

УДК 625.2.001

В.А. ЛИТВИН, С.В. МЯМЛИН, А.А. МАЛЫШЕВА, Л.А. НЕДУЖАЯ
(ДИИТ)

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ВАГОНОВ

Рассматривается определение динамических качеств вагона на стадии проектирования.

Разработанная в ДИИТе математическая модель пространственных колебаний грузового четырехосного вагона и программный комплекс для изучения динамики вагона при его движении по реальным вертикальным и горизонтальным неровностям пути дают возможность определить динамические качества вагона на стадии проектирования. Это позволяет конструкторам оценить динамические показатели проектируемого вагона и внести при необходимости соответствующие коррективы. Так, на Днепродзержинском вагоностроительном заводе были спроектированы в последнее время вагоны-хопперы для перевозки бокситов и техуглерода по аналогии с вагоном для перевозки окатышей. В ДИИТе были проведены теоретические исследования динамических показателей этих трех типов вагонов.

Особенностью рассматриваемой математической модели является учет инерционных, упругих и диссипативных свойств железнодорожного пути как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Предполагается, что вагон движется по случайным неровностям пути. В качестве таковых используются реальные неровности, записанные на конкретном участке стыкового пути. Эти неровности задаются независимо под обе рельсовые нити, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях /1-3/.

В качестве показателей, оценивающих динамические качества вагона, применяются следующие:

- коэффициенты вертикальной и горизонтальной динамики по обрессоренной, необрессоренной частям вагона и по силам взаимодействия;
- вертикальные и горизонтальные поперечные ускорения пятников;
- боковые и направляющие силы, кромочные напряжения;
- взаимные перемещения тел вагона;
- показатели износа колес;
- коэффициенты устойчивости от схода колес с рельсов;
- коэффициент устойчивости от опрокидывания.

Подробнее динамические показатели, определяемые в результате теоретических расчетов, освещены ниже при описании распечаток, полученных для различных вагонов при разных скоростях движения.

Важнейшими динамическими характеристиками, используемыми в расчетах, являются: моменты инерции кузова относительно главных центральных осей инерции без груза (для определения динамических показателей порожнего вагона) и с грузом, масса кузова и высота центра масс кузова без груза и с грузом над плоскостью опирания надрессорных балок на рессорные комплекты. Для определения этих динамических характеристик была разработана специальная программа. Исходными данными для нее являются параметры всех элементов вагона. С этой целью по чертежам были определены все массовые характеристики и размеры деталей кузова вагона. Для каждой детали вычислялись статические моменты относительно точки, лежащей на пересечении продольной и поперечной плоскостей симметрии кузова вагона в плоскости головок рельсов, а также моменты инерции всех деталей относительно осей, проходящих через указанную точку вдоль оси пути, поперек оси пути и по вертикали. С помощью найденного статического момента определялась высота центра масс кузова вагона без груза над уровнем головок рельсов. Таким образом, были найдены положения главных центральных осей инерции порожнего кузова и определены моменты инерции относительно этих осей. Описанная программа была использована для определения указанных динамических характеристик трех рассматриваемых типов вагонов: для перевозки окатышей, бокситов, теухглерада. Полученные результаты приведены в табл.1 (базы этих вагонов соответственно равны 7,78, 7,78 и 13,28 м).

Эти динамические характеристики использовались для определения динамических показателей порожних вагонов.

Далее определялись динамические характеристики самого груза. Для этого был рассчитан полезный объем вагона, занимаемый грузом. Внутреннее пространство вагона было разбито на зоны-фигуры - прежде всего призмы (трапецеидального, прямоугольного и треугольного поперечного сечения) и обелиски. Для каждой зоны определяли объем, массу, положение центра тяжести, а также в срединном сечении этого тела - площадь, геометрические моменты инерции относительно главных центральных осей инерции, длину фигуры на уровне ее центра тяжести.

Таблица 1

Динамические характеристики	Вагон для перевозки		
	окатышей	бокситов	техуглерода
Масса кузова, т	14,2	13,2	16,4
Высота центра масс над УГР, м	1,7	1,6	2,0
Моменты инерции кузова относительно центральных осей:			
продольной, т м ²	21,3	20,5	44,2
поперечной, т м ²	153,0	157,5	494,9
вертикальной, т м ²	155,5	158,5	477,1

Динамический момент инерции вычисляли по следующим формулам (например, относительно оси у) [4]:

$$J_y = m \left(\frac{L_x^2}{12} + \frac{J_x^r}{A_{xz}} \right),$$

где J_x^r - геометрический момент инерции поперечного сечения; A_{xz} - площадь поперечного сечения фигурч; m - масса тела; L_x - длина тела вдоль продольной оси. Например, для призмы, имеющей трапецидальное поперечное сечение

$$J_x^r = \frac{c^3}{36} \frac{a_1^2 + a_2^2 + 4a_1 a_2}{a_1 + a_2}, \quad L_x = \frac{2}{3} \frac{a_1^2 + a_2^2 + a_1 a_2}{a_1 + a_2},$$

где c - высота трапеции; a_1, a_2 - размеры верхнего и нижнего оснований вдоль оси пути (ось X).

С помощью этих выражений были получены все динамические характеристики груза, приведенные в табл.2.

Результатирующие динамические характеристики кузова вагона с грузом представлены в табл.3.

Таблица 2

Динамические характеристики	Вагон для перевозки		
	окатышей	бокситов	техуглерода
Масса груза, т	70,7	70,8	67,7
Высота центра масс над УГР, м	2,1	2,7	2,9
Моменты инерции груза относительно центральных осей:			
продольной, т м ²	84,2	114,6	127,4
поперечной, т м ²	282,6	327,5	1267,5
вертикальной, т м ²	331,9	353,7	1239,8

Таблица 3

Динамические характеристики	Вагон для перевозки		
	окатышей	бокситов	техуглерода
Масса кузова вагона с грузом, т	84,9	84,0	84,1
Высота центра масс над УГР, м	2,0	2,5	2,7
Моменты инерции относительно центральных осей:			
продольной, т м ²	107,4	147,7	197,8
поперечной, т м ²	437,4	497,5	1788,5
вертикальной, т м ²	489,3	524,7	1716,9

При характеристиках, приведенных в табл. 1-3, выполнялись расчеты по программному комплексу, который состоит из вспомогательной программы, позволяющей вычислять динамические характеристики кузова вагона, и основной программы, с помощью которой определяются на стадии проектирования динамические качества исследуемых вагонов.

Результаты расчетов видны на одной из распечаток, приведенной ниже, для вагона по перевозке техуглерода порожнего со скоростью 120 км/ч на прямом участке пути.

Вагон - дорожный 20-4015 тележки - типовые скользуны - типовые
 рельсы Р65 шпалы - дерев. лине балласт - щебеночный прямая
 скорость 80 км/ч длина пути 700 м длина переходного участка
 500 м неровности - стохастические стыковые

Параметр	F _{min}	X _{min}	F _{max}	X _{max}	M	D	S	M +2.5σ
KVC(1,1)	-0.2950	64.14	.2585	66.92	-.0010	.0153	.1237	.3103
KVC(1,2)	-.2319	69.97	.2774	67.00	-.0163	.0108	.1040	.2764
KVP - 2(1)	-.2999	66.88	.2565	64.01	-.0091	.0081	.0900	.2343
KVP - 2(2)	-.1544	59.11	.1735	53.69	-.0021	.0049	.0675	.1709
KVB(1,1,1)	-.2691	63.79	.2498	66.03	-.0001	.0065	.0806	.2016
KVB(1,1,2)	-.1522	69.93	.2533	66.53	-.0112	.0045	.0670	.2186
KVV(1,1,1)	-.4155	63.73	.7877	66.01	-.0015	.0218	.1475	.3703
KVV(1,1,2)	-.4076	63.55	.4700	64.26	-.0100	.0159	.1260	.3251
KHC (1,1)	-.0714	68.20	.1193	57.13	-.0021	.0013	.0365	.0933
YP - 2(1)	-.1680	57.09	.0894	57.95	-.0017	.0017	.0413	.1050
YP - 2(2)	-.1990	62.30	.1917	51.80	-.0019	.0030	.0546	.1384
KHB (1,1)	-.1621	69.97	.1940	56.01	-.0006	.0142	.1189	.2980
KHV(1,1,1)	-.3560	66.06	.3374	52.03	-.0100	.0833	.2886	.7403
HV(1,1,1)	-5.666	56.50	2.132	61.61	-.5332	2.088	1.445	4.146
HV(1,1,2)	-5.7279	57.83	2.191	65.04	-.6007	2.339	1.529	4.424
HN(1,1,1)	-6.136	69.99	-.8364	63.73	-1.677	1.765	.4202	2.527
HN(1,1,2)	-.8478	63.35	17.11	56.01	2.733	12.62	3.552	11.61
SI (1)	7.634	63.72	25.17	66.01	13.18	4.723	2.173	18.62
SI (2)	6.939	63.35	20.59	64.26	13.34	3.713	1.327	18.16
DEPSI (1)	-1.658	53.63	1.586	63.27	-.1088	1.246	1.116	2.689
PSIK (1,1)	-2.096	63.67	2.666	53.79	-.0058	3.057	1.748	4.377
XZAB (1)	-4.280	63.63	5.451	53.83	-.0185	12.79	3.576	1.959
PSIB (1,1)	-1.248	63.37	1.527	55.31	-.1130	1.5564	.7459	1.978
YK (1,1)	-7.654	69.97	6.491	57.31	-.4341	22.17	4.709	12.21
YB (1,1)	-7.715	69.99	6.316	57.02	-.3297	21.42	4.629	11.90
DETE (1)	-5.862	69.99	4.616	69.37	.4414	5.752	2.398	6.437
F (1)	.0000	50.01	.0022	69.91	.0000	.0000	.0003	.0007
F (2)	.0000	50.01	.0356	55.97	.0023	.0000	.0057	.0191
П (1)	.0002	66.26	.0826	66.12	-.0135	.0000	.0054	.0295
П (2)	.0006	66.26	.0225	66.12	.0134	.0000	.0051	.0286

	Ky _{min}	X _{min}	наибольшая сложная серия < IKy(0,9999)					
1,1	3.705	55.58	с	.000 м	по	.000 м	.00000с.	10.00
1,2	2.859	64.79	с	.000 м	по	.000 м	.00000с.	10.00
2,1	2.822	53.80	с	.000 м	по	.000 м	.00000с.	10.00
2,2	2.855	62.24	с	.000 м	по	.000 м	.00000с.	10.00

В первом столбце указаны все динамические показатели (параметры). Здесь использованы следующие обозначения: $KVC(1,1)$, $KVC(1,2)$ - коэффициенты вертикальной динамики по обрессоренной части вагона для передней тележки соответственно с левой и правой сторон вагона; $ZP_2(1)$, $ZP_2(2)$ - вертикальные ускорения переднего и заднего пятников в долях g ; $KVB(1,1,1)$, $KVB(1,1,2)$ - коэффициенты вертикальной динамики по необрессоренной части вагона для передней колесной пары соответственно с левой и правой сторон вагона; $KVV(1,1,1)$, $KVV(1,1,2)$ - коэффициенты вертикальной динамики по силам взаимодействия для передней колесной пары соответственно с левой и правой сторон вагона; $KHC(1,1)$ - коэффициент горизонтальной динамики по обрессоренной части вагона для передней тележки; $YP_2(1)$, $YP_2(2)$ - горизонтальные ускорения переднего и заднего пятников в долях g ; $KHB(1,1)$ - коэффициент горизонтальной динамики по необрессоренной части вагона для передней колесной пары; $KHV(1,1,1)$ - коэффициент горизонтальной динамики по силам взаимодействия для передней колесной пары; $HB(1,1,1)$, $HB(1,1,2)$ - боковые силы, действующие на путь по передней колесной паре, соответственно с левой и правой сторон вагона в kH ; $HN(1,1,1)$, $HN(1,1,2)$ - направляющие силы по передней колесной паре соответственно с левой и правой сторон вагона в kH ; $SI(1,1)$, $SI(2)$ - кромочные напряжения в рельсах под передней колесной парой соответственно на левом и правом рельсах в МПа; $DEPSI(1)$ - относительное влияние кузова и передней тележки в $рад.10^{-3}$; $PSIK(1,1)$ - влияние передней колесной пары в $рад.10^{-3}$; $XZAB(1)$ - забегание боковых рам передней тележки в мм; $PSIB(1,1)$ - влияние левой боковой рамы передней тележки в $рад.10^{-3}$; $YK(1,1)$, $YB(1,1)$ - боковой относ. передней колесной пары и левой боковой рамы передней тележки в мм; $DETE(1)$ - относительная боковая качка кузова и передней тележки в $рад.10^{-3}$; $F(1)$, $F(2)$ - фактор износа левого и правого колес передней колесной пары; $\Pi(1)$, $\Pi(2)$ - показатели износа поверхности катания левого и правого колес передней колесной пары.

Во втором столбце (F_{min}) приведены наименьшие зафиксированные значения показателя на участке пути длиной 70 м (после переходного участка длиной 50 м), в третьем столбце (X_{min}) - абсцисса пути, в которой получено это значение, в четвертом столбце (F_{max}) - наибольшие зафиксированные значения, в пятом - (X_{max}) - абсцисса пути, в которой получено это значение, в шестом - (M) - математическое ожидание процесса, в седьмом - (D) - дисперсия процесса, в восьмом - (S) - среднеквадратическое отклонение, в девятом - ($MI+2,5S$) - максимально вероятное значение показателя.

Отдельно приведены коэффициенты устойчивости от взползания колес на рельсы соответственно первой (1,1), второй (1,2), третьей (2,1) и четвертой (2,2) колесных пар. В первом столбце даны обозначения колесных пар, во втором - наименьшие значения коэффициентов устойчивости (KU_{min}), в третьем - абсцисса пути (X_{min}), в том месте, где зафиксировано полученное значение, далее под текстом: "наибольшая сплошная серия < 1" - печатаются абсциссы пути, с того момента, когда коэффициент устойчивости

стал меньше единицы, и до того момента, когда он вновь превысил единицу (в скобках указано время в секундах, в течение которого могло произойти всползание колеса на рельс). Наконец, в последнем столбце даны вычисленные наименьшие значения коэффициентов устойчивости с вероятностью 0,9999, которые получены с помощью гистограммы, построенной по результатам проведенного расчета.

Из всего многообразия показателей выделим наиболее существенные, которые обычно определяют при проведении экспериментальных исследований: максимально вероятные значения коэффициентов вертикальной динамики по обрессо, зной части вагона (наибольшее из двух значений - по левому или правому рессорному комплекту передней тележки), обозначенные KVC; максимально вероятные значения коэффициентов горизонтальной динамики по необрессоренной части вагона (по рамным силам первой колесной пары) - KHB; наименьшее замеренное значение коэффициента устойчивости от всползания колеса на рельс (по все четырем колесным парам) - KUS. Расчеты выполнены при движении вагонов по прямолинейным участкам пути с типовыми тележками, типовыми скользунам : со скоростями 80, 100 и 120 км/ч в двух вариантах загрузки: порожний и груженный.

Результаты расчетов приведены в табл.4.

Таблица 4

Показатель	Скорость, км/ч	Вагон для перевозки					
		окатышей		бокситов		техуглерода	
		порожний	груженный	порожний	груженный	порожний	груженный
KVC	80	0,310	0,310	0,305	0,310	0,33	0,327
KHB	80	0,298	0,374	0,299	0,370	0,301	0,372
KUS	80	2,822	2,501	2,763	2,517	2,432	2,148
KVC	100	0,517	0,299	0,515	0,296	0,369	0,389
KHB	100	0,330	0,405	0,323	0,404	0,331	0,407
KUS	100	2,321	2,259	2,431	2,542	2,193	1,571
KVC	120	0,596	0,321	0,613	0,318	0,643	0,609
KHB	120	0,358	0,430	0,347	0,423	0,404	0,424
KUS	120	0,800	2,161	1,000	1,831	0,771	1,235

Проанализируем полученные результаты. С ростом скорости динамические коэффициенты растут, а коэффициенты устойчивости уменьшаются. Как видно, при скорости движения 80 км/ч все показатели не превышают допустимых значений (0,7 - для коэффициентов вертикальной, 0,4 - для коэффициентов горизонтальной динамики), а коэффициенты устойчивости от схода выше минимально допустимого значения 1,2. При скорости 100 км/ч только коэффициенты горизонтальной динамики в груженом режиме незначительно (на 1-1,7%) превышают допустимые значения, а при скорости 120 км/ч коэффициенты горизонтальной динамики в груженом режиме превышают допустимые значения (на 6-8%), коэффициенты устойчивости от схода в порожнем режиме ниже 1, что представляет опасность. Проведем более детальный анализ полученных результатов. Из приведенной распечатки видно, что превышение допустимых значений коэффициентов горизонтальной динамики имеет место только для максимально вероятных значений (ввиду высокой дисперсии), тогда как наибольшие зафиксированные значения не превышают величины 0,4. Следовательно, по коэффициентам вертикальной динамики обрессоренной части вагона и коэффициентам горизонтальной динамики необрессоренной части вагона для трех вагонов получены значения ниже допустимых как в груженом, так и в порожнем режиме во всем рассмотренном диапазоне скоростей вплоть до 120 км/ч. Что касается коэффициента устойчивости от схода, то в порожнем режиме при скорости 120 км/ч зафиксировано два значения, меньшие единицы; продолжительность этого процесса невелика - всего 0,00061 секунды (по пути - 2 см, то есть шаг интегрирования). За такой короткий промежуток времени втягивание колесной пары на рельс не произойдет, поэтому полученное значение не является опасным. Следовательно, движение этих вагонов может быть допущено со скоростью до 120 км/ч как в груженом, так и в порожнем режиме.

Выполнено также сравнение динамических показателей вагонов при теоретических и экспериментальных исследованиях. Для этого построены графики, на которых сплошной, штриховой и штрихпунктирной линиями нанесены результаты теоретических исследований для вагонов по перевозке бокситов, окатышей и теуглера соответственно (максимально вероятные значения), а штриховой с кружками - экспериментальных исследований (рис.). Отличия между этими графиками можно объяснить разными участками пути, на которых проводились испытания и которые использованы при проведении теоретических исследований (теоретические исследования выполнены путем введения в модель реальных неровностей пути, записанных на конкретном участке пути). Из полученных результатов видно, что динамические показатели всех вагонов, как уже отмечалось выше, достаточно близки. Таким образом, проведенные исследования показывают, что проектируемые вагоны для перевозки бокситов и теуглера имеют практически такие же динамические (ходовые) качества, как и вагон-эталон для перевозки окатышей, и могут эксплуатироваться с заложеной при расчетах конструкционной скоростью 120 км/ч.

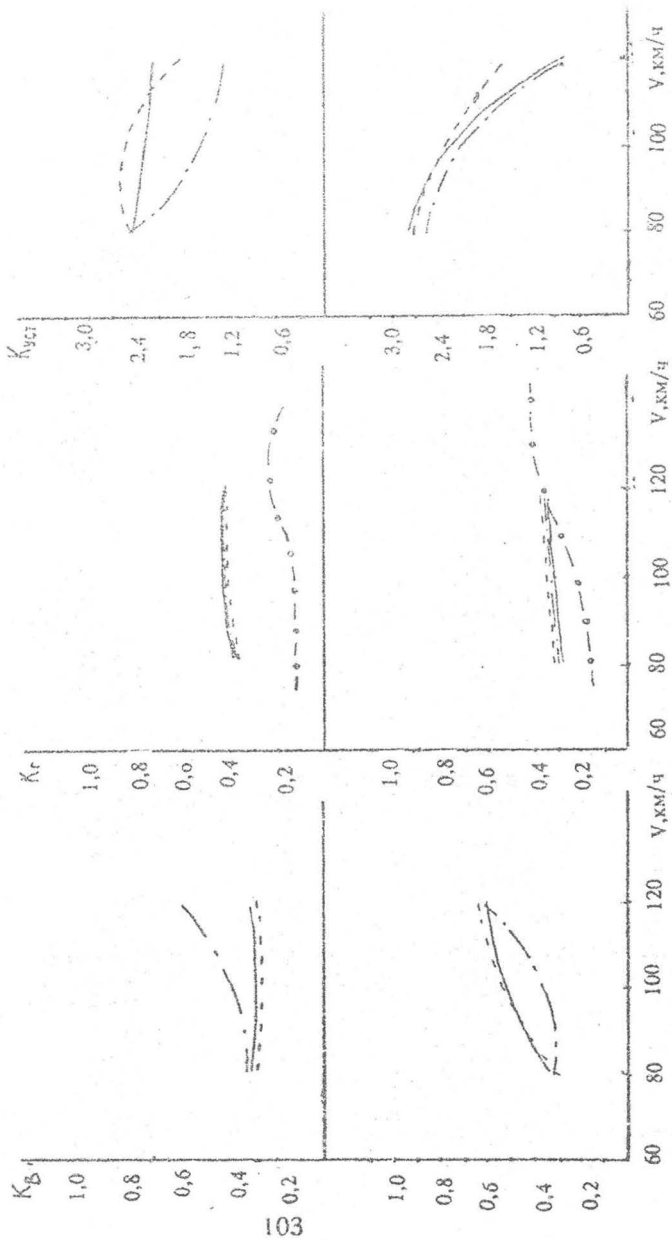


Рис.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарян В.А. Динамика вагонов. М.: Транспорт, 1964. 256 с.
2. Вершинский С.В., Данилов В.Н, Челноков И.И. Динамика вагона. М.: Транспорт, 1972. 304 с.
3. Блохин Е.П., Данович В.Д., Морозов Н.И. Математическая модель пространственных колебаний четырехосных рельсовых экипажей. Днепропетровск, 1986. 39 с. Деп. в ЦНИИТЭИ. МПС 29.09.86, № 3/52.
4. Расчет грузовых вагонов на прочность при ударах: Учеб. пособие для ВУЗов ж.-д. трансп./Е.П.Блохин, И.Г.Барбас, Л.А.Манашкин и др.М.: Транспорт, 1989. 230 с.