

СССР — МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М. И. КАЛИНИНА

МОРОЗ Иван Кириллович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДИНАМИКИ
ДВУХЪЯРУСНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

(05.22.07 — Подвижной состав и тяга поездов)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1975

НТБ
ДНУЖТ

СССР - МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА имени М.И.Калинина

На правах рукописи

МОРОЗ Иван Кириллович

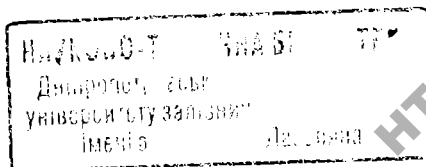
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДИНАМИКИ
ДВУХЪЯРУСНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

(05.22.07 - Подвижной состав и тяга поездов)

А в т о р е ф р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1975



Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта им. М.И. Калинина

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ - кандидат технических наук,
доцент Савчук О.И.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ - доктор технических наук,
профессор Котуранов В.И.
кандидат технических наук,
доцент Данович В.Д.

ВЕДУЩЕЕ ПРЕДПРИЯТИЕ - Днепродзержинский вагоно-
строительный завод имени
газеты Правда

Автореферат разослан "10" сентября 1975 г.

Защита диссертации состоится "16" октября 1975 г.
на заседании Ученого Совета Днепропетровского института
инженеров железнодорожного транспорта им. М.И.Калинина
(г. Днепропетровск, 10, Университетская, 2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута .

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные
печатью, просьба направлять по указанному адресу

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук

В.Н.Плахотник

НТБ
ДНУЖТ

Осуществляемое в соответствии с решениями XXIV съезда КПСС усиление материально-технической базы железнодорожного транспорта, совершенствование организации и технологии производства, улучшение использования технических средств позволили за четыре года девятой пятилетки освоить небывалый прирост перевозок продукции промышленности и сельского хозяйства и повысить эффективность работы железных дорог.

Первостепенное внимание на всех этапах развития железных дорог СССР уделялось и уделяется совершенствованию вагонного парка и его структуры

Бурное развитие всех отраслей промышленности, освоение новых видов продукции ставит перед железнодорожным транспортом задачу постоянного увеличения парка специализированных вагонов, которые по сравнению с универсальным подвижным составом имеют лучшие технико-экономические показатели.

Планом развития народного хозяйства СССР предусматривается неуклонный рост производства автомобилей, для чего вводятся в строй новые заводы и дополнительные мощности на действующих автомобильных заводах

За четыре года девятой пятилетки выпуск легковых автомобилей по сравнению с 1970 годом возрос более чем в 4,5 раза и в 1974 году составил 1119000 машин.

Анализ доставки автомобилей потребителям показал, что около 80 % их доставляется по железным дорогам. В условиях массового производства легковых автомобилей их перевозку экономически целесообразно производить на специализированном подвижном составе

НТБ
ДНУЖТ

В связи с этим, Днепропетровским вагоностроительным заводом им. газеты Правда совместно с ВНИИ вагоностроения, ЦНИИ МПС и другими организациями был создан двухъярусный вагон для перевозки легковых автомобилей. Двухъярусный подвижной состав в нашей стране разрабатывался впервые. В процессе проектирования и доводки конструкции вагона ДИИТ"ом при участии автора производились теоретические исследования, положенные в основу настоящей работы.

Цель диссертации. Разработка методики уточненных теоретических исследований прочности кузовов двухъярусного подвижного состава для перевозки легковых автомобилей, выбор целесообразных конструктивных схем и параметров кузовов, исследование частот и форм их собственных колебаний с учетом конечной жесткости элементов, экспериментальная проверка результатов теоретических исследований.

Методы исследования. Для прочностных исследований применялись классические методы строительной механики стержневых систем и современные методы прикладной теории упругости. Исследования проводились на цифровых вычислительных машинах. Выбор улучшенных вариантов конструкции кузова выполнялся методом детерминированного поиска в упорядоченной последовательности вариантов. Обусловленность конструктивной схемы проверялась на АВМ путем варьирования жесткостей элементов .

Для исследований динамических характеристик кузова применен метод дискретных масс, собственные числа характеристических матриц определялись с помощью $Q-R$ алгоритма

Экспериментальные исследования проводились путем статических и динамических испытаний натурных образцов вагонов

НТБ
ДНУЖТ

Обработка результатов выполнялась с применением корреляционно-го и регрессионного анализа. Для оценки возможных погрешностей эксперимента произведен статистический анализ жесткостей ряда тонкостенных прокатных профилей, применяемых в вагоно-островении

Научная новизна. Для исследования прочности массивных элементов кузовов подвижного состава применен метод конечных элементов. Используя принцип локализации нормальных и касательных напряжений, исследовано влияние металлической обшивки рамы на напряженно-деформированное состояние кузова вагона при действии продольных сил. Произведен анализ частот и форм колебаний вагонов с учетом влияния упругого подвешивания загуженных в них автомобилей.

На основе анализа работы конструкции первого варианта вагона разработана новая конструктивная схема кузова с улучшенной передачей нагрузки от верхнего яруса на нижнюю раму, на которую Государственным Комитетом при Совете Министров СССР по делам изобретений и открытий выдано авторское свидетельство.

Реализация на производстве. Рекомендации по выбору рациональных профилей для основных конструктивных элементов шестистоечного кузова реализованы в конструкции вагона, принятого к серийному выпуску. Через два года эксплуатации этот вагон удостоен Знака качества.

По предложенной конструктивной схеме с улучшенной передачей нагрузки от верхнего яруса на нижний построен образец двухъярусного вагона, который по результатам испытаний допущен к опытной эксплуатации на Волжском автозаводе. Опыт эксплуата-

НТБ
ДНУЖТ

тации двух типов вагонов позволит определить наиболее целесообразные параметры двухъярусного вагона для перевозки автомобилей на перспективу

Практическая ценность работы. Проведенные исследования послужили основой для создания методики расчета и оценки прочности двухъярусного подвижного состава, которая использована при создании отечественных типов специализированных вагонов для перевозки легковых автомобилей .

Объем работы. Диссертация изложена на 117 страницах машинописного текста, состоит из пяти глав, содержит 45 рисунков и 38 таблиц, выводы, список литературы из 146 наименований и приложения

I. Состояние вопроса. Постановка задачи.

Основная цель, преследуемая при проектировании подвижного состава, заключается в обеспечении прочности всех его элементов при возможно меньшей металлоемкости конструкции . Большим вкладом в разработку и развитие точных и оригинальных методов расчета на прочность отдельных узлов вагона послужили труды профессоров М. В. Винокурова, А. А. Попова, Л. А. Шадура, Е. Н. Никольского и др. Важные теоретические и экспериментальные исследования в области динамики вагонов выполнены академиком АН УССР В. А. Лазаряном, профессорами И. И. Челноковым, С. Б. Вершинским, А. А. Львовым, Е. П. Блохиным и др. Постоянный вклад в теорию и опытные исследования динамики и прочности подвижного состава вносят научные коллективы ЦНИИ МПС, ВНИИ-вагоностроения, научно-исследовательские лаборатории и вагонные кафедры МИИТ"а, ЛПИЖТ"а, БИТИ"а, ДПИТ"а, ХПИТ"а и др. Применение вычислительных машин привело к пересмотру расчетных моделей подвижного состава-

НТБ
ДНУЖТ

ва, появилась возможность рассматривать системы с учетом пространственной работы конструкции. Наиболее удобными для составления алгоритмов расчета являются методы линейной алгебры, что объясняет широкое проникновение теории матриц в строительную механику и в теорию расчета вагонов. Кузова двухъярусных вагонов содержат элементы различной марности (стержни, пластины), что не позволяет с достаточной точностью определить напряженное состояние некоторых элементов (например, стоек) методами расчета стержневых систем. Это предопределило применение метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет осуществить непосредственный переход от континуального объекта к дискретному. Развитию и применению МКЭ к решению инженерных задач посвящены работы советских ученых Л.В.Вейнбарга, А.С.Городецкого, А.Л.Филина, В.А.Постнова, И.Я.Хархурица, Л.А.Розина, Н.И.Безухова, О.В.Лужина, С.Б.Ухова и др. МКЭ сопряжен с большим объемом вычислительной работы, поэтому при рассмотрении плоских рам с металлической обшивкой весьма удобно пользоваться методом локализации касательных и нормальных напряжений, который развит в трудах А.Ф.Феофанова, С.Н.Кана, И.А.Свардлова. В последние годы большое внимание уделяется решению обратной задачи теории сооружений — когда по заданным нагрузкам и условиям прочности необходимо получить наиболее экономичное распределение материала в конструкции. Проблема оптимального проектирования конструкций находится еще в стадии становления, но наличие современных вычислительных машин создает благоприятные условия для ее решения. Большим вкладом в теорию оптимального проектирования конструкций являются труды И.М.Рабиновича, К.М.Хуберяна, Ю.А.Радцига, А.И.Виноградова, С.Н.Королькова, Я.Ю.Шаца, Н.Д.Сер —

НТБ
ДНУЖТ

геева, Н.С. Храповицкого и др. Развитие теории электронного моделирования (Г.Е. Пухов, К.А. Керопян, А.Е. Степанов, О.Н. Токарева, О.М. Савчук и др.) и создание специализированных аналоговых машин позволяет успешно использовать их для вариантной оптимизации стержневых систем. Весьма важным для оценки динамических качеств вагонов с невысокой жесткостью элементов кузова является анализ частот и форм колебаний вагона с учетом конечной жесткости элементов кузова. Методика исследований собственных колебаний кузовов подвижного состава разработана в трудах В.А. Лазаряна, В.Ф. Ушкалова, С.И. Конашенко

Наличие в вагоне для перевозки автомобилей второго яруса, удерживаемого с помощью нескольких стоек, специфические условия передачи нагрузок, наличие металлической обшивки рам — все это вносит существенные изменения в расчетные схемы и методику исследований.

В реферируемой работе объектами исследований являются два типа кузовов двухъярусных вагонов

а) соединение верхней рамы с нижней осуществляется с помощью шести стоек (четырех угловых наклонных и двух средних вертикальных). Такая конструктивная схема была рекомендована ВНИИ-вагоностроения и внедрена в серийном образце вагона. В дальнейшем такой кузов будем называть «шестистоечным»

б) соединение верхней рамы с нижней осуществляется с помощью четырех стоек, что позволяет уменьшить внутренние усилия в нижней раме, повысить грузопместимость кузова на один автомобиль и снизить тару вагона. Такая конструктивная схема разработана ДВЗ и ДИИТ"ом с участием автора. В дальнейшем такой кузов будем называть «четырехстоечным»

НТБ
ДНУЖТ

По обоим типам кузовов были решены следующие задачи

1. Исследование напряженного состояния конструкции кузовов, рассматриваемых, как пространственные стержневые системы, на которые действуют сочетания расчетных вертикальных и горизонтальных (продольных и поперечных) нагрузок. При проведении исследований применялись ЭВМ „Урал-3" и „Минск-32".

2. Для уточненного расчета конструкции с учетом работы обшивки рам и для исследования прочности отдельных узлов ваго- на применялись методы теории упругости. Исследования напряжен- ного состояния стоек с элементами продольных балок верхнего и нижнего ярусов производились методом конечных элементов. Учет работы панелей обшивки рам при действии продольных сил производился в соответствии с принципом локализации касатель- ных и нормальных напряжений. Решение задач производилось на ЭВМ „Урал-3" и „Минск-32".

3. С целью создания более равнопрочной конструкции, при уменьшении ее металлоемкости, производился поиск модификации кузова с наиболее рациональными профилями основных несущих элементов. Задача решалась как экстремальная комбинаторная в упорядоченной последовательности вариантов на ЭВМ „Урал-3" и методами электронного моделирования на АВМ ЭМСС-8 „Альфа" Оценка равнопрочности конструкции производилась по коэффициен- ту равноправности, который определяется отношением максималь- ных характерных напряжений к минимальным

$$K_p = \frac{\sigma_{i \max}}{\sigma_{j \min}} \leq Z \quad (1 \leq Z \leq 3,5);$$

4. Исследовались частоты и формы собственных колебаний кузовов вагонов, которые рассматривались как пространственные стержневые системы с сосредоточенными массами. Анализ собствен-

ных колебаний производился для порожнего состояния вагона и груженого подрессоренным и неподрессоренным грузом .

5. Проведена экспериментальная проверка результатов теоретических исследований. Опытные образцы вагонов подвергались статическим, ударным и динамическим (ходовым) испытаниям. Для более достоверной оценки результатов эксперимента произведена статистическая оценка разброса жесткостных параметров основных прокатных профилей, применяемых в конструкции. Дан анализ безопасности движения вагонов по коэффициенту устойчивости колесных пар против схода с рельсов

П. Исследование прочности и поиск улучшенных вариантов конструкции подвижного состава для перевозки легковых автомобилей.

Расчетные схемы шести- и четырехстоечного кузовов двухъярусных вагонов выбирались в виде пространственных стержневых систем так, чтобы было возможным с помощью метода сил исследовать на ЭЦВМ распределение внутренних усилий и напряжений в несущих элементах конструкций от действия нагрузок, симметричных относительно продольной оси вагона. Поэтому в расчетные схемы включались половины кузовов, отсеченных вертикальной продольной плоскостью симметрии.

При производстве расчетов принимались во внимание деформации, оказывающие существенное влияние на напряженное состояние конструкции

- а) изгиб всех стержней в вертикальной плоскости ;
- б) растяжение-сжатие продольных балок и стоек кузова
- в) изгиб поперечных балок в горизонтальной плоскости;
- г) кручение поперечных балок с закрытыми профилями

НГБ
ДНУЖТ

Такие расчетные схемы позволили определить напряженное состояние от действия вертикальных нагрузок и продольных инерционных сил, вызванных ускорениями верхнего яруса величиной

3g

При расчетах на продольные нагрузки расчетная схема должна отражать работу металлического настила пола вагона. Здесь дополнительно к перечисленным выше деформациям принимались во внимание работа на сдвиг панелей обшивки нижней рамы. В качестве примера на рис. I показана основная система для расчета четырехстоечного кузова. В соответствии с принципом локализации касательных и нормальных напряжений панели обшивки работают только на сдвиг, не препятствуя деформациям смежных продольных и поперечных балок рамы. Работа панелей обшивки на растяжение-сжатие учитывается путем присоединения ее эффективной площади к площади продольных элементов рамы. Обшивка рамы представляется в виде прямоугольных панелей с непрерывно распределенными касательными связями. Добавочные неизвестные выбираются групповыми для соседних панелей и являются равнодействующими касательных сил панелей.

Исходя из основного уравнения метода сил в матричной формулировке, матрица лишних неизвестных определяется выражением

$$X = - (B_1^T K B_1)^{-1} (B_1^T K \bar{B}_p); \quad (I)$$

где B_1 - матрица усилий в расчетных сечениях от единичных неизвестных ;
 $\bar{B}_p$ - матрица усилий, в тех же сечениях от внешней нагрузки ;
 K - матрица податливости (жесткости) элементов системы

НТБ
ДНУЖТ

При включении в расчетную схему панелей обшивки, система остается дискретной, но составление исходных матриц имеет некоторые особенности. Матрица усилий от единичных неизвестных представляется блочной и состоит из двух подматриц B_1 и B_0 , которые определяются лишними неизвестными стержневой системы и панелей обшивки

$$B_1^* = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_0 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

Матрица податливости дополняется блоком K_q , характеризующим податливость панелей обшивки сдвигу

$$K^* = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & K_q \end{pmatrix}; \quad (3)$$

Податливость сдвигу панели площадью f и толщиной δ характеризуется выражением

$$k = \frac{f}{G \delta}; \quad (4)$$

где G - модуль сдвига.

Матрица $\bar{B}_p^*$ строится как для стержневой системы, но для соответствия с размерами остальных матриц она дополняется нулевыми строками.

Исследование напряженного состояния кузовов без учета и с учетом работы на сдвиг обшивки рамы показало, что при расчетах на продольные силы результаты существенно отличаются. В таблице I приведены значения напряжения в характерных сечениях нижней рамы вагона с четырехстоечным кузовом (рис. I) от продольной сжимающей нагрузки 250 т.

НТБ
ДНУЖТ

Таблица I

№ стержня	Сечение	Б расчетные (кг/см ²)		Б измеренные (кг/см ²)	
		Основная система стержневая	С учетом обшивки рамы	Средние	Максимальные
2	X-3	-1150	-900	-875	-925
3	X-4	-980	-765	-740	-840
4	X-5	-1305	-960	-1005	-1140
5	X-7	-1390	-1020	-1075	-1170
10	X-I	-50	-175	-190	-225
11	H-5	-285	-325	-305	-440
12	H-7	-590	-590	-435	-525
17,22,37	K-I	-1170	-875	-820	-965
18,23,38	Ш-I	1150	470	335	440
19,24,39	П-I	-870	-225	-115	-210

Как видно из приведенного, уточнение расчетной схемы позволяет на 7-30 % улучшить результаты расчета, что в последствии было подтверждено экспериментом.

По специально построенной расчетной схеме был выполнен расчет на боковые поперечные нагрузки и затем оценена прочность конструкции. Оказалось, что исходные варианты кузовов, выбранные конструктивно, имеют большую неравнопрочность, а по отдельным сечениям не обеспечивают прочности. Это потребовало проведения исследований по более рациональному выбору параметров элементов конструкций без изменения общей конструктивной

НТБ
ДНУЖТ

схемы кузова (основные размеры определяются по возможностям установки на кузов легковых автомобилей). Задача оптимизации конструкции кузова заключалась в подборе наиболее рациональных профилей для изготовления отдельных элементов, обеспечивающих требуемую прочность, жесткость и технологичность конструкции. Каждый типоразмер профилей имеет дискретные значения геометрических характеристик сечения. Вследствии этого задача оптимизации сформулирована как экстремальная комбинаторная. Поиск улучшенной конструкции производился методом детерминированного поиска в упорядоченной последовательности вариантов на ЭЦВМ по разработанной программе и на электронных моделях. Моделирование кузовов вагонов производилось на основе смешанного метода. Применение указанной методики позволило из множества вариантов выбрать такие конструкции, в которых максимальные расчетные напряжения в характерных сечениях ряда элементов кузова близки к допускаемым, а соотношения характерных напряжений (коэффициент равнопрочности) не превышает трех. Эти варианты реализованы в конструкциях вагонов.

III. Расчет стоек двухъярусных вагонов методом конечных элементов.

Стойки двухъярусных вагонов – плоские сварные конструкции коробчатого сечения, которые только при грубой идеализации расчетной схемы можно считать стержнями. Поэтому для их расчета применен метод конечных элементов. Расчет конструкции вагона от действия вертикальной симметричной нагрузки и продольных сил инерции требует решения плоской задачи теории упругости с использованием конечных элементов треугольной формы. Основное уравнение МКЭ определяет связь между узловыми усилия-

НТБ
ДНУЖТ

ми и узловыми перемещениями

$$KU = P \quad (5)$$

где

K - матрица жесткости

U - вектор узловых перемещений

P - вектор узловых усилий

Матрица жесткости конечного элемента определяется выражением

$$K_e = B^T D B \Delta t; \quad (6)$$

где

Δ - площадь конечного элемента

t - толщина элемента

Для изотропного материала при плоском напряженном состоянии

$$D = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

где

E - модуль упругости ;

μ - коэффициент Пуассона

$$B = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{pmatrix}; \quad (8)$$

b, c - коэффициенты, выражаемые через координаты узлов i, j, k треугольного элемента .

Наиболее трудоемкой задачей МКЭ является формирование матрицы жесткости всей системы, которая определяется в результате последовательного объединения матриц жесткости отдельных элементов. Порядок матрицы при данной разбивке на элементы не может регулироваться, но упорядоченная нумерация узлов существенно влияет на компактность матрицы и может придать ей ленточную структуру .

НТБ
ДНУЖТ

Расчет по МКЭ выполнялся в следующей последовательности

I. Разработка расчетной схемы

а) установление исходных геометрических размеров расчетной области ;

б) назначение сетки разбивки ;

в) назначение граничных условий ;

г) приведение нагрузок к узловым точкам

2.Определение матриц жесткости каждого из конечных элементов.

3.Формирование обобщенной матрицы жесткости всей системы.

4.Формирование системы уравнений

5.Решение системы уравнений.

6.Определение искомым полей напряжений, деформаций, усилий.

При проведении уточненного расчета из конструкции кузова условно вырезалась стойка с элементами верхней и нижней продольных балок длиной 2,5 м . Рассматриваемая область разбивалась на 46-56 элементов. Граничные условия определялись по результатам расчета кузова как стартовой системы.Примененный метод позволил получить картину распределения напряжений по всей поверхности стойки и дать достоверную оценку прочности данному элементу конструкции .

IV. Исследование частот и форм собственных колебаний двухъярусных вагонов

Спектр частот и формы собственных колебаний подвижного состава можно получить, если рассматривать кузова как упругие системы. В основу расчета положен способ замены распределенных масс сосредоточенными с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Система дифференциальных уравнений, описывающих колебания кузова, имеет вид:

Днепропетровский национальный университет
имени академика

НТБ
ДНУЖТ

важущих колебания вагона имеет вид

$$A\ddot{q} + Cq = 0 \quad (9)$$

где A - диагональная матрица инерционных коэффициентов;

C - матрица квазиупругих коэффициентов

$\ddot{q}, q$ - векторы обобщенных ускорений и координат в расчетной схеме

В связи с большим объемом вычислительной работы расчетная схема была упрощена и взята в виде четверти кузова. Используя свойство симметрии и кососимметрии форм колебаний, исследования проводились по каждой из форм отдельно, для чего устанавливались соответствующие граничные условия по осям симметрии расчетной схемы. Учитывая специфику работы вагона, при исследовании форм и частот колебаний использовались два типа расчетных схем

1. Расчетная схема в виде невесомой упругой пространственной стержневой системы, собственная масса которой и масса груза сосредоточены в виде дискретных масс. Опорами кузова являются упругие элементы, жесткость которых соответствует жесткости рассорного подвешивания тележки ЦНИИ-ХЗ-О с 5-пружинными комплектами. Эта схема моделирует колебания порожнего вагона, или груженого неподдресоранным грузом (при соответствующих значениях масс).

2. Расчетная схема в виде невесомой упругой пространственной системы, собственная масса которой сосредоточена в виде дискретных масс. Места расположения сосредоточенных масс кузова выбирались таким образом, чтобы вблизи них находились колеса погруженных на вагон автомобилей. Масса груза (автомобилей) так же дискретизировалась и располагалась над дискрет-

НТБ
ДНУЖТ

ными массами кузова. Между этими массами ставились упругие элементы, жесткость которых соответствовала жесткости подвешивания автомобилей. Расчетная схема для исследования колебаний подпрыгивания вагона с четырехстоечным кузовом, груженого автомобилями, показана на рис. 2.

Квазиупругие коэффициенты уравнений (9) определялись методами электронного моделирования. При составлении моделей учитывались деформации

- изгиб всех стержней в вертикальной плоскости ,
- кручение шкворневых балок ,
- кручение хребтовой балки при косооимметричных смещениях узлов,

Матрица, описывающая колебания вагона груженого автомобилями, является блочной и состоит из четырех подматриц. Порядок ее в два раза выше чем у матриц, описывающих колебания порожнего вагона

$$B = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$A_{12} = A_{21}$ - диагональные подматрицы квазиупругих коэффициентов, характеризующих жесткости подвешивания автомобилей

A_{11} - подматрица, содержащая компоненты матрицы коэффициентов для анализа колебаний порожнего вагона, к коэффициентам главной диагонали которой добавлены приведенные жесткости подвесок автомобилей ;

A_{22} - диагональная подматрица, содержащая инерционные коэффициенты уравнений колебаний автомобилей .

НТБ
ДНУЖТ



Рис. 2. Расчётная схема для исследования колебаний вагона груженого автомобилями.

Решение проблемы матриц вида (10) производилось на ЭЦМ „Минск-22" с применением $Q-R$ алгоритма Франсиса-Кублановской. Собственные векторы (формы колебаний) определялись по специальной программе. В результате получены частоты и формы четырех видов колебаний вагона подпрыгивания, голопирования, боковой качки и кососимметричные (крутильные). Анализ форм (распределения амплитуд) собственных колебаний позволяет выявить при каких частотах возможны повышенные амплитуды колебаний отдельных элементов кузова.

Исследование показало, что формы колебаний порожнего вагона, груженого автомобилями или неподдрессированным грузом при одном номере частоты имеют качественно подобных характер. Представляет интерес зависимость частот собственных колебаний от загрузки вагона. В табл.2 приведены частоты трех низших форм колебаний (в Гц) для различной загрузки четырехосевного вагона

Таблица 2

Форма колебаний	№ частоты	Вагон груженный неподдрессированным грузом	Вагон порожний	Вагон груженный автомобилями
Подпрыгивание	1 2 3	2,2 3,75 5,64	3,45 6,59 7,45	3,98 7,24 7,63
Голопирование	1 2 3	3,11 4,57 6,74	5,39 7,07 9,47	5,87 7,38 9,66
Боковая качка	1 2 3	2,22 3,89 7,19	3,61 6,97 11,8	4,36 7,49 12,1
Крутильные колебания	1 2 3	2,24 4,07 7,67	3,51 7,04 11,6	4,36 7,54 11,7

НТБ
ДНУЖТ

Как видно из таблицы, наиболее низкие частоты собственных колебаний имеет вагон, загруженный неподрессоренным грузом. У порожнего вагона частоты выше, а у груженого автомобилями с включенным подвешиванием — еще выше, чем у порожнего вагона. Из трех рассмотренных состояний наиболее неблагоприятным является первое, поэтому динамические испытания вагона проводились при загрузке его макетами автомобилей без рессорного подвешивания, а также в порожнем состоянии.

У. Экспериментальное исследование прочности и динамики двухъярусного подвижного состава для перевозки легковых автомобилей.

Объем испытаний и методика их проведения соответствовали действующим нормам и положениям. Результаты эксперимента хорошо согласуются с данными аналитических исследований.

Прочность кузовов двухъярусных вагонов по всем расчетным режимам обеспечена. Динамические характеристики вагонов при движении в порожнем и груженом состояниях в диапазоне скоростей до 120 км/ч — удовлетворительные.

Отклонения параметров сечений прокатных и штампованных профилей, обусловленные допусками, соизмеримы с их номинальными значениями и носят случайный характер. В отдельных случаях это может привести к значительному перераспределению внутренних усилий и напряжений (конструкция слабо обусловлена). В связи с этим были проведены исследования практического распределения размеров некоторых прокатных профилей, применяемых в конструкциях двухъярусных вагонов — зет № 31, швеллеры, двутавры и полосовая сталь. Обработка результатов измерений производилась на ЭЦМ «Наири-2». Анализ результатов исследований

НТБ
ДНУЖТ

показал, что отклонение величин геометрических характеристик сечений прокатных профилей по отношению к их номинальному значению достигает 16 %. Поэтому, при исследовании прочности кузовов подвижного состава целесообразно производить проверку обусловленности конструкции с учетом разброса жесткостей ее основных несущих элементов в пределах $\pm 20 \%$.

В ы в о д ы

1. Внедрение двухъярусных вагонов для перевозки легковых автомобилей является технически и экономически целесообразным. Такие вагоны позволяют обеспечить перевозки все возрастающего выпуска легковых автомобилей минимальным количеством подвижного состава.
2. Проведенные исследования показали, что для анализа напряженного состояния кузова от действия вертикальных нагрузок достаточно выбрать расчетную схему в виде пространственной стержневой системы, включающей несущие балки нижней и верхней рам, а также стойки кузова. Расчет следует выполнять на ЭЦМ или на аналоговой ЭВМ "Альфа" по разработанной в диссертации методике. Экспериментальная проверка показала на приемлемую для практики точность расчетов.
3. Исследования напряженного состояния конструкции от продольных сил показали, что расчет кузова, как стержневой системы приводит к значительным погрешностям. Рекомендуется применить методику расчета с включением в расчетную схему обшивы нижней рамы, работающей на сдвиг. При этом точность рас-

НТБ
ДНУЖТ

чета повышается для различных элементов конструкции на 7 - 30 % .

4. Специфика конструкции двухъярусных вагонов предопределяет необходимость расчета кузова на действие продольных инерционных сил по верхнему ярусу. Рекомендуется принимать эти силы распределенными по длине продольных балок. При оценке прочности кузова следует принимать во внимание большие из напряжений, полученных при расчете на силы инерции или продольные силы .
5. При расчете кузовов вагонов, как пространственной стержневой системы, не удастся получить достоверную картину распределения напряжений в массивных элементах, которыми являются стойки с усиленными участками продольных балок. Для анализа их напряженно-деформированного состояния рекомендуется применить метод конечных элементов. Проведенное исследование с помощью МКЭ показало высокую эффективность этого метода и достоверность результатов .
6. Уточненный расчет показал, что величины напряжений в элементах кузовов двухъярусных вагонов при действии боковых нагрузок находятся в пределах 10 % от напряжений, вызванных вертикальной статической нагрузкой. Поэтому при оценке прочности кузовов рекомендуется учитывать напряжения от боковых сил согласно действующих норм.
7. Статистические исследования жесткости прокатных профилей, применяемых в вагоностроении, показали, что разброс геометрических характеристик их сечений находится в пределах $\pm 20 \%$. В отдельных случаях это может привести к значительному перераспределению внутренних усилий и напряжений

НТБ
ДНУЖТ

(конструкция слабо обусловлена). Для проверки обусловленности конструкции при разбросе жесткостных характеристик элементов кузовов подвижного состава в указанных пределах удобно использовать электронное моделирование на АБМ ЭМСС-8 "Альфа"

8. Для улучшения параметров кузовов двухъярусных вагонов применен метод расчета упорядоченной последовательности вариантов, что позволяет уменьшить металлоемкость на 6-8 % по сравнению с исходным конструкторским вариантом, достигнув практически достаточной равнопрочности .
9. Исследование частот и форм собственных свободных колебаний кузовов двухъярусного подвижного состава целесообразно проводить методом дискретных масс. Определение квазиупругих коэффициентов дифференциальных уравнений колебаний производилось методом электронного моделирования, что позволило определить матрицу квазиупругих коэффициентов для пространственной системы. Погрешность расчетов по сравнению с ЭЦМ не превысила 5 % . Собственные числа и векторы матрицы находились с помощью $Q-R$ -алгоритма .
10. Выполненные исследования позволили определить спектр собственных частот и форм колебаний двухъярусных вагонов в порожнем состоянии, груженым неподрессоренными макетами (для сравнения с экспериментом), а также четырехстоечного вагона, груженого автомобилями с включенным рессорным подвешиванием. Анализ результатов показал, что наименьшие частоты присущи вагону, груженому автомобилями, у порожнего вагона частоты ниже на 2-24 % , а у вагона, груженого неподрессоренными макетами - на 40-56 % . Наибольшие

НТБ
ДНУЖТ

динамические усилия и напряжения в конструкции кузовов действуют при перевозке неподрессоренного груза, что подтвердили динамические испытания .

- II. Результаты проведенных экспериментальных исследований прочности двухъярусных вагонов хорошо согласуются с данными аналитических исследований, что подтверждает правильность выбранной методики теоретических расчетов и оценки прочности конструкций .
12. Исследования кузовов двухъярусного подвижного состава позволили разработать конструктивную схему 4-стоечного вагона, отличающуюся более рациональной передачей нагрузок от верхнего яруса . Вагон вмещает 18 автомобилей "Жигули" (вместо 17 у 6-стоечного вагона) и имеет пониженную на 1 т металлоемкость кузова.

Результаты исследований прочности и динамики двухъярусных вагонов использованы на Днепродзержинском вагонном заводе им.газеты"Правда" при проектировании и доводке конструкции вагонов для перевозки легковых автомобилей .

Основное содержание диссертации опубликовано в
следующих работах

1. Расчет на прочность двухъярусного вагона для перевозки легковых автомобилей. Труды ВНИИ-вагоностроения. Выпуск 9, М., 1969 .
2. Исследования собственных свободных колебаний вагона для перевозки легковых автомобилей .Труды ДИИТ"а, вып.133, Днепродзержинск, 1971

НТБ
ДНУЖТ

3. Исследование прочности кузовов вагона для перевозки легковых автомобилей. Труды ДИИТ"а, выпуск 120, Днепропетровск, 1972 .
4. Кузов двухъярусного вагона для перевозки автомобилей. Авторское свидетельство №340564. Бюллетень изобретений и открытий №18, 1972 .
5. Совершенствование конструкции вагона для перевозки легковых автомобилей . Транспортное машиностроение НИИИНФОРМТЯМАШ .5-73-27, М., 1973
6. О собственных колебаниях двухъярусного вагона для перевозки легковых автомобилей и длинномерных грузов на сцепных транспортерах . Труды БИТМа, выпуск 26, Брянск, 1974.
7. Анализ работы несущей обшивки рамы двухъярусного вагона при действии продольных нагрузок . Труды ДИИТ"а, выпуск 153, Днепропетровск, 1974 .

Результаты исследований докладывались :

На первой республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников. Днепропетровск, 1969

На научно-технической конференции ДИИТ"а . Днепропетровск, 1970.

На техническом совещании при ЦВ МПС .Москва, 1973 .

На симпозиуме по проблемам моделирования динамики подвижного состава . Брянск, 1973 .

На объединенном семинаре кафедр механического факультета ДИИТ"а . Днепропетровск, 1975 .

НТБ
ДНУЖТ

Автореферат
МОРОЗ И.К.

**БТ 02706 от 26.08.1975. Поступило в производство
27 августа 1975. Объем-1,75 печ.листа.Ротапринт ДТТ № 3
гор. Днепропетровск-2 ул.Фрунзе № 6. Заказ 10639, тир-150.**

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ