ОДМ 218.11.001-2015

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ПО МЕРЕ НАКОПЛЕНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ РОВНОСТИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2015

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

(РОСАВТОДОР)

Утверждены
распоряжением
Федерального дорожного
агентства
№ 2332-р
От 04.12.2015 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ПО МЕРЕ НАКОПЛЕНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ РОВНОСТИ

Издание официальное

Москва 2015

Предисловие

1 РАЗРАБОТАНЫ ООО «ДорТехИнвест».

2 ВНЕСЕНЫ Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Росавтодора.

3 ПРИНЯТЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ распоряжением Федерального дорожного агентства от «0412. 2015 г. № 2332-р.

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ.

Содержание

		Стр.
1	Область применения ……..……..	1
2	Нормативные ссылки …….....	2
3	Термины и определения……...……..	2
4	Общие положения……..	4
5	Методика оценки зависимости вероятностно-статистических характеристик микропрофилей автомобильных дорог от максимально-учитываемой длины и высоты неровности……..	5
5.1	Построение плана и микропрофиля автомобильной дороги по данным передвижной диагностической лаборатории (цифровая модель)…….……	5
5.2	Способ обработки данных о ровности, непосредственно полученных с помощью прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории……	9
5.3	Методика учета накопления неровностей на основе исследования вероятностных характеристик микропрофилей автомобильных дорог (методика В.П.Носова и В.П.Жигарева)……	11
5.4	Методика учета накопления неровностей на основе измерения ровности дорожных покрытий по методике О.А.Красикова……	20
6	Определение коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности……	23
6.1	Коэффициент динамичности……..	23
6.2	Определение вероятности появления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности (методика В.В.Столярова)…….....	30
6.3	Методика анализа изменения коэффициента динамичности……	34

6.4 Прямой метод оценки динамического взаимодействия колеса транспортного средства и неровностей дорожного покрытия (методика И.М.Рабиновича)..... 41
6.5 Определение коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности..... 48
6.6 Рекомендации по применению экспериментальных стендов для определения динамических характеристик..... 58
7 Технические рекомендации по учету изменения коэффициента динамичности при проектировании, строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог..... 62
Библиография..... 71
Приложение 1 Пример применения методики Носова-Жигарева при обработке результатов исследования ровности дорожной поверхности..... 73
Приложение 2 Результаты работы программного комплекса моделирования процесса динамического взаимодействия колеса транспортного средства и дорожного покрытия с единичными и накопленными неровностями в среде МАТЛАБ..... 74
Приложение 3 Результаты экспериментальных исследований по измерению изменения коэффициента динамичности..... 79

Методические рекомендации по учету увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности

Methodical recommendations about the accounting of increase in dynamic influence of loading in process of accumulation of roughnesses and to determination of coefficient of dynamism depending on a flatness indicator

---

Дата введения 2015 г.

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Отраслевой дорожный методический документ «Методические рекомендации по учету увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности» (далее - рекомендации) разработан в развитие подпрограммы «Автомобильные дороги» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» в соответствии с законодательными и нормативными документами, действующими в дорожном хозяйстве и носит рекомендательный характер.

1.2 Настоящие рекомендации распространяются на вопросы исследования и анализа увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей при проектировании и эксплуатации дорожных покрытий [1-12].

1.3 В настоящих рекомендациях приведены сведения по учету увеличения динамического воздействия нагрузки со стороны транспортных средств на автомобильную дорогу по мере накопления неровностей и

определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности, а также технические рекомендации по учету изменения коэффициента динамичности при проектировании, строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящих рекомендациях использованы ссылки на нормативные документы:

1. ГОСТ 30412-96 Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерений неровностей оснований и покрытий;
2. ГОСТ 7.32-2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;
3. ГОСТ Р 50597-93 Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения;
4. СП 34.13330.2012 Свод правил. Автомобильные дороги (актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85);
5. СП 78.13330.2012 Свод правил. Автомобильные дороги. (актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85).

3 ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отраслевом дорожном методическом документе применяются следующие термины с соответствующими определениями и сокращениями [1-12]:

3.1 динамическая нагрузка: Нагрузка, дополнительно возникающая при движении транспортного средства по автомобильной дороге.

3.2 дорожная одежда: Конструкция, состоящая из покрытия и основания, предназначенная для передачи транспортной нагрузки на рабочий слой земляного полотна.

3.3 коэффициент динамичности нагрузки: Коэффициент увеличения нагрузки (деформации) при динамическом воздействии по сравнению со статическим.

3.4 коэффициент приведения: Отношение результата воздействия на дорожную одежду транспортного средства с определенной осевой нагрузкой к результату воздействия расчетного автомобиля (с учетом воздействия более легкой ведомой оси).

3.5 микропрофиль проезжей части: Продольный профиль поверхности автомобильной дороги по заданной полосе наката в виде массива вертикальных отметок, полученных с интервалом не более 0,25 м, содержащий неровности, оказывающие влияние на вертикальные колебания транспортного средства.

3.6 показатель ровности: Интегральный (суммарный) диагностический показатель ровности, приведенный к единице длины участка дорожного покрытия.

3.7 полоса движения: Полоса проезжей части, по которой происходит движение транспортных средств в один ряд.

3.8 полоса наката (колея): Часть полосы движения на поверхности проезжей части, подвергающаяся наиболее частому воздействию колес транспортных средств, следующих по данной полосе движения.

3.9 продольная ровность проезжей части: Один из показателей качества дорожного покрытия, характеризующий взаимное воздействие транспортных средств и покрытия дорожной одежды и влияющий на изменение вертикальных колебаний транспортного средства и динамической нагруженности дорожной одежды.

3.10 частота дорожных неровностей (дорожная частота): величина, обратная длине волны неровности.

4 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1 Снижение фактического срока службы дорожных конструкций, рост деформаций и разрушений в дорожных одеждах, в первую очередь, связаны с воздействием транспортного потока на автомобильную дорогу [3-12].

Изучение взаимовлияния транспортного средства и автомобильной дороги - это сложный процесс, для которого можно оценить показатели динамического воздействия транспортных средств на конструкцию автомобильной дороги, а также установить, какова же степень влияния ровности дорожного покрытия на колебания конструкции транспортного средства.

4.2 Учет увеличения динамического воздействия нагрузки в результате накопления неровностей и определение коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности автомобильных дорог необходимы при расчете дорожных одежд на стадиях проектирования и реконструкции автомобильных дорог общего пользования, а также при решении ряда прикладных задач (например, при расчете материального ущерба при проезде тяжеловесного и крупногабаритного транспорта) на стадии эксплуатации автомобильных дорог общего пользования [1-4, 8-12, 20].

4.3 Движение транспортного средства по автомобильной дороге сопровождается воздействием его колеса на дорожное покрытие в области, представляющей по своей конфигурации овал различной формы, зависящей от типа и грузоподъемности транспортного средства.

4.4 В настоящее время в нормативно-технической документации, разработанной для проектирования и усиления дорожных одежд, учет нарастания транспортной нагрузки на автомобильные дороги общего

пользования осуществляется путем введения показателя прироста интенсивности движения [13].

4.5 В справочной литературе имеются данные о нагрузках на ось или нагрузках на колесо, которые передаются на дорожное покрытие от транспортных средств, и которые относятся к статическому давлению на горизонтальную площадку. Однако при движении транспортных средств касательные и вертикальные воздействия от колес на конструкцию автомобильной дороги имеют динамический характер и переменны по величине, направлению и по статистическим показателям (дисперсии и коэффициенту вариации).

4.6 Для опытно-экспериментального применения, накопления статистики и обобщения предлагается корреляционная зависимость взаимовлияния изменения коэффициента ровности IRI и изменения коэффициента динамичности с учетом квадратного корня скорости транспортного средства.

5 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗАВИСИМОСТИ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОПРОФИЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ МАКСИМАЛЬНО-УЧИТЫВАЕМОЙ ДЛИНЫ И ВЫСОТЫ НЕРОВНОСТИ

5.1 Построение плана и микропрофиля автомобильной дороги по данным передвижной диагностической лаборатории (цифровая модель)

5.1.1 Для анализа числового ряда (цифровой модели дорожного покрытия) приемлема обобщенная модель, в которой отклонение X_n измеряемой величины для n-го измерения от своего номинального значения представляется суммой трех слагаемых: детерминированной составляющей l_n (представляемая как уклон), переменной случайной составляющей μ_n с коррелированными значениями (выделяемая составляющая ровности) и

собственно случайной составляющей ξ_n (типа дискретного белого шума, представляемая, в том числе, как макрошероховатость):

$$X_n = l_n + \mu_n + \xi_n \qquad (5.1)$$

Выделение первых компонентов l_n, μ_n проводится с помощью типовых алгоритмов, случайная составляющая непрогнозируема. Детерминированную составляющую l_n можно рассматривать как сумму начального случайного смещения уровня $l_0^{(k)}$ и линейного тренда $l^{(k)} \cdot n$, вызванного суммарным действием систематических возмущающих факторов $l_0 = l_0^{(k)} + l^{(k)} \cdot n$, где k - индекс реализации; $l^{(k)}$ - скорость изменения текущего математического ожидания. Коэффициенты $l_0^{(k)}$ и $l^{(k)}$ имеют различные априорно неизвестные значения. Природа возникновения периодической коррелированной составляющей μ_n вызвана медленно изменяющимися возмущающими воздействиями, а составляющей ξ_n - совокупным действием собственных случайных составляющих возмущающих факторов.

Обосновывается, что последовательность ξ_n не противоречит закону нормального распределения с $M\{\xi_n\} = 0$ и $G_{\xi_n} = const$, не зависящей от n.

Последовательность μ_n может быть представлена в виде аппроксимации по гармоническому закону или последовательностью стационарных коррелированных величин с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией:

$$K_{\mu_n}(\tau) = G^2_{\mu_n} \cdot \rho_{\mu_n}(\tau), \qquad \tau = 1, 2, \ldots , \qquad (5.2)$$

где τ - целочисленный сдвиг (на количество циклов измерения), $\rho_{\mu_n}(\tau)$ - нормированная корреляционная функция, $G^2_{\mu_n}$ - дисперсия переменной случайной составляющей, $M\{\mu_n\} = 0, \quad n >> 1$.

5.1.2 Рассматривается задача разделения числового ряда на детерминированную, коррелированную и случайную составляющие. Используют спектральный метод оценки параметров мгновенного распределения. Отклонения от линейной составляющей имеют вид:

$$x_n^0 = x_n - l_n = \xi_n - \upsilon_n. \qquad (5.3)$$

Выделение линейной составляющей целесообразно проводить методом наименьших квадратов. При таком способе получения реализации x_n^0 ее математическое ожидание $M\{x_n\} = 0$. Величина $\{x_n^0\}$ чаще всего распределена по нормальному закону. Проверку такой гипотезы целесообразно проводить по критерию Пирсона.

Дисперсия последовательности $\{x_n^0\}$ является суммой дисперсий систематической и случайной составляющих: $G_x^2 = G_v^2 + G_\xi^2$. (5.4)

Случайные процессы ξ_n и υ_n являются стационарными с нулевыми математическими ожиданиями: $M\{\xi_n\} = 0$, $M\{\upsilon_n\} = 0$.

Из условия некоррелированности последовательности $\{\xi_n\}$ следует, что задача выделения систематической составляющей аналогична задаче выделения случайного шума, обусловленного случайными помехами. Задачи решаются методом выделения линейной (кусочно-линейной) составляющей, а также методом линейной фильтрации и их аналогами.

Пример 1. Выделение составляющих цифровой модели автомобильной дороги на основе вычислительного моделирования иллюстрируется примером Чванова-Стекольщикова. Файл содержит N значений (рисунок 5.1):

N = 1070

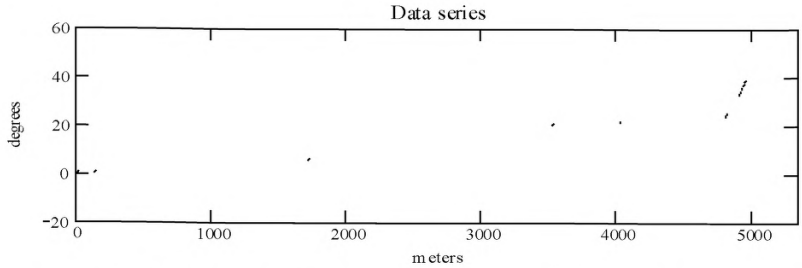


Рисунок 5.1 Цифровой ряд результатов измерения участка автомобильной дороги

Осуществляется поиск и исправление или исключение случайных выбросов в данных. Параметр устанавливает границы допуска для значений ряда, например, k := 5. Значения параметра берут из диапазона от 3 до 6. Чем больше его значение, тем шире допустимые границы (рисунок 5.2).

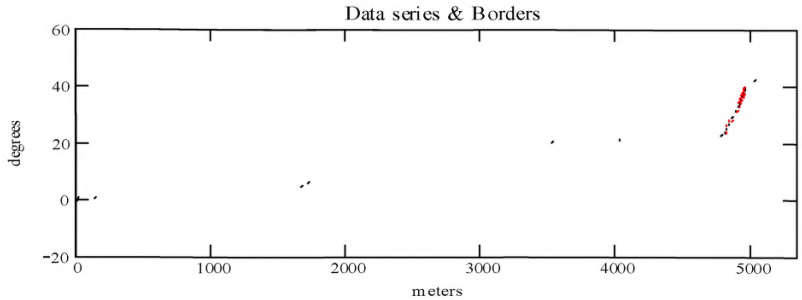


Рисунок 5.2 График цифровой модели участка автомобильной дороги

5.1.4 Обработка результатов

Решение задачи позволяет выделять составляющую ровности (рисунок 5.3), которая в общем случае не всегда подчиняется гармоническому закону.

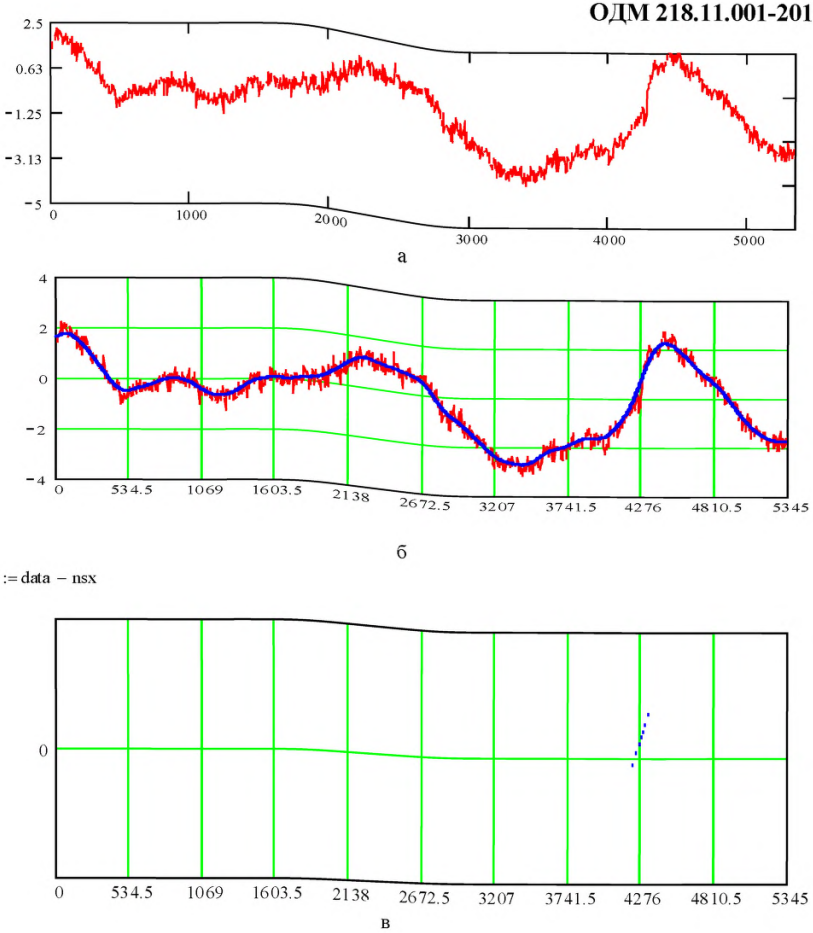


Рисунок 5.3 Графики выделения низкочастотной составляющей цифровой модели дорожного покрытия

5.2 Способ обработки данных о ровности, непосредственно полученных с помощью прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории

5.2.1 Сущность метода

Метод основан на получении и обработке данных с помощью прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории.

5.2.2 Инструментальные средства

Передвижная дорожная лаборатория, оснащенная гироскопической системой, средствами навигации, прибором контроля ровности типа ПКРС-2У, бесконтактным датчиком перемещений.

5.2.3 Проведение испытаний

Данные, полученные с прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории, путем проезда выбранных участков автомобильной дороги, накапливаются в программных файлах.

5.2.4 Обработка результатов

На мониторе бортового компьютера отображаются данные о ровности и показатель по предыдущим участкам, приведенный к 1,0 км. Длина участков, на которых обрабатываются данные, назначается оператором перед началом проведения измерений.

Приведение ровности на отдельных участках к ровности на км производится по формуле:

$$R_{км} = R_L * (1000/L_{уч}), \quad (5.5)$$

где: $R_{км}$ – ровность на км, см/км; R_L – ровность на участке, см; $L_{уч}$ – задаваемая длина участка, м

Данные выводятся на монитор в виде графиков с накоплением по участкам или в виде диаграммы значений

Пример 2. Типовые виды графика текущего значения ровности и ровности с накоплением представлены на рисунках 5.4 и 5.5.

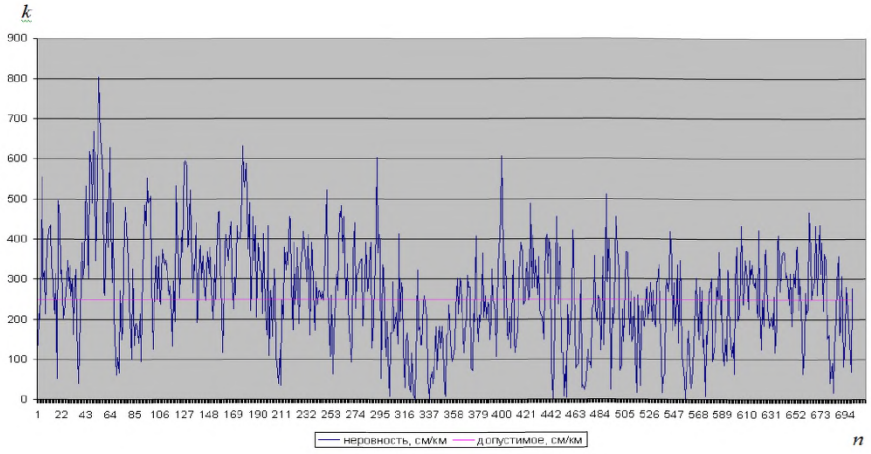


Рисунок 5.4 Типовой вид графика текущего значения ровности (по вертикали – *k* - количество сотых мм, *n* – номер измерения)

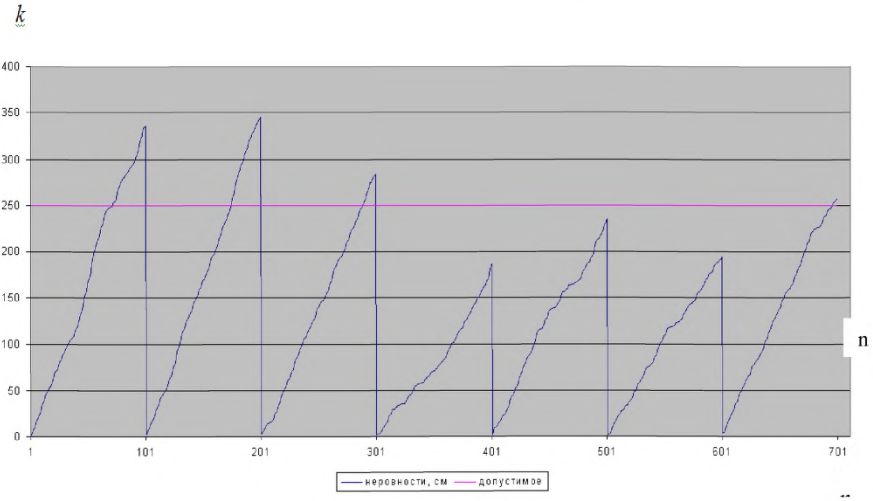


Рисунок 5.5 Типовой график ровности с накоплением, полученный передвижной дорожной диагностической лаборатории (по вертикали – *k* - количество сотых мм)

5.3 Методика учета накопления неровностей на основе исследования вероятностных характеристик микропрофилей автомобильных дорог (методика В.П.Носова и В.П.Жигарева)

5.3.1 Сущность метода

Метод основан на получении и обработке данных, полученных с помощью прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории.

5.3.2 Инструментальные средства

Передвижная дорожная лаборатория, оснащенная гироскопической системой, средствами навигации, толчкомером, бесконтактным датчиком перемещений, прибором контроля ровности (типа ДПП или APL-25).

5.3.3 Проведение испытаний

Проектный продольный профиль (ППП) автомобильной дороги является преобразованием продольного профиля дорожного покрытия, которое можно считать линейным с учетом требований, формулируемых нормативными документами на его проектирование. Значения его ординат в узловых точках участков допускается выдерживать с некоторым допуском, а значения ординат промежуточных точек рассчитываются при проектировании продольного профиля с погрешностью до 1,0 мм. Допуски на точность задания ординат профиля в некоторых точках целесообразно включать в модель ППП для определения спектральной плотности дисперсии (СПД) его ординат.

Микропрофилем проектного продольного профиля автомобильной дороги (МППП) будет линейное преобразование ППП, при котором из него исключаются неровности большой длины и неровности малой длины.

Критерием выбора граничных длин волн неровностей является выполнение требований обеспечения равенства параметров колебания транспортного средства на ППП и МППП. МППП включает неровности,

лежащие в диапазоне длин 0,5…100 м. Используется фильтр низких и высоких частот. Например, фильтры третьего порядка с дробно-рациональными передаточными характеристиками, позволяющими исключить из ПГП постоянную составляющую, постоянный уклон и постоянную кривизну.

Модель ПГП и МПГП принимают из допущения: значения продольного уклона на отрезке не противоречат нормальному распределению. Эти допущения подтверждают экспериментальными данными. Требование нормальности продольного уклона не существенно для определения формы СПД уклонов, но важно для определения ее уровня. По этой модели определяют СПД, в которой учтены требования [2] на максимальные значения уклонов и их приращения, допуски на вертикальные отметки при проектировании и строительстве автомобильных дорог [3].

Разработанная в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете модель МПГП позволяет связать основную характеристику микропрофиля как стационарного нормального процесса – СПД его ординат, с основными нормативными показателями СНиП 3.06.03-85.

Наиболее пригодны для получения информации о микропрофиле приборы, позволяющие прямым или косвенным образом получать ординаты микропрофиля (лазерные измерители, приборы типа ДПП и APL-25). Они обладают высокой производительностью, достаточной точностью и позволяют определить требуемые показатели ровности автомобильных дорог, если известен алгоритм их получения из реализаций микропрофиля.

Принятые показатели СНиП 3.06.03-85 необходимы и достаточны для оценки ровности в широком диапазоне длин неровностей и определяют спектральную плотность дисперсии ординат микропрофиля. Показатель «разности вертикальных отметок» при различных базах замера может быть исключен из оценки ровности лишь в некоторых случаях: прохождение

участков автомобильной дороги в местах со сложным рельефом, в условиях городов и т.п. Распределение разностей отметок обычно не противоречит закону нормального распределения, поэтому вместо вероятностей непревышения нормативных значений разностей отметок рекомендуется использовать их среднеквадратические значения. Дополнительно к [3] и ГОСТ 30412 рекомендуется учитывать непрерывность и закон распределения разностей отметок.

При строительстве автомобильных дорог нормы СНиП на просветы под трехметровой рейкой обычно выполняются, но требования по разностям отметок в большинстве случаев не выполняются. Проектный профиль также целесообразно оценивать по его ровности, так как до 25-30% нормативных значений показателей ровности образуется уже при разработке проектного профиля. Выполнение норм [3] по просветам под рейкой обеспечивает нахождение СПД ординат микропрофиля у верхней границы класса А классификации ИСО СПД ординат микропрофиля (при оценке ровности по СНиП «хорошо») и ниже середины этого класса (при оценке «отлично»).

5.3.4 Техническое нормирование ровности

Рекомендуется учитывать, что нормативные значения отечественных показателей ровности и международных показателей хорошо коррелируются между собой. Интегральные показатели ровности (например, IRI и т.д.) имеют одинаковую физическую природу и могут быть интерпретированы как отношение среднего модуля относительной скорости подрессоренных и неподрессоренных масс действительного или модельного транспортного средства к скорости его движения. Различия получаются из-за нелинейностей динамических систем. При одинаковых скоростях движения приборов при определении этих показателей и при линейности системы эти показатели линейно связаны между собой и мало зависят от коэффициента формы СПД ординат микропрофиля.

Локальную оценку ровности целесообразно проводить по значениям IRI для отрезков участков автомобильной дороги длиной от 25 до 100 м – IRI_l. Разброс значений IRI_l больше разброса значений IRI для участков длиной 1000 м, поэтому нормирование IRI_l отличается от нормирования IRI.

Показатель IRI является интегральным косвенным критерием оценки ровности дорожной поверхности участков дорог, принятым в международной практике. Он характеризует воздействие в вертикальном направлении от дорожного покрытия на стандартную динамическую систему, моделирующую одноосный прицеп (двухмассовая модель колебаний транспортного средства).

Этот показатель аналогичен показателю прибора ПКРС-2, используемого для оценки ровности автомобильных дорог при их ее содержании, т.е. показатель IRI – отношение суммарного относительного перемещения подрессоренных и неподрессоренных масс (кузова и моста) к пройденному автомобилем расстоянию (размерность: мм/м или м/км). Этот показатель интегрально оценивает ровность в диапазоне дорожных частот λ от 0,07 до 0,7 цикл/м (в полосе длин волн неровностей l от 1,5 до 15 м). Значение IRI определяется для отрезков участка различной длины и для всего участка.

Он может быть определен для отрезков длиной 10 м (IRI_{10}) и 50 м (IRI_{50}) и для всего участка ($IRI_У$). Значения IRI_{10} и IRI_{50} позволяют оценить ровность отрезков участков соответствующей длины, а значения $IRI_У$ позволяют сопоставить различные участки маршрута по ровности их поверхности и по воздействию на транспортное средство.

Для оценки ровности показателем IRI в различных диапазонах длин неровностей рекомендуется использовать показатель $IRI_ф$, получаемый по отфильтрованному микропрофилю автомобильной дороги.

В среднем для наиболее вероятностных значений коэффициента формы СПД ординат микропрофиля не менее 70 % значения IRI приходятся на

диапазон длин неровностей до 4 м, не менее 90 % - до 10 м, на неровности длиной менее 0,4 м приходится не более 10 % значений IRI.

Предельно-допустимые значения по ровности автомобильных дорог I, II категорий значения IRI от 4,5 до 5,5 мм/м. Современные технологии строительства и ремонта автомобильных дорог позволяют получить значения в 2,5-3 раза меньше. При менее совершенных технологиях значения IRI получаются в 1,8-2,0 раза меньше предельных значений.

Показатель, аналогичный показателю IRI для оценки ровности в продольной вертикальной плоскости (для оценки продольного микропрофиля), называется IRI поперечных кренов – $IRI_{попер}$. Он определяет отношение к пройденному пути модуля суммарного относительного углового перемещения подрессоренных (кузова) и неподрессоренных (мосты) масс двухмассовой линейной модели колебаний, например, одноосного прицепа с записанными параметрами и при заданной скорости движения прицепа.

Уравнения поперечных колебаний такой модели имеют вид:

$$J_1\varphi_1 + r_{1\varphi}\,\varphi_1 + c_{1\varphi}\,\varphi_1 - r_{1\varphi}\,\varphi_2 - c_{1\varphi}\,\varphi_2 = 0;$$

$$J_2\varphi_2 + r_{1\varphi}\,\varphi_2 + (c_{1\varphi} + c_{2\varphi})\varphi_2 - r_{1\varphi}\,\varphi_1 - c_{1\varphi}\,\varphi_1 = c_{1\varphi}\,\varphi_{non} \quad , \qquad (5.6)$$

где J_1, J_2 - моменты инерции подрессоренных и неподрессоренных масс относительно центральных предельных осей, $r_{1\varphi}$ - коэффициент вязкого трения в подвеске прицепа (при его угловых поперечных колебаниях $r_{1\varphi} = 2r_1 \cdot d^2_p$, ($r_1$ - коэффициент вязкого трения в амортизаторах, d^2_p - рессорная колея); $c_{1\varphi}$ - угловая жесткость подвески ($c_{1\varphi} = 2c_1 d^2_p$, c_1 - жесткость рессор); $c_{2\varphi} = 2c_2B^2$ (c_2 - радиальная жесткость шин прицепа, $2B$ - колея прицепа); φ_1 и φ_2 - углы поперечного крена подрессоренных и неподрессоренных масс прицепа, $\varphi_{поп}$ – поперечный угол наклона поверхности автомобильной дороги под колесами прицепа ($\varphi_{non} = [q_п(t) - q_л(t)]/(2B)$, $q_{л,п}(t)$ - ординаты микропрофиля под левыми и правыми колесами прицепа).

Предлагаются следующие значения параметров стандартной динамической системы (они аналогичны параметрам динамической системы,

принимаемой при расчете IRI): J_1= 1,0; J_2 = 0,15; $r_{1\varphi}$ = 6,0; $c_{1\varphi}$ = 63,3; $c_{2\varphi}$ =653. Колея прицепа принимается равной колее тележки автопоезда: $2B$ = 3160 мм.

По другому определению предлагаемый критерий принимают равным отношению среднего (за пройденный путь) модуля относительной угловой скорости поперечного крена подрессоренных и неподрессоренных масс стандартной динамической системы к скорости движения:

$$IRI_{попер} = [m_{(\varphi 2 - \varphi 1)}]/v = 1/L \int \left| \varphi_2 - \varphi_2 \right| dt \quad . \qquad (5.7)$$

Осредненный поперечный уклон определяют по формуле:

$$\overline{\varphi}_{non}(l) = \Sigma \varphi_i(l) = 1/2B \times \Sigma [q_{i\,n}(l) - q_{i\,л}(l)]; \quad 1/n \quad , \qquad (5.8)$$

где $2B$ = 3160 мм - колея транспортного средства; $[q_{i\,n}(l) - q_{i\,л}(l)]$ - разность ординат микропрофиля по левой и правой колее; $\varphi_i\,(l)=1/2B\times[q_{i\,n}(l)-q_{i\,л}(l)]$ - значение поперечного уклона (радианы) под I ой осью; n = 14 - число осей.

Этот показатель также рекомендуется для использования, учитывая влияние поперечных угловых колебаний транспортного средства на безопасность транспортировки груза.

5.3.5 Методика исследования

Массивы ординат микропрофилей участков автомобильных дорог записывают в файлах на компьютер и последовательно обрабатывают с использованием разработанного программного комплекса.

В результате обработки для каждого участка рекомендуется получать следующие параметры, характеризующие ровность его поверхности, например:

- значения международного индекса ровности (IRI_{50}) для отрезков участков автомобильных дорог длиной 50 м;
- значения международного индекса ровности (IRI_{10}) для отрезков участков автомобильных дорог длиной 10,0 м;
- значения переменной составляющей поперечного угла наклона прямой, проходящей через точки контакта колес транспортного средства по левому и

правому борту (переменная составляющая поперечного уклона профиля поверхности дороги на базе, равной колее транспортного средства – 3160 мм);

- значения переменной составляющей поперечного угла наклона поверхности дороги на базе, равной колее транспортного средства, осредненного по базе платформы (тележки), используемой для транспортировки груза;
- значения для участков длиной 10,0 м параметра, аналогичного международному индексу ровности, для оценки реакции стандартной линейной динамической системы на поперечные угловые воздействия от конструкции автомобильной дороги.

Значения поперечного уклона (его переменной составляющей), определяют возмущающее воздействие на транспортное средство под его соответствующую ось; осредненные по длине тележки значения поперечного уклона определяют суммарное воздействие от автомобильной дороги на поперечные угловые колебания транспортного средства.

5.3.6 Порядок экспериментальных исследований

Производят запись микропрофилей исследуемых участков. Одновременно рекомендуется использовать два прибора ДПП, установленные на расстоянии 3160 мм друг от друга. При проезде маршрута двигаются посередине полосы движения. Правый ДПП рекомендуется позиционировать на расстоянии от 1,7 до 2,0 м от кромки. Скорость движения выбирается более 40 км/ч, но на некоторых участках из-за помех со стороны других транспортных средств и из-за больших неровностей эту скорость в ряде случаев приходится уменьшать. Участки, где было зарегистрировано уменьшение скорости при обработке записей микропрофилей, выделяют отдельно и исключают из анализа.

5.3.7 Обработка результатов

Рекомендуется выполнять два заезда с записью микропрофиля дорожного покрытия. В рекомендуемой для практического применения

таблице 5.1 приводятся номера участков и их наименования в соответствии с картой маршрута, указываются длины участков, где были обработаны записи микропрофиля. Привязку участков к карте маршрута задают с погрешностью 20-30 м.

Таблица 5.1 Участки маршрута

№ участка	Наименование	Длина, м	Скорость движения ДПП, км/ч	Обработка записей микропрофиля	Полоса движения на проезжей части
1	2	3	4	5	6

5.3.8 Вычисленные значения поперечного угла наклона прицепа с грузом – это динамические значения угла поперечного крена. Полные значения этого угла на обследованных участках маршрута будут равны динамическим значениям, сложенным со статическим значением, определяемым постоянным поперечным углом наклона дорожной поверхности. Этот угол прибором ДПП не регистрируется.

5.3.9 Постоянную составляющую угла поперечного наклона поверхности дорожного покрытия оценивают из заданного проектного поперечного профиля. На поворотах, где скорость автопоезда будет в 2-2,5 раза меньше, чем на прямолинейных участках маршрута, динамические значения углов поперечного крена прицепа будут меньше, но к ним добавятся углы крена от центробежных сил. Чтобы оценить эти углы, надо знать угловую жесткость подвески транспортного средства и положение по высоте центра тяжести прицепа с грузом, между тем, эти углы будут достаточно малыми. Более точную оценку значений угла поперечного крена прицепа с грузом при движении автопоезда на маршруте можно получить, если промоделировать это движение, зная необходимые параметры транспортного средства.

5.3.10 Коэффициент ровности и коэффициент IRI рекомендуется применять совместно с информацией об амплитуде и частоте встречающихся на дороге неровностей. Для точного и полного анализа потребительских свойств автомобильной дороги необходимо снимать и использовать профилограмму поверхности дорожного покрытия, причем желательно не только по полосе наката, а по всей полосе движения.

5.3.11 Для точной оценки коэффициента динамичности, нормальной реакции на колесах прицепа, вертикальных и поперечных ускорений и углов поперечного крена прицепа рекомендуется проводить расчет колебаний динамической системы, для чего нужно знать достаточно точно ее параметры: массовые (масса, положения центров тяжести груза и прицепа, их моменты инерции), жесткости шин колес прицепа и коэффициенты трения в них.

5.4 Методика учета накопления неровностей на основе измерения ровности дорожных покрытий по методике О.А.Красикова

5.4.1 Сущность метода

Метод основан на получении и обработке данных с помощью прицепного оборудования передвижной дорожной диагностической лаборатории, например [9].

5.4.2 Инструментальные средства

Передвижная дорожная лаборатория, оснащенная толчкомером, бесконтактным датчиком перемещений, прибором контроля ровности, например, ПКРС-2У, толчкомером ТЭД-2М, устройством «Мерлин» или их аналогами.

5.4.3 Проведение испытаний

При оценке ровности дорожных покрытий следует соблюдать нормируемые параметры и учитывать их отклонения при обработке результатов измерений: приведение, например, к ПКРС-2У или базовому толчкомеру ТХК-2; приведение к нормированной нагрузке в кузове; приведение к базовому автомобилю; приведение к расчетной скорости 50

км/ч. Ровность дорожных покрытий может измеряться другими средствами измерения, имеющими устойчивую корреляционную связь с прицепной установкой ПКРС-2У. Правила производства полевых работ с такими приборами изложены в технических паспортах и нормативных документах.

В международной практике ровность дорожных покрытий характеризуют международным индексом ровности IRI, который представляет собой сумму вертикальных отклонений фактической поверхности дорожного покрытия от идеализированной ровной поверхности.

Наиболее распространенными показателями IRI являются 1,5-2,5 м/км для автомобильных дорог с черными покрытиями и 3-4 м/км для гравийных дорог, находящихся в хорошем состоянии.

5.4.4 Пример 3. Для перехода от показания толчкомера к показанию IRI установлена корреляционная связь вида:

$$IRI=4{,}387x10^{-1}-3{,}367x10^{-2}S+1{,}742x10^{-1}xS^{2}-1{,}225x10^{-5}xS^{3}+$$
$$+3{,}677x10^{-8}xS^{4}-4{,}124x10^{-11}S^{5} \qquad (5.9)$$

где S - показание толчкомера ТХК-2, см/км.

В данной формуле коэффициенты приведения размерностей присутствуют при коэффициентах аппроксимации по умолчанию.

С использованием данной зависимости установлены нормы ровности дорожных покрытий по индексу IRI для автомобильных дорог, таблица 5.2.

Таблица 5.2 Нормы ровности дорожных покрытий по индексу IRI

№ п/п	Нормы ровности дорожных покрытий							
	Оценка IRI	IRI	По типам покрытий					
			капитальный		облегченный		переходные и низшие	
			По толчкомеру, см/км	IRI	По толчкомеру, см/км	IRI	По толчкомеру, см/км	IRI

1	Хорошо	До 2	До 65	До 2,8	До 105	До 6	До 175	До 10
2	Удовлетво-рительно	2–4	65–72	2,8–3,6	105–125	6–7,2	175-215	10–11,6
3	Неудовлет-ворительно	4–6	75–130	3,6-7,6	125–160	7,2–9,2	215–260	11,6–13,2
4	Плохо	Свы-ше	Св. 130	Св. 7,6	Св. 160	Св. 9,2	Св. 260	Св. 13,2

Установление корреляционных связей между показаниями отечественных и зарубежных приборов по измерению ровности дорожных покрытий рекомендуется вести следующим образом.

5.4.5 Пример 4. Показатель IRI определяется с использованием устройства «Мерлин» (рисунок 5.6), предназначенного для проведения измерений ровности дорожных покрытий - отклонений поверхности дорожного покрытия от условной прямой или для калибровки других приборов по измерению ровности.

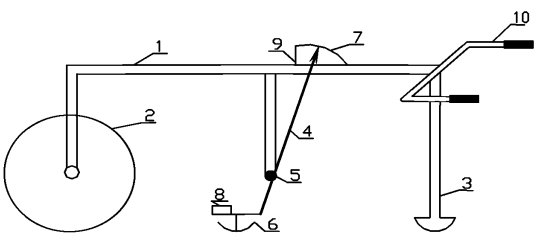


Рисунок 5.6 - Общий вид измерительного устройства «Мерлин»: 1 – рама; 2 – колесо; 3 – стойка с криволинейным основанием; 4 – рычаг; 5 – ось; 6 – зонд; 7 – указатель; 8 – груз; 9 – крепление листа; 10 – ручки

Для вывода зависимости индекса ровности IRI от показаний толчкомера ТЭД-2М произведены измерения ровности дорожного покрытия на одних и тех же опытных участках измерительным устройством «Мерлин» и

толчкомером ТЭД-2М. В результате было получено поле корреляции (рисунок 5.7) и уравнение аппроксимирующей связи в виде кривой, описывающей искомую зависимость:

$$IRI = 0{,}0241 \times S + 0{,}8253 \ , \qquad (5.10)$$

где S – показания толчкомера ТЭД-2М, см/км.

Полученное уравнение должно корректироваться для каждого толчкомера на основе калибровочных испытаний с измерительным устройством.

5.4.6 Обработка результатов

С использованием подобной зависимости получаются нормы ровности дорожных оснований и покрытий по индексу IRI в период после строительства, реконструкции или капитального ремонта и в период эксплуатации для капитальных, облегченных, переходных и низших типов покрытий в зависимости от интенсивности движения транспорта.

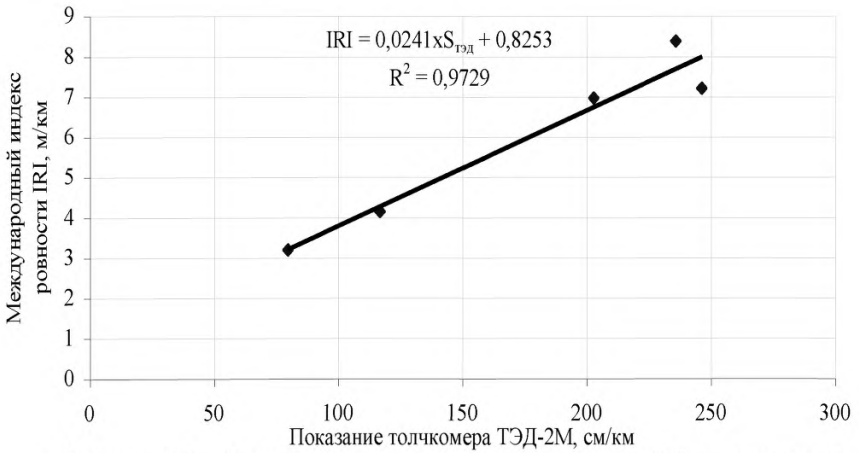


Рисунок 5.7 - Корреляционная зависимость индекса IRI от показаний толчкомера ТЭД-2М

6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ РОВНОСТИ

6.1 Коэффициент динамичности

6.1.1 При движении транспортных средств касательные и вертикальные воздействия от колес на дорожную конструкцию имеют динамический характер и переменны по величине, направлению и статистическим показателям.

Динамическое воздействие транспортного средства на дорожную конструкцию становится значимым при движении по неровной поверхности дорожного покрытия, сопровождающемся ударами и колебаниями колес и кузова.

Коэффициент динамичности рекомендуется определять по формуле:

$$K_{\partial i(t)} = \frac{p_i(t) + (M_i + m_i) \cdot g}{(M_i + m_i) \cdot g} \quad , \qquad (6.1)$$

где $K_{\partial i(t)}$ – функция коэффициента динамичности от времени, $p_i(t)$ – динамическая составляющая нагрузки i-й оси, g – ускорение свободного падения, M_i и m_i – подрессоренная и неподрессоренная массы транспортного средства.

Динамическая составляющая нагрузки определяется произведением вертикального ускорения на массу транспортного средства, распределенную на i–ю ось.

6.1.2 Нормативные межремонтные сроки службы дорожных покрытий устанавливают по моменту достижения ими предельно допускаемого эксплуатационного состояния, оцениваемого их ровностью. Эти значения связывают с безопасностью движения и проектным уровнем надежности дорожной конструкции в целом. Например, при уровне надежности 0,95 (автомобильная дорога I категории) накопленные неровности на дорожном покрытии по толчкомеру ТХК-2 на автомобиле УАЗ не должны быть больше

80–100 см/км, а при надежности 0,9 – не более 170 см/км (III категория). При превышении этих показателей дорожное покрытие подлежит ремонту.

Пример 5. На рисунке 6.1 показана типовая расчетная схема и аналитические зависимости для определения силы динамического воздействия колеса на поверхность дорожного покрытия при наличии на ней одной из часто встречаемых неровностей в виде впадины, выбоины или ямы.

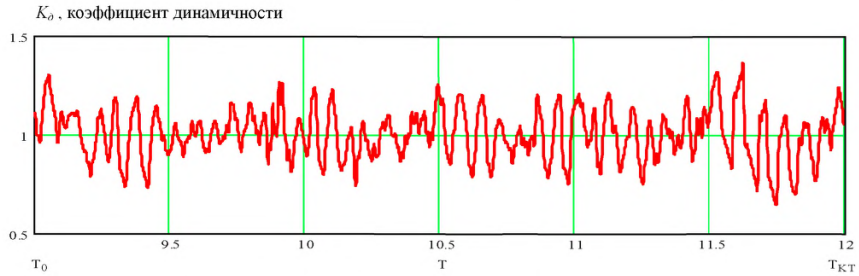


Рисунок 6.1 Амплитудно-временная характеристика коэффициента динамичности

На дорожных покрытиях могут быть неровности глубиной от 6 до 10 мм (в среднем 8 мм), [3] допускает их в количестве не более 10 %. Грузовое транспортное средство при весе заднего моста с колесами всего около 2–3 % от его общего веса с грузом при проезде на скорости 60 км/ч этой неровности шириной или диаметром 0,5 м воздействует на покрытие с максимальной динамической силой, превосходящей статическую нагрузку на эти колеса примерно в 1,5 раза (коэффициент динамичности $K_д$=1,45).

При неровностях большей глубины или высоты динамические нагрузки возрастают еще значительнее. Например, при движении по ровному покрытию коэффициент динамичности не выходит за пределы 1,15. На неровной проезжей части с повышением скорости до 80 км/ч этот коэффициент динамичности возрастает до 3,0

6.1.3 Коэффициент динамичности зависит от загруженности транспортного средства: для грузовых транспортных средств при полной

(номинальной) нагрузке он составляет от 1,4 до 1,8; для ненагруженного – от 2,0 до 2,4. Увеличение скорости движения сопровождается вначале быстрым ростом коэффициента динамичности, затем замедленным ростом. Для высоких скоростей его значение практически не изменяется. Коэффициент динамичности зависит от геометрии неровностей дорожного покрытия, квадрата скорости движения, механических свойств транспортного средства. В общем случае это функция времени – $k_д(t)$.

6.1.4 С учетом результатов работ профессора Е.В.Угловой рекомендуется следующий порядок статистического анализа коэффициента динамичности [26].

1. При обработке числовых экспериментальных рядов исследуется непротиворечие закону нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}, \qquad (6.2)$$

где x – значение случайной величины, μ – среднее значение, σ^2 – дисперсия.

2. Для оценки достоверности этой гипотезы используются разные критерии и оценки, например, связанные с анализом симметрии. Коэффициент асимметрии определяется формулой:

$$A = \frac{1}{n\sigma^2}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^3 . \qquad (6.3)$$

3. Оценивается отклонение формы экспериментальной кривой от нормальной, т.е. вычисляется коэффициент эксцесса:

$$A = \frac{1}{n\sigma^4}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^4 . \qquad (6.4)$$

4. Рекомендуется проводить анализ гистограмм распределения коэффициента динамичности по критериям «толстые и укороченные хвосты распределений» и «тонкие и длинные хвосты распределений».

Пример 6. Такой анализ можно провести на типовом примере гистограммы распределения коэффициента динамичности, полученной Е.В.Угловой (рисунок 6.2).

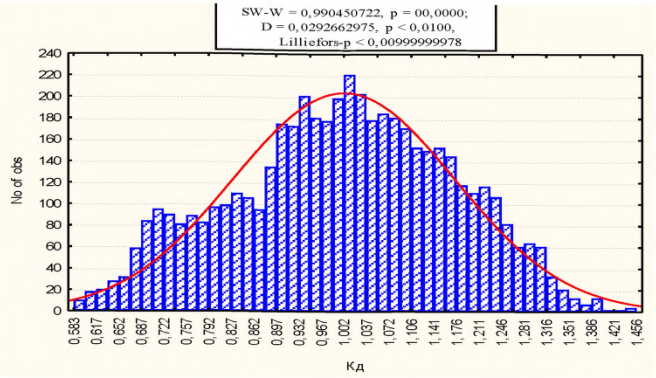


Рисунок 6.2 Гистограмма распределения коэффициента динамичности на участке Азов-Староминская км 45 при проезде автомобиля ВАЗ-21213 со скоростью 100 км/ч

5. На основе функции $k_д(t)$ определяются характеристики коэффициента динамичности на участке автомобильной дороги.

Максимальный коэффициент динамичности:

$$k_д^{\max} = \max_{t\in[t_1,t_2]} k_д(t) \quad , \qquad (6.5)$$

- максимальное значение коэффициента динамичности на исследуемом участке автомобильной дороги. Время t_1 соответствует началу, а t_2 – концу прохождения участка.

Этот показатель характеризует максимальное воздействие транспортного средства на автомобильную дорогу. В предположении о постоянстве скорости движения он может свидетельствовать о степени локальной неровности или поврежденности дорожного покрытия. Время, соответствующее значению $k_д^{\max}$, - момент проезда этой неровности.

Средний коэффициент динамичности рекомендуется определять следующим образом. Пусть τ – совокупность интервалов на отрезке $[t_1, t_2]$, на которых коэффициент динамичности больше единицы. Тогда величина:

$$k_{\partial}^{cp} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{\tau_1} k_{\partial}(t) dt \qquad (6.6)$$

может быть принята за оценку среднего коэффициента динамичности на участке автомобильной дороги.

Продолжительность динамических перегрузок рекомендуется определять с учетом того, что в отечественных нормативных документах в качестве предельного коэффициента динамичности принято значение 1,3. Превышение коэффициента динамичности значения этого значения можно расценивать как динамические перегрузки. Пусть $\tau_{1,3}$ - совокупность интервалов на отрезке $[t_1, t_2]$, на которых коэффициент динамичности больше 1,3. Тогда за меру динамической перегрузки можно принять:

$$T_{перегр} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{\tau_{1,3}} dt \qquad (6.7)$$

- доля времени, когда воздействие на дорогу больше нормативного.

Средний коэффициент динамических перегрузок определяется как:

$$k_{\partial}^{перегр} = \frac{\int_{\tau_{1,3}} k_{\partial}(t) dt}{\int_{\tau_{1,3}} dt} \qquad (6.8)$$

Коэффициент устанавливает средний коэффициент динамичности на участках перегрузки. При фиксированной скорости движения для одного и того же транспортного средства указанные величины характеризуют неровность рассматриваемого участка.

Степень изменчивости динамического воздействия транспортного средства при движении на дорожное покрытие по отношению к статическому

воздействию выражается минимальным и максимальным коэффициентами динамичности:

минимальный $K_{дин} = P_{мин} / P_{стат}$, максимальный $K_{дин} = P_{макс} / P_{стат}$, (6.9)

где $P_{мин}$, $P_{макс}$ – минимальное и максимальное значение нагрузки колеса на дорожное покрытие при движении транспортного средства, $P_{стат}$ – статическая нагрузка колеса на покрытие.

6. Для оценки динамического воздействия используются различные критерии. Наиболее распространённые из них можно разделить на 2 группы.

Первая группа коэффициентов (коэффициент динамической нагрузки DLC, динамический коэффициент транспортного средства (оси), совокупный коэффициент силы (DAFC) определяет отношение динамических усилий, возникающих при проезде транспортного средства к его статическому весу.

7. Ко второй группе (дорожный коэффициент напряжения F, совокупный критерий силы, коэффициент усталостного повреждения ESAL) можно отнести критерии, позволяющие оценить динамические перегрузки посредством определения размеров различных видов дорожных повреждений, вызванных проходом нагрузок. При этом в качестве характеристики динамических нагрузок на колесо автомобиля за рубежом используется показатель DLC, представляющий собой отношение:

$$DLC = M/N \quad , \qquad (6.10)$$

где M - среднеквадратичное отклонение, N - статическое значение нагрузки на колесо.

Данный коэффициент отражает физический смысл коэффициента вариации. При расчете нагрузки на дорожную конструкцию в отечественных нормативных документах коэффициент динамичности принимают равным 1,3.

8. При эксплуатации автомобильных дорогах динамическое воздействие транспортных средств выражено коэффициентом динамичности, значение

которого больше нормативного, равного 1,3, и рассматривается как динамические перегрузки.

9. При проектировании жестких дорожных одежд в соответствии с ОДМ «Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд» коэффициент динамичности допускается принимать в зависимости от осевой массы автомобиля (таблица 6.1).

Таблица 6.1 Коэффициенты динамичности для расчета жестких дорожных одежд

Осевая масса автомобиля, т	2	4	6	8	10	12
$K_{дин}$	1,6	1,3	1,15	1,08	1,06	1,04

10. Исследования, проведенные профессором Смирновым А.В., позволили рекомендовать следующие коэффициенты динамичности для ровных вновь устраиваемых дорожных покрытий (таблица 7.1).

Таблица 6.1 Коэффициенты динамичности для ровных вновь устраиваемых покрытий

Скорость движения автомобиля, км/час	20	40	50	60	70	80	100	120
Максимальный коэффициент динамичности	1,1	1,3	1,4	1,55	1,62	1,7	1,75	1,8
Минимальный коэффициент динамичности	0,9	0,7	0,6	0,45	0,37	0,3	0,25	0,2

11. При расчете дорожных одежд профессор Радовский Б.С. предлагает учитывать коэффициент динамичности колесной нагрузки, имеющий следующие величины (таблица 6.2).

Таблица 6.2 Коэффициент динамичности колесной нагрузки

Скорость движения автомобиля, км/час	10	20	30	40	50	60	80	100
Коэффициент динамичности	1,12	1,21	1,28	1,34	1,38	1,41	1,45	1,47

Анализ таблиц 7.1 и 7.2 показывает, что при скорости движения автомобиля более 40 км/ч рекомендуется использовать значение коэффициента динамичности свыше 1,3.

6.2 Определение вероятности появления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности (методика В.В.Столярова)

6.2.1 Вероятность (техническая составляющая оценки степени риска появления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности определяется по формуле:

$$r = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{K_{дин50}^{\max} - K_{динФ}}{\sqrt{\sigma^2_{K_{дин50}^{\max}} + \sigma^2_{K_{динФ}}}}\right), \qquad (6.11)$$

где r – вероятность появления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности; $K_{дин50}^{\max}$ - критический (максимальный) коэффициент динамичности, при котором вероятность возникновения неровностей равна 50%; $K_{динф}$ – фактический коэффициент динамичности; $\sigma_{K_{динФ}}$ – среднее квадратическое отклонение фактического

коэффициента динамичности; $\sigma^2_{K_{дин50}^{max}}$ - среднее квадратическое отклонение критического (максимального) коэффициента динамичности; Ф(U) – функция Лапласа (интеграл вероятности).

6.2.2 Показатели $K_{динФ}$ и $\sigma_{K_{динФ}}$ определяют в результате статистических расчетов по достаточному числу замеров коэффициента динамичности.

Параметры $K_{дин50}^{max}$ и $\sigma_{K_{дин50}^{max}}$ устанавливают в зависимости от допустимой величины коэффициента динамичности ($K_{дин}^{доп}$) и коэффициента вариации фактического коэффициента динамичности (C_V):

- при $C_V \neq 0{,}2$

$$K_{дин50}^{max} = 2 \cdot K_{дин}^{доп} - \frac{\sqrt{(K_{дин}^{доп})^2 + [25(C_V)^2 - 1][(K_{дин}^{доп})^2 - 25\sigma^2_{K_{дин}^{доп}}]} - K_{дин}^{доп}}{25\left(C_V\right)^2 - 1}; \quad (6.12)$$

- при $C_V = 0{,}2$

$$K_{дин50}^{max} = 2K_{дин}^{доп} - \frac{(K_{дин}^{доп})^2 - 25 \cdot \sigma^2_{K_{дин}^{доп}}}{2 \cdot K_{дин}^{доп}}. \quad (6.13)$$

где $K_{дин}^{доп}$ - допустимое значение коэффициента динамичности; $\sigma_{K_{дин}^{доп}}$ – среднее квадратическое отклонение допустимого коэффициента динамичности; C_V - коэффициент вариации фактического коэффициента динамичности, определяемый по зависимости:

$$C_V = \frac{\sigma_{K_{динФ}}}{\mathrm{К_{дин_Ф}}}. \quad (6.14)$$

Параметр $\sigma_{K_{дин50}^{max}}$ определяют по формуле:

$$\sigma_{K_{дин50}^{max}} = C_V \cdot K_{дин50}^{max}. \quad (6.15)$$

6.2.3 Пример 7. Применение методики В.В.Столярова применительно к двум характерным участкам автомобильной дороги II категории.

1. При расчете нагрузки на дорожную конструкцию в отечественных нормативных документах допустимый коэффициент динамичности ($K_{дин}^{доп}$) принимают равным 1,3.

2. Значение коэффициента вариации допустимого коэффициента динамичности принимают равным C_V=0,05, характерным для строительства.

3. Устанавливают среднее квадратическое отклонение допустимого коэффициента динамичности $\sigma_{K_{дин}^{доп}}$=0,05•1,3=0,065.

4. В результате статистической обработки исходных данных установлены фактические данные на двух участках автомобильной дороги (таблица 6.3).

Таблица 6.3 Данные на двух участках автомобильной дороги

№ участка	$K_{дин\,ф}$	$\sigma_{K_{дин\,ф}}$	C_V
I	0,985	0,19	0,193
II	1,019	0,27	0,262

5. Определим критический (максимальный) коэффициент динамичности: для I участка:

$$K_{дин50}^{\max} = 2 \cdot 1{,}3 - \frac{\sqrt{(1{,}3)^2 + [25(0{,}193)^2 - 1][(1{,}3)^2 - 25 \cdot 0{,}065^2]} - 1{,}3}{25 \cdot 0{,}193^2 - 1} = 1{,}98;$$

для II участка:

$$K_{дин50}^{\max} = 2 \cdot 1{,}3 - \frac{\sqrt{(1{,}3)^2 + [25(0{,}262)^2 - 1][(1{,}3)^2 - 25 \cdot 0{,}065^2]} - 1{,}3}{25 \cdot 0{,}262^2 - 1} = 2{,}068.$$

6. Определяют среднее квадратическое отклонение критического (максимального) коэффициента динамичности:

для I участка: $\sigma_{K_{дин_{50}}^{max}} = 0{,}193 \cdot 1{,}98 = 0{,}38$;

для II участка: $\sigma_{K_{дин_{50}}^{max}} = 0{,}262 \cdot 2{,}068 = 0{,}54$.

7. Определим вероятность дополнительного накопления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности:

для I участка:

$$r = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{1{,}98 - 0{,}985}{\sqrt{0{,}38^2 + 0{,}19^2}}\right) = 0{,}5 - \Phi(2{,}34) = 0{,}5 - 0{,}4903581 = 0{,}0096.$$

для II участка: $r = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{2{,}068 - 1{,}019}{\sqrt{0{,}54^2 + 0{,}27^2}}\right) = 0{,}5 - \Phi(1{,}78) = 0{,}5 - 0{,}4591 = 0{,}04$.

8. Обработка результатов. Выводы.

Для автомобильной дороги II категории при уровне надежности 0,95 допустимая вероятность накопления неровностей равна 0,05. На I участке при фактическом коэффициенте динамичности равном 0,985 наблюдается только лишь 0,96 м^2 неровностей из 100 м^2, а на II участке при фактическом коэффициенте динамичности равном 1,019 уже наблюдается возникновение неровностей на 4 м^2 из 100 м^2.

6.3 Методика анализа изменения коэффициента динамичности

6.3.1 Грузовые транспортные средства имеют близкие значения собственных частот и движутся по автомобильной дороге заданного микропрофиля с приблизительно одинаковой скоростью. Наибольшие значения динамических нагрузок реализуются на ограниченных участках автомобильной дороги (пространственная повторяемость динамических нагрузок), где дорожное покрытие подвержено ускоренному усталостному разрушению. О нарушении условия безотрывного движения свидетельствует отрицательное значение контактного усилия между колесом и автомобильной

дорогой. При коэффициенте динамичности более 2,0 возможен отрыв колес транспортного средства от поверхности проезжей части.

6.3.2 При моделировании динамического воздействия транспортных средств на участках с плохой ровностью (при скорости грузового транспортного средства 80 км/ч средний коэффициент динамичности обычно больше 1,1, максимальный коэффициент динамичности - больше 1,6) рекомендуется проверка условия безотрывного движения на заданных скоростных режимах.

6.3.3 При уменьшении осевой нагрузки коэффициент динамичности увеличивается. Это связано с характеристиками транспортного средства, с соотношением подрессоренной и неподрессоренной массы. На участках с неудовлетворительным показателем ровности максимальный коэффициент динамичности превышает нормативное значение 1,3 на всем диапазоне изменения осевой нагрузки, а на участках с удовлетворительным показателем ровности - при малом соотношении подрессоренной и неподрессоренной массы.

6.3.5 Средний коэффициент динамичности для достаточно ровных участков автомобильных дорог незначительно повышается с уменьшением осевой нагрузки, но не превышает значения 1,2 на всем диапазоне ее изменения.

6.3.6 Динамическое воздействие нагрузки учитывается при проектировании дорожных одежд. Известны результаты П.И.Теляева и Ю.И.Смирнова, полученные в Ленинградском филиале Союздорнии в 1980-х годах. Эксперименты были проведены на участках, продольный профиль которых был заранее измерен, с измерением вертикальную нагрузку в движении. Считая предельно допустимой продольную неровность высотой 7 мм, с обеспеченностью 95% при скорости движения грузового автомобиля 80 км/ч был получен коэффициент динамичности 1,3, а для неровности высотой 10 мм при скорости 60 км/ч - коэффициент динамичности 1,33.

6.3.7 Е.В.Угловой на основе анализа максимального коэффициента динамичности на 5,0 % протяженности участка (расчеты выполнены для 38 участков автомобильных дорог) предложены следующие значения коэффициента динамичности для участков с обеспеченным показателем ровности (таблица 6.4).

Таблица 6.4 Предложенные значения коэффициента динамичности для расчета нежестких дорожных одежд

Осевая масса автомобиля, т	2	4	6	8	10	12
$К_{дин95\%}$	1,4	1,3	1,2	1,18	1,15	1,1

6.3.8 Для участков автомобильных дорог с неудовлетворительной ровностью коэффициенты динамичности следует рассчитывать на основе модели взаимодействия «транспортное средство - дорога», так как на этих участках наблюдается значительный разброс величин коэффициента динамичности (от 1,2 до 2,5) в зависимости от микропрофиля дорожного покрытия, осевой нагрузки и скорости движения автомобиля.

6.3.9 Для оценки влияния ровности эксплуатируемых дорожных покрытий на уровень динамического воздействия транспортных средств рекомендуется выполнять расчет коэффициентов приведения транспортных средств к расчетной нагрузке с учетом их динамического воздействия на участках автомобильных дорог с различным показателем ровности.

6.3.10 В качестве расчетного коэффициента динамичности эксплуатируемых автомобильных дорог рекомендуется принимать значение максимального коэффициента динамичности заданной вероятности, полученного методом моделирования динамического воздействия грузового транспортного средства при проезде по заданному участку со скоростью 80 км/ч.

6.3.11 При движении транспортного средства на малых скоростях (20–30 км/ч) перемещения массы подрессоренной, т.е. кузов с грузом, и массы неподрессоренной, т.е. колеса и оси, совершаются одновременно и ускорения этих масс имеют одинаковые величины, стремящиеся к нулю, а вертикальное давление равно статической нагрузке. При увеличении скорости движения (40–60 км/ч) наблюдается выделение колебаний подрессоренной массы на рессорах с частотой 1-2 Гц, соответствующей собственной частоте колебаний подрессоренной массы, что сопровождается нарушением синхронности колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс. Подрессоренная масса обладает большой амплитудой колебаний, которые могут превысить высоту неровности. При этом увеличивается динамическое воздействие.

6.3.12 Дальнейшему увеличению скорости движения транспортного средства сопутствует появление более высоких частот колебаний (8–12 Гц); при резонансе, когда в наибольшей мере выявлены инерционные силы неподрессоренных масс, интенсивность колебаний и вертикальное давление достигают максимальной величины. В зависимости от длины неровности и скорости движения транспортного средства появляются колебания, свойственные неподрессоренной массе, либо колебания, характерные для подрессоренных масс, либо же оба вида колебаний одновременно.

6.3.13 Выбор значения коэффициента динамичности в качестве расчетного при оценке динамического воздействия транспортного средства на дорожное покрытие производится следующим образом.

Пример 8. Даже при неудовлетворительной ровности дорожного покрытия среднее значение коэффициента динамичности в редких случаях превышает значение 1,3 (таблица 6.5). Максимальное значение коэффициента динамичности на участке автомобильной дороги при удовлетворительной ровности покрытия может существенно превышать нормативную величину - 1,3, что связано с локальными неровностями на участке.

Таблица 6.5 – Сравнение характеристик динамического воздействия при проезде автомобиля МАЗ по опытным участкам автомобильных дорог

Скорость движения	Участок №1		Участок №2		Участок №3	
	показатель ровности по толчкомеру, 60 см/км		показатель ровности по толчкомеру, 80 см/км		показатель ровности по толчкомеру, 290 см/км	
	$К_{д\ сред}$	$К_{д\ макс}$	$К_{д\ сред}$	$К_{д\ макс}$	$К_{д\ сред}$	$К_{д\ макс}$
20 км/ч	1,02	1,15	1,04	1,25	1,05	1,32
60 км/ч	1,06	1,27	1,09	1,44	1,16	1,74
90 км/ч	1,11	1,35	1,25	1,77	1,29	1,91

6.3.14 Подвижная нагрузка создает в монолитном слое растягивающие напряжения, превосходящие в 1,5 раза для ровного покрытия и в 2,3 раза для неровного величину напряжений, возникающих при статическом нагружении. При учете нагружения дорожного покрытия динамические проявления от воздействия перемещающегося по дороге грузового транспортного средства можно рассматривать как набор контактных напряжений на поверхности дорожного покрытия, зависящий от времени.

6.3.15 При использовании математического моделирования рекомендуется учитывать, что статическая нагрузка прикладывается от каждого колеса транспортного средства; динамическая составляющая учитывается в нагрузке каждого колеса; характер распределения давления по площади отпечатка колеса зависит от типа шин.

6.3.16 При оценке влияния динамических нагрузок на повреждения автомобильной дороги рекомендуется использовать два подхода:

1) первый опирается на статистический анализ транспортных нагрузок и использование «четвертого степенного закона», показывающего степень повреждения дорожной конструкции при движении нагрузок;

2) второй включает вычисление теоретического ущерба, нанесенного автомобильной дороге при прохождении одного или более транспортных средств, путем вычисления с использованием модели реакции дорожной конструкции на действие движущейся динамической нагрузки.

6.3.17 В ряде случаев предполагают, что дорожное повреждение зависит от четвертой степени моментной нагрузки на колесо транспортного средства.

Учитывая, что динамические нагрузки на колесо транспортного средства подчиняются нормальному закону распределения, получено, что коэффициент напряжения равен [26]:

$$\Phi = E[P(t)^4] = (1 + \sigma s^2 + 3s^{-4}) P^4 stat \quad , \quad (6.16)$$

где $P(t)$ - моментная нагрузка на колесо во время t; $P_{stat} = E\,[P\,(t)]$, $s = b/m$ - статическая (средняя) нагрузка на колесо; s - коэффициент вариации динамической нагрузки на колесо; b - среднеквадратичное отклонение; m - среднее значение (коэффициент динамической нагрузки DLC); E - оператор ожидания.

6.3.18 Усталостное разрушение чувствительно к пиковым динамическим нагрузкам, поэтому оно происходит сначала в локализованных областях, где динамические нагрузки высоки.

6.3.19 При исследовании динамического воздействия транспортного средства на конструкцию дорожной одежды в работах Угловой Е.В. использовалась математическая модель взаимодействия «автомобиль – дорожное покрытие» [21].

6.3.20 Рассматривается, что транспортное средство при проезде по неровному дорожному покрытию совершает колебательные движения, оказывая при этом дополнительные динамические перегрузки. При движении транспортного средства на участке с периодически повторяющимися неровностями колебания его подрессоренной и неподрессоренной части совершаются с некоторой частотой.

6.3.21 Предложенный в работах Угловой Е.В. подход реализован в виде программы средствами пакета MathCad (рисунок 6.3). Этот подход рекомендуется к расширенному применению.

6.3.22 Результаты моделирования динамического воздействия транспортных средств с учетом микропрофиля поверхности дорожного покрытия, выполненные для эксплуатируемых участков автомобильных дорог, позволили установить следующие закономерности:

- средний коэффициент динамичности на заданном участке позволяет провести сравнительных анализ участков автомобильных дорог по уровню динамического воздействия транспортных средств. На достаточно ровных участках (с нормативным показателем ровности) средний коэффициент динамичности при эксплуатационных скоростных режимах движения от 60 до 120 км/ч не превышает значения 1,15. На неровных участках средний коэффициент динамичности достигает значения от 1,3 до 1,45.
- средний коэффициент динамичности не позволяет выявлять динамические перегрузки, связанные с локальными неровностями, а также прогнозировать развитие деформаций и поврежденностей (накопление неровностей) дорожного покрытия.

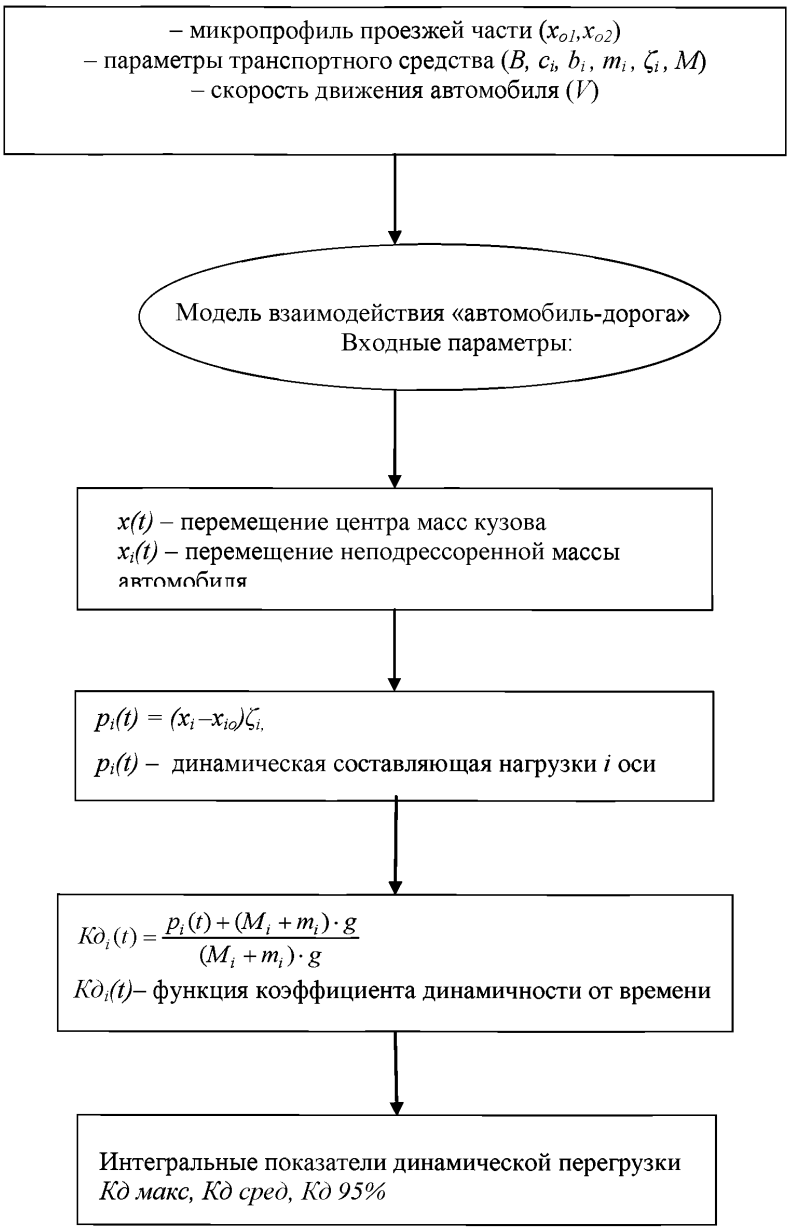


Рисунок 6.3 Расчет коэффициента динамичности на участке автомобильной дороги

6.3.24 Максимальный коэффициент динамичности на ровных участках при скорости движения от 60 до 120 км/ч составляет от 1,3 до 1,8 для легкового и от 1,2 до 1,5 для грузового транспортных средств.

6.3.25 Максимальный коэффициент динамичности связан с одиночной неровностью дорожного покрытия и не отражает уровень динамического воздействия транспортных средств на всем участке автомобильной дороги. На неровных участках максимальные коэффициенты динамичности для легкового транспортного средства достигают значения от 2,5 до 2,8, для грузового – от 2,0 до 2,2.

6.3.26 Микропрофиль (длина волны от 0,2 до 80 м) вызывает интенсивные колебания неподрессоренных и подрессоренной частей автомобиля, и по характеру воздействия на колебательные системы автомобиля делится на коротковолновый диапазон (от 0,2 до 3,5 м), средневолновый (от 3,5 до 15 м) и длинно-волновый (от 15 до 80 м).

6.3.28 Дорожный диапазон неровностей существенно влияющих на колебания автомобиля находится в пределах от 0,2 до 80 м, что следует учитывать при построении цифровой модели поверхности автомобильной дороги для моделирования динамического воздействия транспортных средств на дорожное покрытие.

6.4 Прямой метод оценки динамического взаимодействия колеса транспортного средства и неровностей дорожного покрытия (методика И.М.Рабиновича)

6.4.1 Работы Бируля А.К. и Смирнова А.В. показали, что при увеличении скорости движения наблюдается рост динамической составляющей воздействия, которая увеличивается с увеличением высоты неровности дорожного покрытия. При этом величина динамического воздействия увеличивается и может в два и более раз превысить статическую нагрузку от транспортного средства. Амплитуды колебаний и их частотный диапазон зависят от высоты неровностей, а также от формы и длины. Для различных микропрофилей поверхности автомобильных дорог в зависимости от преобладающих длин неровностей при различных скоростных режимах

может наблюдаться значительное увеличение динамичности воздействия транспортного средства на конструкцию автомобильной дороги.

6.4.2 В качестве информативного параметра оценки динамического воздействия рекомендуется использовать вертикальное ускорение колебаний колеса транспортного средства. Согласно методике И.М.Рабиновича определяется вертикальное ускорение оси колеса при его взаимодействии с накопленной неровностью с учетом радиуса колеса, скорости транспортного средства и геометрии неровностей. Рассматриваются этапы взаимодействия колеса с радиальной поверхностью накопленной неровности (1), с входом и сходом с нее (2). На рисунке 6.4 схематически изображены: профиль сечения неровности, ограниченный кривой OPA, и траектория $C_1CNC_2C_3$ центра C колеса. На участках CC_1 и C_2C_3 эта траектория имеет вид горизонтальной прямой, на участке CNC_2 представляет собою кривую, эквидистантную кривой OPA и отстоящую от нее на расстоянии R, где R - радиус колеса.

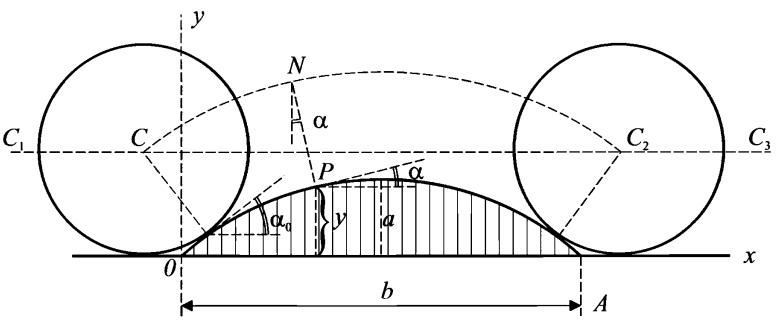


Рисунок 6.4 Схема взаимодействия колеса транспортного средства и накопленной неровности дорожного покрытия

Переход от горизонтального участка к криволинейному совершается резко, т.е. в этой точке траектория имеет две различные касательные. Плавный переход будет, если между неровностью и дорожным покрытием

имеется плавная переходная кривая с радиусом кривизны, большим радиуса R колеса.

Координаты произвольной точки P поверхности неровности обозначаются x, y. Центр C колеса, когда P будет служить точкой касания, займет положение N, характеризуемое координатами:

$$y_N = y + R\cos\alpha,\ x_N = x - R\sin\alpha \quad , \qquad (6.17)$$

где α - угол наклона касательной в точке P кривой OPA к оси x.

Зная уравнение кривой OPA и, делая подстановку (6.17), можно найти уравнение траектории CNC_2, и после двукратного дифференцирования выражения y_N, найти ускорение по вертикальному направлению и вертикальную проекцию давления колеса на накопленную неровность.

Чтобы найти вертикальное ускорение центра колеса, соответствующее любому моменту качения по поверхности неровности (но не моменту вступления на нее или схода с нее), его выражают в функции от радиусов кривизны колеса и поверхности неровности. Первый обозначен R; второй r (радиус кривизны кривой OPA - накопленной неровности). Величина R - постоянна, величина r может быть переменной. Рассматривается кривая OPA как неподвижная полодия, а окружность колеса – как подвижная; точка P касания - мгновенный центр вращения колеса (рисунок 6.5).

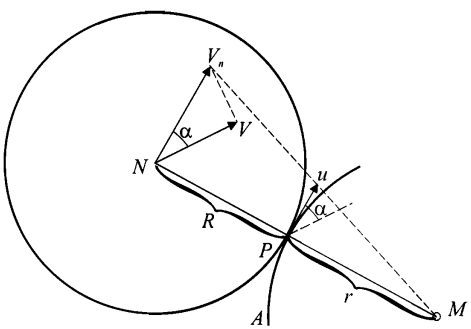


Рисунок 6.5 Расчетная схема

Угловая скорость ω и угловое ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ колеса:

$$\omega = \frac{\upsilon_N}{R} = \frac{\upsilon}{R\cos\alpha} \quad , \tag{6.18}$$

$$\frac{d\omega}{pt} = -\frac{\upsilon^2 \sin\alpha}{R(R+r)\cos^3\alpha} \quad . \tag{6.19}$$

Отрицательный знак перед дробью показывает, что в восходящей части траектории, где $\sin\alpha > 0$, угловое ускорение отрицательно, т.е. направлено в сторону, противоположную направлению угловой скорости ω; в нисходящей части угловое ускорение положительно.

Вектор u есть скорость точки P прямой NM, вращающейся около точки M (центра кривизны неподвижной полодии в точке P). Поэтому:

$$u = \upsilon_N \frac{r}{R+r} = \frac{\upsilon r}{(R+r)\cos\alpha} \quad . \tag{6.20}$$

Ускорение точки P оси колеса направлено по лучу NPM от точки P к N и равно:

$$\omega u = \frac{\upsilon^2 r}{R(R+r)\cos^2\alpha} \quad . \tag{6.21}$$

Ускорение любой точки N неизменяемой плоской системы, движущейся в своей плоскости представляется в виде геометрической суммы ускорения точки P и ускорения вращения точки N относительно P. На рисунке 6.7 показаны три составляющие ускорения точки N. Проекция суммарного ускорения точки N на вертикаль будет равна:

$$j = \frac{\upsilon^2}{(R+r)\cos^3\alpha} \quad . \tag{6.22}$$

Формула представляет решение вопроса о вертикальных ускорениях центра колеса, получаемых во время качения по накопленной неровности.

Вертикальное ускорение j при условии, что колесо катится по выпуклому контуру, направлено вниз. Так как угол α невелик и заключен между пределами $\pm\frac{\pi}{2}$, то знак $Cos\alpha$ сохраняется на всем контуре.

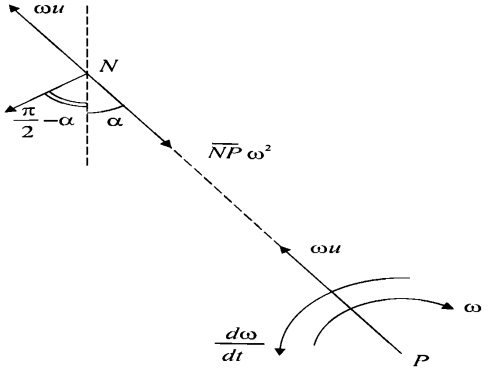


Рисунок 6.6 Расчетная схема

При восходящем и при нисходящем движении колеса ускорение направлено вниз, а сила инерции – вверх; весь период качения колеса по поверхности неровности есть период облегченного давления колеса на накопленную неровность. Ускорение и сила инерции по мере движения колеса изменяются обратно пропорционально величине $(R+r)\cos^3\alpha$. Если сечение неровности представляет собой сечение круга, то ускорение уменьшается по закону $\frac{1}{\cos^3\alpha}$ до достижения высшей точки траектории; где достигает своего минимума. Во время нисходящего движения колеса ускорение увеличивается по тому же закону. Радиусы кривизны колеса R и накопленной неровности r не играют роли каждый в отдельности; величина ускорения зависит лишь от их суммы. Большое колесо, катящееся по профилю большой кривизны и малое колесо, катящееся по профилю малой

кривизны, дают один и тот же эффект, если в обоих случаях сумма $R+r$ - одна и та же.

При данном радиусе r сила инерции будет тем меньше, чем больше будет радиус кривизны R. Колеса большего диаметра вызывают меньшие силы инерции и меньший динамический эффект. При данном радиусе колес R силы инерции будут уменьшаться с увеличением радиуса r. Для этапа взаимодействия колеса с радиальной поверхностью накопленной неровности высота препятствия сама по себе не играет никакой роли; важна кривизна его поверхности.

Формула (6.22) справедлива и при наличии переходной кривой от профиля неровности к дорожному покрытию. Переходная кривая имеет смысл, если по абсолютной величине ее радиус кривизны $[r]>R$; в противном случае колесо не сможет катиться по ней. Так как она обращена выпуклостью по направлению к дорожному покрытию, то $r<0$. Во время движения по переходной кривой ускорение направлено вверх, а давление колеса при этом превышает статическое. При переходе через точку касания обеих кривых ускорение и сила инерции меняют свой знак на обратный.

Формула (6.22) представляет решение вопроса и для движения колеса в углублении или впадине пути.

Также рассматриваются начальный и конечный моменты, т. е. приподнимание колеса с дорожного покрытия, когда оно встречается с накопленной неровностью, и вступление на покрытие, когда покидает неровность. При соблюдении вышеуказанных условий (абсолютной жесткости дорожного покрытия, а также неровности и колеса) ускорение в оба эти момента направлено вверх и равно ∞. Сила инерции также равна ∞. Оба эти момента времени имеют малую продолжительность. Имеется два удара, направленных вниз.

Второй случай можно привести к виду удара груза m, падающего с высоты h'. Формулы представлены в общем виде и годятся при любом выпуклом очертании поверхности накопленной неровности. В случае кругового очертания сечения неровности можно выразить угол α_0 в функции от основных размеров.

Получено:

$$h' = \frac{\upsilon^2}{2g} \cdot \frac{a(2R + 2r - a)}{(R + r - a)^2} \quad . \tag{6.23}$$

Величина удара пропорциональна квадрату скорости и зависит от отношения между суммой радиусов кривизны и высотой a препятствия. Если обозначить $\frac{R+r}{a} = \mu$, то формула (6.23) будет упрощена:

$$h' = \frac{\upsilon^2}{2g} \frac{(2\mu - 1)}{(\mu - 1)^2} \quad . \tag{6.24}$$

Зависимость h' от μ имеет гиперболический вид. При увеличении μ от 1 до ∞ величина h', а вместе с ней и сила удара уменьшается от ∞ до 0. При данных размерах препятствия (т.е. размерах r, a) увеличение радиуса колес влечет за собой уменьшение силы удара.

6.4.3 Рекомендуется использовать программный модуль имитационного моделирования процесса динамического взаимодействия колеса транспортного средства и дорожного покрытия с единичными и накопленными неровностями в среде МАТЛАБ. Результаты работы программного комплекса (типовые примеры) приведены в приложении 2 (представлены скриншоты изображений).

6.4.4 Достоинством методики является возможность получать численные ряды ускорений для сочетаний неровностей в виде коротких, средних и длинных волн.

6.4.5 Методика И.М.Рабиновича показывает нелинейный характер изменения вертикальных ускорений колеса по отношению к скорости

транспортного средства, что будет учтено в формуле 6.30 (корреляционной зависимости взаимовлияния изменения коэффициента ровности IRI и изменения коэффициента динамичности с учетом квадратного корня скорости транспортного средства).

6.5 Определение коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности

6.5.1 В качестве базового алгоритма (подробного описания порядка проведения экспериментальных и расчетных работ) рекомендуется методика учета накопления неровностей на основе исследования вероятностных характеристик микропрофилей автомобильных дорог (методика В.П.Носова и В.П.Жигарева), приведенная в п. 5.3 настоящих рекомендаций и с учетом формулы 6.30 и приложения 1.

6.5.2 С учетом результатов п.6.4 можно сделать заключение, что коэффициент динамичности помимо механических характеристик транспортных средств зависит через ускорение от квадрата скорости транспортного средства, радиуса колеса транспортного средства, высоты и радиуса накопленной неровности. Для упрощения можно считать из условия кратковременности взаимодействия шины и неровности дорожного покрытия (сотые или тысячные доли с при скоростях в районе 100 км/час) колесо жестким недеформируемым телом.

6.5.3 Определение коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности не может быть решено напрямую через выведенное математическое уравнение. Эта задача может быть решена на уровне корреляционной зависимости между изменением коэффициента динамичности и показателя ровности IRI после расчета каждого из них по данным цифровой модели дорожного покрытия (см. формулу 6.30).

6.5.4 В качестве измерителей предлагаются среднее, максимальное значения и среднее квадратическое отклонение коэффициента динамичности.

Под микропрофилем проезжей части понимается продольный профиль поверхности автомобильной дороги по заданной полосе наката в виде массива вертикальных отметок, полученных с интервалом не более 0,25 м.

6.5.4 Предлагается следующий укрупненный алгоритм.

1. Исходной базой для решения задачи может являться цифровая модель дорожного покрытия, которая может быть определена, например, по методике п. 5.3 настоящих рекомендаций путем проезда передвижной дорожной диагностической лаборатории. Также лаборатория может быть оснащена устройством видеосканирования и программой перевода в цифровую модель. Погрешность измерения должна составлять не более 0,5 мм. Также могут быть использованы технологии лазерного сканирования и другие современные средства получения цифровых моделей местности.

2. При способе записи микропрофиля покрытия с помощью профилометрических установок бесконтактного типа микропрофиль записывается по продольному сечению дорожной поверхности лазерным датчиком, что эквивалентно точечному контакту. В математическую модель вибронагруженности транспортного средства следует подавать в качестве возмущения микропрофиль, осредненный по площадке контакта шины с дорогой. Рекомендуется проводить запись микропрофиля с очень малым шагом (несколько мм) с последующим его осреднением по длине площадки контакта, для корректного осреднения по ширине площадки контакта надо проводить синхронную запись нескольких параллельных сечений на расстоянии 1..2 см.

3. Проводится типовой статистический и корреляционный анализ (в т.ч. удаление случайных выбросов, проверка непротиворечия закону нормального распределения) согласно п. 6.1 или в программном комплексе STATISTICA 6.

Примечание - на рисунке 6.7 приведен пример рабочего окна программного комплекса STATISTICA 6 для исследования и анализа графиков.

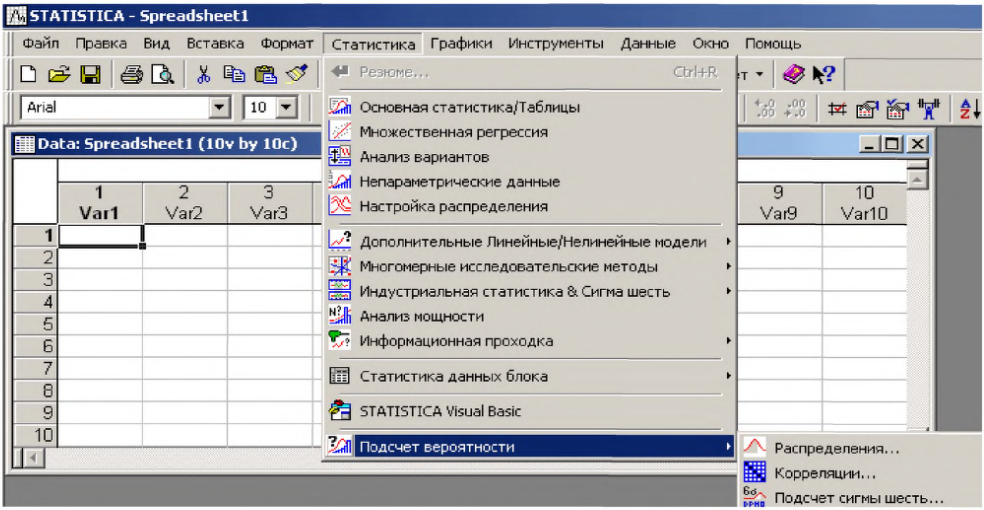


Рисунок 6.7 Пример рабочего окна комплекса STATISTICA 6

4. По полученной цифровой модели проводится выделение периодической коррелированной составляющей или гармонический анализ с переменным шагом 1, 2,5; 5,0; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 70; 80; 90; 100 м. По данным выделения коррелированной составляющей рекомендуется ее обработать в виде огибающей с параметром, равным радиусу колеса транспортного средства (согласно п.5.1 настоящих рекомендаций).

5. Определяются амплитуда, высота неровностей и текущие радиусы кривизны (гармонический анализ).

6. Определяются расчетно диагностические показатели ровности, например, по толчкомеру и IRI (согласно методике 5.3).

7. Определяются вертикальные ускорения для каждой накопленной неровности согласно методике И.М.Рабиновича (согласно п. 6.4 настоящих рекомендаций).

8. По полученному цифровому ряду ускорений и по данным об интенсивности и составе движения транспортного потока определяются

динамические составляющие нагрузок на конструкцию автомобильной дороги.

9. Может быть использована упрощенная схема взаимодействия колеса и дорожного покрытия (двухмассовая модель) в момент прохождения выбоины, которая представлена на рисунке 6.8 [5].

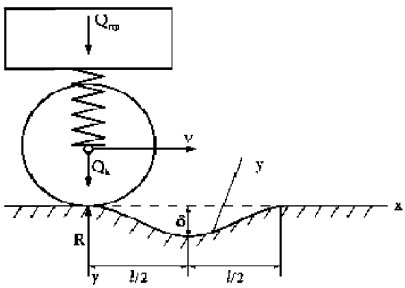


Рисунок 6.8 Схема взаимодействия колеса и дорожного покрытия

10. Можно использовать типовые расчетные формулы:

$$K_d = \frac{R_{\max}}{Q_{\text{ïð}} + Q_k} = 1 + \frac{2\pi^2 v^2 \delta}{gl} \cdot \frac{Q_k}{Q_{\text{ïð}} + Q_k},\ R_{\max} = Q_{\text{ïð}} + Q_k \left(1 + \frac{2\pi^2 v^2 \delta}{gl}\right),$$

$$y = \frac{\delta}{2}\left(1 + \cos\frac{2\pi x}{l}\right) \quad , \qquad (6.25)$$

где K_d - коэффициент динамичности, δ – вертикальный размер неровности, l – длина участка неровности, g – ускорение свободного падения, R_{max} – максимальное значение силы взаимодействия; $Q_{пр}$, Q_k - подрессоренная и неподрессоренная массы транспортного средства; y – вертикальная составляющая прогиба.

11. Строится и анализируется гистограмма распределения коэффициента динамичности (на основе программного комплекса STATISTICA 6).

Примечание - такой анализ можно провести, например, на гистограмме распределения коэффициента динамичности, полученной по данным рисунка 6.2 с помощью программы STATISTICA 6 (рисунок 6.9).

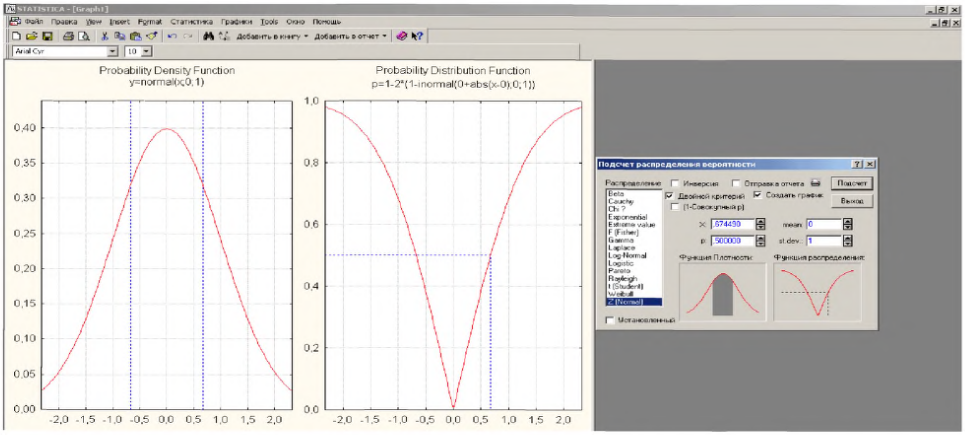


Рисунок 6.9 Гистограмма распределения коэффициента динамичности

12. Определяются среднее, максимальное значения и среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации коэффициента динамичности. Строится его автокорреляционная функция (на основе программного комплекса STATISTICA 6).

13. Определяются локальные участки неоднородностей коэффициента динамичности.

14. При исследовании вопросов технического нормирования коэффициента динамичности определяется допустимая вероятность накопления неровностей по методике В.В.Столярова (п. 6.2 настоящих рекомендаций).

15. Строятся графики (на основе программного комплекса STATISTICA 6).

16. По результатам накопленной статистики проводится корреляционно-регрессионный анализ и определение коэффициента влияния изменения показателя ровности на изменение коэффициента динамичности

для формулы 6.30 (см. пример 6.5.13), например, с использованием программного комплекса STATISTICA 6.

Пример 8. Вид рабочего окна корреляционно-регрессионного анализа программного комплекса STATISTICA 6 приведен на рисунке 6.10.

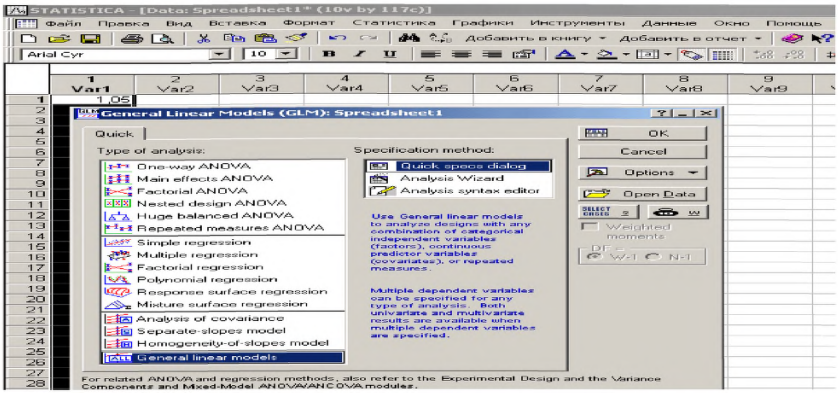


Рисунок 6.10 Пример рабочего окна корреляционно-регрессионного анализа комплекса STATISTICA 6

17. Проводится анализ графиков с точки зрения статистического анализа числовых рядов и вопросов проектирования автомобильных дорог.

18. Формулируется перечень мероприятий по повышению качества дорожной конструкции с учетом формируемых динамических свойств (конструктивные, например геосетка, распределенный гидродемпфер; технологические – на однородность).

6.5.6 Данная методика рекомендуется для опытно-экспериментального исследования и сбора замечаний и предложений по ее совершенствованию.

6.5.7 Также рекомендуется определять и накапливать для последующего анализа коэффициенты относительного влияния изменения параметров накопленных неровностей на изменение вертикальной составляющей ускорения (пропорциональной изменению динамической нагрузки). Под

коэффициентом относительного влияния понимается отношение изменения выхода к проценту изменения входа.

6.5.8 При реализации корреляционно-регрессионного анализа рекомендуется использовать эконометрический подход в виде следующей структуры общей модели:

$$Y_n = S \cdot \left(h_0 + h_1 \cdot x_{1n} + \ldots + h_m \cdot x_{mn}\right) + Q \cdot \left(h_{D_{1n}^2} \cdot D_{1n} + \ldots + h_{D_l^2} \cdot D_{\ln}\right), \quad (6.26)$$

где: S, Q – преобразование абсолютного или относительного вида (обычного или логарифмического вида); h_0 ,…, h_n – весовые коэффициенты для количественных входных факторов, получаемые методом наименьших квадратов; h_{D1}, …, h_{Dl} – весовые коэффициенты для манекенов бинарного вида.

6.5.9 Показателем эффективности идентификации параметров по выбранным возмущающим факторам является величина остаточной дисперсии $\sigma^2_{ост/f_{1n},\ldots,f_{mn}}$.

6.5.10 Анализируя полученные коэффициенты уравнения регрессии, математическое ожидание, дисперсию и корреляционные соотношения, судят о степени влияния возмущающих факторов на значение выходного параметра.

6.5.11 Согласно процедуре применения эконометрического подхода определяются весовые коэффициенты линейной регрессионной модели.

6.5.12 Тогда частная модель оценки изменения коэффициента динамичности зависимости от изменения коэффициента ровности будет иметь следующий структурный вид:

$$k_{дин} = h_0 + h_1 \cdot K_{ровн}, \quad (6.27)$$

где: h_0 ,…, h_l – весовые коэффициенты для количественных входных факторов, получаемые методом наименьших квадратов.

Более сложный вид формула 6.27 с учетом корня скорости транспортного средства и коэффициентов приведения будет иметь в виде формулы 6.30.

6.5.13 Для научных исследований показатель ровности также может определяться в виде эконометрического уравнения через квадрат скорости и радиус колеса транспортного средства (как параметры интенсивности и состава транспортного потока) и высоту (глубину) и радиус кривизны накопленной неровности (как параметры изменения геометрии дорожного покрытия).

6.5.14 Для эконометрики важнейшим является использование только линейных регрессионных уравнений, использование инструментальных и дополнительных качественных переменных. Используются специальные математические приемы разбиения области определения на участки аппроксимации, переход через логарифмы от абсолютных к относительным переменным, а также прием структурирования модели по бинарным переменным (1 – если да, 0 – если все остальное). Данное представление помимо качественной визуализации результатов обеспечивает и содержательность математической модели – соответствие изменения знаков входящих переменных изменению знака выходного параметра.

6.5.15 Пример 9. Использование эконометрического подхода.

По данным профессора Немчинова М.В. [7] об изменении виброскорости V для автомобиля ВАЗ-2107 по изменению глубины а поврежденностей шероховатой поверхностной обработки коэффициент относительного влияния определен как h_1=1,6. Начальный параметр h_0=-2,5.

Тогда:

$$V= -2,5+1,6xa. \quad (6.28)$$

Расчет коэффициента динамичности. Максимальное ускорение согласно данным Немчинова М.В. равно 24 м/с^2. Нагрузка на ось:

P=1460 кг/2=730 кг.

Динамическая нагрузка:

$Q=Pxg$=730x24= 17520 кгм/с^2.

Максимальный коэффициент динамичности:

$K_{динмах}$=(730x9,8+17520)/730x9,8= (7154+17520)/7154=24674/7154=3,45.

6.5.16 Результаты М.В.Немчинова дают вывод о линейной зависимости между высотой (глубиной) неровностей и ускорением на участке диаграммы начиная с 5 мм. Это важно для анализа коэффициента динамичности, потому что можно считать, что начиная с 5 мм влияние изменения радиуса кривизны неровностей либо коррелированно с высотой (глубиной выступов), либо мало зависят от нее.

6.5.17 Коэффициент динамичности больше для легковых автомобилей, так как радиус кривизны для них меньше. Для коэффициента приведения S_i более лёгких автомобилей к расчётному более тяжёлому автомобилю можно использовать формулу, которая даёт значения коэффициента приведения от 0,001 до 0,05:

$$S_i = (Q_i / Q_p)^{4,4}, \quad (6.29)$$

где S_j - коэффициенты приведения j-ой оси автомобиля к расчетной нагрузке; Q_i – номинальная нагрузка j-ой оси автомобиля на дорожное покрытие, кН; Q_p – расчетная «статическая» нагрузка, кН.

6.5.18 Упругий характер взаимодействия шины с неровностью рекомендуется учитывать через изменение радиуса кривизны нежесткого колеса при его взаимодействии с неровностью.

6.5.19 О нелинейном характере взаимовлияния коэффициентов ровности $I_{пi}$ и динамичности с учетом квадратного корня от скорости транспортного средства заявлено в работах Московского автомобильно-дорожного государственного университета (Борисов Ю.В., Васильев Ю.Э., Жигарев В.П., Кольцов В.И. и др.) в 2000 г. (см. приложение 1).

6.5.20 Для опытно-экспериментального применения, накопления статистики и обобщения предлагается модифицированная формула

взаимовлияния изменения коэффициента ровности IRI и изменения коэффициента динамичности в следующем виде:

$$D = \frac{a + b \cdot I_{\text{ri}} \cdot \sqrt{V} \cdot S_j}{100}, \qquad (6.30)$$

где D – коэффициент динамичности, I_{ri} – значение коэффициента ровности (размерность мм/м), V – скорость транспортного средства (размерность км/час), S_j – коэффициент приведения для класса транспортного средства, а и b – коэффициенты линейного регрессионного уравнения (a – начальное значение, b – коэффициент влияния).

6.5.21 Данная зависимость рассматривается как корреляционная зависимость; коэффициентом приведения размерностей, по умолчанию, служит коэффициент влияния b.

6.5.22 В процессе опытно-экспериментального освоения данной методики предлагается накопить статистический материал для определения и уточнения параметров a и b – для различающихся состояний вновь устроенного и эксплуатируемого дорожного покрытия, различных классов транспортных средств, а также для различных измерителей коэффициента ровности IRI на различных базах измерения.

6.5.23 Статистическая обработка предполагается на основе корреляционно-регрессионного анализа в сертифицированной программе STATISTICA 6.

6.5.21 Полученные коэффициенты могут быть в дальнейшем использованы для пересчета коэффициента IRI и в коэффициент динамичности и, наоборот, с учетом типов транспортных средств.

6.5.24 Сбор замечаний и предложений по совершенствованию данной методики проводится Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства.

6.6 Рекомендации по применению экспериментальных стендов для определения динамических характеристик

6.6.1 Сущность метода

Метод основан на получении и обработке данных с помощью экспериментального стенда для динамических испытаний

6.6.2 Инструментальные средства

Экспериментальный стенд для динамических испытаний.

Рекомендуемая структура стенда для определения динамометрических характеристик процесса взаимодействия транспортного средства и дорожной конструкции, разработанная в Институте машиноведения имени А.А.Благонравова Российской академии наук, показана на рисунке 6.11.

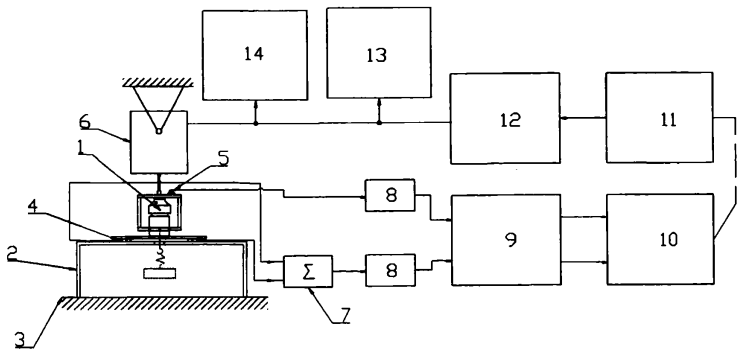


Рисунок 6.11 Экспериментальный стенд для динамических испытаний:

1 – испытуемый объект; 2 – измерительный стол; 3 – фундамент; 4 – датчики силы; 5 – акселерометр; 6 – вибровозбудитель; 7 – сумматор; 8 – усилитель; 9 – фазометр; 10 – вольтметр; 11 – двух лучевой осциллограф; 12 – двух канальный анализатор сигналов; 13 – двух координатный самописец; 14 – генератор синусоидального сигнала и случайного шума

Она содержит механическую оснастку, позволяющую крепить различные типы гидроопор для измерения динамических характеристик в трех взаимно перпендикулярных направлениях по осям *z, y, x*. Стенд оборудован

электронно-измерительной аппаратурой, блок-схема которой включает схему возбуждения: позиции 14, 15, 10, 11, 6 и измерительную схему: позиции 4–13. Схема возбуждения состоит из аппаратуры для создания динамической силы, действующей на испытуемый объект синусоидальным сигналом и случайным (белым) шумом в широком частотном диапазоне.

Измерительная схема служит для аппаратного определения динамической жесткости с помощью возбуждения гидроопоры случайным шумом. В этом случае сигнал с датчиков силы 4 и акселерометра 5 через кондиционирующий усилитель 8 поступает на вход двухканального анализатора сигналов 10, где происходит преобразование передаточных спектров и силы. На выходе анализатора 11 получается действительная и мнимая части комплексной жесткости:

$$C = \mathrm{Re}C - iYmC, \qquad (6.31)$$

где C - комплексная жесткость, $\mathrm{Re}C$ - действительная часть, $iYmC$ - мнимая часть жесткости, или непосредственно модуль динамической жесткости $|C| \times (f)$.

Угол потерь, тангенс которого равен коэффициенту потерь, получается путем измерения фазы между сигналами в заданном частотном диапазоне: $\varphi \times (f)$. Эти величины записываются в память компьютера, соединенной с генератором сигналов 14. Измерительная схема для определения динамической жесткости при воздействии на фиксируемой частоте синусоидальным сигналом различной динамической силы включает кроме позиций 4–8; фазомер 9 для измерения фазы между сигналами силы и ускорения, причем один из кондиционирующих усилителей 8. преобразует сигнал смещения путем интегрирования сигнала ускорения – умножения на $-\omega^2$. Вольтметр 10 и осцилограф 11 служат для отсчета величины сигнала силы F и сигнала смещения x, по которым определяем жесткость:

$$C = \frac{F}{x} \quad . \qquad (6.32)$$

На рисунке 6.12 представлена блок–схема установки для определения жесткостных характеристик виброизолятора с использованием комплекта аппаратуры «Брюль и Кьер».

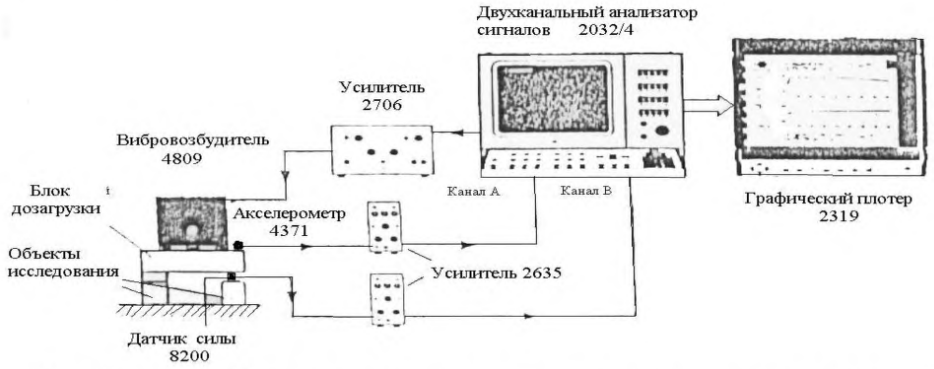


Рисунок 6.12 Блок–схема установки для определения жесткостных характеристик виброизолятора с использованием комплекта аппаратуры «Брюль и Кьер».

6.6.3 Проведение испытаний. Пример использования стенда для динамических испытаний.

Результаты экспериментальных исследований по измерению изменения коэффициента динамичности представлены на графиках приложения 3.

Для удобства первичный анализ измерения коэффициента динамичности проводился сразу под графиками приложения 3. На экспериментальном стенде определен диапазон изменения коэффициента динамичности для типового диапазона нагрузок и колебаний, вызываемых накопленными неровностями. Новым оказался значительный диапазон изменения коэффициента динамичности при использовании новых технических решений, имеющих перспективу встраивания в несущую систему транспортного средства – гидродинамические опоры производства ФРГ.

Максимальное значение коэффициента динамичности составило 10,0, минимальное – 0,009. При этом налицо уменьшение коэффициента динамичности, начиная с частот около 25 Гц.

Важен факт отсутствия в ряде случаев существенной корреляции между формируемым изменением ускорения и динамической силой.

Действительно свойства гидродинамических опор могут повышать динамическую устойчивость работы опоры, в данном случае в несущей системе транспортного средства, и снижать для определенных октав частот коэффициент динамичности до минимальных значений. Разброс показаний (среднее квадратическое отклонение, косвенный показатель меры риска) для динамической силы не изменялся. Необходимо дальнейшие исследования в области динамического взаимодействия колеса транспортного средства и неровностей дорожного покрытия с учетом перспективных технических решений, используемых или предполагаемых к использованию в конструкциях высокоскоростных и тяжеловесных транспортных средств.

Эти технические решения обладают избирательностью и эффективны на определенных октавах частот, на других частотах они не эффективны, и более того могут оказаться генераторами негативных для конструкции автомобильной дороги колебаний.

6.6.6 Данные результаты могут служить методической основой совершенствования настоящего ОДМ на основе результатов исследования динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определения коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности, а также зависимости вероятностно-статистических характеристик микропрофилей автомобильных дорог от максимально-учитываемой длины и высоты неровности и соответствующей ей скорости движения транспортного средства.

7 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕМОНТЕ И СОДЕРЖАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

7.1 При проектировании и расчете транспортных средств шина рассматривается как элемент подвески транспортного средства, в определенной мере гасящей динамические нагрузки. При кратковременном взаимодействии (тысячные доли секунды при скоростях движения более 60-100 км/час) шина может рассматриваться как почти абсолютно жесткое тело, не деформируемое этим выступом. Упругий характер взаимодействия шины с неровностью рекомендуется учитывать через изменение радиуса кривизны нежесткого колеса при его взаимодействии с неровностью. Изменение жесткости колеса увеличивает радиус кривизны колеса в зоне взаимодействия. Соответственно для колес с меньшей жесткостью коэффициент динамичности будет меньше.

7.2 Результаты многочисленных измерений показали, что величины прогибов не велики и определяются десятыми долями мм, причем, чем выше скорость движения, тем меньше деформируется дорожная одежда, причем откосы линзы прогиба можно рассматривать как прямолинейные.

7.3 Зона возможного проявления реологических свойств асфальтового бетона ограничена скоростью движения транспортных средств около 50 км/час и на зону отсутствия проявления реологических свойств (конструкция работает в состоянии «абсолютной жесткости» и полностью подчиняется закону Гука). В зависимости от этого для каждой зоны должны быть свои особенности расчета и конструирования дорожных одежд.

7.4 Динамическая составляющая нагрузки определяется произведением вертикального ускорения на массу транспортного средства, распределенную

на *i*–ю ось. Поэтому нормативные межремонтные сроки службы дорожных покрытий устанавливают по моменту достижения ими предельно допускаемого эксплуатационного состояния, оцениваемого их ровностью.

7.5 Для оценки влияния ровности эксплуатируемых дорожных покрытий на уровень динамического воздействия транспортных средств рекомендуется выполнять расчет коэффициентов приведения транспортных средств к расчетной нагрузке с учетом их динамического воздействия на участках автомобильных дорог с различным показателем ровности.

7.6 В качестве расчетного коэффициента динамичности эксплуатируемых автомобильных дорог рекомендуется принимать значение максимального коэффициента динамичности заданной вероятности, полученного методом моделирования динамического воздействия грузового транспортного средства при проезде по заданному участку со скоростью 80 км/ч.

7.7 В инструкциях по проектированию дорожных одежд ([4-12]) под коэффициентом динамичности вертикальной нагрузки $K_A(v)$ имеют в виду отношение значения вертикальной нагрузки, передаваемой на поверхность покрытия при скорости движения v транспортного средства по горизонтальному участку дороги к вертикальной нагрузке, передаваемой колесом на поверхность покрытия от неподвижного автомобиля.

7.8 Для моделирования воздействия транспортных средств рекомендуется использовать универсальные компьютерные программы, такие как NASTRAN, ADAMS, DADS и др. При использовании математического моделирования рекомендуется учитывать, что статическая нагрузка прикладывается от каждого колеса транспортного средства; динамическая составляющая учитывается в нагрузке каждого колеса; характер распределения давления по площади отпечатка колеса зависит от типа шин.

7.9 При оценке влияния динамических нагрузок на повреждения автомобильной дороги рекомендуется использовать два подхода:

3) первый опирается на статистический анализ транспортных нагрузок и использование «четвертого степенного закона», показывающего степень повреждения дорожной конструкции при движении нагрузок;

4) второй включает вычисление теоретического ущерба, нанесенного автомобильной дороге при прохождении одного или более транспортных средств, путем вычисления с использованием модели реакции дорожной конструкции на действие движущейся динамической нагрузки.

В ряде случаев предполагают, что дорожное повреждение зависит от четвертой степени моментной нагрузки на колесо транспортного средства.

7.10 Учитывая, что динамические нагрузки на колесо транспортного средства подчиняются нормальному закону распределения, получено, что коэффициент напряжения зависит от моментной нагрузки на колесо во время t; статической (средней) нагрузка на колесо; коэффициента вариации динамической нагрузки на колесо; среднеквадратического отклонения; среднее значение (коэффициент динамической нагрузки DLC).

7.11 При проектировании жестких дорожных одежд в соответствии с [4] коэффициент динамичности допускается принимать в зависимости от осевой массы автомобиля (таблица 7.1).

Таблица 7.1 Коэффициенты динамичности для расчета жестких дорожных одежд

Осевая масса автомобиля, т	2	4	6	8	10	12
$К_{дин}$	1,6	1,3	1,15	1,08	1,06	1,04

7.12 Исследования, проведенные профессором Смирновым А.В., позволили рекомендовать следующие коэффициенты динамичности для ровных вновь устраиваемых дорожных покрытий (таблица 7.2).

Таблица 7.2 Коэффициенты динамичности для ровных вновь устраиваемых покрытий

Скорость движения автомобиля, км/час	20	40	50	60	70	80	100	120
Максимальный коэффициент динамичности	1,1	1,3	1,4	1,55	1,62	1,7	1,75	1,8
Минимальный коэффициент динамичности	0,9	0,7	0,6	0,45	0,37	0,3	0,25	0,2

7.13 При расчете дорожных одежд с учетом результатов профессора Радовского Б.С. предлагается учитывать коэффициент динамичности колесной нагрузки, имеющий следующие величины (таблица 7.3).

Таблица 7.3 Коэффициент динамичности колесной нагрузки

Скорость движения автомобиля, км/час	10	20	30	40	50	60	80	100
Коэффициент динамичности	1,12	1,21	1,28	1,34	1,38	1,41	1,45	1,47

7.14 Рекомендуется использовать следующие значения максимального коэффициента динамичности. На участках с удовлетворительной ровностью покрытия при допустимо-разрешенной скорости движения грузовых транспортных средств (80 км/ч), его значение 95% обеспеченности для расчетной нагрузки, составляет 1,15, а на участках с неудовлетворительной ровностью покрытия от 1,3 до 1,4.

7.15 Для оценки динамического воздействия транспортных средств на эксплуатируемых автомобильных дорогах рекомендуется использовать риск превышения коэффициента динамичности критических значений, позволяющий оценить динамические перегрузки в худших локализациях участка дороги).

7.16 Определение вероятности (технической составляющая оценки степени риска) появления неровностей на покрытии дорожной одежды по причине роста коэффициента динамичности рекомендуется определять по полученным данным измерения продольного профиля на основе методики В.В.Столярова с учетом критического (максимального) значения и среднего квадратического отклонения коэффициента динамичности (согласно методике 6.2). В качестве исходных данных к математическим моделям теоретико-вероятностного подхода рекомендуется использовать следующие оценки допустимых средних квадратических отклонений параметров автомобильной дороги (таблица 7.4).

Таблица 7.4 Допустимые средние квадратические отклонения параметров

Параметр А (с учетом работ В.А. Семенова)	Оценка качества			
	Отлично, менее	хорошо	удовлетворит.	неудовл., более
Температура укладки черной смесей	0,08·А	(0,08÷0,14) А	(0,14÷0,2) ·А	0,2·А
Плотность зернистых материалов	0,025·А	(0,025÷0,038)·А	(0,038÷0,053)·А	0,053·А
Плотность грунта	0,025·А	(0,025÷0,052) А	(0,052÷0,08) А	0,08·А
Модуль упругости на слое щебня	0,15·А	(0,15÷0,21) А	(0,21÷0,26) А	0,26·А
Толщины слоя щебня	0,12·А	(0,12÷0,22) А	(0,22÷0,31) А	0,31·А
Толщина слоя а/б	0,1·А	(0,10÷0,22) А	(0,22÷0,34) А	0,34·А
Плотность а/б	0,038·А	(0,038÷0,055)·А	(0,055÷0,071)·А	0,071·А
Модуль упругости на а/б	0,12·А	(0,12÷0,2) А	(0,2÷0,27) А	0,27·А

7.17 Повышение требований к ровности дорожных покрытий в процессе эксплуатации (согласно нормативным документам ГОСТ Р 50597, [3, 9], позволяет уменьшить негативное влияние динамического воздействия транспортного потока на срок службы автомобильных дорог.

Для предупреждения развития геометрии неровностей на эксплуатируемых участках автомобильных дорог рекомендуется повышение требований к коэффициенту вариации уплотнения дорожных покрытий.

В качестве мероприятия снижения максимального коэффициента динамичности рекомендуется ограничение скорости движения при учете развития геометрии накопленных неровностей до критических значений.

7.17 На стадии эксплуатации для оценки влияния динамического воздействия транспортных средств на снижение срока службы дорожных одежд динамические коэффициенты для участков автомобильных дорог следует рассчитывать на основе математической модели взаимодействия «транспортное средство – дорожное покрытие», так как на этих участках наблюдается значительный разброс величин коэффициента динамичности (от 1,2 до 2,5) в зависимости от микропрофиля поверхности покрытия, осевой нагрузки и квадрата скорости движения транспортного средства.

Расчет динамических нагрузок от транспортного потока на экспериментальных участках наблюдения показал, что на участках автомобильных дорог с неудовлетворительным показателем ровности суммарное количество приложений расчетной нагрузки за год в 3,0–3,3 раза превышает значение, рассчитанное для участков с удовлетворительной ровностью покрытия.

7.18 Рекомендуется использовать модель накопления усталостных повреждений асфальтобетонных покрытий с учетом сезонных изменений климатических факторов, изменений в процессе эксплуатации расчетных параметров элементов дорожной конструкции и транспортных нагрузок.

Расчет накопления усталостных повреждений при заданном транспортном потоке может проводиться двумя способами: точный – основанный на суммировании повреждений от прохода каждого транспортного средства; упрощенный – с использованием коэффициентов приведения транспортных средств к расчетной нагрузке.

7.19 Рекомендуется использовать следующие конкретные примеры выбора ремонтных мероприятий, на основе информации, полученной с использованием разработанной методики по предотвращению, минимизации и компенсации динамического воздействия транспортных средств на конструкцию автомобильной дороги, вызванного накоплением неровностей:

1. Организационные (контроль качества, технический надзор)

1.1 Задание и обеспечение требований однородности на этапе строительства (строительство в обобщенной системе координат местности), например:

- обеспечение водоотвода, проектирование других инженерных сооружений;

- отказ от устройства выемок при близком залегании грунтовых вод;

- реализация принципа гарантийных обязательств подрядчика перед заказчиком;

- контроль уплотнения щебеночных и гравийных дорожных покрытий.

1.2 Задание и обеспечение требований однородности на этапе реконструкции, например:

- уширение существующей дорожной одежды;

- реализация системы контроля качества.

1.3 Задание и обеспечение требований однородности на этапе ремонта и капитального ремонта.

1.4 Задание и обеспечение требований однородности на этапе содержания.

1.5 Ограничение движения отдельных типов автомобилей полностью или в отдельные интервалы времени.

1.6 Развитие дорожной сети, позволяющее обеспечить распределение транспортных потоков для обеспечения необходимого уровня обслуживания;

- устранение резкого торможения большегрузных автомобилей;
- использование постов весового контроля;
- использование устройств для учета движения и др.

2. Технические:

- применение современных материалов, техники и оборудования;
- шероховатые поверхностные обработки;
- фрезерование с координатным замыканием рабочего органа;
- применение катков с комбинированными вальцами;
- восстановление ровности дорожного покрытия путем заполнения колеи эмульсионно-минеральной смесью;
- реализация эффекта присоединенной массы – применение геосинтетики, распределенной гидродемпферной сетки;
- своевременное водоотведение;
- применение литого асфальтобетона на основе полимерно-битумных вяжущих,
- применение битума с повышенными динамическими характеристиками;
- применение кубовидного щебня с повышенными прочностными свойствами);
- устройство трещинопрерывающих и эластичных прослоек в асфальтобетонных покрытиях;
- стабилизация насыпи с помощью геотекстиля и геосетки;
- повышение качества дорожного покрытия (мелкозернистый асфальтобетон, щебеночно-мастичный асфальтобетон, дренирующее покрытие).

3. Проектные:

- применение современных методов проектирования с учетом влияния динамических нагрузок.

- применение новых технологий, материалов, изделий и конструкций повышения динамической устойчивости конструкций автомобильных дорог.

7.19 В результате реализации предлагаемых методических рекомендаций могут быть обоснованы и реализованы технические решения по обеспечению динамической устойчивости автомобильных дорог, за счет чего ожидается повышение их транспортно-эксплуатационных характеристик, увеличение межремонтных сроков, повышение безопасности дорожного движения, сокращение затрат на строительство, реконструкцию, ремонт и содержание автомобильных дорог.

Библиография

1. Технический регламент Таможенного Союза 014/2011 Технический регламент Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог».

2. СНиП 2.05.02-85 Автомобильные дороги.

3. СНиП 3.06.03-85 Автомобильные дороги.

4. ОДМ Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд (взамен ВСН 197-91).

5. ОДМ 218.2.024-2012 Методические рекомендации по оценке прочности нежестких дорожных одежд.

6. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд.

7. ОДН 218.1.052-2002 Оценка прочности нежестких дорожных одежд.

8. ОДН 218.0.006-2002 Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог.

9. ОДМ Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкомером

10. ВСН 52-89 Указания по оценке прочности и расчету усиления нежестких дорожных одежд.

11. ВСН 46-72 Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа.

12. ВСН 46-83 Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа.

Приложение 1

Пример применения методики Носова-Жигарева при обработке результатов исследования ровности дорожной поверхности

Получены результатов исследования ровности дорожной поверхности для исследованных участков автомобильной дороги. В таблице П.1 приведены значения международного индекса ровности $IRI_У$, осредненные по колеям для каждого заезда и значения, осредненные по колеям и заездам.

Таблица П.1 Значения международного индекса ровности $IRI_У$ для участков дорожного покрытия

№ участка	Заезд 1	Заезд 2	Среднее $IRI_У$
1 (36)	6,7	6,5	6,6
3 (38)	4,95	5,3	5,13
5 (40)	3,95	3,7	3,83
7 (42)	6,7	6,1	6,4
9 (44)	2,7	2,7	2,7
11 (46)	3,5	3,6	3,55
15 (48)	8,3	8,6	8,45
17 (50)	10,3	11,3	10,71
19 (50)	9,95	11,3	10,71
21 (52)	6,18	7,5	6,65
23 (54)	8,7	9,2	8,95
25 (56)	3,4	3,4	3,4
27 (58)	4,5	4,5	4,5
29 (60)	2,8	3,9	3,35
31 (62)	7,9	6,5	7,2
33 (64)	4,6	6,4	4,5
35 (66)	6,6	7,4	7,0

Значения IRI_{10} и IRI_{50} различаются внутри каждого и для различных участков. Значения $IRI_У$ зависят от участка, хотя разбросы этих значений меньше чем для IRI_{50} и для IRI_{10}.

Самым неровным из обследованных участков по показателю $IRI_У$ является участок №17, 19 (№ 50). Он относится к верхней границе класса С – нижней границе класса Д по классификации ИСО.

По существующим нормативным документам на предельное состояние автомобильной дороги этот участок подлежит капитальному ремонту, так как в пересчете показателя IRI для этого участка в показатель ПКРС-2У (пересчет $IRI_У$ в показатель S_n в первом приближении может быть выполнен по соотношению S_n=128 IRI) получено S_n=1450 см/км, что заметно больше предельного состояния (S_n=1200см/км) для дорог, относимых даже к группе В (дороги местного значения с интенсивностью движения менее 1000 автомобилей в сутки) по ГОСТ Р50597.

Несколько лучше, но не удовлетворяют требованиям ГОСТ участки №15(48), №23(54), где $IRI_У$ ≥8,6 мм/м, то есть S_n ≥1130 см/км. По классификации ИСО они относятся к классу С – к его середине, либо к его верхней границе. Остальные участки удовлетворяют требованиям ГОСТ, если относить их к группе В (S_{nmax}=1200 см/км, $IRI_{У\,max}$= 9,9 мм/м).

Ряд участков удовлетворяет требованиям ГОСТ, если их относить к группе Б (S_{nmax}=860 см/км, $IRI_{Уmax}$=6,8 мм/м), самые ровные участки удовлетворяют требованиям ГОСТ для дорог группы А (S_{nmax}=660 см/км, $IRI_{Уmax}$=5,2 мм/м). Такими участками являются участки № 9(44), № 11(46), № 5(40), № 25(56), № 27(58), № 29(60). По классификации ИСО они относятся к классу В. Участков, относящихся к классу А этой классификации (IRI менее 3,1 мм/м) среди обследованных участков один - № 9(44), где $IRI_У$ = 2,7 мм/м.

Это относится к оценке ровности всего участка в целом. Отрезки этих участков могут иметь большие значения критериев ровности. Значения IRI_{10} для отрезков участков лежат в диапазоне от 2,5 до 22 мм/м, а значения IRI_{50} –

в диапазоне от 2,5 до 15 мм/м. Наиболее неровными из обследованных участков автомобильных дорог являются участки и отрезки, сведения о которых приведены в таблице П.2.

Таблица П.2 Участки с повышенной неровностью

участок		*отрезок*	
№1 (36)	800-900 м	№21 (52)	200-270 м
№3 (38)	80-110 м	№23 (54)	450-500 м, 650-700 м
№5 (40)	350-400 м	№25 (56)	150-200 м, 300-350 м
№7 (42)	280-400 м	№27 (58)	200-300 м
№9 (44)	120-170 м, 400-450 м	№29 (60)	50-100 м
№11 (46)	350-450 м;	№31 (62)	300-350 м, 450-500 м
№15 (48)	250-300 м, 380-350 м	№33 (64)	30-50 м
№17, 19 (50)	100-150 м, 300-350 м	№35 (66)	70-150 м

Наибольшие значения IRI_{10}, лежащие в диапазоне от 18 до 23 мм/м, получаются: участок У7(50) при координате, отсчитываемой по оси автомобильной дороги, то есть на отрезке l=250-300 м; У15(48), l=40-50 м и l=250-350 м; У17(50), l=350-450 м; У19(52), l=30-40 м и l=230-260 м; У23(54), l=650-700 м; У31(62), l=450-550 м.

Наибольшие значения IRI_{50}, лежащие в диапазоне от 13 до 16 мм/м, получаются в большинстве случаев на тех же участках и на тех же отрезках этих участков: У15(48), l=400-450 м; У17(50), l=100-150 м и l=350-400 м; У19(52), l=0-50 м; У23(54), l=650-750 м; У31(62), l=450-550 м.

Если IRI в диапазоне от 6 до 6,2 мм/м (верхняя граница класса В по классификации ИСО) и скорость движения грузового автомобиля V=70 км/ч, то коэффициент динамичности в зависимости от транспортного средства и его загруженности находится в диапазоне $k_д$ от 0,45 до 0,5.

Этот коэффициент пропорционален $\mathrm{IRI}\sqrt{V}$, поэтому для грузовых автомобилей при скорости движения V=70 км/ч коэффициент динамичности на самых неровных из обследованных участках не будет превосходить значений $k_д$=0,5-0,75. Для рассматриваемого транспортного средства из-за сглаживания возмущения, вызванного его многоосностью, коэффициент динамичности нормальной реакции будет не больше указанных величин, и в среднем, для наиболее неровных из указанных выше отрезков, может быть принят равным $k_д$=0,5-0,6.

На более неровных отрезках участков и на поворотах скорости транспортных средств будут меньше от 2 до 3 раз, поэтому и на этих участках коэффициент динамичности будет не больше указанных значений.

Для более точного определения коэффициента динамичности и определения допустимой (по динамическому нагружению) скорости движения автопоезда требуется выполнение соответствующих расчетов его колебаний.

Приложение 2

Результаты работы программного комплекса моделирования процесса динамического взаимодействия колеса транспортного средства и дорожного покрытия с единичными и накопленными неровностями в среде МАТЛАБ

Начальные данные

$\upsilon := 0$ **Скорость колеса горизонтальная**

$\upsilon 1кмч := 60$ **60 км/час**

$\upsilon 2кмч := 90$ **90 км/час**

$\upsilon 3кмч := 120$ **120 км/час**

$\upsilon 1 := \upsilon 1кмч \cdot \frac{1000}{3600}$

$\upsilon 2 := \upsilon 2кмч \cdot \frac{1000}{3600}$ Скорость колеса горизонтальная, **м/сек**

$\upsilon 3 := \upsilon 3кмч \cdot \frac{1000}{3600}$

$R := 0.61$ **Радиус колеса (м)**

$R1 := 0.2876$ **ВАЗ Калина**

$R2 := 0.37195$ **УАЗ Хантер**

$R3 := 0.53775$ **КАМАЗ**

$R' := 0.02, 0.021 .. 0.9$ Диапазон изменения радиуса колеса (для построения зависимостей, м)

$r := 1$ **Радиус неровности (м)**

$r' := 0.02, 0.021 .. 0.9$ Диапазон изменения радиуса неровности (для построения зависимостей, м)

$a := 0.042$ **Высота неровности (м)**

$a1 := 0.001$ **1 милиметр**

$a2 := 0.003$ **3 милиметра**

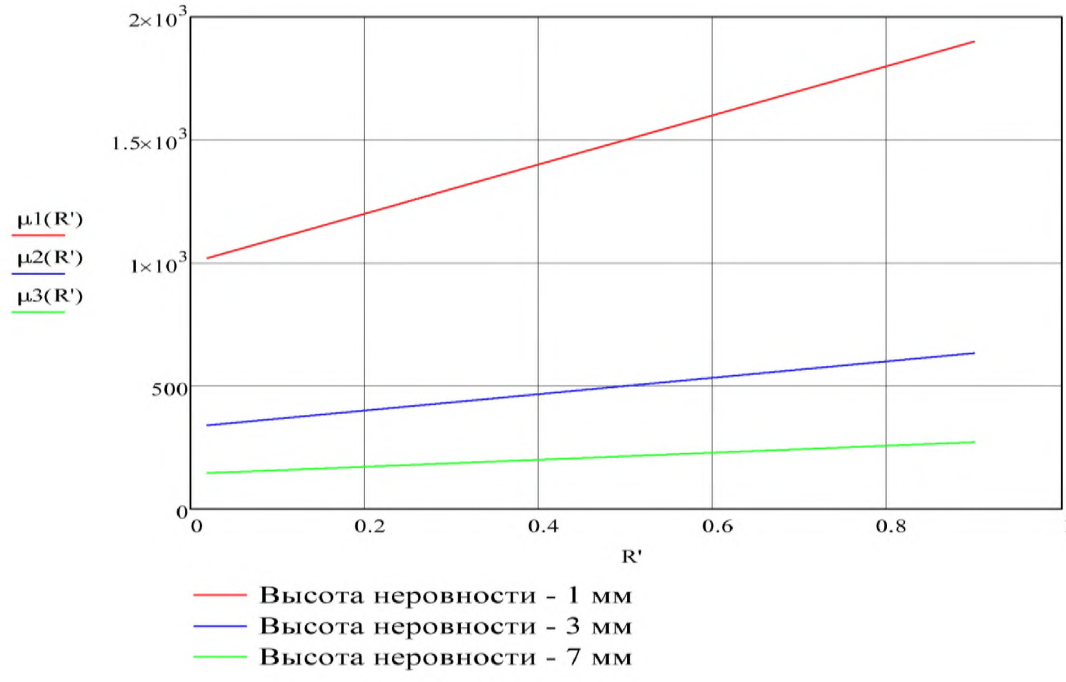
$a3 := 0.007$ **7 милиметров**

$g := 9.81$ Ускорение свободного падения

$\alpha := \frac{-\pi}{4}, \frac{-\pi}{4} + \frac{\pi}{100} .. \frac{\pi}{4}$ Диапазон изменения угла касательной в точке касания колеса и неровности от $-\pi/4$ до $+\pi/4$ (для постр. зависимостей, рад)

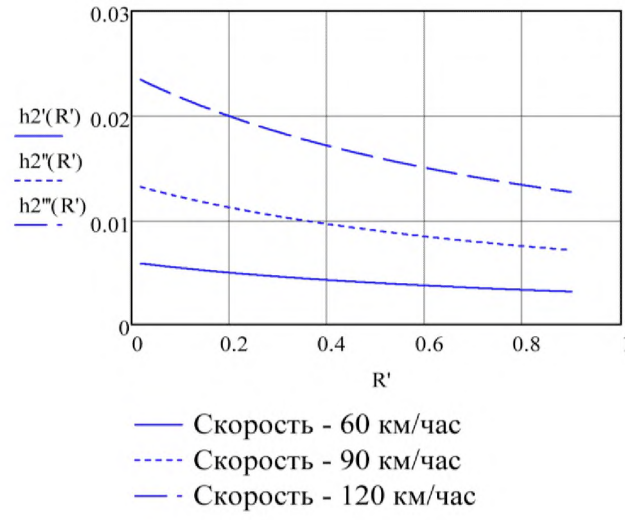
$$\mu 3(R') := \frac{(R' + r)}{a3}$$

Суммарный график

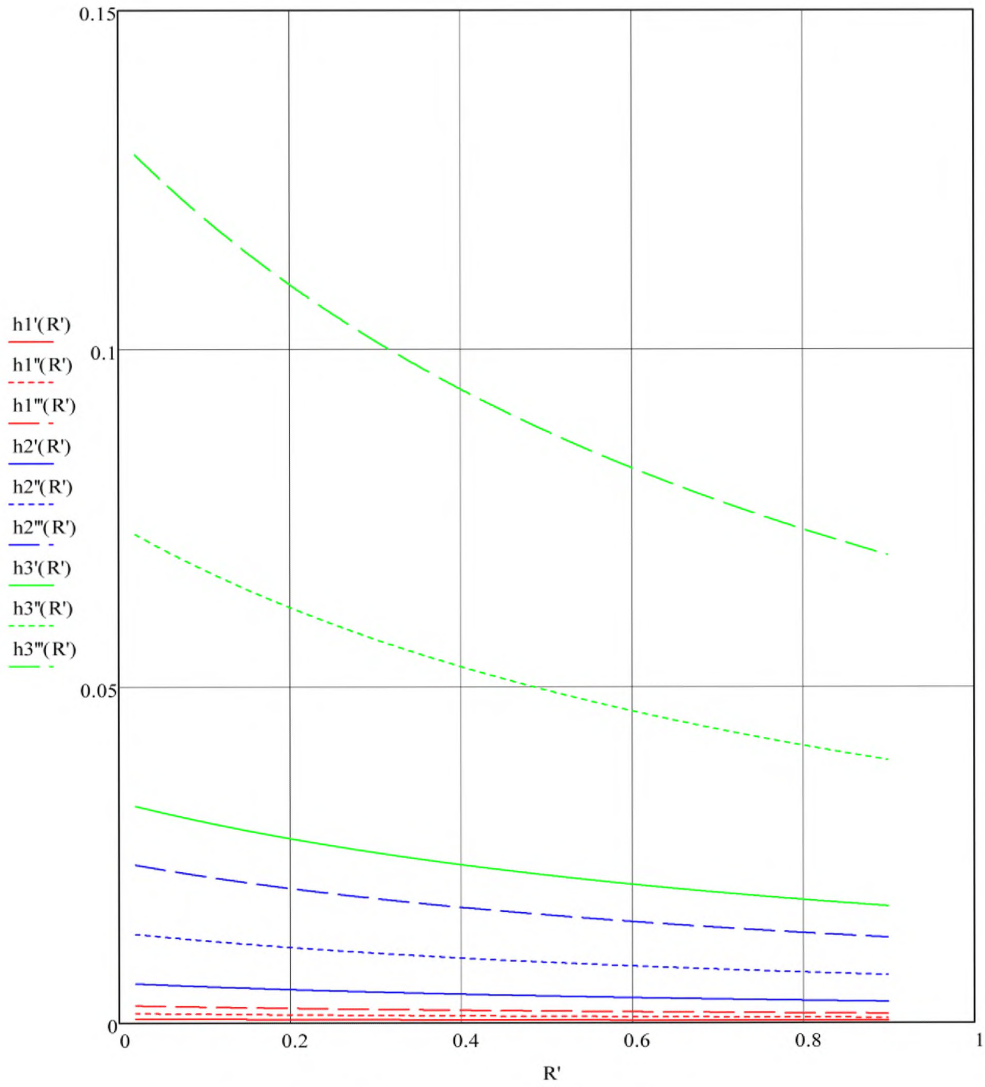


Для неровности, высотой 3 мм

$$h2'(R') := \frac{\left[\upsilon 1^2 \cdot \left[2\frac{(R'+r)}{a} - 1\right]\right]}{2g\left[\frac{(R'+r)}{a2} - 1\right]^2} \quad h2''(R') := \frac{\left[\upsilon 2^2 \cdot \left[2\frac{(R'+r)}{a} - 1\right]\right]}{2g\left[\frac{(R'+r)}{a2} - 1\right]^2} \quad h2'''(R') := \frac{\left[\upsilon 3^2 \cdot \left[2\frac{(R'+r)}{a} - 1\right]\right]}{2g\left[\frac{(R'+r)}{a2} - 1\right]^2}$$



Суммарный график



— Высота неровности - 1 мм, скорость - 60 км/час
----- Высота неровности - 1 мм, скорость - 90 км/час
— · Высота неровности - 1 мм, скорость - 120 км/час
— Высота неровности - 3 мм, скорость - 60 км/час
----- Высота неровности - 3 мм, скорость - 90 км/час
— · Высота неровности - 3 мм, скорость - 120 км/час
— Высота неровности - 7 мм, скорость - 60 км/час
----- Высота неровности - 7 мм, скорость - 90 км/час
— · Высота неровности - 7 мм, скорость - 120 км/час

Предельное значение скорости колеса для движения без отрыва от поверхности

(Начальные данные см. выше)

$\upsilon_{пред} := \sqrt{g \cdot (R + r)}$ — м/сек

$\upsilon_{пред_кмч} := \dfrac{\upsilon_{пред}}{\frac{1000}{3600}}$ — км/час

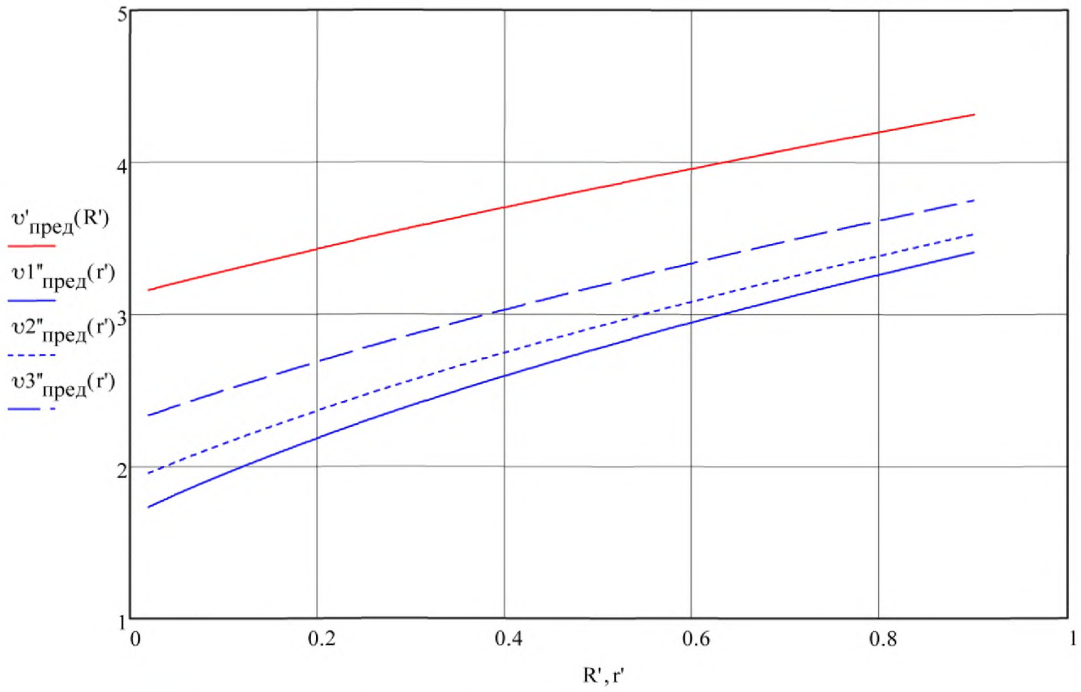
$\upsilon'_{пред}(R') := \sqrt{g \cdot (R' + r)}$ — Зависимость от радиуса колеса при радиусе неровности = 1 м

$\upsilon''_{пред}(r') := \sqrt{g \cdot (R + r')}$ — Зависимость от радиуса неровности для колес разных радиусов

$\upsilon 1''_{пред}(r') := \sqrt{g \cdot (R1 + r')}$ — Диаметр колеса = 0,2876 м (ВАЗ Калина)

$\upsilon 2''_{пред}(r') := \sqrt{g \cdot (R2 + r')}$ — Диаметр колеса = 0,37195 м (УАЗ Хантер)

$\upsilon 3''_{пред}(r') := \sqrt{g \cdot (R3 + r')}$ — Диаметр колеса = 0,53775 м (КАМАЗ)



Зависимость от радиуса колеса

Завис-ть от радиуса неровности для колеса, радиусом 0,2876 м

Завис-ть от радиуса неровности для колеса, радиусом 0,37195 м

Завис-ть от радиуса неровности для колеса, радиусом 0,53775 м

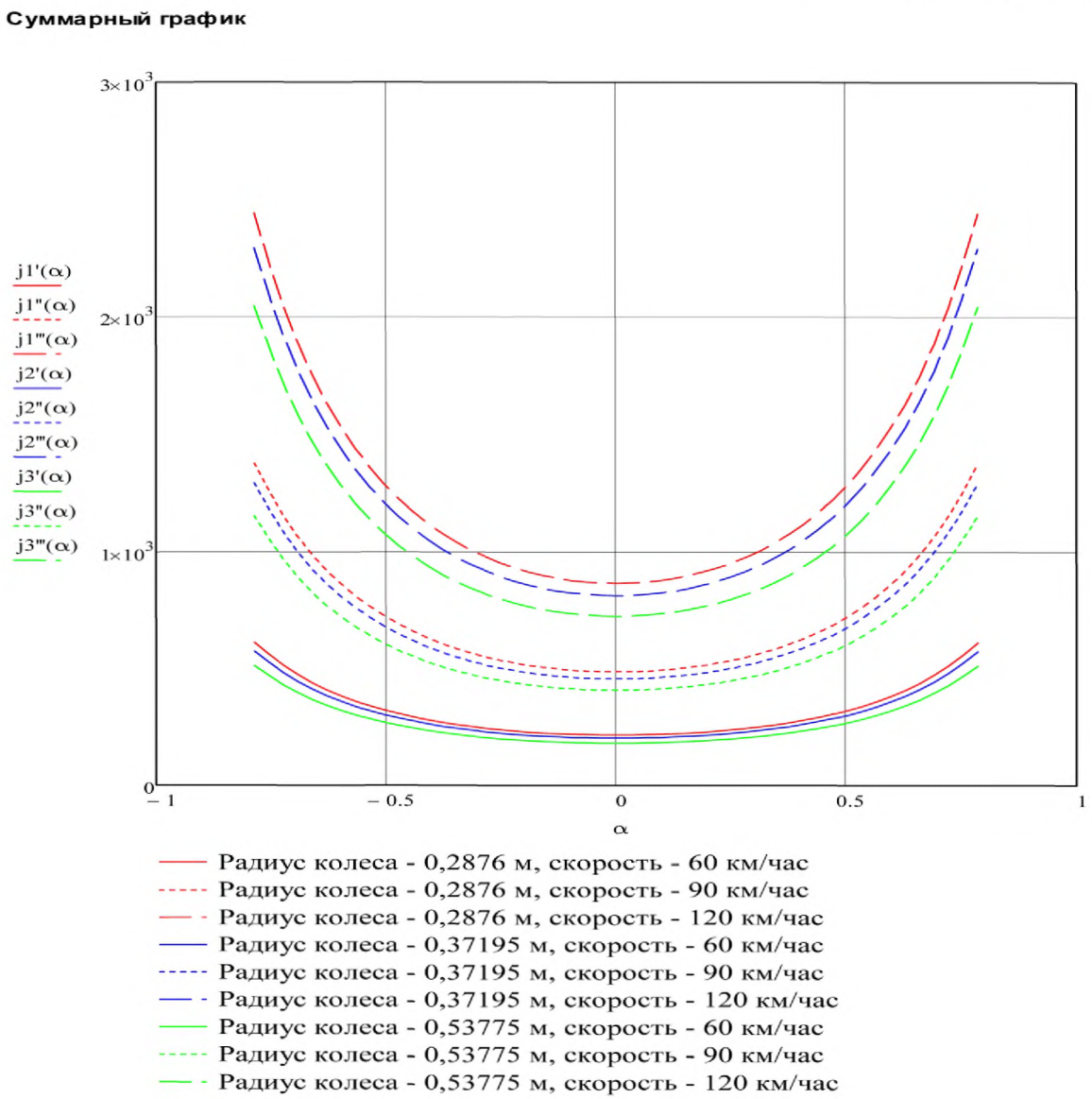
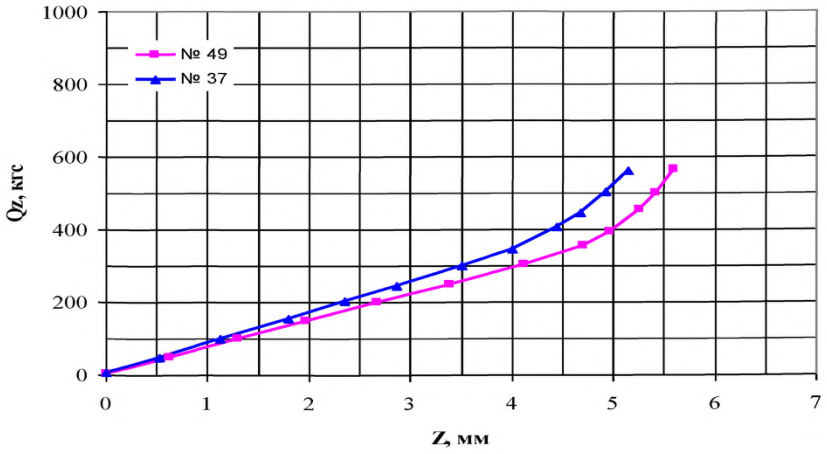


Рисунок П.2 Результаты работы программного комплекса имитационного моделирования процесса динамического взаимодействия колеса транспортного средства и дорожного покрытия с единичными и накопленными неровностями в среде МАТЛАБ

Приложение 3

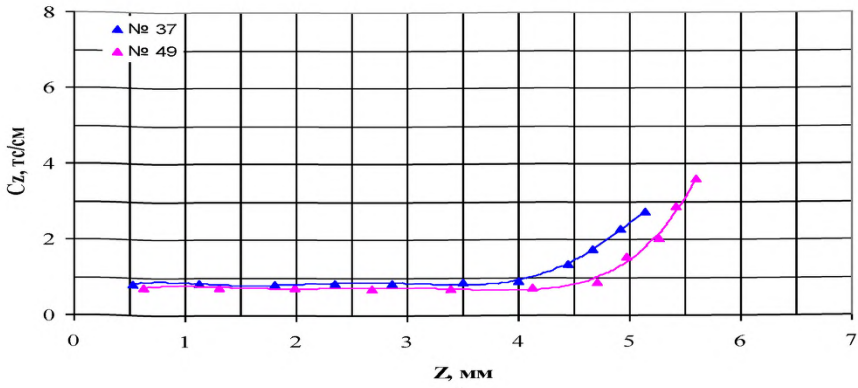
Результаты экспериментальных исследований по измерению изменения коэффициента динамичности

Нагрузочная характеристика для одного образца гидроопоры в осевом направлении Z



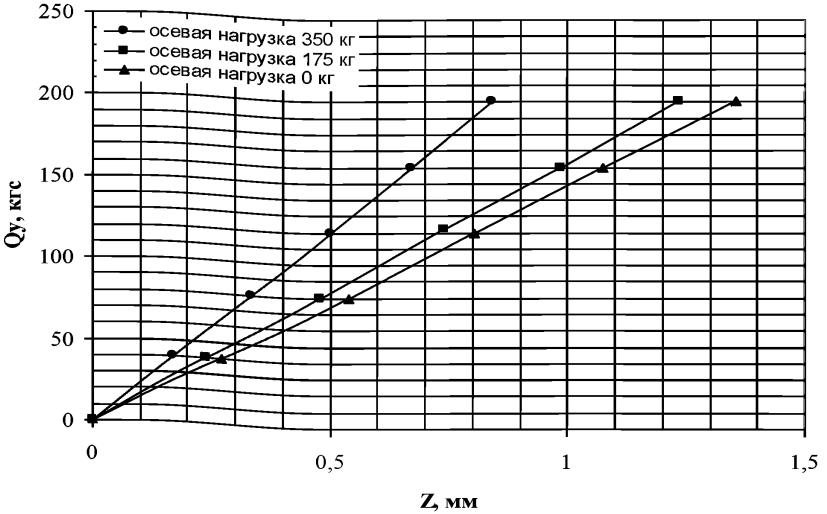
а

Статическая жесткость для одного образца гидроопоры в осевом направлении Z



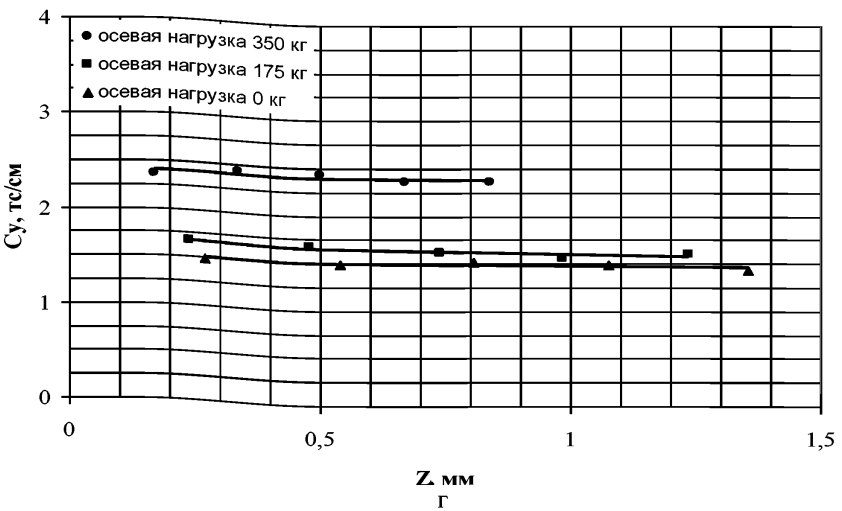
б

Нагрузочная характеристика для двух образцов гидроопоры в поперечном направлении Y



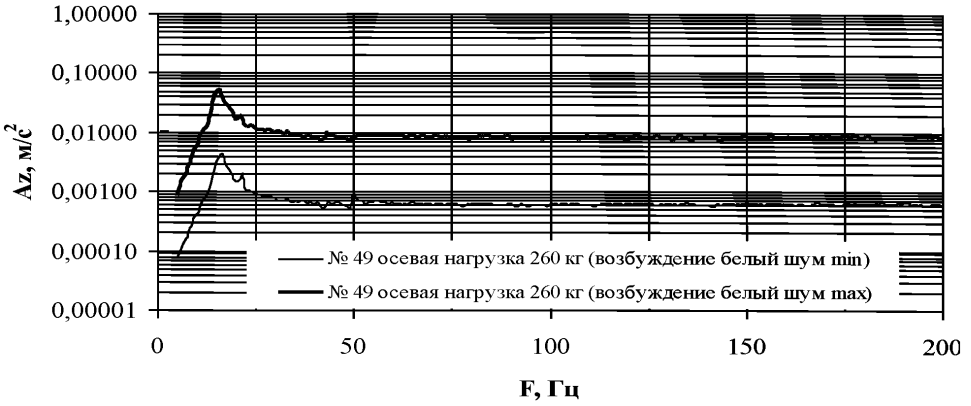
в

Статическая жесткость для двух образцов гидроопоры в поперечном направлении Y



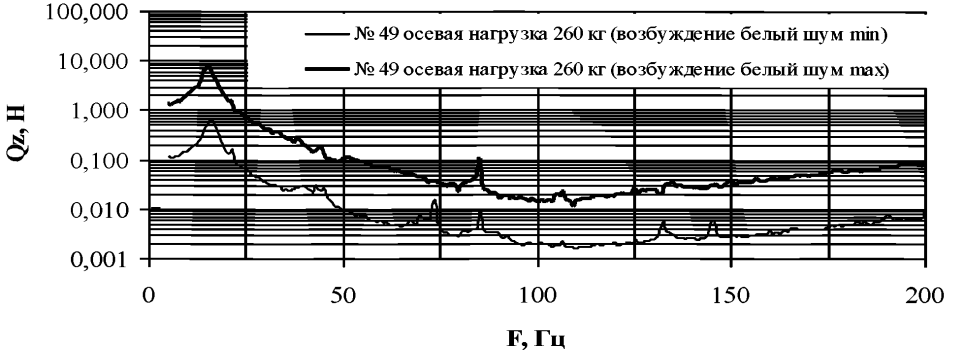
г

Ускорение на входе одного образца гидроопоры в осевом направлении



д

Динамическая сила на выходе одного образца гидроопоры в осевом направлении



е

Частота, Гц	15	25	50	100	110	150	200
Коэффициент динамичности	6,15	0,54	0,07	0,012	0,009	0,03	0,07

Анализ: минимальный коэффициент динамичности 0,009, максимальный коэффициент динамичности 6,15.

Рисунок П3 Результаты экспериментальных исследований по измерению изменения коэффициента динамичности

ОКС 93.040

Ключевые слова: автомобильные дороги, коэффициент динамичности, ровность, дорожное покрытие, дефекты, поврежденности, частота колебаний,

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

(РОСАВТОДОР)

РАСПОРЯЖЕНИЕ

04.12.2015 Москва № 2332-р

Об издании и применении ОДМ 218.11.001-2015 «Методические рекомендации по учёту увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности»

В целях реализации в дорожном хозяйстве основных положений Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и обеспечения дорожных организаций методическими рекомендациями по учёту увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности:

1. Структурным подразделениям центрального аппарата Росавтодора, федеральным управлениям автомобильных дорог, управлениям автомобильных магистралей, межрегиональным дирекциям по строительству автомобильных дорог федерального значения, территориальным органам управления дорожным хозяйством субъектов Российской Федерации рекомендовать к применению с даты утверждения настоящего распоряжения ОДМ 218.11.001-2015 «Методические рекомендации по учёту увеличения динамического воздействия нагрузки по мере накопления неровностей и определению коэффициента динамичности в зависимости от показателя ровности» (далее – ОДМ 218.11.001-2015).

2. Управлению научно-технических исследований и информационного обеспечения (А.В. Бухтояров) в установленном порядке обеспечить издание ОДМ 218.11.001-2015 и направить его в подразделения и организации, указанные в пункте 1 настоящего распоряжения.

3. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на заместителя руководителя А.А. Костюка.

Руководитель Р.В. Старовойт

gost.e-ecolog.ru

О.В. Каширина
(495) 687-88-23 доб. 50-271