, приведенного к расчетной нагрузке в 100 кН на ось (50 кН на колесо) по формуле

$$\sum N_p = 365 \cdot q_{Bm} \cdot f_3 \cdot \sum_{i=1}^N [DTA_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1 + p_i)], \quad (2.4)$$

где  $DTA_{i-1}^{(SV)} = DTV_{i-1}^{(SV)} \cdot f_{A_{i-1}}$ ;  $\sum N_p$  – суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки в 100 кН на ось;  $N$  – количество лет эксплуатации дорожной конструкции (как правило, 30 лет);  $q_{Bm}$  – средний коэффициент, учитывающий долю нагрузки в 100 кН на ось в других нагрузках (табл. 2.6);  $f_3$  – коэффициент учета уклона проезжей части (табл. 2.9);  $DTV_{i-1}^{(SV)}$  – средняя ежедневная численность грузового транспорта за 1-й год эксплуатации дороги, авт./24 часа;  $DTA_{i-1}^{(SV)}$  – среднее количество ежедневных осевых нагрузок (ОН) грузового транспорта за 1-й год эксплуатации осей/24 часа;  $f_{A_{i-1}}$  – среднее количество осей на единицу грузового транспорта (коэффициент количества осей) за 1-й год эксплуатации (табл. 2.5);  $f_{1i}$  – коэффициент учета количества полос движения  $i$  (табл. 2.7);  $f_{2i}$  – коэффициент учета ширины полос движения  $i$  (табл. 2.8);  $p_i$  – средний годовой прирост грузового транспорта (табл. 2.10).

Таблица 2.5

#### Коэффициент количества осей $f_A$

Класс улицы (дороги)	Коэффициент $f_A$
Скоростные автомобильные магистрали государственного значения	4,2
Государственные дороги	3,7
Дороги земель и округов	3,1

Таблица 2.6

#### Средний коэффициент нагрузки $q_{Bm}$

Класс улицы (дороги)	Коэффициент $q_{Bm}$
Скоростные автомобильные магистрали государственного значения	0,26
Государственные дороги	0,20
Дороги земель и округов	0,18

Таблица 2.7

**Коэффициент количества полос движения  $f_1$** 

Количество полос движения	В оба направления движения	В каждое направление движения
1	-	1,00
2	0,50	0,90
3	0,50	0,80
4	0,45	0,80
5	0,45	0,80
6 и более	0,40	0,80

Таблица 2.8

**Коэффициент ширины полос движения  $f_2$** 

Ширина полосы, м	Коэффициент $f_2$
Менее 2,50	2,00
2,5 – 2,75	1,80
2,75 – 3,25	1,40
3,25 – 3,75	1,10
3,75 и более	1,00

Таблица 2.9

**Коэффициент уклона  $f_3$** 

Уклон, %	Коэффициент $f_3$
Менее 2	1,00
2 – 4	1,02
4 – 5	1,05
5 – 6	1,09
6 – 7	1,14
7 – 8	1,20
8 – 9	1,27
9 – 10	1,35
10 и более	1,45

Таблица 2.10

**Средний годовой прирост грузового транспорта**

Класс улицы (дороги)	$P_i$
Скоростные автомобильные магистрали государственного значения	0,03
Государственные дороги	0,02
Дороги земель и округов	0,01

Как видно, немецкая методика, по сравнению с российской, позволяет дополнительно учесть долю загрузки дорог расчетными автомобилями (в 100 кН на ось), число осей у грузовых автомобилей, ширину проезжей части и ее уклон. Результаты расчетов по формуле (2.3) позволяют относить дороги к одному из семи классов строительства (табл. 2.11).

Таблица 2.11

**Классы строительства дорог**

Класс строительства	Для тяжелого движения	I	II	III	IV	V	VI
Количество осей с нагрузкой 100 кН за 30 лет эксплуатации, млн	Более 32	10 – 32	3 – 10	0,8 – 3,0	0,3 – 0,8	0,1 – 0,3	До 0,1

По значению класса строительства из альбома выбираются дорожные конструкции (рис. 2.1). Сравнение методик учета воздействия транспортных средств на дорожные конструкции в России и Германии, (см. табл. 2.4 и 2.11) указывает на то, что дороги I технической категории России соответствуют II классу строительства дорог Германии (3 – 10 млн нагружений), дороги II категории – III классу, III категории – IV классу и т.д.

Результаты расчетов дорожных конструкций по нормам России приведены на рис. 2.2 и 2.3. Сравнение общих толщин дорожных конструкций различных типов (жестких и нежестких) указывает на то, что дорожные конструкции в России в 1,2 – 1,35 раз тоньше германских. Причина этому – различие в методиках учета воздействия транспортных средств, а также меньшие сроки службы конструкций в России (12 – 20 лет) по сравнению с германскими – 30 лет.

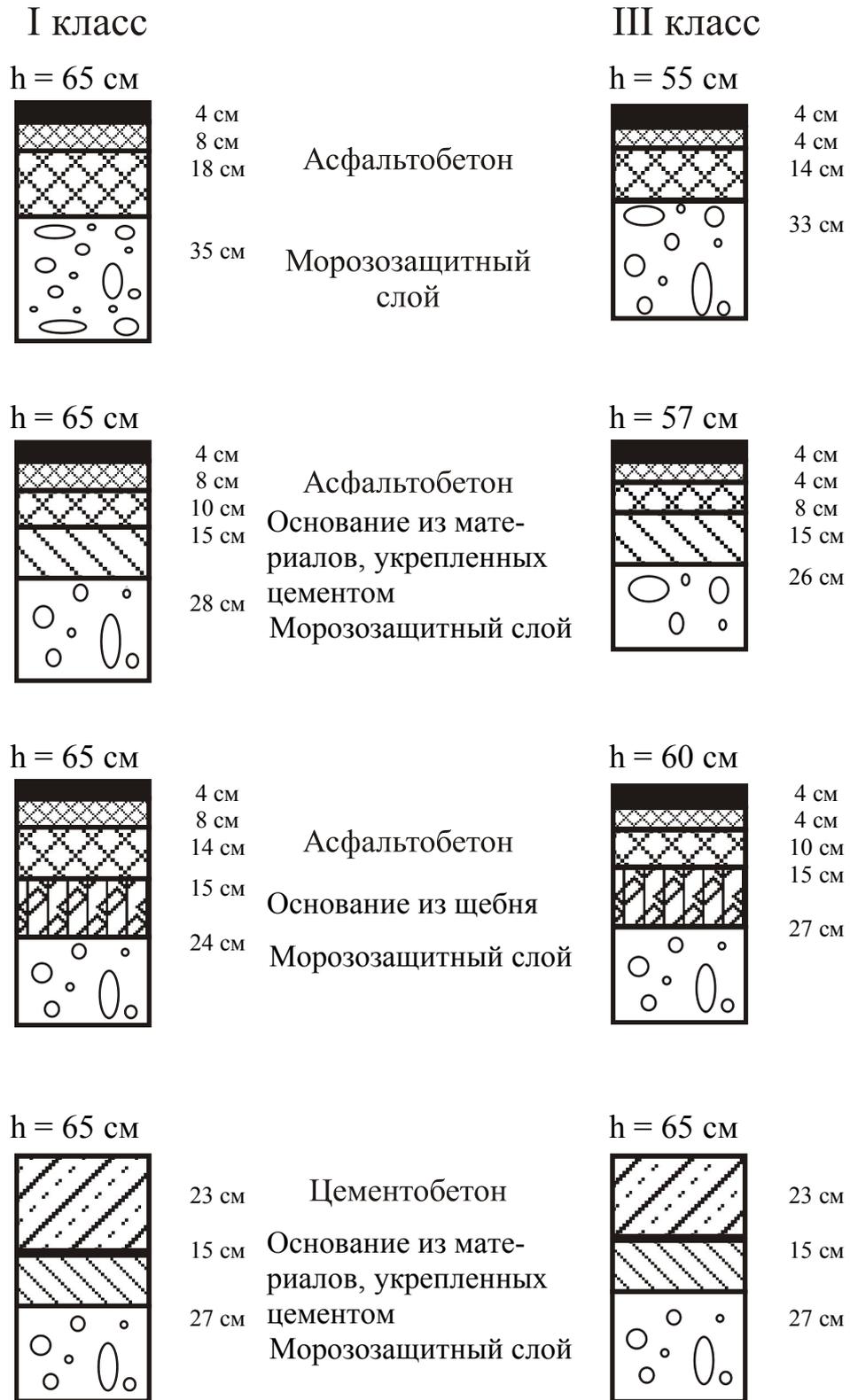
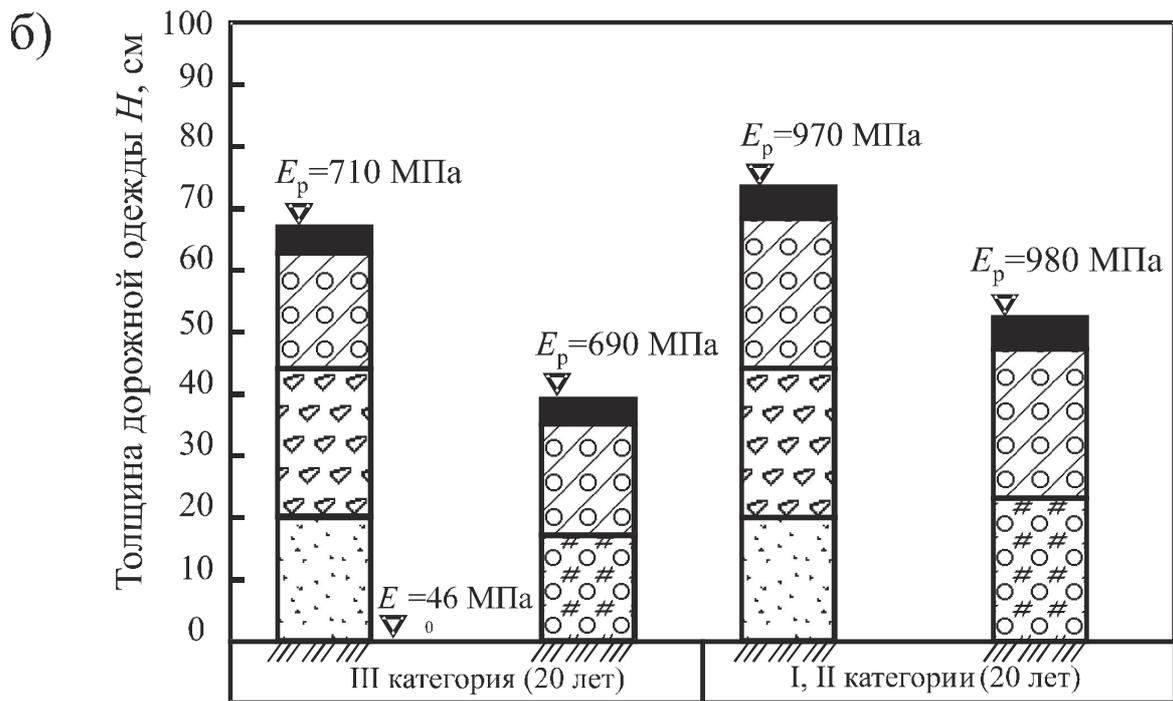
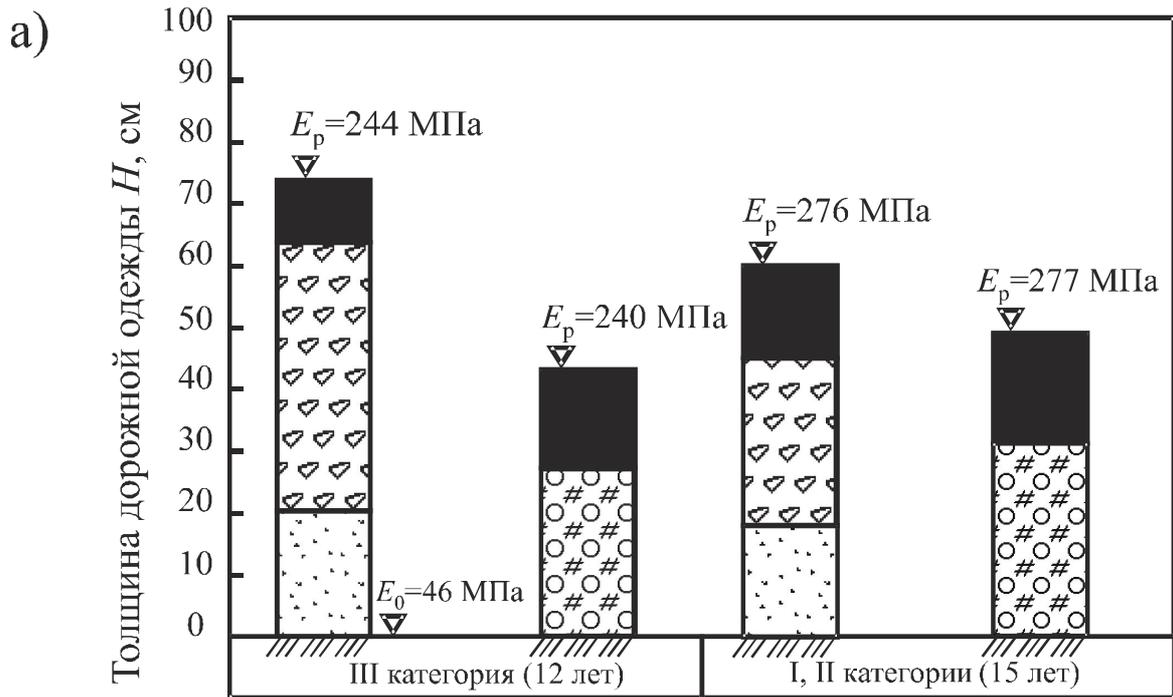


Рис. 2.1. Дорожные конструкции с асфальтобетонным и цементобетонным покрытием ФРГ (RSto) для дорог I и III классов строительства



- асфальтобетон; 
  - щебень II марки; 
  - цементобетон (М 300)

- каменные материалы или ПГС, укрепленные цементом; 
  - песок.

Рис. 2.2. Толщина дорожных конструкций нежесткого (а) и жесткого (б) типов для дорог I, II и III категории по ВСН 46-83, ОДН 218.046-01

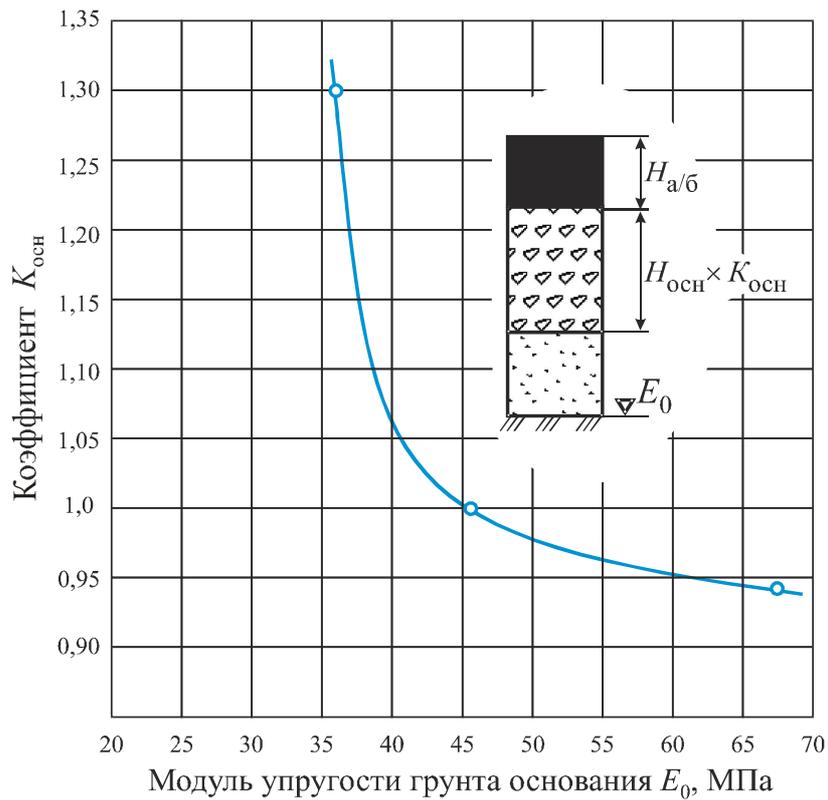


Рис. 2.3. Изменение толщины несущего слоя основания дорожной конструкции в зависимости от модуля упругости грунта

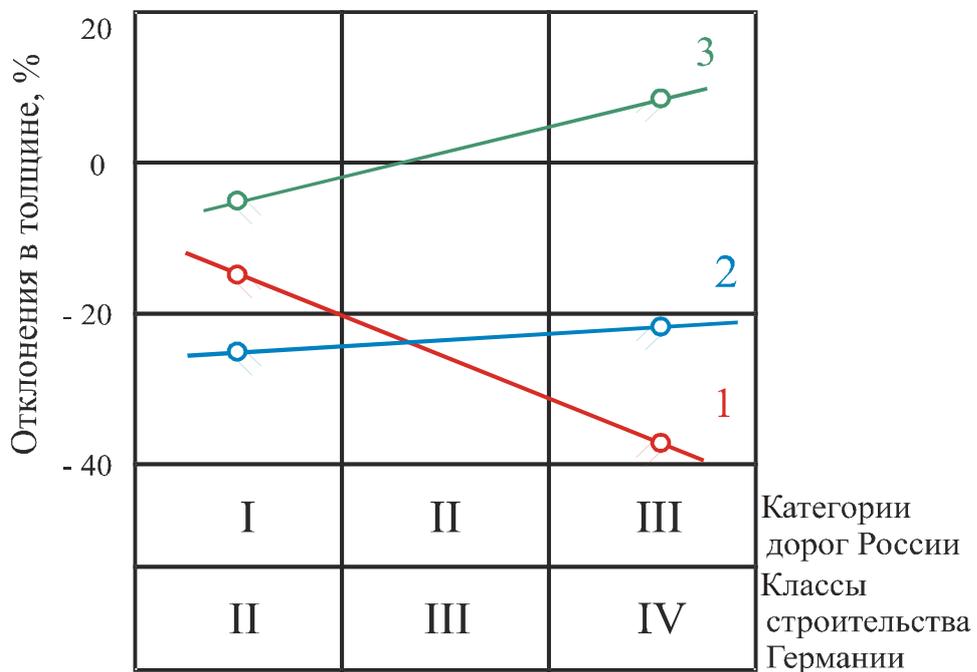


Рис. 2.4. Отклонения в толщине дорожных конструкций России и Германии: 1 – цементобетонные дороги с укрепленным основанием; 2 – дорожные конструкции с асфальтобетонным покрытием и укрепленным основанием; 3 – дорожные конструкции с дискретным (щебеночным) основанием

### 3. НАГРУЗКИ ОТ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ДОРОГИ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ

История развития автомобилизации характеризуется от конных экипажей до тяжелых автопоездов отмечает периодические изменения в течение прошедшего столетия в конструкциях транспортных средств в сторону увеличения скоростей движения, массы перевозимых грузов, пассажировместимости, числа осей, числа колес, нагрузок на оси и колеса и давлений от них на покрытия дорог. Эти тенденции почти повсеместно в мире ограничиваются возможностями дорог в части несущей способности и транспортно-эксплуатационных качеств. Поэтому в большинстве стран мира в начале 3-го тысячелетия действуют ограничения весовых параметров автотранспортных средств, определяющие их конструкции (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Национальные ограничения весовых параметров автотранспортных средств в странах Европы, СНГ и Балтии**

Страна	Нагрузка, т.с., на			Полная масса, т
	одиночную ось	двухосную тележку	трехосную тележку	
1	2	3	4	5
Австрия	10,0	16,0	-	38
Англия	9,3	16,3	22,9	38
Бельгия	12,0	-	-	44
Болгария	10,0	13,0 – 18,0	-	38
Венгрия	10,0	16,0	24,0	40
Греция	13,0	19,0	20,0	38
Дания	10,0	16,0	-	48
Испания	13,0	14,7	-	38
Италия	12,0	-	-	44
Люксембург	13,0	20,0	-	40
Нидерланды	11,0	16,0 – 20,0	21,0 – 24,0	50
Норвегия	10,0	-	-	16
Польша	-	-	-	42
Португалия	12,0	-	-	40
Румыния	10,0	16,0	-	38
Словакия	11,0	11,5 – 16,0	-	48
Финляндия	10,0	18,0	-	56
Франция	13,0	21,0	21,0 – 24,0	40
Германия	11,0	16,0 – 20,0	-	40
Чехия	11,0	11,5 – 18,0	22,0 – 24,0	48
Швейцария	10,0	18,0	-	28
Швеция	10,0	11,0 – 20,0	21,0 – 24,0	20 – 56
Югославия	10,0	16,0	24,0	40

1	2	3	4	5
Рекомендации ЕЭС от 1992 г.	11,5	11,0 – 20,0	21,0 – 24,0	40
Украина	10,0	16,0	22,0	36
Беларусь	6,0 и 10,0	11,4 и 18,0	17,1 и 27,0	36
Казахстан	6,0 и 10,0	11,4 и 18,0	17,1 и 27,0	36
Латвия	10,0	16,0	-	36
Литва	10,0	16,0	22,0	36
Эстония	10,0	20,0	24,0	40
Молдова	10,0	16,0	22,0	36
Россия	10,0	11,4 и 18,0	16,5 и 24,0	30 – 38
Соглашение СНГ	10,0	11,0 – 18,0	15,0 – 25,5	18 – 44

Из этих данных следует, что 18 стран из 33, то есть 54,5%, предпочитают ориентироваться на расчетные статические нагрузки на одиночную ось автотранспортного средства в 10 т.с. (или 100 кН). В целом же масса автопоездов колеблется от 20 до 56 т и соизмерима с массой грузовых вагонов железных дорог России.

В Российской Федерации за расчетную нагрузку для проектирования дорожных конструкций принята в основном нагрузка группы А (100 кН на ось). Однако для дорог с преобладающим объемом движения транспортных средств со сдвоенными и строеными осями предусмотрена расчетная нагрузка группы А<sub>2</sub> и А<sub>3</sub> (табл. 3.2).

Таблица 3.2

### Статическая нагрузка на поверхность покрытия

Группа расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка на ось, кН	Нормативная статическая нагрузка на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля $Q_{\text{расч}}$ , кН	Расчетные параметры нагрузки	
			$q$ , мПа	$D$ , см
А <sub>1</sub>	100	50	0,60	37/33
А <sub>2</sub>	110	55	0,60	39/34
А <sub>3</sub>	130	65	0,60	42/37

*Примечание.* В числителе – для движущегося колеса, в знаменателе – для неподвижного;  $q$  – удельное давление,  $D$  – диаметр кругового следа колес.

Удельная нормальная нагрузка  $q$  на поверхность гладкого покрытия предположительно равномерно распределена по кругу диаметром  $D$ . В действительности отпечатки следов пневматических колес транспортных средств являются эллипсами с длиной наибольшей оси  $B$  по направлению

качения колеса от 22 до 35 см. С увеличением скорости движения колесной нагрузки степень неравномерности давлений на поверхность возрастет, они становятся несимметричными по отношению к вертикальной оси симметрии. Это свойство удельных давлений следует из экспериментов [6, 7], показано на рис. 3.1 в виде эпюр  $q$  и  $\tau$ , меняющихся в зависимости от расстояния от начала контакта по отношению к его длине  $x/B$ .

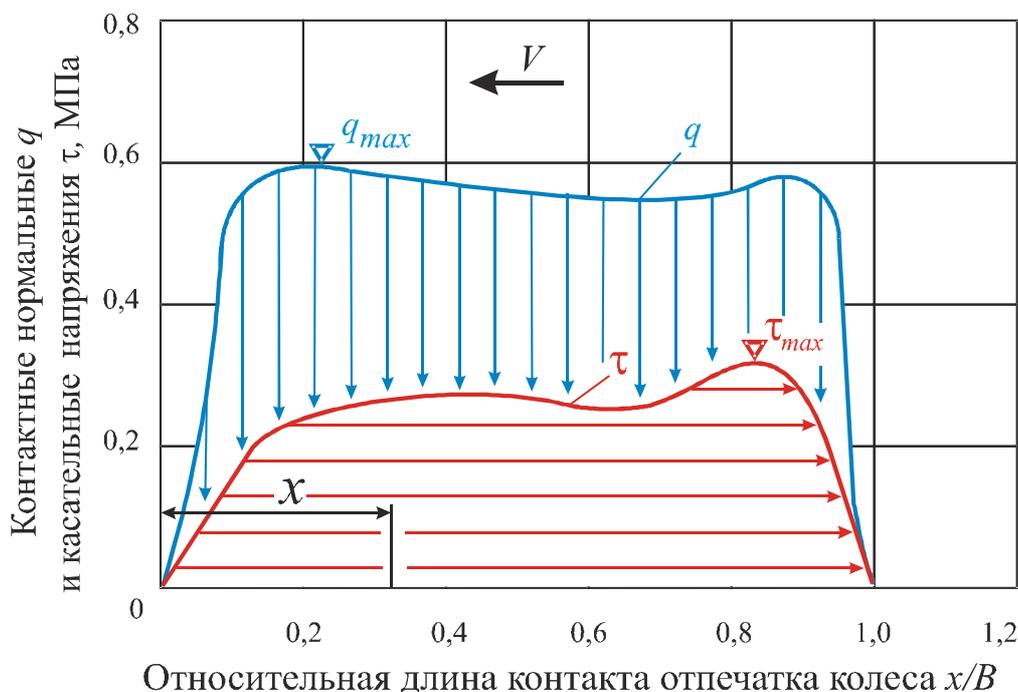


Рис. 3.1. Эпюры контактных нормальных  $q$  и касательных  $\tau$  давлений на покрытие от подвижного колеса с нагрузкой 50 кН

В целом удельное нормальное и касательное давления от катящегося свободно колеса вдоль длины контакта его с поверхностью качения аппроксимируются с точностью 5% многочленами в виде:

$$q(x) = 3,895x - 1,018x^2 + 0,139x^3 - 0,0093x^4 + 0,00033x^5 - 4,64 \cdot 10^{-6}x^6 \dots ; \quad (3.1)$$

$$\tau(x) = 1,29x - 0,365x^2 + 0,0562x^3 - 0,00454x^4 + 0,00018x^5 - 2,746 \cdot 10^{-6}x^6 \dots, \quad (3.2)$$

где  $0 \leq x \leq B$ .

Для расчетной колесной нагрузки групп  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  формула (3.1) преобразуется в вид, зависящий от скорости движения  $V$  и времени контакта колеса с покрытием  $T_0$ :

$$q(t) = q \cdot \left( \begin{array}{l} 0,649 \cdot \frac{T_0}{2} V - 0,169 \frac{T_0^2}{4} \cdot V^2 + 0,022 \frac{T_0^3}{8} \cdot V^3 - 0,0155 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{T_0^4}{16} \cdot V^4 + \\ + 0,055 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T_0^5}{32} \cdot V^5 - 0,77 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T_0^6}{64} \cdot V^6 \end{array} \right). \quad (3.3)$$

Здесь  $T_0$  равно 0,01 с при скорости движения транспорта на автомагистралях в 90 км/ч, а на взлетно-посадочных полосах аэродромов  $T_0 = 0,003 - 0,005$  с для воздушных судов с взлетной массой 90 – 180 т и посадочными скоростями 200 – 270 км/ч.

Контактные динамические вертикальные давления  $q(t)$  вычисляются по формуле (3.3), возникают на границе гладкой поверхности качения и гладкой поверхности беговой дорожки пневматического колеса (рис. 3.1).

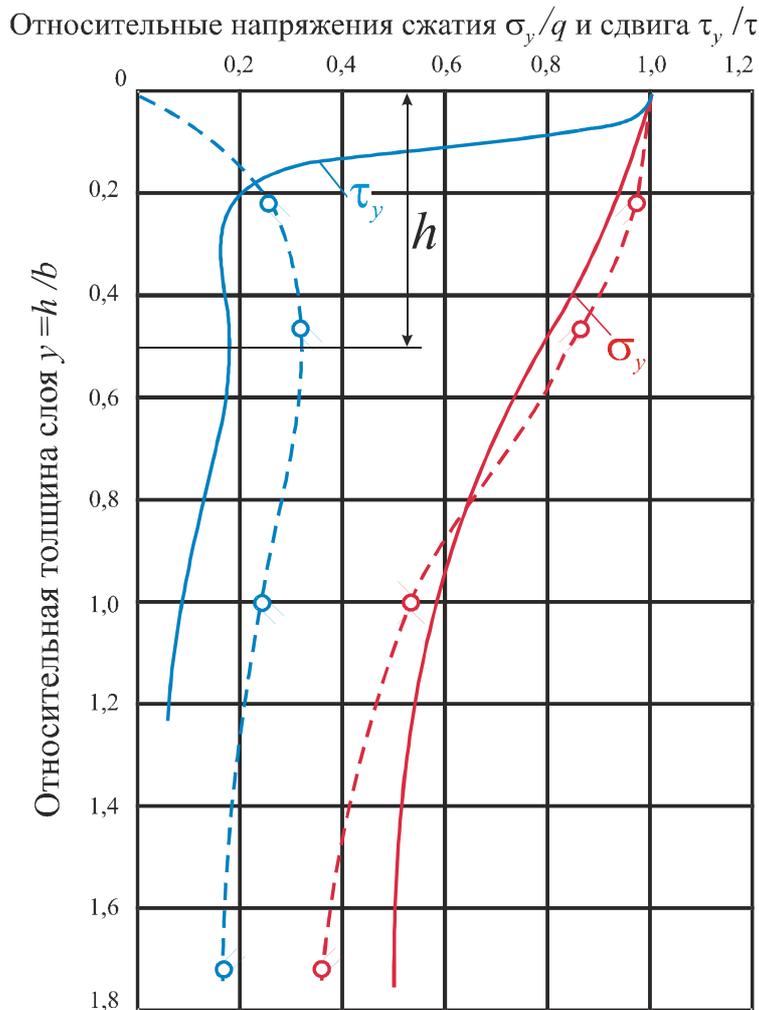


Рис. 3.2. Изменение напряжений сжатия  $\sigma_y$  и сдвига  $\tau$  по толщине слоя. Сплошные линии – от подвижной нагрузки, прерывистые – от неподвижной

Средние статистические контактные давления  $q$ , регламентируемые табл. 3.2, существенно возрастают в зависимости от рисунка протектора шины или наличия на поверхности покрытия шероховатых слоев, обеспечивающих сцепление колеса с дорогой. Например, при различии размеров диаметров соседних зерен шероховатого слоя в 4 раза нагрузка на большее

зерно возрастает в 7 раз. Убывание относительных напряжений сжатия  $\frac{\sigma_y}{q}$

и сдвига  $\frac{\tau_y}{\tau}$  по относительной глубине  $y = h/B$  в основном имеет затухающий характер (см. рис. 3.2 и [9]) и представляется в виде:

$$\sigma_y = q(t) \cdot e^{\frac{-h}{2B}}; \quad (3.4)$$

$$\tau_y = \tau(t) \cdot e^{\frac{-h}{1.6 \cdot B}}. \quad (3.5)$$

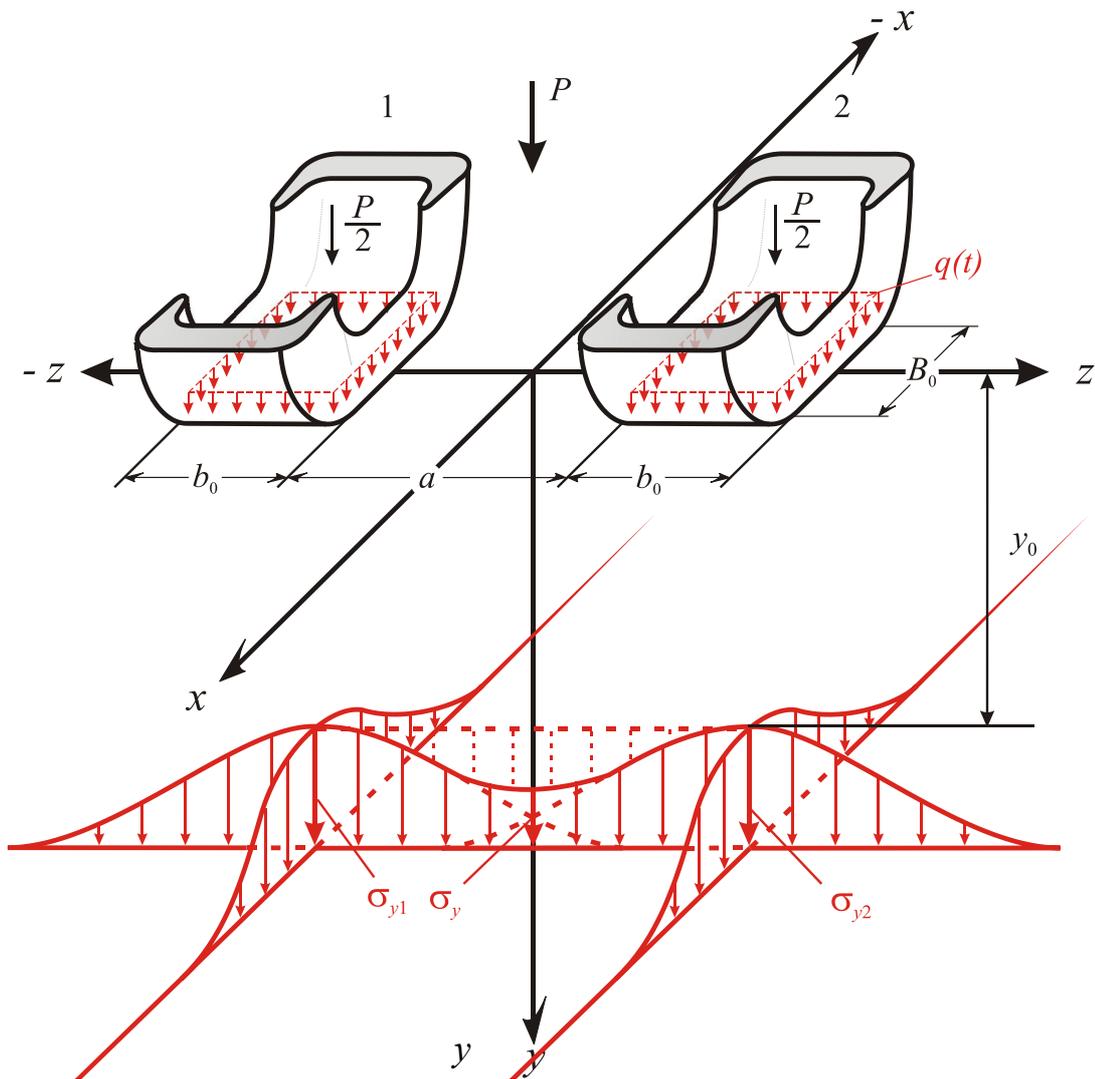


Рис. 3.3. Сложение напряжений сжатия от двух сдвоенных колес на глубине  $y_0$  от поверхности

Сжимающие напряжения  $\sigma_y$  возникают в конструкции вдоль траектории движения колеса, относятся к случаю, когда соотношение длин про-

дольной и поперечной осей эллипса контакта колеса с поверхностью качения составляет 1,1 – 1,7.

Если оси эллипса контакта равны, то напряжения при равных контактных давлениях уменьшаются на глубине 12 см на 16%, 20 см на 28% и 60 см на 40% [8]. От сдвоенных колес колесной нагрузки  $P$  возникают самостоятельные контактные давления  $q(t)$  и напряжения сжатия в глубине дорожной конструкции  $\sigma_{y_1}$  и  $\sigma_{y_2}$  (см. рис.3.3).

По продольной оси сдвоенного колеса ( $x=0$ ) напряжения  $\sigma_{y_1}$  и  $\sigma_{y_2}$  начинают складываться на глубине  $2,5 \div 5$  см при раздвижке колес  $a = 5 - 10$  см. Выравнивание напряжений сжатия от одного колеса и от сдвоенных колес происходит на глубине  $y_0 = 20$  и  $40$  см при  $a = 5$  и  $10$  см [4]. Это обстоятельство позволяет рассчитывать покрытия дорожных конструкций на действие удельных давлений  $q(t)$  и  $\tau(t)$  и при диаметрах круговых следов

$$D = 2\sqrt{\frac{B \cdot b_0}{\pi}}$$
. Для нагрузок, указанных в табл. 3.2,  $D = 24 - 30$  см при  $a = 5 - 10$  см. Следует иметь в виду, что удельные давления и диаметры круговых следов колеса увеличиваются на коэффициент динамичности к нагрузке с учетом колебательных явлений в автомобиле при движении по неровным покрытиям.

## **4. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ДОРОЖНАЯ КОНСТРУКЦИЯ– ГРУНТ» ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

### **4.1. Корректность и применимость физико-математических моделей систем**

При проектировании, расчете и конструировании транспортных сооружений (дорог, аэродромов и др.) широкое применение находят такие методы науки, как системный подход, физическое и математическое моделирование. Системный подход (или метод) состоит в том, что объект расчленяется на отдельные блоки (системы), поведение которых можно моделировать более детально, заменяя влияние на него других блоков (систем) адекватно различным видам воздействий. Таким образом, объект становится совокупностью систем, значение и прогноз поведения каждой – это прогноз поведения объекта в целом. Размер системы по отношению к размеру объекта выбирается в зависимости от значимости практических задач. Например, если необходимо решать задачи обеспечения безопасности движения автомобильного транспорта, то объектом является транспортный поток в транспортном пространстве, а системой – «водитель – автомобиль – дорога». Или, если практическая задача сводится к изучению скользкости или истиранию покрытий дорожных конструкций, то системой достаточно считать «колесо – поверхность качения». Наконец, если практическая задача сводится к защите населенных пунктов, расположенных вдоль дорог от транспортного шума, то системой может быть автомобиль и его узлы, как источники шума, и человек. Поведение слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной нагрузки рассматривал Б.С. Радовский [10, 11], также выделяя систему «нагрузка – среда». С.К. Синг и Т.Т. Куо еще в 1970 г. рассматривали систему «нагрузка – упругое полупространство» для определения динамического прогиба [12]. Доктор техн. наук, профессор С.К. Иллиополов и доктор физ.– мат. наук М.Г. Селезнев для изучения динамического поведения и прогнозов напряженно-деформированного состояния выделили из объекта «дорога» систему «дорожная конструкция – грунт» [3].

Система «дорожная конструкция – грунт» реального строения является многопараметрической и требует построения механико-математических моделей различного уровня. Реальная дорожная конструкция может содержать от 2 до 10 слоев, расположена на земляном полотне конкретной высоты, под которым расположена основа. Каждый слой характеризуется толщиной, модулями упругости на сжатие, сдвиг, изгиб, а также удельной массой. В среднем количество параметров системы «дорожная конструкция – грунт» может достигать от 20 до 75, в связи с чем ее можно считать

многопараметрической. В наиболее общей постановке данную систему описывает динамическая пространственная задача механики сплошной среды. Это связано с тем фактом, что элементы системы при движении по ней автотранспорта подвержены воздействию сложно распределенных существенно пространственных движущихся динамических напряжений, вызывающих различные типы деформаций. Напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов дорожных конструкций в значительной степени определяет их срок службы. Исследование основных характеристик НДС экспериментальными средствами и методами, требующими дорогостоящей прецизионной аппаратуры, весьма сложно, трудоемко и не позволяет получить достаточно полную информацию. Именно этот факт определил интенсивное развитие физико-математических моделей, используемых для расчета основных характеристик НДС и изучения его особенностей. Важным моментом при разработке физико-математической модели является корректное описание особенностей динамического поведения элементов системы.

Пространственная постановка задачи позволяет корректно учитывать основные характерные особенности строения и нагружения дорожной конструкции и подстилающей ее геофизической среды, исследовать влияние скорости движения транспортных средств на напряженно-деформированное состояние системы. Решение такой задачи в общем виде связано с чрезвычайными трудностями как чисто теоретического, так и технического характера. Существенным моментом моделирования динамики системы является корректный учет реальной реакции геологической среды на динамическое воздействие. Неограниченность геологической среды определяет факт существования интенсивных поверхностных волн типа Релея [13], связанных с относительно низкими частотами колебаний и соответственно с достаточно большими длинами волн, много превосходящими ширину дорожной конструкции. Последний факт определяет низкую эффективность прямых численных методов решения задач, таких как метод конечного элемента (МКЭ), так как требуемая для получения достоверных результатов область подстилающего дорожную конструкцию грунта достаточно велика, что приводит к чрезвычайно большому количеству узлов конечно-элементной системы разбиения области и необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений очень высокого порядка. Все это требует развития иных методов решения модельных пространственных задач механики сплошной среды.

К моделям более низкого уровня следует отнести плоскую модель и модель неограниченного многослойного пространства. Первая основана на использовании краевой задачи теории вязкоупругости в плоской постановке и позволяет достаточно точно учесть реальное строение конструкции в сечении. Наличие отработанных методов и программных комплексов для

построения решения дает ей существенные преимущества. Основным недостатком плоской модели является невозможность учета изменений НДС вдоль конструкции описания эффектов, связанных с движением нагрузки при задании ее в качестве постоянной величины для любого сечения.

Следующий уровень моделей получается при исключении условия ограниченности конструкции дорожной одежды по ширине, то есть при представлении всей конструкции в качестве многослойного полупространства с параллельными границами. Разработка и реализация методов и алгоритмов исследования этой задачи связаны и с геофизическими приложениями. Для этой модели существует хорошо отработанный и строго обоснованный математический аппарат, позволяющий достаточно эффективно строить решение при анализе рассматриваемых характеристик динамического НДС. Базируется он на интегральных преобразованиях с применением принципа предельного поглощения [14-27]. Недостатком данных моделей следует считать неограниченность структуры по ширине, что определяет невозможность описания значительного количества возникающих в реальности эффектов.

Для ответа на основные вопросы, связанные с определением фактического диапазона применимости различных физико-математических моделей, требуется провести анализ пространственной модели, достаточно точно учитывающий основные особенности пространственного строения и динамического нагружения системы при воздействии на нее движущегося транспорта. Достоверность основных выводов, полученных на основе анализа, проверяется сопоставлением с результатами натурного эксперимента, для проведения которого требуется разработка и реализация современного прецизионного информационно-измерительного комплекса.

Оценка диапазона применимости различных моделей в значительной степени определяется использованием исходных определяющих соотношений и формулировкой модельных задач. При этом важно учитывать частотный спектр воздействия движущегося транспорта на систему. Как следует из теоретических и экспериментальных исследований, частотный спектр воздействия транспорта достаточно широкополосен и включает частоты свыше одного килогерца. В практике частот используют термины «низкочастотный» и «высокочастотный диапазоны». Эти понятия относительны. Естественным является следующее разделение диапазонов частот. Низкочастотные колебания (от 0 до 50 Гц) определяют в элементах системы волн, длина которых много больше ширины дорожной конструкции. Средние частоты колебаний (от 50 до 250 Гц) определяют длины волн, соизмеримые с шириной дорожной конструкции. Соответственно высокочастотный диапазон связан с колебаниями, длины волн которых много меньше ширины дорожной конструкции. Принятое распределение диапазонов

частот определяет и диапазоны применимости различных моделей по частотам колебаний.

Рассмотрим, к каким искажениям напряженно-деформированного состояния системы «дорожная конструкция – грунт» может привести использование тех или других упрощений реальной пространственной модели.

Упрощение исходной пространственной модели, как уже отмечалось, идет по нескольким направлениям. Первая группа связана с упрощением геометрии области, при сохранении пространственности определяющих уравнений механики сплошной среды. При этом моделирование системы базируется на использовании решений динамической теории упругости для многослойного полупространства (исключен учет ограниченности слоев дорожной конструкции по ширине). Существенное искажение физических эффектов, получаемых на базе подобного упрощения, связано со следующим фактом. Поскольку традиционно в дорожной конструкции жесткость слоев убывает с глубиной, а в геологической среде «нормального» строения наблюдается обратная картина (рост жесткости с глубиной), возникает достаточно своеобразная волноводная структура. В ней практически не генерируются распространяющиеся поверхностные волны [13], зато имеет место выраженный волноводный эффект в слое (или слоях) с наименьшей жесткостью. Этот слой (слои) в упрощенных моделях не ограничен по ширине, и распространяющиеся в нем волны переносят энергию по всем направлениям в равной степени. Реальной, ограниченной по ширине конструкции такой эффект, естественно, не свойственен. Последствия подобного искажения реальности с точки зрения анализа динамического напряженно-деформированного состояния труднопредсказуемы. Дополнительно можно утверждать, что в подобной модели невозможно учесть эффекты напряженно-деформированного состояния, связанные с ограниченностью дорожной конструкции по ширине, и возможные краевые резонансные, изгибные колебания и др.

Вторая группа упрощений связана с использованием определяющих соотношений теории пластин при описании слоев дорожной конструкции. Соотношения теории пластин получены в естественном для тонких слоев предположении о линейном законе распределения перемещений по толщине. Это предположение справедливо на низких частотах колебаний (длина волны много больше толщины слоя) и делает невозможным описание эффектов типа толщинных резонансов конструктивных слоев, связанных с относительно «мягкими» слоями грунта земляного полотна и верхними слоями геологической среды. Соответственно средне- и высокочастотные колебания описываются подобными теориями с непредсказуемой погрешностью.

К значительным погрешностям, особенно в низкочастотном диапазоне, может привести неправильное моделирование геологической среды, на ко-

торой воздвигнута конструкция. Этот факт очевиден при анализе результатов геофизических исследований, направленных на изучение волновых полей, возбуждаемых естественными и искусственными источниками сейсмических колебаний [13].

#### 4.2. Реализация пространственной модели системы «дорожная конструкция – грунт»

Рассматриваемая модель опирается на реализацию новых численно-аналитических методов решения модельных задач теории упругости и вязкоупругости. Модель дорожной конструкции представляет собой пакет полос конечной толщины и ширины, жестко сцепленных между собой, с подстилающей геологической средой. Геологическая среда описывается многослойным полупространством с плоскопараллельными границами раздела упругих параметров. Все элементы конструкции описываются трехмерными соотношениями динамической теории упругости, вязкоупругости или гетерогенной (пористой, флюидонасыщенной) среды. Основная трудность связана с получением решения задачи для изолированной полосы, для чего используется комплекс аналитических методов, включающих принцип суперпозиции, метод интегральных преобразований и принцип предельного поглощения [3].

В общем случае модельная динамическая краевая задача механики сплошной среды, описывающая систему «дорожная конструкция – грунт», может быть сформулирована следующим образом (рис. 4.1).

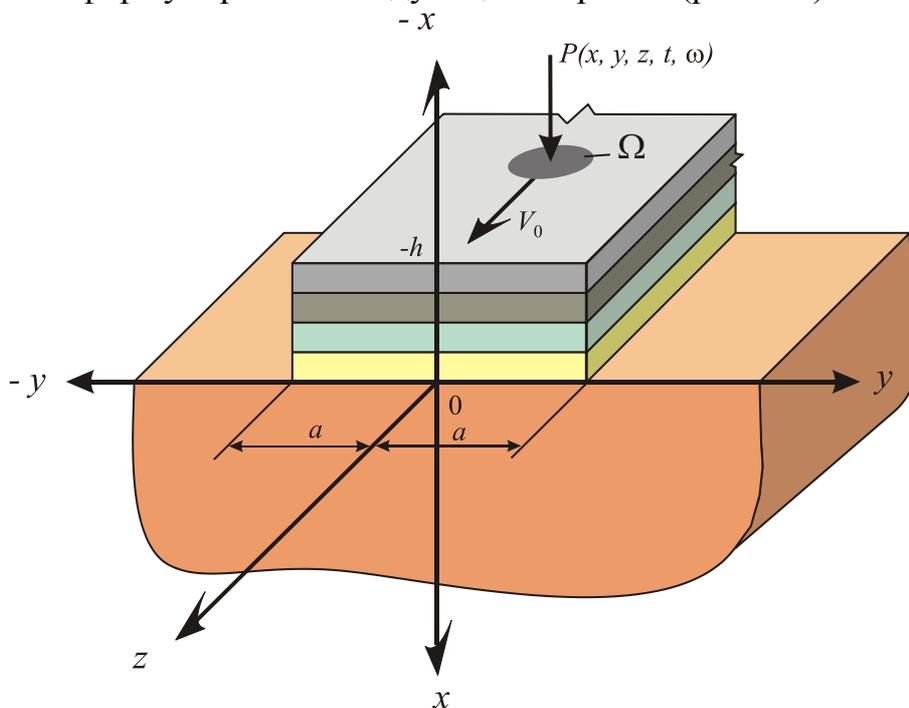


Рис. 4.1. Схема пространственной модели системы «дорожная конструкция – грунт»

Пусть вязкоупругая среда занимает в декартовой системе координат  $(x, y, z)$  область:  $x \in [h, 0]$ ;  $y \in [-a, a]$ ;  $x \geq 0 \cup y \in (-\infty, +\infty)$ . Во всех случаях область не ограничена по координате  $z$ . Упругие характеристики подобластей кусочно-непрерывны по координате  $x$ , т.е. структура их состоит из плоскопараллельных изотропных слоев. Свойства сплошной среды в них определяются плотностью  $\rho_j$ , постоянными Ляме  $\lambda_j$  и  $\mu_j$ , а также вязкостью в пределах каждого слоя, приводящей к заданию параметров  $\lambda_j, \mu_j$  комплекснозначными величинами в пределах каждого слоя. Параметр  $j$  определяет номер слоя, начиная с верхнего ( $j=1$ ).

Движение среды описывается динамическими уравнениями Ляме в пространственном случае:

$$\mu_j \Delta u_x^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \cdot \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial x} = \rho_j \cdot \frac{\partial^2 u_x^{(j)}}{\partial t^2}; \quad (4.1)$$

$$\mu_j \Delta u_y^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \cdot \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial y} = \rho_j \cdot \frac{\partial^2 u_y^{(j)}}{\partial t^2};$$

$$\mu_j \Delta u_z^{(j)} + (\lambda_j + \mu_j) \cdot \frac{\partial \theta^{(j)}}{\partial z} = \rho_j \cdot \frac{\partial^2 u_z^{(j)}}{\partial t^2},$$

где  $u_x^{(j)}, u_y^{(j)}, u_z^{(j)}$  – компоненты вектора смещения точки  $j$ -го слоя  $\bar{U}_j(x, y, z)$ . Каждый из плоскопараллельных слоев занимает область

$x \in [-h_j, -h_{j+1}]$ ,  $h_0 = h$ ;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа в декар-

товой системе координат,  $\theta^{(j)} = \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial x} + \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial y} + \frac{\partial u_z^{(j)}}{\partial z}$ .

На границах раздела упругих параметров заданы условия жесткого сцепления – равенство компонент векторов перемещения и напряжения между контактирующими слоями. На поверхность  $x = -h$  в некоторой области  $\Omega$  действует система нормальных усилий, зависящих от времени и движущихся равномерно и прямолинейно со скоростью  $V_0$  вдоль оси  $oz$ :

$$(z, y \in \Omega), \quad x = -h; \quad \sigma_x = T_1(z, y, t); \quad \tau_{xy} = T_2(z, y, t); \quad \tau_{xz} = T_3(z, y, t), \quad (4.2)$$

где  $\vec{\sigma}_1 \{ \sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz} \}$  – вектор напряжений на плоской границе области  $x = \text{const}$ ;  $\vec{\sigma}_2 \{ \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{zy} \}$  – вектор напряжений на плоских границах об-

ласти  $y = \text{const}$ . Область приложения нагрузки  $\vec{\sigma}_2 \{ \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{zy} \} - \Omega$  движется по поверхности  $x = -h$  со скоростью  $V_0$  в направлении оси  $oz$ .

Все остальные плоские участки границы области свободны от усилий. На бесконечности всюду задаем естественные условия излучения упругих волн, для корректного выполнения которого используем принцип предельного поглощения. Компоненты вектора напряжений определяются по закону Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(j)} &= \lambda_j \cdot \theta_j + 2\mu_j \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial x}; & \sigma_y^{(j)} &= \lambda_j \cdot \theta_j + 2\mu_j \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial y}; \\ \tau_{xy}^{(j)} &= \mu_j \left( \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial y} + \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial x} \right); & \tau_{xz}^{(j)} &= \mu_j \left( \frac{\partial u_x^{(j)}}{\partial z} + \frac{\partial u_z^{(j)}}{\partial x} \right); & \tau_{yz}^{(j)} &= \mu_j \left( \frac{\partial u_y^{(j)}}{\partial z} + \frac{\partial u_z^{(j)}}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Исследование сформулированной краевой задачи при действии на ее границу подвижной нагрузки целесообразно в подвижной декартовой системе координат, связанной с областью приложения нагрузки  $\Omega$ . Введем подвижные координаты  $\{x^*, y^*, z^*\}$  следующим образом:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad z^* = z - V_0 t.$$

Уравнения движения (4.1) в подвижных координатах изменяются путем преобразования инерциальных членов, стоящих в правых частях уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u(x^*, y^*, z^*)}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial z^{*2}} \left( \frac{\partial z^*}{\partial t} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^* \partial t} \frac{\partial z^*}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \\ &= \frac{\partial u}{\partial z^{*2}} V_0^2 - 2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^* \partial t} V_0 + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

Ввиду неограниченности области по оси  $oz$  при исследовании краевой задачи целесообразно использовать метод интегральных преобразований. Применяя к полученным уравнениям преобразование Фурье по времени (в соответствии с методами гармонического анализа) и координате  $z^*$  (параметры преобразования соответственно  $\omega$  и  $\alpha$ ), в правой части уравнений (4.1) получаем инерционный член в виде:

$$\rho \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} = -\rho(\omega - \alpha V_0)^2 \tilde{u} = -\rho \omega^{*2} \tilde{u}.$$

Здесь волна вверху обозначает преобразование Фурье по времени и координате  $z^*$ :

$$\tilde{u} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x^*, y^*, z^*, t) \exp(i[\alpha z^* - \omega t]) dt \cdot dz^*; \quad \omega^* = \omega - \alpha \cdot$$

$V_0$ .

Таким образом, учет равномерного прямолинейного движения вдоль оси  $oz$  нагрузки, изменяющейся во времени, приводит к формальной замене в уравнениях движения (4.1) параметра  $\omega$  на  $\omega^*$ .

При исследовании сформулированной краевой задачи в общей постановке необходимо построить решение вспомогательных задач для бесконечной однородной полосы толщины  $h_j$ , а также решение пространственной краевой задачи для многослойного полупространства. Такое решение проводится методом интегральных преобразований. В этом случае для произвольного числа слоев решение задачи получаем в виде несобственного интеграла следующей структуры:

$$\bar{u}_0(x, y, z, t) = \iint_{\Gamma} \bar{\bar{K}}(x, y, z, \alpha, \beta, t) \cdot \bar{R}(\alpha, \beta) d\alpha \cdot d\beta; \quad (4.4)$$

$$\bar{R}(\alpha, \beta) = \iint_{\Sigma} \bar{R}(y, z) e^{\ell(\alpha z + \beta y)} dy \cdot dz,$$

где  $\bar{R}(y, z)$  – контактные напряжения между конструкцией дорожных одежд и грунтом (слоистым полупространством).

Область контакта  $\Sigma$  – есть полоса шириной  $2a$  на поверхности полупространства  $x = 0 \cup y \in [-a, a]$ . При заданном распределении напряжений  $R(y, z)$  расчет  $\bar{u}_0$  требует построения матрицы  $\bar{\bar{K}}(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ . Для этой цели разработана схема, позволяющая при произвольном числе слоев с высокой степенью точности получать значение элементов этой матрицы с использованием рекуррентных соотношений и решений вспомогательных задач для пространственного слоя и полупространства. Практическая реализация этого алгоритма требует решения задачи для бесконечного слоя и однородного пространства. Это решение не сложно получить в замкнутом виде. Наибольшую сложность представляет построение решения задачи о бесконечном слое конечной ширины в пространственной постановке. Решение этой задачи весьма громоздко, подробно приведено в [3], поэтому ограничимся только кратким изложением алгоритма ее решения.

Решение вспомогательной задачи для пространственного слоя конечной ширины будем строить с использованием принципа суперпозиции как наложение двух бесконечных слоев, занимающих области:

$$z \in (-\infty, +\infty); y \in [-a, a] \cup x \in (-\infty, +\infty); x \in [-h, 0] \cup y \in [-\infty, +\infty].$$

Предполагаем, что на верхнюю грань полосы ( $x = -h$ ) действует подвижная система усилий (4.2), а на нижней грани ( $x = 0$ ) распределение напряжений определяется законом:

$$x = 0; \quad \sigma_x = R_1(z, y, t); \quad \tau_{xy} = R_2(z, y, t); \quad \tau_{xz} = R_3(z, y, t). \quad (4.5)$$

Применение принципа суперпозиции требует решения задач для двух слоев (горизонтально и вертикально ориентированных) в замкнутом виде при произвольно заданных на их гранях системах усилий. Так, для вязкоупругого слоя, занимающего в декартовой системе координат область, задаем граничные условия в виде:

$$x = 0: \quad \sigma_x = X_1(y, z, t), \quad \tau_{yx} = X_2(y, z, t), \quad \tau_{zx} = X_3(y, z, t); \quad (4.6)$$

$$x = -h: \quad \sigma_x = X_4(y, z, t), \quad \tau_{yx} = X_5(y, z, t), \quad \tau_{zx} = X_6(y, z, t),$$

где функции  $X_j(y, z, t)$  неизвестны и подлежат в дальнейшем определению. Вектор смещений для решения этой задачи обозначаем  $u^{(1)}(x, y, z, t)$ .

Аналогично для вертикально ориентированного слоя (вектор перемещений  $u^{(2)}(x, y, z, t)$  на гранях задаем усилия:

$$y = -a: \quad \sigma_y = Y_1(y, z, t), \quad \tau_{yx} = Y_2(y, z, t), \quad \tau_{zy} = Y_3(y, z, t); \quad (4.7)$$

$$y = +a: \quad \sigma_y = Y_4(y, z, t), \quad \tau_{yx} = Y_5(y, z, t), \quad \tau_{zy} = Y_6(y, z, t);$$

При решении этих вспомогательных краевых задач применяем метод интегральных преобразований Фурье с использованием принципа предельного поглощения при выполнении условий излучения энергии упругих колебаний на бесконечности. В результате получаем решение в виде интегральных представлений типа (4.4).

Дальнейший алгоритм расчета сводится к следующему. Суммируем полученные интегральные представления вспомогательных решений для слоев. Эта сумма удовлетворяет уравнениям Ляме в области пересечения  $z \in (-\infty, +\infty); y \in [-a, a] \cup x \in (-\infty, +\infty)$ . Удовлетворяя краевым условиям для полосы с использованием соотношений Гука, получаем систему 12-ти интегральных уравнений для определения 12-ти неизвестных функций напряжений:  $X_j(y, z, t)$  и  $Y_j(x, y, z, t), j = 1, 2, \dots, 6$ . В результате решения этой системы находим функции напряжений, через которые определяем напряженно-деформированное состояние в слое. Для решения системы используем аппроксимационный подход с использованием метода коллокации [3].

Изложенный алгоритм реализован прикладными программами, что позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние полосы при пространственном динамическом нагружении.

При «сшивании» решений для полос или полосы со слоистым полупространством (модель грунта, на котором устроена дорожная конструкция) требуется определить неизвестные контактные напряжения вдоль границ раздела слоев. При этом учитываются условия контакта слоев между собой. Наиболее распространены условия жесткого сцепления слоев, определяющие непрерывность компонент векторов смещения и напряжения при переходе из одного слоя в другой. Технически для выполнения этих условий задаем на нижней грани верхнего слоя и верхней грани нижнего тождественные законы распределения напряжений (неизвестные функции напряжений). Приравнивая компоненты векторов смещения соответствующих слоев вдоль «сшиваемой» поверхности, получаем дополнительные интегральные уравнения для определения контактных напряжений. Так, решение задачи о контакте полосы с однородным полупространством сводится к решению системы 15-ти интегральных уравнений с 15-ью неизвестными функциями. Из них 12 получаем при построении решения задачи для полосы и 3 – при выполнении условий жесткого сцепления полосы с полупространством.

### **4.3. Особенности динамического напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций**

Рассмотрим основные эффекты динамического напряженно-деформированного состояния элементов дорожной конструкции при использовании различных моделей, начиная с наиболее сложной и громоздкой при реализации – пространственной.

Одной из основных характеристик динамического отклика дорожной конструкции на воздействие движущегося транспорта является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). АЧХ отклика системы «дорожная конструкция – грунт» практически обусловлена АЧХ воздействия транспортного средства и «собственной» АЧХ системы. «Собственную» АЧХ системы получаем при расчете отклика конструкции на воздействие типа  $\delta$ -импульса или на основе решения задачи об установившихся гармонических колебаниях системы при моногармоническом воздействии с постоянной во всем диапазоне исследуемых частот амплитудой.

В низкочастотном диапазоне колебаний (до 50 Гц) АЧХ системы всегда имеет ограниченный резонанс различной добротности. На основе численного эксперимента получено, что этот резонанс в значительной степени определяется свойствами геологической среды, на которой возведена кон-

струкция. Наиболее распространенное строение грунта («нормальная» структура) соответствует нарастанию жесткости слоев с глубиной. Именно такой структуре и соответствует наличие резонанса. Основную роль, определяющую его добротность, играет верхний, более мягкий слой геологической среды и грунт земляного полотна. По сути, это толщинный резонанс более «мягкой» прослойки, расположенной между более жесткими (верхними) слоями дорожной конструкции и более жесткими нижележащими слоями грунта. Практически все упрощенные модели этого эффекта не отражают, в то время как результаты натурального эксперимента убедительно подтверждают данный вывод.

Вторая резонансная частота соответствует среднечастотным колебаниям и связана с собственной частотой изгибных колебаний слоев дорожной конструкции из монолитных материалов, включая асфальтобетон.

В высокочастотном диапазоне могут существовать колебания, связанные с краевыми резонансами слоев асфальтобетона. Эти формы колебаний локализованы вблизи кромки покрытия. Распределение вертикальных смещений вдоль боковой кромки верхних слоев конструкции затухающее, вызваны прерыванием сплошности слоев, хотя амплитуда вертикальных смещений в 4-10 раз меньше основного (под нагрузкой) прогиба конструкции.

На основе физико-математической модели системы «дорожная конструкция – грунт» проведен численный эксперимент, позволивший изучить влияние изменения характера реакции конструкции на динамическое воздействие при изменении толщины конструктивных слоев или их физико-механических свойств. В качестве примера на рис. 4.2 приведены частотные характеристики точки поверхности дорожной конструкции при изменении ее свойств. Из него следует, что наилучший эффект в части уменьшения прогиба конструкции и даже сглаживания второго пика резонанса достигается при использовании связанных материалов в основании (например цементированных).

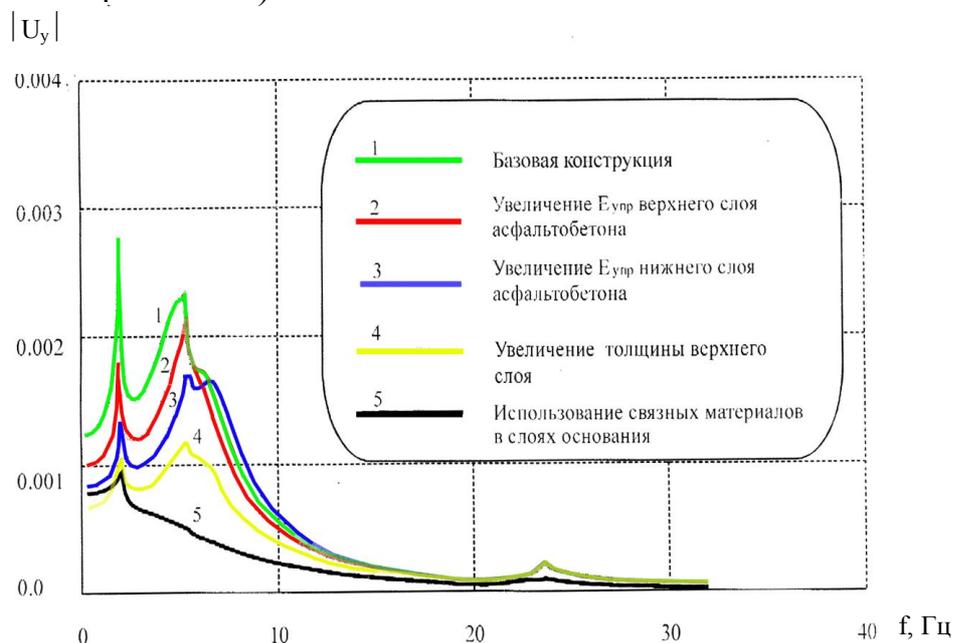


Рис. 4.2. Изменения вертикального динамического прогиба многослойной дорожной конструкции при изменении ее свойств

Увеличение скорости движения приводит к уменьшению амплитуды прогиба поверхности конструкции и появлению асимметрии. Асимметрия проявляется появлением «нагонной» волны перед автомобилем, максимальный прогиб может возникать после прохода нагрузки, с последующим возможным превышением линии горизонта. Причем после прохода нагрузки превышение имеет значительно меньшую амплитуду, чем «нагонная» волна. На рис. 4.3 схематично изображена диаграмма прогиба в продольном сечении поверхности покрытия при действии статической нагрузки (пунктир) и при наличии движения (сплошная линия). Ось  $ou$  совпадает по направлению с движением нагрузки.

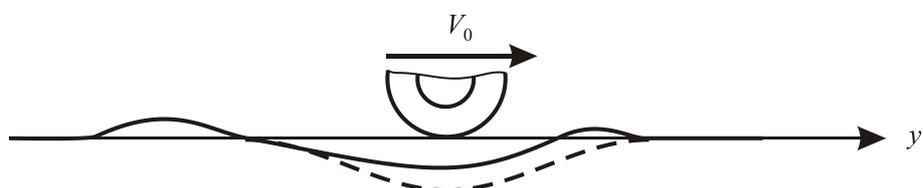
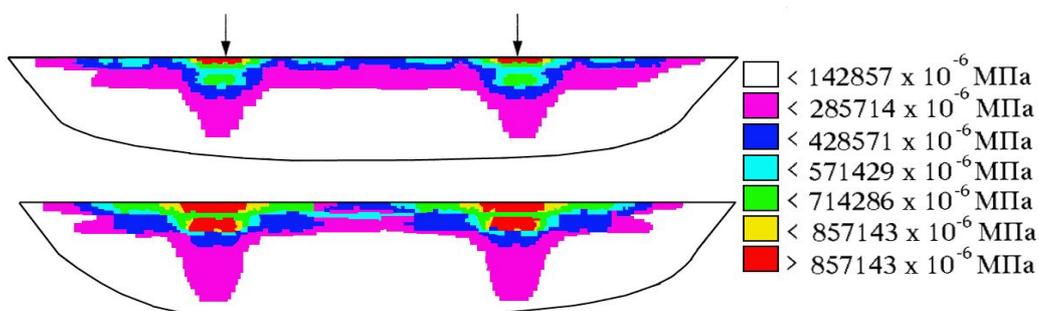


Рис. 4.3. Форма вертикального прогиба поверхности покрытия дорожной конструкции вдоль оси движения нагрузки: пунктир – при  $V_0 = 0$

Исследование закономерностей распределения напряжений в конструктивных слоях при динамическом воздействии движущейся нагрузки



иллюстрирует существенное их отличие от статических или квазистатических. Эти отличия определены существенным увеличением области, охваченной возмущениями, а также значительно более контрастным законом изменения напряжений. В качестве примера на рис. 4.4 приведено распределение напряжений в продольном направлении при воздействии движущейся нагрузки.

Рис. 4.4. Распределение касательных напряжений в слоистой конструкции от двухосного автомобиля с базой 12 м, удельным давлением под колесом 1 МПа и диаметром кругового следа колеса в 37 см

Как видно, зоны НДС от двух осей автомобиля накладываются друг на друга, а учет пластических свойств материалов конструкции приводит к уменьшению значения и области распространения напряжений.

Эти особенности связаны с наличием в конструктивных слоях и подстилающем грунте пакетов волн, распространяющихся как вдоль конструкции, так и в грунте вне её. Важен факт существенного влияния строения и свойств геофизической среды, на которой воздвигнута конструкция, на закономерности изменения НДС элементов системы, особенно в низкочастотном диапазоне.

Дополнительно следует отметить, что значительная часть энергии воздействия транспорта на дорожную конструкцию трансформируется в поверхностные волны (типа волн Релея), распространяющиеся в грунте на достаточно большие расстояния от трассы. Эти волны регистрируются экспериментальными средствами и методами, требующими прецизионного современного виброизмерительного комплекса и методик визуализации и обработки экспериментальных данных. На рис. 4.5 приведены амплитудно-временная (АВХ) и амплитудно-частотная (АЧХ) характеристики точки поверхности грунта на удалении 5 м от автотрассы при прохождении одиночного автомобиля. АЧХ получена в результате обработки оцифрованной записи данных натурального эксперимента путем применения быстрого преобразования Фурье.

При большем (до сотен метров) удалении от трассы АЧХ практически не претерпевает изменения, убывание амплитуды с удалением хорошо коррелирует с расчетными данными и соответствует закону  $r^{-1/2}$  (здесь  $r$  – расстояние от кромки трассы до точки наблюдения). При этом средне- и высокочастотные колебания локализованы в дорожной конструкции или вблизи не

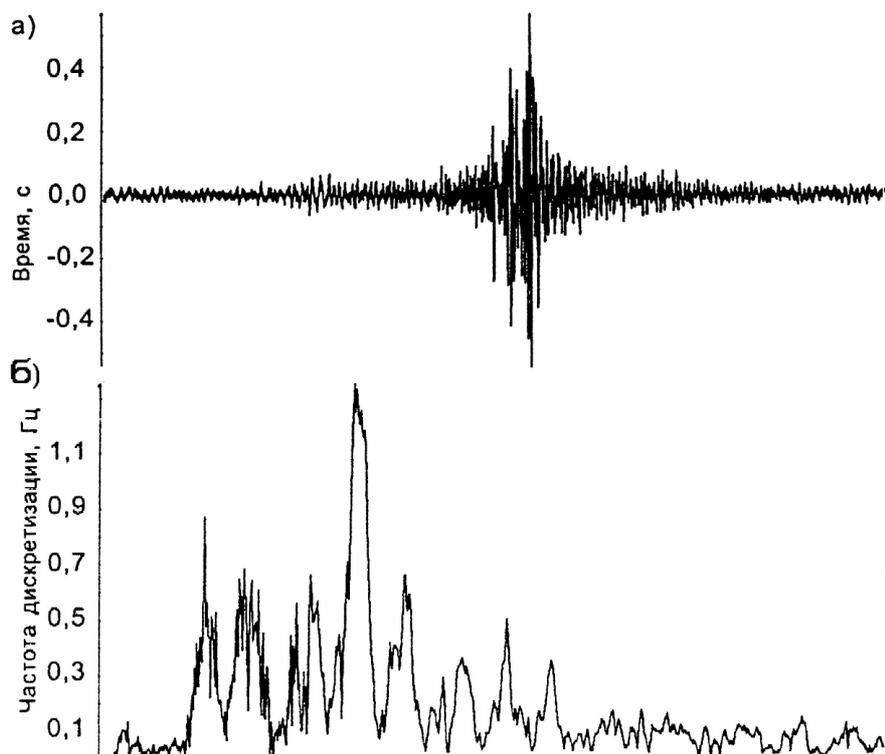


Рис. 4.5. Амплитудно-временная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристики проезда автомобиля «ГАЗель» при скорости 60 км/ч и базе автомобиля 5 м

удалении. С ростом частоты колебаний область, в которой они практически наблюдаются, все более стягивается к полосе наката.

#### 4.4. Численный эксперимент моделирования динамического напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций

Динамичность нагружения многослойной конструкции дорожной одежды приводит к наличию существенных динамических процессов в ее слоях даже при идеально ровном покрытии. Динамические процессы часто определяют механизм развития деформаций и разрушений в конструкции, что не может быть объяснено с позиций статики. Приведен численный эксперимент, основанный на реализации «базисной» пространственной модели для четырехслойной конструкции дорожной одежды с расчетными параметрами, приведенными в табл. 4.1. Материал каждого слоя принимался изотропным и описывался линейными уравнениями теории упругости или вязкоупругости в пространственной постановке без каких-либо упрощений.

Таблица 4.1

**Расчетные параметры конструктивных слоев дорожной конструкции**

Толщина слоя, м	Материал	E, мПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$
0,05	Горячая плотная мелкозернистая а.-б. смесь	3200	2400	0,35
0,08	Горячая крупнозернистая пористая а.-б. смесь	2000	2200	0,3
0,10				
0,32	Фракционированный щебень по способу заклинки	350	1700	0,3
0,20	Песок средней крупности	350	1800	0,3
3,75	Суглинок	40	1900	0,35

При проведении численного эксперимента толщины слоев  $h$  варьировались в диапазоне  $\pm 50$  % от их исходных величин с шагом 5 %, модуль

Юнга  $E - \pm 25\%$  с шагом  $2,5\%$ , плотность  $\rho - \pm 15\%$  с шагом  $1,5\%$ . Грунт нижележащего геологического массива моделировался двухслойным полупространством. Толщина верхнего слоя грунта изменялась от  $0,5$  до  $30$  м с шагом  $0,5$  м. Свойства его определялись следующими механическими характеристиками: скорость волн сдвига  $V_s$  изменялась в пределах от  $100$  до  $500$  м/с; скорость продольных волн  $V_p$  – соответственно от  $200$  до  $1\ 000$  м/с при варьировании значений плотности от  $1\ 200$  до  $3\ 000$  кг/м<sup>3</sup>. В каждом из рассматриваемых вариантов выполнялось следующее условие равенства:  $V_p \approx 2V_s$ , что соответствует реальным свойствам грунтов (коэффициент Пуассона  $\nu \approx 0,3$ ). Таким образом, выбранный диапазон изменения параметров включал в себя разновидность грунтов от песка до гранита.

Последний слой грунтового пространства характеризовался соответственно большими по величине значениями скоростей распространения волн и плотности, что соответствует реальной геофизической среде с нарастающей по глубине жесткостью. Изменялись эти параметры от  $10$  до  $500\%$  (контрастность жесткости слоя полупространства до  $1/5$ ). Кроме того, был рассмотрен один вариант «аномального» строения грунта, когда жесткость поверхностного слоя вдвое выше жесткости полупространства.

Скорость движения нагрузки, действующей на покрытие с интенсивностью от  $0,6$  до  $1$  мПа с пятном контакта круглой формы размером от  $0,2$  до  $0,4$  м в поперечнике, изменялась в диапазоне от  $5$  до  $200$  км/ч с шагом варьирования  $10$  км/ч. Также учитывалась сопутствующая движению вибрация транспортного средства с частотой от  $0$  до  $1\ 000$  Гц. Итоговый частотный спектр динамического воздействия на конструкцию изменялся от  $[0-100$  Гц] до  $[0-3\ 000$  Гц].

В итоге проведенного численного эксперимента был получен обширный материал, позволивший проанализировать особенности динамического НДС элементов исследуемой «системы». Остановимся подробнее на рассмотрении результатов этого анализа.

Динамические эффекты в конструкции имеют выраженный волновой характер. Наиболее интенсивно они проявляются вблизи боковых кромок верхних слоев конструкции дорожной одежды, где видны выраженные локализованные неровности волнового характера, довольно быстро убывающие при удалении от края. Локальное технологическое нарушение при устройстве слоев оснований дорожных одежд (ослабление основания) приводит к росту амплитуд динамических смещений точек верхних слоев в соответствующей зоне. В результате появляется локализованное нарушение ровности поверхности, также имеющее, как правило, волнообразный характер.

Наличие волны «выпучивания» поверхности покрытия перед движущимся транспортным средством является сугубо динамическим фактором,

определяющим дополнительные причины усталостного трещинообразования в покрытии. Наибольшую выраженность эти явления имеют в зонах систематического торможения транспорта (вблизи регулируемых перекрестков, разветвлений дорог, переездов и др.). Волновые процессы в элементах конструкции затухают значительно медленнее статических, распространяются на значительно большие расстояния и при выходе на границу могут порождать краевые эффекты, имеющие конечно-резонансный характер и приводящие к различного рода нарушениям.

Появление этих явлений может быть связано с самой конструкцией или строением подстилающего грунта. Неучет резонансных явлений при конструировании дорожных одежд на стадии проектирования может привести к значительному сокращению реальных сроков службы. Существенно также и то, что наличие динамических эффектов вблизи боковой кромки конструкции дорожной одежды (в том числе и краевых резонансов) порождает в подстилающих слоях системы интенсивный рост напряжений, что определяет тенденцию к ослаблению менее жестких слоев основания. Этот эффект определяется комплексом воздействий различных динамических факторов, приводящих к истиранию крупных фракций материала основания за счет интенсивных сдвигов напряжений переменного знака, доуплотнения материала за счет вибрации, что приводит к нарушениям ровности покрытий.

Следует особо подчеркнуть, что интенсивность проявления описанных динамических эффектов будет существенно увеличиваться со снижением общей прочности дорожных конструкций автомобильных дорог.

Особенности динамического напряженно-деформированного состояния элементов системы «дорожная конструкция – грунт» во многом связаны с возможностью проявления резонансных явлений различной природы, которые являются наиболее опасными с точки зрения зарождения и развития нарушений в рассматриваемой системе. Изучены они недостаточно, что и определяет интерес к их более подробному рассмотрению.

Резонансные эффекты системы «дорожная конструкция – грунт» связаны с различными особенностями строения ее элементов и могут носить как «локальный», так и «глобальный» характер. «Глобальные» эффекты определяются резонансом всей среды или одного из ее слоев, «локальные» – краевые, или вызванные резонированием имеющихся в элементах конструкций полостей, разуплотнений и неоднородностей различного размера и форм.

В многослойном полупространстве «глобальные» резонансные эффекты, определяющие возрастание амплитуд смещений, могут возникать либо в среде «нормального» строения, когда жесткость слоев нарастает с глубиной (общий резонанс), либо в слое относительно низкой жесткости, расположенном между более жесткими элементами слоистой среды (резонанс

одного слоя, обладающего в данном случае волноводными свойствами). В этом плане исследуемая структура, на первый взгляд, не является резонансной, так как в конструкции дорожной одежды жесткости слоев убывают с глубиной. Однако если учесть ограниченность конструкции по ширине и строение подстилающего грунта, в котором жесткости нарастают с глубиной, а также некоторые особенности сезонного состояния конструктивных элементов исследуемой системы, то оказывается, что условия для проявления подобных резонансов имеют место.

Существенно, что для выявления условий возникновения наиболее энергетичных низкочастотных резонансов требуется проведение расчетов по «базисной» трехмерной модели. При исследовании эффектов, связанных с высокочастотной составляющей спектра воздействия на конструкцию дорожной одежды, можно пользоваться более простыми моделями типа многослойного полупространства. Объясняется это тем, что высокочастотные колебания в элементах конструкции локализуются вблизи области воздействия и быстро затухают при удалении от нее, практически «не ощущая» влияния боковых кромок, т.е. можно практически пренебречь ограниченностью конструкции дорожной одежды по ширине. При этом следует особо отметить тот факт, что каждый новый эффект тестировался «базисной» моделью, а расчеты для проверки достоверности проводились по различным методикам для частных случаев.

Вопросы влияния степени неровности покрытия автодорог на процессы развития и накопления деформаций и сокращение межремонтных сроков в настоящее время остаются в значительной степени открытыми. Неровность покрытия приводит к существенному изменению закона давления колеса на его поверхность. При этом существенными являются факторы «поддрессоривания» транспортного средства, а также параметры, определяемые длиной и скоростью его движения, количеством осей, формой неровности и др.

При выполнении численного эксперимента был принят следующий алгоритм расчета. На первом этапе рассчитывали характер изменения величины и АЧХ силового давления колеса на поверхность конструкции при прохождении через неровность и после нее. Так как глубина неровности и вертикальные перемещения поддрессоренной массы, определяющие изменение давления во времени и его частотный спектр, существенно превышают величину деформации поверхности конструкции, представляется возможным считать в первом приближении неровную поверхность недеформируемой и проводить корректный расчет характеристик давления поддрессоренных колес транспортного средства на поверхность конструкции.

В проведенном численном эксперименте форма неровности была принята как гладкое углубление, длину которого изменяли от 0,4 до 1,5 м с

шагом варьирования 0,1 м, при значениях глубины (для каждой фиксированной длины) от 0,01 до 0,1 м с шагом изменения ее величины 0,01 м. Скорость движения в диапазоне от 10 до 200 км/ч варьировали с шагом 10 км/ч. Транспортное средство представляло собой грузовой автомобиль с расчетной нагрузкой на ось, при этом количество осей менялось от 2-х до 4-х, а длину базы автомобиля, т.е. расстояние от передней оси до последней, принимали равной 2, 4, 6, 8, 10 и 12 м.

На втором этапе рассчитывали напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции, на поверхность которой действует расчетная, изменяющаяся во времени нагрузка при варьировании всех расчетных параметров в указанных выше диапазонах. Значения же расчетных параметров самой исследуемой системы «дорожная конструкция – грунт» для получения сравнительных результатов были приняты такими же, как и в ранее описанных экспериментах (см. табл. 4.1).

Проведенный численный анализ показал, что даже относительно слабо выраженная неровность покрытия (глубиной 0,01 м и длиной 1 м) при высоких скоростях движения может привести к увеличению пикового давления на покрытие до 2-х и более раз. Максимум давления при этом приходится либо на саму неровность, либо непосредственно за ней. Увеличение глубины неровности или сокращение ее длины приводит к существенным увеличениям амплитуды силового воздействия. Неровности покрытий приводят также к существенному расширению частотного спектра импульса силы, воздействующей на поверхность конструкции, не только в их окрестности, но и на достаточном удалении от них. При увеличении числа осей и усложнении конфигурации неровности эта тенденция еще более выражена. Полученные закономерности позволили сделать следующие выводы.

1. При расчете и проектировании дорожных конструкций необходимо учитывать реальные количественные и качественные особенности динамического НДС дорожной конструкции, включая возможное наличие резонансов различной добротности, что возможно только с использованием пространственной модели.

2. Особое значение пространственная модель системы приобретает при разработке новых конструктивных решений и их апробации. Именно апробация этих решений на базе численного эксперимента с использованием пространственной модели позволит получить объективную информацию об их эффективности. Имеющийся опыт численного эксперимента показывает, например, что использование чередующихся «жестких» и более «мягких» слоев всегда приводит к появлению в высокочастотном диапазоне достаточно добротных локальных резонансов. Характер НДС в таких слоях, обладающих выраженными волноводными свойствами, весьма сло-

жен, что требует серьезного расчета в каждом конкретном случае на стадии принятия решения.

3. Наличие неровности на поверхности покрытий приводит к существенному усилению действия негативных факторов, определяемых всем комплексом исследованных нами динамических эффектов. Следствием этого является существенное увеличение скорости развития и накопления деформаций и разрушений в конструктивных слоях дорожной одежды, что, в конечном счете приводит к сокращению межремонтных сроков.

4. Особенно существенно негативное влияние неровностей покрытия в расчетный зимне-весенний период наибольшего ослабления грунта земляного полотна, когда целесообразно прибегать к значительному ограничению скорости движения.

### Библиографический список

1. Конструирование и ремонт нежестких дорожных одежд/ Под ред. *Н.Н. Иванова* – М.: Транспорт, 1976. – 328 с.
2. *Смирнов А.В.* Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1975. – 182 с.
3. *Иллиополов С.К., Селезнев М.Г.* Уточненный расчет напряженно-деформированного состояния системы «дорожная одежда – грунт». – Ростов-на-Дону: РГСУ, 1997.
4. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд/ Минтранс РФ. – М., 2001.
5. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. RSTO 200. FORSCHUNG Gesellschaft für Strassen – und VERKEHR wesen. Ausgabe 2000. BAST.
6. *Кнороз В.И.* Работа автомобильной шины. – М.: Автотрансиздат, 1960. - 228 с.
7. *Кленников Е.В., Кнороз В.И., Петров И.П.* Экспериментальные исследования нормальных и касательных напряжений в контакте шины //Тр. НАМИ. – М., 1970. – Вып. 120. – С. 78 – 95.
8. Справочник по механике грунтов/ *В.Б. Швец, Л.К. Гинсбург, В.М. Гольдштейн* и др. – Киев: Будівельник, 1987.
9. *Смирнов А.В., Агалаков Ю.А.* Расчет асфальтобетонных покрытий на жестких основаниях по условиям сдвига// Наука и техника в дорожной отрасли. – 1997. – № 1.
10. *Радовский Б.С.* Поведение дорожной конструкции как слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной нагрузки //Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1975. – С 78 – 89.
11. *Радовский Б.С.* Прогиб под центром подвижной нагрузки, действующей на вязкоупругое однородное полупространство //Вопросы расчета и конструирования дорожных одежд: Тр. Союздорнии. – М., 1979.
12. *Синг С.К. Куо Т.Т.* Колебания упругого полупространства под действием равномерно движущейся нагрузки, распределенной в пределах круга// Прикладная механика: Тр. Американского общества инженеров-механиков. – М., 1970. – №1.
13. *Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Собиевич А.Л.* Механико-математические модели в задачах активной сейсмологии. – М.: ГНИЦ ПГК Минобразования России, 1999. – 291 с.
14. *Ананьев И.В.* К теории колебания сред с непрерывно меняющимися характеристиками //Изв. СКНЦ ВШ: Естеств. науки. – 1976. – №4.
15. *Бабешко В.А., Ворович И.И., Селезнев М.Г.* Распространение в упругом слое волн, возникающих при колебании штампа // Распространение упругих и упругопластических волн – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1973. – С. 339-342.
16. *Бабешко В.А., Ворович И.И., Селезнев М.Г.* Вибрация штампа на двухслойном основании// ПММ, – 1977. – Вып. 1. – Т. 41. – С. 166-173.
17. *Бабешко В.А., Селезнев М.Г., Шагинян А.С.* Об одном методе уточненного учета реакции упругой среды при гармоническом воздействии. – М.: Недра, 1981. – Вып. 89. Прикладная геофизика. – С. 79-88.
18. *Бабешко В.А., Селезнев М.Г., Шагинян А.С.* Способ определения параметров смещения упругой среды при гармоническом воздействии. – М.: Недра, 1983. – Вып. 106. Прикладная геофизика. – С. 32-39.
19. *Бабешко В.А.* Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

20. *Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф.* Динамика неоднородных линейно-упругих сред. – М.: Наука, 1989. – 344 с.
21. *Бабешко В.А.* О вибрации систем штампов // Изв. АН СССР, МТТ. – 1990. – № 6. – С. 72-78.
22. *Белоконь А.В.* К теории динамических задач с подвижными возмущениями для неоднородной упругой полосы// Докл. АН СССР. – 1981. – № 5. – Т. 261. – С. 1079-1082.
23. *Боев С.И., Румянцев А.Н., Селезнев М.Г.* Решение задач о возбуждении волн в упругом двухслойном полупространстве// Методы расширения частотного диапазона вибросейсмических колебаний. – Новосибирск: ИГ и ГСО АН СССР, 1987.
24. *Ворович И.И., Александров В.М., Бабешко В.А.* Неклассические смешанные задачи теории упругости. – М.: Наука, 1974.
25. *Ворович И.И., Бабешко В.А.* Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. – М.: Наука, 1979.
26. *Ворович Е.И., Пряхина О.Д.* Аналитический метод определения В резонансов // Изв. АН СССР, МТТ. – 1987. – № 3. – С. 101-106.
27. *Ворович Е.И., Пряхина О.Д., Тукодова О.М.* Динамические свойства упругой полуграниченной среды, контактирующей с упругим инерционным элементом// Изв. АН СССР, МТТ. – 1996. – № 2. – С. 128-133.
28. *Смирнов А.В.* Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности нежестких дорожных одежд: Дис. ... д-ра техн. наук. – МАДИ, 1989. – 376 с.
29. *Смирнов А.В.* Экспериментальное исследование волн колебаний дорожных покрытий при движении автомобиля// Прикладная механика. – 1973. – Т. IX.
30. *Смирнов А.В., Малышев А.А., Агалаков Ю.А.* Механика устойчивости и разрушения дорожных конструкций. – Омск: Изд-во СибАДИ, 1997. – 91 с.
31. *Фадеев В.Б.* Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колеобразование на проезжей части дорог с нежесткими дорожными одеждами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1999. – 21 с.
32. *Золотарь И.А.* К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств. – Санкт-Петербург: Изд-во ВАТТ, 1999. – 32 с.
33. *Смирнов А.В.* Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций. – Омск: СибАДИ, 1993. – 128 с.
34. P.Koebler und andere. Deutsche Kraftfahrtforschung und strassen-verkehrstechnik Messungen der dynamischen Rodlasten und Entwicklung oines Prufhindernisses zur Feststellung strabenschonender Fahrzeugbauweise 1959. Helf 127.
35. Bomhard F.I. Verfahren zur Messung der dynamischen Rodlast beim Kraftwagen. Munchen. 1956.
36. *Малофеев А.Г.* Исследование динамического воздействия автомобиля на нежесткие дорожные одежды дорог: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХАДИ, 1978 – 196 с.
37. *Иванов Н.Н.* и др. Расчет и испытание нежестких дорожных одежд – М.: Высшая школа, 1971. – 100 с.
38. *Горбунов-Посадов М.И.* Таблицы для расчета тонких плит на упругом основании. -М.: Госстройиздат, 1959. – 100 с.
39. *Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И.* Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 627 с.

40. *Казарновский В.Д.* и др. Расчет дорожных одежд переходного типа // Новое в проектировании конструкций дорожных одежд: Сб. тр. – М.: Изд-во Союздорнии, 1988. – С. 50 – 61.
41. *Васильев А.П., Коганзон М.С., Яковлев Ю.М.* Предложения по учету остаточных деформаций при расчете дорожных одежд нежесткого типа // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1997. – №1. – С. 5-6.
42. *Каныгина С.Ю.* Прогнозирование остаточных деформаций дорожных одежд нежесткого типа на земляном полотне из глинистых грунтов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1999. – 20 с.
43. *Орловский В.С.* Расчет оснований под сборное покрытие // Автомобильные дороги. – 1986. – №1. – С. 18-20.
44. *Фадеев В.Б.* Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колеобразование на проезжей части дорог с нежесткими дорожными одеждами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1999. – 21 с.
45. *Хархута Н.Я., Васильев* и др. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1975. – 285 с.
46. *Косенков В.С.* Оценка транспортно-эксплуатационных показателей при обосновании оптимальных сроков усиления дорожных одежд // Оптимизация сроков реконструкции и стадийного строительства автомобильных дорог / Минавтодор Казахской ССР. – Алма-Ата, 1973. – С.171–190.
47. *Кизима С.С.* Исследование изменения ровности нежестких дорожных одежд в условиях УССР как показателя их качества: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев: Изд-во КАДИ, 1975. – 23 с.
48. *Коганзон М.С.* Расчет остаточных деформаций дорожных одежд // Прогнозирование транспортно-эксплуатационных показателей нежестких дорожных одежд: Учебн. пособие. – Алма-Ата: Изд-во Мин-ва науки РФ, 1992. – С. 43–46.
49. *Эдельман А.В.* Оценка влияния неупругих свойств грунта земляного полотна на работоспособность дорожных одежд нежесткого типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 1993. – 20 с.
50. *Мевлединов З.А.* Обоснование основных показателей, учитывающих влияние остаточных деформаций при расчете дорожных одежд нежесткого типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 1997. – 17 с.
51. *Александрова Н.П., Александров А.С.* Пути совершенствования методик расчета системы «дорожная одежда–земляное полотно» по остаточной деформации. // Труды СибАДИ.–Омск: Изд-во СибАДИ, 2001.–Вып.4.– Ч.2.– С.3–13.
52. *Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В.* Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983. – 391 с.
53. *Бартенев Г.М.* Прочность и механика разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
54. *Бартенев Г.М.* Строение и механические свойства неорганических стекол. – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с.
55. *Батраков О.Т.* Вязкие свойства одежд автомобильных дорог // Материалы Всесоюз. межвуз. науч.-техн. конф. по прочности дорожных одежд. – Харьков, 1968. – С. 51-54.
56. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
57. *Гольдштейн Н.М.* Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1973. – 368 с.

58. *Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И.* Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
59. *Ермакович Д.В.* Анализ упруговязкой стадии деформирования слоев нежестких дорожных одежд на основе механических диаграмм// Материалы Всесоюз. межвуз. науч.-техн. конф. по прочности дорожных одежд. – Харьков, 1968. –С. 57-61.
60. *Иноземцев А.А.* Сопротивление упруговязких материалов. – Л.: Стройиздат, 1966. – 168 с.
61. *Казарновский В.Д.* Слабые грунта как основание насыпей автомобильных дорог: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МАДИ, 1975. – 58 с.
62. *Казарновский В.Д.* О критерии сдвигоустойчивости в расчете дорожных одежд // Вопросы расчета и конструирования дорожных одежд: Сб. тр. – М.: Союздорнии, 1979. – С. 27-39.
63. *Казарновский В.Д.* Оценка сдвигоустойчивости связных грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1985. – 167 с.
64. *Кристинсен К.* Введение в теорию вязкоупругости. – М.: Мир, 1974. – 338 с.
65. *Маслов Н.Н.* Механика грунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
66. *Ржаницин* Теория ползучести. — М.: Стройиздат, 1968. – 418 с.
67. *Тер-Мартirosян З.Г.* Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений.– М.: Стройиздат, 1990. – 200 с.
68. *Aboshi H.* An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement //8-th, Moscow, 1973 – V. 4/ 3 – Pp. 88.
69. *Buisman A.S.K.* Results of long duration settlement test //1-st, Cambridge (Mass.), 1936 – V. 1. – Pp. 103–106.
70. *Casagrande A., Wilson S.D.* Effect of loading on the strengs of clays and shale's at constant water content //Geotechnique.– 1951. – №2. – Pp. 251–263.
71. *Christian J.T., Boehmer J.W., Martin P.P.* Consolidation of a layer under a strip load //V. 98. – № – SM 7. – Pp. 693–707.
72. Реология теория и приложения /Под ред. *Ф. Эйриха/* Перевод с англ. *Ю.Н. Работнова, П.А. Рибиндера.* – М.: Изд-во ИЛ., 1962. – 824 с.
73. *Сиденко В.М., Батраков О.Т., Покутнев Ю.А.* Дорожные одежды с арогидроизоляционными слоями. – М.: Транспорт, 1984. – 142 с.
74. *Александров А.С., Александров А.С., Александрова Н.П.* Расчет системы «дорожная одежда–земляное полотно» по накапливаемой остаточной деформации. //Труды СибАДИ.–Омск: Изд-во СибАДИ,2001.–Вып.4.–Ч.2.– С.13–26
75. *Александров А.В. Потапов В.Д.* Основы теории упругости и пластичности.– М.: Высшая школа, 1990. – 399 с.
76. *Love, A.E.H.* The stress Produced in a semi-infinite solid by Pressure on part of the Boundary. Phil. Trans. Roy. Soc., London, – 1928. Series A., Н. 228, s. 377 bis 420.
77. *Батунер Л.М., Позин М.Е.* Математические методы в химической технике.- Л.: Химия, 1968. – 824 с.
78. *Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.* Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1965. – 616 с.
79. *Варвак П.М., Варвак Л.П.* Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – 160 с.
80. *Власов В.З.* Общая теория оболочек и ее приложения в технике. – М.: Гостехиздат, 1962. – 784 с.

81. *Власов В.З.* Общая теория оболочек //Изб. труды. Очерк научной деятельности. Статьи. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – Т.1. – 528 с.
82. *Корнев Б.Г., Черниговская Е.М.* Расчет плит на упругом основании. – М.: Госстройиздат, 1962. – 355 с.
83. *Медников И.А.* Исследования по теории расчета бетонных покрытий автомобильных дорог: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МАДИ, 1965. – 52 с.
84. *Могилевич В.М.* и др. Сборные покрытия автомобильных дорог. – М.: Высшая школа, 1972. – 383 с.
85. Par Ingr. RAFIROIU M. Une nouvelle méthode pour le dimensionnement chaussées souples «Revue Générale des Routes et des Aérodrômes» 1968. 38. n 431. P-p 49 – 56, 61 – 68, 73 – 74.

Учебное издание

**Смирнов Александр Владимирович  
Иллиополов Сергей Константинович  
Александров Анатолий Сергеевич**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
И РАСЧЕТ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебное пособие

\* \* \*

Редактор Т.И. Калинина

\* \* \*

Компьютерный набор выполнила  
Т.Г. Поплавская

\* \* \*

Подписано к печати \_\_\_\_\_  
Формат 60x90 1/16. Бумага ксероксная  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Таймс  
Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_  
Тираж \_\_\_\_\_ экз. Заказ \_\_\_\_\_  
Цена договорная

Издательство СибАДИ  
644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10  
Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ  
644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10

Учебное издание

**Смирнов Александр Владимирович  
Иллиополов Сергей Константинович  
Александров Анатолий Сергеевич**

**ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
И РАСЧЕТ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Учебное пособие

\* \* \*

Редактор Т.И. Калинина

\* \* \*

Компьютерный набор выполнила  
Т.Г. Поплавская

\* \* \*

Подписано к печати \_\_\_\_\_

Формат 60x90 1/16. Бумага ксероксная

Оперативный способ печати

Гарнитура Таймс

Уч.-изд. л.11,75

Тираж 300 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Цена договорная

Издательство СибАДИ

644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ

644099, Омск, ул. П.Некрасова, 10