

4 Расчеты прочности и устойчивости верхнего строения пути

Конструкция верхнего строения пути по прочности, устойчивости и состоянию должна обеспечить безопасное и плавное движение поездов с наибольшими скоростями, установленными для данного участка. Это требование ПТЭ необходимо выполнять в условиях непрерывного действия различных динамических нагрузок и природных воздействий, а также с учетом накопления остаточных деформаций всех элементов пути.

В основе требований, предъявляемых к конструкции верхнего строения пути, лежат условия обеспечения его прочности, устойчивости и экономичности. Расчетами на прочность определяется минимально необходимый тип верхнего строения пути в заданных условиях эксплуатации, а целесообразный тип верхнего строения пути определяется технико-экономическими расчетами. Далее приведены расчеты пути на прочность и устойчивость.

Методика расчетов верхнего строения пути на прочность и устойчивость позволяет решать ряд задач:

- определение напряжений и деформаций в элементах верхнего строения пути в заданных условиях эксплуатации;
- оценка возможности повышения осевых нагрузок и скоростей движения при заданной конструкции пути;
- определение возможности работоспособности конструкции пути до очередного капитального ремонта;
- анализ причин потери прочности и устойчивости пути;
- проектирование новых конструкций.

Современная методика распространяется на конструкции верхнего строения пути с рельсами длиной 12,5 м и 25,0 м, в т.ч. на рельсовые элементы стрелочного перевода (рамные рельсы, переводная кривая и др.).

4.1. Расчеты прочности верхнего строения пути

4.1.1. Силы взаимодействия пути и подвижного состава

Вертикальные силы, передаваемые колесами экипажа рельсам при стоянке, называются *статической нагрузкой*. Величины этих нагрузок можно найти в технических паспортах экипажей или справочниках.

Динамические силы, действующие на путь, представляют собой алгебраическую сумму сил, каждая из которых вызвана определенным видом колебаний экипажа, силами веса, центробежными силами и т.п.

Для упрощения расчетов вертикальных динамических сил учитывают только основные, наибольшие силы и пренебрегают остальными.

К основным силам относят:

- весовую часть экипажа (кН/ось, кН/колесо);
- силы, передаваемые рессорным подвешиванием колесам при колебании обрессоренных масс;
- силы инерции необрессоренных масс, вызванные их колебаниями на упругом пути из-за наличия неровностей пути и колес;
- вертикальные силы, возникающие в связи с возвышением наружного рельса в кривых и действием на колесную пару горизонтальных поперечных сил.

Статическая нагрузка на рельс от колеса современных экипажей тележного типа находится в пределах 71...81 кН у пассажирского вагона ЦМВ; 100...128,5 кН у груженого грузового вагона; 97,5...125,0 кН у локомотива.

Вертикальные силы инерции необрессоренных масс в большинстве случаев являются наибольшей составляющей динамического воздействия на рельс, а поэтому они в основном и определяют вертикальные динамические силы. Причинами их возникновения могут быть колебания колес, вызванные неровностями пути и колес, а также извилистым движением колесных пар.

Горизонтальные поперечные силы, направленные перпендикулярно оси пути, возникают в уровне поверхности катания колеса по рельсу и между гребнем колес и боковой поверхностью головок рельсов. Устойчивость и прочность рельса зависит от полной поперечной силы (боковой), передаваемой ему колесом. Равнодействующая боковых сил от одной колесной пары называется *рамной силой*. Для случая, показанного на рис. 4.1, а, боковая сила

$$Y_{\sigma} = Y - Pf_f \quad (4.1)$$

а рамная сила

$$H = Y_{\sigma} - Pf_f = Y - 2Pf_f \quad (4.2)$$

где Y — направляющее усилие.

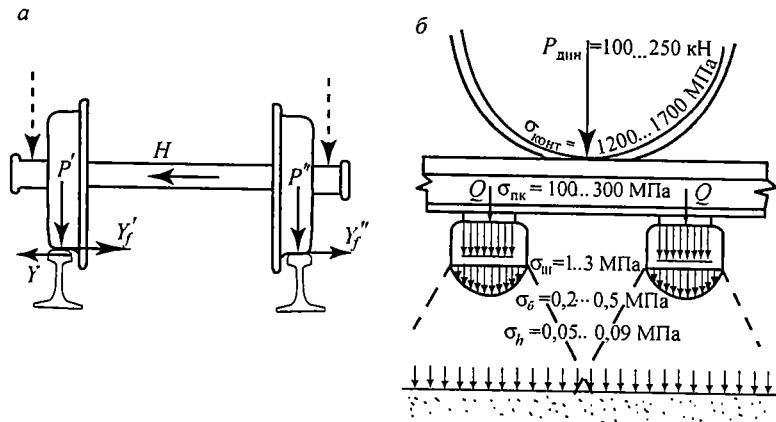


Рис. 4.1. Схема передачи вертикальной нагрузки от колеса на основание пути: P — вертикальная сила; $\sigma_{\text{нк}}$ — в кромках подошвы рельса; $\sigma_{\text{ш}}$ — в шпале (в прокладке) под подкладкой; $\sigma_{\text{б}}$ — в балласте под шпалой; $\sigma_{\text{г}}$ — на основной площадке земляного полотна

Боковая сила в прямых достигает 20...40 кН, а в кривых 50...100 кН. В кривых, кроме рамных сил, возникают центробежные силы, поперечные составляющие силы веса и тяги.

В расчетах пути учитывают, что рельс взаимодействует не с одним, а со всеми колесами одной тележки экипажа, опирающимися на него. При динамическом расчете пути под воздействием системы грузов необходимо найти одну силу, которая, будучи статически приложена в расчетном сечении, по своему воздействию оказалась бы эквивалентной динамическому воздействию всей системы грузов.

Вертикальная эквивалентная сила от колеса на рельс за пределами его стыка достигает 250 кН, а в зоне стыка на деревянных шпалах — 300 кН.

Горизонтальные продольные силы возникают вследствие угона пути, торможения и изменений температуры рельсов. При торможении локомотива продольная сила достигает 80...100 кН на звено, а при рекуперативном торможении на спуске — 600...700 кН. Температурная сила в рельсах бывает в пределах 1000...2000 кН.

Динамическая нагрузка от колеса передается на головку рельса по небольшой площадке (рис.4.1, б). Площадь эллипса упругого контакта 1,2... 2,2 см². При внецентренном приложении нагрузки в зоне перехода головки в шейку рельса возникают напряжения концентрации

(200...400 МПа при рельсах Р65), а в кромках подошвы — напряжения изгиба и кручения (100...300 МПа). Напряжения на деревянной шпале под металлической подкладкой бывают в пределах 1...3 МПа, на основной площадке земляного полотна — 0,05...0,09 МПа, а при очень высоких осевых нагрузках и больших неровностях пути могут быть и больше (рис. 4.1, б).

4.1.2. Расчетные характеристики пути и подвижного состава

Расчетные характеристики пути. Расчеты прочности пути основаны на положении, что его конструкция находится в исправном состоянии, соответствующем требованиям ПТЭ и действующим нормам. Геометрические параметры рельсовой колеи должны соответствовать удовлетворительному состоянию пути.

Важнейшими характеристиками упругих свойств верхнего строения пути являются модуль упругости рельсового основания и коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса.

Модуль упругости рельсового основания U численно равен равномерно распределенной реакции основания, возникающей на единицу длины рельса при упругой осадке основания, равной единице.

Коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (4.3)$$

где E — модуль упругости рельсовой стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

I — момент инерции поперечного сечения рельса в вертикальном направлении, м⁴.

Коэффициент относительной жесткости для типовых конструкций пути находится в пределах 0,9...1,8 м⁻¹, а модуль упругости основания летом 23...29,5 МПа при деревянных шпалах на щебеночном балласте и 110...167 МПа при железобетонных шпалах. Зимой модуль упругости увеличивается в 1,5...2,0 раза.

Расчетные характеристики пути приведены в табл. 4.1 [7].

Расчетные характеристики подвижного состава. Динамические силы воздействуют на путь через колеса подвижного состава и рельс. В расчетах учитывают воздействия на путь одной тележки вагона или локомотива. Конструкция экипажной части различных типов подвижного состава должна находиться в исправном состоянии, соответствующем требованиям ПТЭ и техническим нормам.

Расчетные характеристики подвижного состава приведены в табл. 4.2 [7].

Горизонтальные (боковые) силы, а также крутящие моменты из-за эксцентриситета приложения вертикальных сил в расчетах учитываются коэффициентом f , определенным экспериментально (табл. 4.3).

4.1.3. Определение вертикальных динамических сил, действующих на рельс

Расчетная сила складывается из постоянной величины статической нагрузки на колесо и переменных дополнительных сил инерции от колебаний экипажа

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{р}} + P_{\text{инп}} + P_{\text{инк}} + P_{\text{инкк}} \quad (4.4)$$

где $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{р}}$, $P_{\text{инп}}$, $P_{\text{инк}}$, $P_{\text{инкк}}$ — составляющие соответственно от веса экипажа, колебаний кузова на рессорах, сил инерции необрессоренных масс при изолированных неровностях на пути и колесах, а также непрерывных неровностях на колесах.

Статическая нагрузка принимается постоянной, а остальные являются случайными или статистическими величинами.

Расчет ведется на максимально вероятное значение динамической нагрузки

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ст}}^{\text{вер}} = \bar{P}_{\text{ст}} + \lambda \sqrt{\sum S_i^2}; \quad (4.5)$$

$$\bar{P}_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} + \bar{P}_{\text{р}}^{\text{сп}}, \quad (4.6)$$

где $\bar{P}_{\text{ст}}$ — среднее значение вертикальной нагрузки;

$P_{\text{ст}}$ — статическая нагрузка колеса на рельс, Н;

$\bar{P}_{\text{р}}^{\text{сп}}$ — среднее значение вертикальной составляющей сил инерции от колебания кузова на рессорах, Н;

λ — нормирующий множитель, определяющий появление максимальной динамической нагрузки;

S_i — среднее квадратическое отклонение от сил инерции, Н.

Таблица 4.2

Расчетные характеристики локомотивов и вагонов

Тип и серия подвижного состава	$P_{\text{ст}}$ кН	q_i кН	λ , МН/М	$f_{\text{ст}}$ м	d , м	l_b , м	$V_{\text{констр.}}$ М/С
I	2	3	4	5	6	7	8
Электровагоны пассажирские							
ЧС200	97,5	16,25	0,91	0,197	1,25	3,20	55,5
ЧС6	97,5	16,25	0,91	0,197	1,25	3,20	44,4
ЧС7	107,5	17,50	1,25	0,169	1,25	3,20	44,4
ЧС8	109,5	17,50	1,84	0,169	1,25	2,95	44,4
ЧС4, ЧС4'	105,00	18,50	0,87	0,140	1,25	2,30 + 2,30	44,4
ЧС2, ЧС2'	102,5	19,25	1,35	0,120	1,25	2,40 + 2,20	44,4
Электровагоны грузовые							
ВЛ60 ^{кп}	115,0	30,80	1,16	0,060	1,25	2,30 + 2,30	27,7
ВЛ80 ^{кстр.}	120,0	27,60	1,16	0,128	1,25	3,00	30,5
ВЛ10, ВЛ82	115,0	31,60	1,16	0,135	1,25	3,00	27,7
ВЛ84	125,0	17,30	2,05	0,180	1,25	2,85	33,3
ВЛ85	115,0	27,60	1,52	0,156	1,25	2,90	30,5
ВЛ15	115,0	30,50	1,52	0,140	1,25	2,90	27,7
ВЛ8/ВЛ8 ^М	115/119	31,70	1,18	0,070	1,20	3,20	22,2/25,0
ВЛ22/ВЛ22 ^М	110,0	32,50	1,35	0,059	1,20	2,10 + 2,10	22,2
ВЛ23	115,0	31,70	1,42	0,059	1,20	2,20 + 2,20	27,7
ВЛ41	115,0	30,75	0,96	0,075	1,20	2,10	19,4
ВЛ10 ^У , ВЛ12	125,0	30,55	1,52	0,155	1,25	3,00	27,7
ВЛ82 ^М	125,0	31,60	1,52	0,135	1,25	2,00	27,7
Тепловозы пассажирские							
ТЭП80	112,5	14,35	1,39	0,183	1,22	1,85 + 2,50 + + 1,85	44,4

Тип и серия подвижного состава	$P_{ст}$ кН	q , кН	J , МН/м	$f_{ст}$ м	d , м	l_1 , м	$V_{констр.}$ м/с
ТЭП70	112,5	13,80	1,64	0,187	1,22	2,15 + 2,15	44,4
ТЭП60, 2ТЭП6	107,5	14,50	0,99	0,094	1,05	2,40 + 2,20	44,4
ТЭ7	105,0	23,30	1,31	0,062	1,05	2,10 + 2,10	38,8
ТЭП10, 2ТЭ10	107,5	22,00	1,29	0,071	1,05	2,10 + 2,10	38,8
Тепловозы грузовые							
2ТЭ116, 2ТЭ10В							
2ТЭ10У, 3ТЭ10У							
2ТЭ10М, 3ТЭ10М	115,0	22,30	1,09	0,102	1,05	1,85 + 1,85	27,7
3ТЭ10В, 4ТЭ10С	105,0	23,30	1,40	0,057	1,05	2,10 + 2,10	27,7
ТЭ3, 3ТЭ3	115,0	22,00	1,12	0,102	1,05	2,10 + 2,10	33,3
2ТЭ10УТ	98,0	22,50	1,29	0,069	1,05	2,10 + 2,210	27,7
М62, 2М62	105,0	22,50	1,10	0,104	1,05	1,85 + 1,85	27,7
М62У, 2М62У, 3М62У	106,0	29,80	0,95	0,087	1,05	1,85 + 1,85	27,7
ТЭМ3, ТЭП16	105,5	20,80	1,10	0,104	1,05	1,85 + 1,85	27,7
ТЭМ17	114,0	21,50	1,29	0,069	1,05	2,10 + 2,10	27,7
ТЭ10, 2ТЭ10	108,0	22,00	1,19	0,069	1,05	2,10 + 2,10	27,7
ТЭМ2, ТЭМ2УМ, ТЭМ2УМТ	100,0	23,30	1,15	0,070	1,05	2,10 + 2,10	27,7
ЧМЭЗ	102,5	21,00	1,66	0,049	1,05	2,00 + 2,00	26,4
Вагоны							
4-осные на тележках ЦНИИ-ХЗ	110,0	9,95	2,00	0,048	0,95	1,85	33,3
6-осные на тележках УВЗ-9М	107,0	10,70	1,95	0,050	0,95	1,75	27,7

Тип и серия подвижного состава	$P_{ст}$ кН	q , кН	J , МН/м	$f_{ст}$ м	d , м	l_1 , м	$V_{констр.}$ м/с
8-осные на тележках ЦНИИ-ХЗ	105,5	9,95	2,00	0,048	0,95	1,85	27,7
Пассажирские ЦМВ	81,0	7,10	0,76	0,145	1,05	2,70	33,3
ЦМВ на тележках КВЗ-ЦНИИ	71,25	7,10	0,57	0,155	1,05	2,40	44,4

Обозначения, принятые в таблице:

$P_{ст}$ — статическая нагрузка от колес на рельс; q — отнесенный к колесу вес необрессоренных частей; J — приведенная к колесу жесткость рессорного подвешивания; $f_{ст}$ — статический прогиб рессорного подвешивания; d — диаметр колеса по кругу катания; l_1 — расстояние между центрами осей колесных пар тележки экипажа; $V_{констр.}$ — конструкционная скорость.

Тип подвижного состава	Коэффициенты f									
	В прямых участках	В кривых участках радиусом, м								300
		1000	800	700	600	500	400	350		
Электровозы ВЛ8 ВЛ10, ВЛ10 ^У , ВЛ12 ВЛ22 ^М ВЛ23 ВЛ15 ВЛ60 ^{к.п.}	1,24	1,28	1,29	1,30	1,32	1,35	1,39	1,44	1,50	1,50
	1,25	1,27	1,28	1,30	1,33	1,37	1,41	1,43	1,49	1,49
	1,20	1,34	1,37	1,39	1,43	1,48	1,54	1,59	1,65	1,65
	1,17	1,22	1,24	1,26	1,30	1,35	1,46	1,51	1,62	1,62
	1,16	1,21	1,31	1,36	1,41	1,48	1,54	1,57	1,60	1,60
1,15	1,25	1,45	1,54	1,61	1,66	1,71	1,73	1,73	1,76	1,76

Тип подвижного состава	Коэффициенты f									
	В прямых участках	В кривых участках радиусом, м								300
		1000	800	700	600	500	400	350	300	
ВЛ65 ВЛ85 ВЛ80 ^{ср.т.с.} ЧС3, ЧС1 ЧС2, ЧС2 ^Г ЧС4, ЧС4 ^Г ЧС200, ЧС7, ЧС8	1,12	1,33	1,38	1,42	1,47	1,54	1,64	1,72	1,82	
	1,17	1,28	1,31	1,33	1,37	1,42	1,51	1,57	1,65	
	1,08	1,30	1,34	1,36	1,38	1,40	1,41	1,42	1,44	
	1,08	1,17	1,33	1,42	1,49	1,54	1,59	1,61	1,64	
	1,13	1,19	1,35	1,43	1,53	1,65	1,77	1,83	1,90	
	1,20	1,32	1,56	1,68	1,80	1,93	2,06	2,12	2,19	
	1,16 ¹⁾	1,23	1,36	1,42	1,49	1,55	1,62	1,66	1,70	
	Тепловозы ТЭ3, ТЭ10, М62, 2М62, ТЭМ2, ТЭМ2УМ, ТЭМ2АМ ТЭ7 2ТЭ116, 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ10У М62У, 2М62У, ТЭМ3, ТЭМ16, ТЭМ17, 2ТЭ10УТ ТЭП10, ТЭП10Л ТЭП60, 2ТЭП60 ТЭП70 ТЭП80 ЧМЭЗ	1,17	1,23	1,35	1,41	1,49	1,58	1,67	1,71	1,75
		1,20	1,30	1,50	1,59	1,69	1,80	1,89	1,94	2,00
		1,10	1,16	1,28	1,34	1,43	1,53	1,64	1,70	1,75
1,13		1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,50	1,60	1,70	
1,20		1,33	1,40	1,44	1,49	1,54	1,60	1,64	1,68	
1,13		1,34	1,39	1,44	1,47	1,55	1,65	1,72	1,78	
1,06		1,24	1,29	1,32	1,38	1,42	1,52	1,60	1,68	
1,04		1,30	1,36	1,42	1,48	1,53	1,63	1,67	1,75	
1,08		1,20	1,25	1,30	1,35	1,39	1,46	1,54	1,64	
1,18		1,26	1,28	1,30	1,33	1,39	1,49	1,55	1,65	
Вагоны грузовые 4-осные на тележках ЦНИИ-ХЗ 6-осные на тележках УВЗ-9 ^М 6-осные на тележках КВЗ-1 ^М 8-осные на тележках ЦНИИ-ХЗ	1,13	1,35	1,41	1,44	1,46	1,49	1,53	1,56	1,60	
	1,13	1,26	1,29	1,32	1,36	1,42	1,50	1,56	1,65	
	1,18	1,28	1,31	1,33	1,37	1,42	1,49	1,54	1,62	

¹⁾ Для электровоза ЧС200 при $V = 180$ км/ч — 1,38; при $V = 200$ км/ч — 1,55.

Нормирующий множитель принят $\lambda = 2,5$, что гарантирует уровень вероятности 0,994, т.е. из 1000 случаев прохода колеса в расчетном сечении только в 6 случаях возможно превышение $P_p^{вер. макс.}$.

Максимальное значение сил инерции P_p от колебания кузова на рессорах возникает в момент наибольшего сжатия рессор:

$$P_p^{max} = \varepsilon_p \cdot z_{max}, \quad (4.7)$$

где ε_p — жесткость комплекта рессор, отнесенная к одному колесу, Н/м (см. табл. 4.2).

Максимальный динамический прогиб рессор $z_{max} = a + bV^2$, определяется по данным табл.4.4.

Таблица 4.4

Прогибы рессорного подвешивания

Тип подвижного состава	z_{max} , мм
Электровозы ВЛ22 ^М , ВЛ23, ВЛ8, ВЛ61	$10,9 + 9,6 \cdot 10^{-4} V^2$
Тепловозы ТЭМ1, ТЭМ2, ТЭ3, ТЭ7, 2ТЭ10Л, ТЭП10, ТЭ109, ТЭП60, 2ТЭ116	
Грузовые вагоны:	$7,9 + 8,0 \cdot 10^{-4} V^2$
8-осные с базой тележки 3200 мм	$9,5 + 9,0 \cdot 10^{-4} V^2$
6-осные на тележках УВЗ-9 ^М	$6,0 + 16,0 \cdot 10^{-4} V^2$
6-осные на тележках КВЗ-1 ^М	$4,6 + 23,0 \cdot 10^{-4} V^2$
4-осные на тележках ЦНИИ-ХЗ	$10,0 + 16,0 \cdot 10^{-4} V^2$
Маневровые тепловозы, путевые машины	15 мм

Силу P_p можно определить также с учетом коэффициента k_d динамики обрессоренной части экипажа и статического прогиба рессор (см. табл. 4.1)

$$P_p^{max} = k_d \cdot (P_{ст} - q_k) = (0,1 + 0,2 \cdot \frac{V}{f_{ст}}) \cdot (P_{ст} - q_k), \quad (4.8)$$

где q_k — отнесенный к колесу вес необрессоренной части экипажа, Н;

V — расчетная скорость движения, м/с;

$f_{ст}$ — общий статический прогиб рессор, м.

Эта формула применяется в основном для электровозов и тепловозов с двухступенчатым рессорным подвешиванием.

Допускается использовать в расчете экспериментальные значения k_d (табл. 4.5—4.7) [7].

Таблица 4.5

Коэффициенты вертикальной динамики пассажирских локомотивов

Тип подвижного состава	Коэффициенты вертикальной динамики при скорости движения, км/ч						
	80	100	120	140	160	180	200
Электровозы							
ЧС200, ЧС6	0,20	0,26	0,27	0,29	0,33	0,35	0,35
ЧС7, ЧС8	0,20	0,26	0,28	0,33	0,33	—	—
ЧС4, ЧС4 ^Г	0,21	0,26	0,32	0,39	0,41	—	—
ЧС2, ЧС2 ^Г	0,22	0,30	0,33	0,36	0,36	—	—
Тепловозы							
ТЭП80	—	0,18	0,21	0,23	0,28	—	—
ТЭП70	0,23	0,24	0,25	0,28	0,30	—	—
ТЭП60, 2ТЭП60	0,27	0,29	0,30	0,34	0,35	—	—
ТЭ7, ТЭП10, ТЭП10Л	0,35	0,37	0,39	0,41	—	—	—

Таблица 4.6

Коэффициенты вертикальной динамики грузовых локомотивов

Тип подвижного состава	Коэффициенты вертикальной динамики при скорости движения, км/ч				
	40	60	80	100	120
Электровозы					
ВЛ60 ^К , ВЛ60 ^П , ВЛ60 ^Р	—	—	0,22	0,29	0,30
ВЛ80 ^С , ВЛ80 ^Т , ВЛ80 ^Р , ВЛ80 ^К	—	—	—	—	—
ВЛ10, ВЛ11, ВЛ82	—	0,27	0,33	0,37	0,37
ВЛ84	—	0,21	0,28	0,30	0,31
ВЛ85, ВЛ15	—	0,23	0,28	0,32	0,35
ВЛ8	0,30	0,32	0,37	0,43	—
ВЛ8 ^М	—	—	0,24	0,35	—
ВЛ22, ВЛ22 ^М , ВЛ61	0,22	0,31	0,37	0,40	—
ВЛ23	—	0,30	0,38	0,43	—
ВЛ41	0,13	0,18	0,38	—	—
ВЛ10 ^У , ВЛ12, ВЛ82 ^М	—	0,29	0,34	0,38	0,38
Тепловозы					
2ТЭ116, 2ТЭ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ10У, 3ТЭ10В, 3ТЭ10У, 3ТЭ10М, 4ТЭ10М	0,30	0,31	0,35	0,41	—
2М62, М62У, 3М62У, М62, 2М62У, ТЭМ3, ТЭМ16, ТЭМ17, ТЭМ18	0,22	0,28	0,35	0,40	—
ТЭ3, 3ТЭ3, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10, ТЭ10, ТЭМ1, ТЭМ2, ТЭМ2А, ТЭМ2АМ, ТЭМ2У, ТЭМ2УМ, ТЭМ2УМТ	0,30	0,32	0,40	0,46	—

Таблица 4.7

Коэффициенты вертикальной динамики грузовых вагонов

Тип тележки	k_d при скорости движения, км/ч								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
прямой участок									
ЦНИИ-ХЗ-0	—	0,23	0,28	0,35	0,43	0,52	0,57	0,61	0,66
МТ50	—	0,15	0,33	0,46	0,81	0,92	1,09	—	—
8-осный полувагон	—	0,24	0,25	0,27	0,33	0,33	0,33	0,33	—
кривой участок, $R = 700$ м									
ЦНИИ-ХЗ-0	—	—	0,28	0,35	0,43	0,55	0,60	0,61	0,63
МТ50	—	—	0,25	0,40	0,76	0,92	0,95	—	—
8-осный полувагон	—	0,33	0,34	0,35	0,35	0,35	0,43	0,47	—
кривой участок, $R = 250$ м									
ЦНИИ-ХЗ-0	0,47	—	—	0,54	—	—	—	—	—
8-осный полувагон	0,38	—	—	0,48	—	—	—	—	—

Можно принять среднее значение

$$\bar{P}_p^{cp} = 0,75 P_p^{max} \quad (4.9)$$

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс S определяется по формуле композиции законов распределения его составляющих

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{ин}^2 + 0,95 S_{инк}^2 + 0,05 S_{инк}^2}, \quad (4.10)$$

где S_p — среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от вертикальных колебаний надрессорного строения, Н;

$S_{ин}$ — среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от сил инерции необрессоренных масс при прохождении колесом изолированной неровности пути, Н;

$S_{инк}$ — среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от сил инерции необрессоренных масс, возникающих из-за непрерывных неровностей на поверхности катания колес, Н;

$S_{инк}$ — среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от сил инерции необрессоренных масс, возникающих из-за наличия на поверхности катания колес плавных изолированных неровностей, Н;

0,05 — количество колес рассчитываемого типа, имеющих изолированные плавные неровности на поверхности катания, отнесенное к общему числу таких колес, %, эксплуатируемых на участке;

0,95 — количество колес, %, имеющих непрерывную плавную неровность на поверхности катания.

Среднеквадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс S_p от вертикальных колебаний надрессорного строения P_p^{\max} определяется по формуле

$$S_p = 0,08 P_p^{\max}, H. \quad (4.11)$$

Среднеквадратическое отклонение сил инерции, возникающих при движении колеса по изолированной неровности пути,

$$S_{\text{инк}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \alpha_1 \epsilon \beta \gamma l_{\text{ш}} \sqrt{\frac{U \cdot q_k}{k}} \cdot \bar{P} V, \quad (4.12)$$

где α_1 — коэффициент, учитывающий величину колеблющейся массы пути (деревянные шпалы — 1, железобетонные — 0,931);

ϵ — коэффициент учета жесткости пути (деревянные шпалы — 1, железобетонные — 0,322);

β — коэффициент, зависящий от типа рельсов (для рельсов Р50, Р65 и Р75 он равен соответственно 1; 0,87; 0,82);

γ — коэффициент учета рода балласта (щебень, асбест, сортированный гравий — 1; карьерный гравий, ракушка — 1,1, песок — 1,5);

$l_{\text{ш}}$ — расстояние между осями шпал (при эпюрах укладки 2000, 1840 и 1600 шт/км; $l_{\text{ш}}$ соответственно 0,5 м; 0,55 м; 0,63 м).

Среднеквадратическое отклонение сил инерции, возникающих от изолированной неровности колеса:

$$S_{\text{инк}} = 0,5 \cdot 10^6 y_{\text{max}} \frac{U}{k} \alpha_0 e_0, \quad (4.13)$$

где α — коэффициент учета взаимодействия массы пути и необрессоренной массы экипажа (деревянные шпалы — 0,433, железобетонные — 0,403);

e_0 — расчетная глубина изолированной неровности, принимаемая 2/3 от наибольшей глубины ползуна на колесах по ПТЭ (для локомотивов с подшпиками скольжения $e_0 = 0,067 \cdot 10^{-2}$ м и качения $e_0 = 0,047 \cdot 10^{-2}$, а вагонов соответственно $e_0 = 0,133 \cdot 10^{-2}$ м и $l_0 = 0,067 \cdot 10^{-2}$ м);

y_{max} — максимальный дополнительный прогиб рельса, отнесенный к единице глубины неровности (безразмерная величина).

Для подавляющего числа расчетных случаев при скорости движения более 20 км/ч

$$y_{\text{max}} = 1,47 e_0.$$

где e_0 — расчетная глубина плавной изолированной неровности на поверхности катания колес, принимаемая равной 2/3 от предельной допустимой глубины неровности

Среднеквадратическое отклонение сил инерции, возникающих от непрерывной неровности колеса:

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot UV^2 \alpha_0 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{kU - 326k^2 q_k} \cdot 10^6}, \quad (4.14)$$

где d — диаметр колеса, м (см. табл. 4.2).

Наибольшая нагрузка расчетного колеса в сечении под ним

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{max}}^{\text{вер}} = \bar{P}_{\text{ср}} + 2,5 \sqrt{S_p^2 + S_{\text{инк}}^2 + g S_{\text{инк}}^2 + (1-g) S_{\text{инк}}^2}, \quad (4.15)$$

где g и $(1-g)$ — доля колес с изолированной и непрерывной неровностью, соответственно 0,05 и 0,95 (эти цифры необходимо уточнить, так как в настоящее время доля колес с изолированной неровностью превышает 0,05).

4.1.4. Определение изгибающих моментов, давлений на шпалы и прогибов рельса

Изгибающий момент M в рельсе, давление Q рельса на шпалу и прогиб y рельса, возникающие в сечении рельса под одиночной силой P , определяются по формулам

$$M = \frac{P}{4k} \mu_{kx}; \quad (4.16)$$

$$Q = \frac{Pkl_{\text{ш}}}{2} \eta_{kx}; \quad (4.17)$$

$$y = \frac{Pk}{2U} \eta_{kx}, \quad (4.18)$$

где $\mu = e^{-kx} (\cos kx - \sin kx)$; $\eta = e^{-kx} (\cos kx + \sin kx)$.

Изгибающий момент пропорционален линии влияния μ_{kx} (рис. 4.2, а), а давление на шпалу и упругий прогиб — линии влияния η_{kx} (рис. 4.2, б-г).

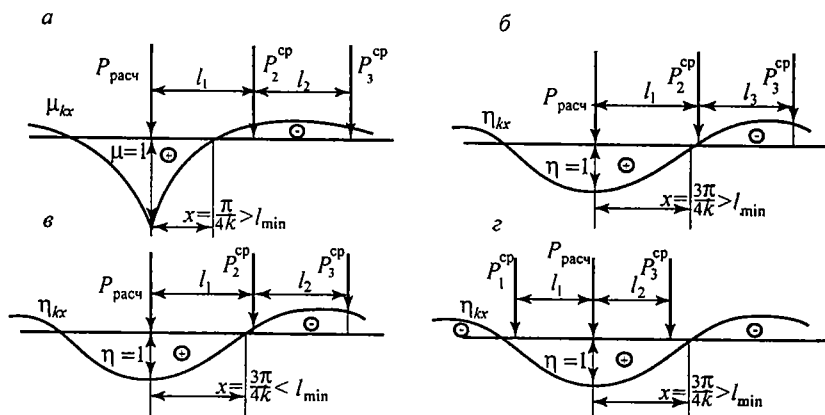


Рис. 4.2. Эпюры μ_{kx} (а) и η_{kx} (б) для определения наименее выгодного положения нагрузки при выборе расчетной схемы:

$P_{расч}$ — нагрузка на рельс от расчетного колеса и $P_{ср}$ — от соседних колес; l — расстояния между осями колесных пар; x — расстояние от расчетного колеса до точек $\mu = 0$ и $\eta = 0$

При загрузении рельсов двух- и трехосными тележками необходимо определить максимальные значения M , Q и y от системы сил.

Наибольший изгибающий момент M_{max} возникает под крайней осью тележки, а наибольшие величины нагрузки на шпалу Q_{max} и упругого прогиба y_{max} могут возникнуть как под крайними осями, так и под средней осью.

За расчетную можно принять первую ось тележки, если $x = \frac{3\pi}{4k} < l_{min}$

(здесь l_{min} — наименьшее расстояние между осями колесных пар в тележке). В этом случае вторая ось располагается в отрицательной зоне линии влияния (рис. 4.2, в).

При $x = \frac{3\pi}{4k} > l_{min}$ за расчетную принимается вторая ось тележки (рис. 4.2, г).

Величины сил от расчетной оси принимаются в их максимально вероятном значении, а от соседних осей в среднем с учетом соответствующих ординат линий влияния μ_{kx} и η_{kx} .

Эквивалентная сила для определения изгибающего момента от системы сил

$$P'_{экр} = P_{расч} + \sum \bar{P}_i \mu_i \quad (4.19)$$

Эквивалентная сила для определения давления на шпалу и упругого прогиба

$$\bar{P}''_{экр} = P_{расч} + \sum \bar{P}_i \eta_i \quad (4.20)$$

Величины M , Q , y при этом определяются по формулам:

$$M = \frac{1}{4k} P'_{экр} \quad (4.21)$$

$$Q = \frac{kl_{ш}}{2} P''_{экр} \quad (4.22)$$

$$y = \frac{k}{2U} P''_{экр} \quad (4.23)$$

Ординаты линий влияния изгибающих моментов M рельса, поперечных сил Q и прогибов y рельса в сечениях пути, расположенных под колесными нагрузками от осей экипажа, смежных с расчетной осью, можно получить в табл. 4.8 [7].

Значения функций μ и η в зависимости от kx

Таблица 4.8

kx	μ	η	kx	μ	η	kx	μ	η
0,50	0,2415	0,8231	1,09	-0,1426	0,4536	1,68	-0,2056	0,1648
0,51	0,2309	0,8172	1,10	-0,1457	0,4476	1,69	-0,2051	0,1612
0,52	0,2205	0,8113	1,11	-0,1488	0,4416	1,70	-0,2047	0,1576
0,53	0,2103	0,8054	1,12	-0,1516	0,4356	1,71	-0,2042	0,1540
0,54	0,2002	0,7994	1,13	-0,1543	0,4298	1,72	-0,2037	0,1505
0,55	0,1903	0,7934	1,14	-0,1570	0,4240	1,73	-0,2032	0,1470
0,56	0,1805	0,7874	1,15	-0,1597	0,4183	1,74	-0,2026	0,1435
0,57	0,1709	0,7813	1,16	-0,1622	0,4126	1,75	-0,2020	0,1400
0,58	0,1615	0,7752	1,17	-0,1647	0,4069	1,76	-0,2013	0,1365
0,59	0,1522	0,7690	1,18	-0,1671	0,4012	1,77	-0,2006	0,1332
0,60	0,1431	0,7628	1,19	-0,1694	0,3955	1,78	-0,2000	0,1299
0,61	0,1341	0,7566	1,20	-0,1716	0,3899	1,79	-0,1993	0,1266
0,62	0,1253	0,7504	1,21	-0,1737	0,3842	1,80	-0,1985	0,1234
0,63	0,1166	0,7441	1,22	-0,1758	0,3786	1,81	-0,1978	0,1202
0,64	0,1080	0,7378	1,23	-0,1778	0,3731	1,82	-0,1970	0,1170
0,65	0,0997	0,7315	1,24	-0,1797	0,3677	1,83	-0,1962	0,1138
0,66	0,0914	0,7252	1,25	-0,1815	0,3623	1,84	-0,1953	0,1108
0,67	0,0833	0,7189	1,26	-0,1833	0,3569	1,85	-0,1945	0,1078
0,68	0,0754	0,7125	1,27	-0,1849	0,3515	1,86	-0,1936	0,1048
0,69	0,0676	0,7061	1,28	-0,1865	0,3462	1,87	-0,1927	0,1018

Продолжение таблицы 4.8

kx	μ	η	kx	μ	η	kx	μ	η
0,70	0,0599	0,6997	1,29	-0,1881	0,3408	1,88	-0,1917	0,0989
0,71	0,0524	0,6933	1,30	-0,1897	0,3355	1,89	-0,1908	0,0960
0,72	0,0450	0,6869	1,31	-0,1911	0,3303	1,90	-0,1899	0,0932
0,73	0,0377	0,6805	1,32	-0,1925	0,3251	1,91	-0,1889	0,0904
0,74	0,0306	0,6740	1,33	-0,1938	0,3199	1,92	-0,1879	0,0876
0,75	0,0236	0,6676	1,34	-0,1950	0,3148	1,93	-0,1869	0,0849
0,76	0,0168	0,6612	1,35	-0,1962	0,3098	1,94	-0,1859	0,0822
0,77	0,0101	0,6547	1,36	-0,1973	0,3047	1,95	-0,1849	0,0795
0,78	0,0035	0,6483	1,37	-0,1983	0,2997	1,96	-0,1838	0,0769
0,25 π	0,0000	0,6451	1,38	-0,1993	0,2948	1,97	-0,1827	0,0743
0,79	-0,0029	0,6418	1,39	-0,2003	0,2898	1,98	-0,1816	0,0717
0,80	-0,0093	0,6354	1,40	-0,2011	0,2849	1,99	-0,1804	0,0692
0,81	-0,0155	0,6289	1,41	-0,2019	0,2801	2,00	-0,1794	0,0667
0,82	-0,0216	0,6225	1,42	-0,2027	0,2753	2,01	-0,1782	0,0643
0,83	-0,0275	0,6161	1,43	-0,2033	0,2705	2,02	-0,1771	0,0619
0,84	-0,0333	0,6096	1,44	-0,2039	0,2658	2,03	-0,1759	0,0595
0,85	-0,0390	0,6032	1,45	-0,2045	0,2611	2,04	-0,1748	0,0571
0,86	-0,0446	0,5968	1,46	-0,2051	0,2565	2,05	-0,1737	0,0549
0,87	-0,0501	0,5904	1,47	-0,2056	0,2519	2,06	-0,1725	0,0526
0,88	-0,0554	0,5840	1,48	-0,2060	0,2474	2,07	-0,1712	0,0504
0,89	-0,0606	0,5776	1,49	-0,2064	0,2429	2,08	-0,1700	0,0482
0,90	-0,0657	0,5712	1,50	-0,2068	0,2384	2,09	-0,1688	0,0460
0,91	-0,0708	0,5648	1,51	-0,2071	0,2339	2,10	-0,1675	0,0439
0,92	-0,0757	0,5584	1,52	-0,2073	0,2295	2,11	-0,1663	0,0417
0,93	-0,0805	0,5521	1,53	-0,2075	0,2252	2,12	-0,1650	0,0397
0,94	-0,0851	0,5459	1,54	-0,2077	0,2209	2,13	-0,1637	0,0377
0,95	-0,0896	0,5396	1,55	-0,2078	0,2166	2,14	-0,1625	0,0357
0,96	-0,0941	0,5333	1,56	-0,2079	0,2123	2,15	-0,1613	0,0337
0,97	-0,0984	0,5270	1,57	-0,2079	0,2082	2,16	-0,1600	0,0317
0,98	-0,1027	0,5207	0,5 π	-0,2079	0,2079	2,17	-0,1587	0,0288
0,99	-0,1069	0,5145	1,58	-0,2079	0,2041	2,18	-0,1574	0,0280
1,00	-0,1108	0,5083	1,59	-0,2078	0,2000	2,19	-0,1560	0,0262
1,01	-0,1147	0,5021	1,60	-0,2077	0,1959	2,20	-0,1548	0,0244
1,02	-0,1185	0,4960	1,61	-0,2075	0,1919	2,21	-0,1534	0,0226
1,03	-0,1223	0,4899	1,62	-0,2073	0,1879	2,22	-0,1522	0,0208
1,04	-0,1259	0,4839	1,63	-0,2071	0,1840	2,23	-0,1509	0,0191
1,05	-0,1294	0,4778	1,64	-0,2069	0,1801	2,24	-0,1496	0,0174
1,06	-0,1328	0,4716	1,65	-0,2067	0,1763	2,25	-0,1482	0,0157
1,07	-0,1362	0,4656	1,66	-0,2064	0,1725	2,26	-0,1469	0,0141
1,08	-0,1394	0,4596	1,67	-0,2060	0,1686	2,27	-0,1455	0,0125

Продолжение таблицы 4.8

kx	μ	η	kx	μ	η	kx	μ	η
2,28	-0,1442	0,0110	2,91	-0,0656	-0,0406	3,54	-0,0155	-0,0380
2,29	-0,1429	0,0095	2,92	-0,0645	-0,0409	3,55	-0,0149	-0,0378
2,30	-0,1416	0,0080	2,93	-0,0634	-0,0411	3,56	-0,0144	-0,0376
2,31	-0,1403	0,0065	2,94	-0,0624	-0,0413	3,57	-0,0139	-0,0373
2,32	-0,1389	0,0050	2,95	-0,0614	-0,0415	3,58	-0,0134	-0,0371
2,33	-0,1376	0,0036	2,96	-0,0603	-0,0417	3,59	-0,0129	-0,0368
2,34	-0,1362	0,0022	2,97	-0,0593	-0,0419	3,60	-0,0124	-0,0366
2,35	-0,1349	0,0008	2,98	-0,0583	-0,0420	3,61	-0,0119	-0,0363
0,75 π	-0,1340	0,0000	2,99	-0,0573	-0,0421	3,62	-0,0114	-0,0361
2,36	-0,1336	-0,0005	3,00	-0,0563	-0,0423	3,63	-0,0109	-0,0359
2,37	-0,1323	-0,0018	3,01	-0,0553	-0,0423	3,64	-0,0105	-0,0356
2,38	-0,1309	-0,0031	3,02	-0,0543	-0,0424	3,65	-0,0101	-0,0354
2,39	-0,1296	-0,0044	3,03	-0,0534	-0,0425	3,66	-0,0096	-0,0351
2,40	-0,1282	-0,0056	3,04	-0,0524	-0,0426	3,67	-0,0092	-0,0348
2,41	-0,1268	-0,0068	3,05	-0,0515	-0,0427	3,68	-0,0088	-0,0346
2,42	-0,1255	-0,0080	3,06	-0,0505	-0,0428	3,69	-0,0083	-0,0343
2,43	-0,1241	-0,0092	3,07	-0,0496	-0,0429	3,70	-0,0079	-0,0341
2,44	-0,1228	-0,0103	3,08	-0,0487	-0,0430	3,71	-0,0075	-0,0338
2,45	-0,1215	-0,0114	3,09	-0,0478	-0,0431	3,72	-0,0071	-0,0336
2,46	-0,1202	-0,0125	3,10	-0,0469	-0,0431	3,73	-0,0067	-0,0333
2,47	-0,1189	-0,0135	3,11	-0,0460	-0,0431	3,74	-0,0063	-0,0330
2,48	-0,1175	-0,0146	3,12	-0,0451	-0,0432	3,75	-0,0059	-0,0327
2,49	-0,1161	-0,0156	3,13	-0,0442	-0,0432	3,76	-0,0055	-0,0324
2,50	-0,1149	-0,0166	3,14	-0,0433	-0,0432	3,77	-0,0051	-0,0322
2,51	-0,1136	-0,0176	π	-0,0432	-0,0432	3,78	-0,0048	-0,0319
2,52	-0,1123	-0,0185	3,15	-0,0424	-0,0432	3,79	-0,0044	-0,0316
2,53	-0,1109	-0,0195	3,16	-0,0416	-0,0432	3,80	-0,0040	-0,0314
2,54	-0,1096	-0,0204	3,17	-0,0407	-0,0432	3,81	-0,0036	-0,0311
2,55	-0,1083	-0,0213	3,18	-0,0399	-0,0431	3,82	-0,0033	-0,0308
2,56	-0,1071	-0,0221	3,19	-0,0391	-0,0431	3,83	-0,0030	-0,0305
2,57	-0,1058	-0,0228	3,20	-0,0383	-0,0431	3,84	-0,0027	-0,0303
2,58	-0,1045	-0,0237	3,21	-0,0375	-0,0430	3,85	-0,0023	-0,0300
2,59	-0,1033	-0,0246	3,22	-0,0367	-0,0430	3,86	-0,0020	-0,0297
2,60	-0,1019	-0,0254	3,23	-0,0359	-0,0429	3,87	-0,0017	-0,0294
2,61	-0,1007	-0,0261	3,24	-0,0351	-0,0428	3,88	-0,0014	-0,0292
2,62	-0,0994	-0,0269	3,25	-0,0343	-0,0427	3,89	-0,0011	-0,0289
2,63	-0,0982	-0,0276	3,26	-0,0336	-0,0426	3,90	-0,0008	-0,0286
2,64	-0,0969	-0,0283	3,27	-0,0328	-0,0425	3,91	-0,0005	-0,0283
2,65	-0,0956	-0,0289	3,28	-0,0321	-0,0424	3,92	-0,0002	-0,0280
2,66	-0,0944	-0,0296	3,29	-0,0313	-0,0423	1,25 π	0,0000	-0,0279
2,67	-0,0932	-0,0302	3,30	-0,0306	-0,0422	3,93	0,0001	-0,0278
2,68	-0,0920	-0,0308	3,31	-0,0299	-0,0421	3,94	0,0003	-0,0275
2,69	-0,0908	-0,0314	3,32	-0,0292	-0,0420	3,95	0,0005	-0,0272
2,70	-0,0895	-0,0320	3,33	-0,0285	-0,0419	3,96	0,0008	-0,0269

kx	μ	η	kx	μ	η	kx	μ	η
2,71	-0,0883	-0,0326	3,34	-0,0270	-0,0418	3,97	0,0011	-0,0267
2,72	-0,0871	-0,0331	3,35	-0,0271	-0,0417	3,98	0,0014	-0,0264
2,73	-0,0859	-0,0337	3,36	-0,0264	-0,0415	3,99	0,0017	-0,0262
2,74	-0,0847	-0,0342	3,37	-0,0257	-0,0413	4,00	0,0019	-0,0258
2,75	-0,0835	-0,0347	3,38	-0,0251	-0,0411	4,10	0,0040	-0,0231
2,76	-0,0823	-0,0352	3,39	-0,0244	-0,0409	4,20	0,0057	-0,0204
2,77	-0,0811	-0,0356	3,40	-0,0237	-0,0408	4,30	0,0070	-0,0179
2,78	-0,0799	-0,0361	3,41	-0,0230	-0,0406	4,40	0,0079	-0,0155
2,79	-0,0787	-0,0365	3,42	-0,0225	-0,0404	4,50	0,0085	-0,0132
2,80	-0,0777	-0,0369	3,43	-0,0218	-0,0403	4,60	0,0089	-0,0111
2,81	-0,0765	-0,0373	3,44	-0,0212	-0,0401	4,70	0,0090	-0,0092
2,82	-0,0754	-0,0377	3,45	-0,0206	-0,0399	4,80	0,0089	-0,0075
2,83	-0,0742	-0,0381	3,46	-0,0200	-0,0397	4,90	0,0087	-0,0059
2,84	-0,0731	-0,0385	3,47	-0,0194	-0,0395	5,00	0,0084	-0,0046
2,85	-0,0721	-0,0388	3,48	-0,0189	-0,0392	5,10	0,0080	-0,0038
2,86	-0,0710	-0,0391	3,49	-0,0183	-0,0390	5,20	0,0075	-0,0023
2,87	-0,0699	-0,0394	3,50	-0,0177	-0,0389	5,30	0,0069	-0,0014
2,88	-0,0687	-0,0397	3,51	-0,0171	-0,0386	5,40	0,0064	-0,0006
2,89	-0,0676	-0,0400	3,52	-0,0165	-0,0384	5,50	0,0058	0,0000
2,90	-0,0666	-0,0403	3,53	-0,0160	-0,0382			

При этом $\mu = f(kx)$; $\eta = f(kx)$, где k — коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса, m^{-1} ; x — расстояние от расчетного сечения до соответствующего колеса.

4.1.5. Напряжения в элементах верхнего строения пути

Напряжения изгиба в рельсах по оси его подошвы и головки от вертикальной нагрузки (рис. 4.3, а)

$$\sigma_{оп} = \frac{M}{W_{п}}; \quad (4.24)$$

$$\sigma_{ог} = \frac{M}{W_{г}}, \quad (4.25)$$

где $W_{п}$, $W_{г}$ — моменты сопротивления поперечного сечения рельса относительно подошвы и головки соответственно.

С учетом действия вертикальных внецентренно приложенных и горизонтальных поперечных сил определяются напряжения в кромках головки и подошвы:

$$\sigma_{кп} = f\sigma_{оп} \leq [\sigma_{кп}]; \quad (4.26)$$

$$\sigma_{кг} = m_{кг}\sigma_{оп} \leq [\sigma_{к}]; \quad (4.27)$$

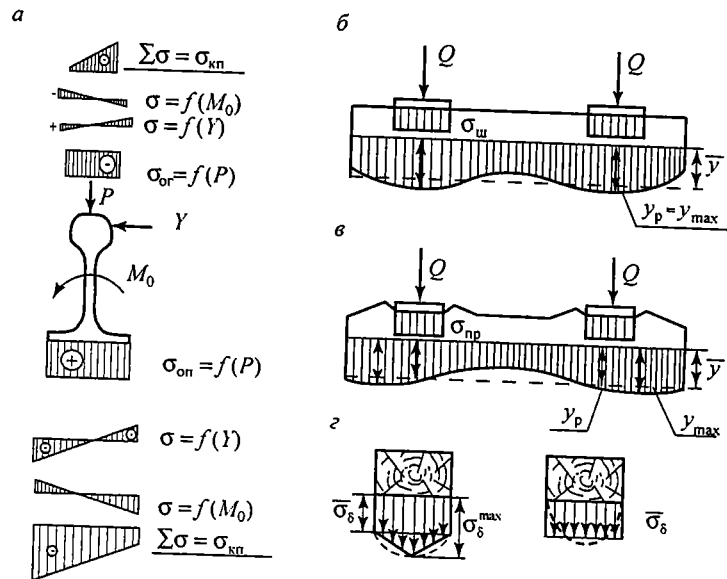


Рис. 4.3. Эпюры напряжений:

а — в рельсах; б — в деревянных шпалах под подкладками; в — в упругих прокладках железобетонных шпал; г — в балласте под шпалой (с учетом упругих линий прогибов y); $\sigma_{оп}$ и $\sigma_{ог}$ — эпюры напряжений по оси подошвы и головки рельса от действия силы P ; $\sigma = f(Y)$ — то же от действия силы Y ; $\sigma = f(M)$ — то же от действия крутящего момента M ; $\Sigma\sigma = \sigma_{кп}$ и $\Sigma\sigma = \sigma_{кг}$ — суммарные изгибные напряжения в кромке подошвы и головки рельса

Коэффициент f приведен в табл. 4.3, а $m_{кг}$ — в табл. 4.9.

Значения коэффициентов $m_{кг}$ для направляющих осей

Таблица 4.9

Тип рельса	Износ $h \cdot 10^{-3}$, м	Значения $m_{кг}$ при f , равном					
		1,0	1,10	1,25	1,50	1,75	2,0
Р75	6	1,21	1,25	1,31	1,40	1,50	1,60
	9	1,24	1,27	1,34	1,43	1,53	1,64
Р65	6	1,25	1,29	1,34	1,44	1,53	1,64
	9	1,29	1,33	1,39	1,49	1,59	1,69
Р50	6	1,18	1,22	1,28	1,39	1,49	1,60
	9	1,22	1,27	1,33	1,44	1,55	1,66

Средние напряжения сжатия под подкладками на деревянных шпалах и в прокладках на железобетонных $\sigma_{ш}, \sigma_{пр}$ МПа, а также в балластном слое под каждой шпалой в подрельсовом сечении $\sigma'_б$ МПа (рис. 4.3, б, в, г)

$$\sigma_{ш} = \sigma_{пр} = \frac{Q \cdot 10^6}{\omega} = \frac{kl_{ш} \cdot 10^6}{2\omega} \cdot P''_{экр} \leq [\sigma_{ш}, \sigma_{пр}] \quad (4.28)$$

$$\sigma'_б = \frac{Q \cdot 10^6}{\Omega_{\alpha}} = \frac{kl_{ш} \cdot 10^6}{2\Omega_{\alpha}} \cdot P''_{экр} \leq [\sigma'_б] \quad (4.29)$$

где ω — площадь подкладки, м (см. табл. 4.1);

$\Omega_{\alpha} = \frac{1}{2} \alpha ab$ — опорная площадь полушпалы с поправкой на изгиб (a и b — длина и ширина опорной постели шпалы), м;

$\alpha = \frac{y}{y_p}$ — отношение средней просадки шпалы к просадке в сечении под рельсом.

рельсом.

Численно величины ω и Ω даны в табл. 4.1.

4.1.6. Расчеты прочности основной площадки земляного полотна

В этих расчетах необходимо учесть две особенности:

- напряжения на основной площадке определяются от воздействия наиболее массового подвижного состава — четырехосного грузового вагона с разрешенной нагрузкой до 240...250 кН/ось (доля локомотивных осей составляет 0,03...0,05);

- учитываются воздействия на основание не только расчетной, но и двух соседних с ней шпал.

Напряжение σ_h на основной площадке при толщине балластного слоя h определяется как сумма трех составляющих — напряжений от расчетной шпалы σ'_h и от двух соседних $\sigma'_{hc}, \sigma''_{hc}$, т.е.

$$\sigma_h = \sigma'_{hc} + \sigma'_{hc} + \sigma''_{hc} \quad (4.30)$$

Каждое из этих напряжений является функцией от напряжений в балласте под шпалой и толщины балласта (рис. 4.4).

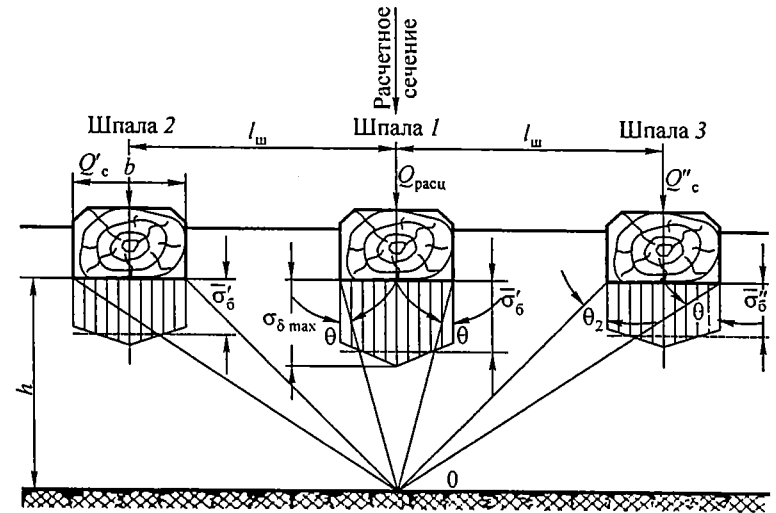


Рис. 4.4. Расчетная схема определения напряжений на основной площадке земляного полотна:

$Q_{расч}$ и Q_c — давления на расчетную и соседние шпалы; $\sigma_{б max}$ и $\sigma'_б$ — ординаты эпюр максимальных и средних напряжений в балласте под шпалой

Последовательность расчета:

1) определяются давления на опоры $Q_{расч}, Q'_c$ и Q''_c от всех осей тележки вагона, в зависимости от расстояния каждой оси до соответствующей шпалы. При этом линия влияния $\eta_{кx}$ последовательно перемещается к соответствующей шпале, от которой определяют составляющую напряжения σ'_h ;

2) рассчитываются величины средних и максимальных напряжений в балласте под расчетной шпалой $\bar{\sigma}'_б$ и $\sigma_{б max}$ средних под соседними $\bar{\sigma}'_{бс}$ и $\bar{\sigma}''_{бс}$:

$$\bar{\sigma}'_б = \frac{Q_{расч}}{\Omega_{\alpha}}; \quad (4.31)$$

$$\bar{\sigma}'_{бс} = \frac{Q''_c}{\Omega_{\alpha}}; \quad (4.32)$$

$$\bar{\sigma}_{6c}'' = \frac{Q_c''}{\Omega_{\alpha}}; \quad (4.33)$$

$$\sigma_{6 \max} = m_6 \bar{\sigma}_6; \quad (4.34)$$

$$m_6 = \frac{0,89}{\sigma_6 + 0,435}; \quad (4.35)$$

где m_6 — коэффициент, характеризующий концентрацию напряжений от краев постели шпалы к ее оси (принимается в пределах 1...2);

3) определяются напряжения в точке M как сумма воздействий эпюр давлений на балласт под тремя шпалами.

Напряжения от расчетной шпалы 1

$$\sigma_h' = r_1 \cdot [0,635mC_1 + 1,275(2-m)C_2] \cdot \sigma_6, \quad (4.36)$$

где r_1 — параметр учета влияния материала шпал на напряжения (0,8 — деревянные и 0,7 — железобетонные шпалы).

$$C_1 = \frac{b}{2h} - \frac{b^3}{24h^3}; \quad (4.37)$$

$$C_2 = \frac{bh}{b^2 + 4h^2}, \quad (4.38)$$

где b — ширина нижней постели шпалы;

h — толщина балластного слоя.

Напряжения от соседних шпал 2 и 3

$$\sigma_{hc}' = \frac{r_1}{\pi} \cdot A_h \bar{\sigma}_{6c}'; \quad (4.39)$$

$$\sigma_{hc}'' = \frac{r_1}{\pi} \cdot A_h \bar{\sigma}_{6c}''; \quad (4.40)$$

где $A_h = f(b, h)$ — параметр, зависящий от ширины нижней постели шпалы и толщины балластного слоя.

Параметры C_1 , C_2 и A_h принимаются по табл. 4.10—4.11.

Таблица 4.10

Коэффициенты C_1 и C_2 для расчета напряжений в балласте на глубине h , см

h	C_1 при ширине шпалы b , см			C_2 при ширине шпалы b , см		
	23	25	27	23	25	27
20	0,512	0,544	0,572	0,216	0,225	0,232
25	0,428	0,458	0,488	0,190	0,200	0,209
30	0,365	0,393	0,420	0,167	0,178	0,187
35	0,317	0,342	0,367	0,148	0,158	0,168
40	0,280	0,302	0,325	0,133	0,142	0,151
45	0,250	0,271	0,291	0,120	0,129	0,138
50	0,226	0,245	0,263	0,109	0,118	0,126
55	0,206	0,223	0,241	0,100	0,108	0,116
60	0,189	0,205	0,221	0,092	0,100	0,107
65	0,175	0,190	0,205	0,086	0,093	0,100
70	0,163	0,177	0,190	0,080	0,087	0,093

Таблица 4.11

Коэффициенты A для расчета напряжений в балласте на глубине h , см

h	Значение коэффициента A при ширине шпалы, см								
	23 при $l_{ш}$, см			25 при $l_{ш}$, см			27 при $l_{ш}$, см		
	51	55	63	51	55	63	51	55	63
20	0,046	0,035	0,021	0,051	0,039	0,023	0,057	0,043	0,026
25	0,077	0,059	0,037	0,085	0,066	0,041	0,094	0,072	0,045
30	0,110	0,087	0,056	0,122	0,096	0,062	0,134	0,106	0,068
35	0,145	0,117	0,078	0,159	0,128	0,085	0,174	0,141	0,093
40	0,176	0,145	0,100	0,194	0,160	0,110	0,211	0,174	0,120
45	0,205	0,172	0,122	0,224	0,188	0,133	0,244	0,205	0,145
50	0,229	0,195	0,142	0,250	0,214	0,156	0,272	0,232	0,170
55	0,248	0,215	0,161	0,271	0,235	0,176	0,295	0,255	0,191
60	0,264	0,232	0,178	0,288	0,253	0,194	0,312	0,274	0,211
65	0,276	0,245	0,192	0,300	0,267	0,209	0,325	0,289	0,227
70	0,284	0,255	0,204	0,309	0,278	0,222	0,335	0,301	0,241

4.1.7. Допускаемые напряжения в элементах пути

В Методике [7] в качестве допускаемых напряжений приняты оценочные критерии прочности пути, зависящие от грузонапряженности. Указаны четыре критерия прочности пути, полученные из условия обеспечения его надежности в зависимости от класса пути, нормируемые в соответствии с Положением о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах Российской Федерации [37]:

- из условия непревышения допускаемого количества отказов рельсов за период нормативной наработки;
- из условия непревышения допускаемого износа шпал и прокладок под подкладками за период нормативной наработки;
- из условия непревышения допускаемой интенсивности накопления остаточных деформаций соответственно в балласте и на основной площадке земляного полотна.

Эти критерии названы оценочными критериями прочности пути. Численные значения оценочных критериев прочности пути применительно к градации грузонапряженности в соответствии с Положением о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах Российской Федерации приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12

Оценочные критерии прочности пути

Критерии	Вид подвижного состава	Значения оценочных критериев прочности, Мпа, при грузонапряженности, млн ткм бр. на км в год*			
		более 50	50...25	24...10	менее 10
[σ_k]	Локомотивы	190	200	240	340
	Вагоны	150	160	200	300
[$\sigma_{ш}$]	Локомотивы	1,2	1,6	2,0	3,0
	Вагоны	1,1	1,5	1,8	2,7
[σ_b]	Локомотивы	0,4	0,42	0,45	0,50
	Вагоны	0,26	0,30	0,35	0,40
[σ_s]	Локомотивы	0,10	0,10	0,11	0,12
	Вагоны	0,08	0,08	0,09	0,10

*Для новостроек — на 10-й год эксплуатации.

Примечания. 1. [σ_k] — допускаемые напряжения растяжения в кромке подошвы рельса, обусловленные его изгибом и кручением вследствие вертикального и поперечного горизонтального воздействия колес подвижного состава;

2. [$\sigma_{ш}$] — допускаемые напряжения на смятие в деревянных шпалах (прокладках на железобетонных) под подкладками, осредненные по площади подкладки;

3. [σ_b] — допускаемые напряжения сжатия в балласте под шпалой в подрельсовой зоне;

4. [σ_s] — допускаемые напряжения сжатия на основной площадке земляного полотна в подрельсовой зоне.

Данные таблицы применимы в следующих условиях:

- ◆ для типовых нетермообработанных рельсов в прямых и кривых радиусом более 1000 м;
- ◆ для сосновых стандартных шпал;
- ◆ для щебеночного и асбестового балласта;
- ◆ для земляного полотна из суглинистых грунтов.

При песчаном балласте приведенные в табл. 4.12 значения необходимо уменьшить в 1,6 раза, а при карьерном гравии и ракушке — в 1,4 раза. При термоупрочненных рельсах значения увеличиваются на 10 %.

В кривых с радиусом 1000 м и менее действующими нормативными документами предусмотрена сплошная смена рельсов между капитальными ремонтами пути: при $R = 1000...651$ м — один раз, при $R = 650...351$ м — три раза. Поэтому из условия обеспечения указанных показателей надежности пути в таких кривых значение оценочных критериев прочности рельсов принимается [σ_k] = 240 МПа.

4.1.8. Примеры расчетов прочности пути

Пример 4.1. *Цель расчета:* установить зависимость напряжений от скоростей движения пассажирского и грузового локомотива, а также грузового вагона с тележками ЦНИИ-ХЗ-0.

Исходные данные. Грузонапряженность линии 40 млн т·км брутто на 1 км в год. Расчетные локомотивы ЧС-4 и ВЛ8, их конструктивные скорости соответственно 140 и 100 км/ч. Максимальная скорость грузового поезда 100 км/ч. Минимальный радиус кривой $R = 500$ м.

В соответствии с заданными эксплуатационными условиями и Положением о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах Российской Федерации, определено, что верхнее строение пути должно соответствовать группе В, 1 категории и 1 классу. При капитальном ремонте в путь должна быть уложена следующая конструкция верхнего строения:

- рельсы Р65 новые, термообработанные, 1-й группы;
- шпалы железобетонные ШС-1, 1840 шт./км в прямой и 2000 шт./км в кривой;
- скрепления КБ с прокладками повышенной упругости;
- балластная призма двухслойная (слой щебня 40 см и песчаная подушка 20 см).

В расчетах учтен приведенный износ рельсов 6 мм. Расчетные характеристики пути и локомотивов приведены соответственно в табл. 4.13 и 4.14.

В качестве расчетных намечаем скорости движения:

- электровоз ЧС4 — 20, 50, 100 и 140 км/ч в прямой;
20, 50 и 100 км/ч в кривой;
- электровоз ВЛ8 — 20, 50 и 100 км/ч;
- грузовой вагон — 20, 50 и 100 км/ч.

Таблица 4.13

Расчетные характеристики пути

Характеристика конструкции пути	План линии	U , МПа	k , м ⁻¹	$l_{ш}$, м	J_B , 10 ⁻⁸ , м ⁴	$W_n \cdot 10^{-6}$, м ³
Р65(6)ЖБ, Щ	прямая	100	1,338	0,55	3208	417
	кривая	110	1,421	0,50		

Последовательность расчета. Определение динамической нагрузки P_p^{\max} от колес подвижного состава на рельс при скорости 27,8 м/с. Максимальное значение сил инерции, Н, от колебания кузова вагона на рессорах

$$P_p^{\max} = \mathcal{K}_p Z_{\max} \quad (4.41)$$

Максимальный прогиб рессор определяется по формулам табл. 4.4.

$$\text{ВЛ8} \quad Z_{\max} = (10,9 + 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 27,8^2) \cdot 10^{-3} = 11,6 \cdot 10^{-3}, \text{ м};$$

$$\text{вагон} \quad Z_{\max} = (10,0 + 16,0 \cdot 10^{-4} \cdot 27,8^2) \cdot 10^{-3} = 11,2 \cdot 10^{-3}, \text{ м}.$$

$$\text{ВЛ8} \quad P_p^{\max} = 1,18 \cdot 10^6 \cdot 11,6 \cdot 10^{-3} = 13688 \text{ Н};$$

$$\text{вагон} \quad P_p^{\max} = 2,00 \cdot 10^6 \cdot 11,2 \cdot 10^{-3} = 22400 \text{ Н}.$$

Значение P_p^{\max} , Н, от электровоза ЧС4 найдем с помощью коэффициента динамики (табл. 4.5) по формуле

$$P_p^{\max} = k_d (P_{ст} - q). \quad (4.42)$$

Так получаем

$$P_p^{\max} = 0,26(105000 - 18500) = 22490 \text{ Н}.$$

Среднюю динамическую нагрузку колеса на рельс P_p^{cp} , Н, определяем по следующей формуле:

$$P_p^{cp} = 0,75 P_p^{\max}; \quad (4.43)$$

$$\text{ЧС4} \quad P_p^{cp} = 0,75 \cdot 22490 = 16867 \text{ Н};$$

$$\text{ВЛ8} \quad P_p^{cp} = 0,75 \cdot 13688 = 10266 \text{ Н};$$

$$\text{вагон} \quad P_p^{cp} = 0,75 \cdot 22400 = 16800 \text{ Н}.$$

Средняя величина вертикальной нагрузки, Н, от колеса на рельс

$$P_{cp} = P_{ст} + P_p^{cp}, \text{ Н}; \quad (4.44)$$

$$\text{ЧС4} \quad P_{cp} = 105000 + 16867 = 121867 \text{ Н};$$

$$\text{ВЛ8} \quad P_{cp} = 115000 + 10266 = 125266 \text{ Н};$$

$$\text{вагон} \quad P_{cp} = 115000 + 16800 = 131800 \text{ Н}.$$

Окончание таблицы 4.13

α_0	α_1	ϵ	β	γ	$\omega \cdot 10^{-4}$, м ²	Ω_{α} , м	b , м	$F \cdot 10^{-4}$, м	C_1	C_2	A_h
0,403	0,931	0,322	0,87	1	518	0,2975	0,276	78,24	0,227	0,110	0,274

Таблица 4.14

Расчетные характеристики подвижного состава

Подвижной состав	$P_{ст}$, кН	q_k , кН	\mathcal{K}_p , МН/м	d , м	$f_{ст}$, м	l_i , м	$e_i \cdot 10^{-2}$, м	f	
								в прямой	в кривой
Электровоз ЧС-4	105	18,5	0,87	1,25	0,197	2,30+ +2,30	0,047	1,20	1,93
Электровоз ВЛ8	115	31,7	1,18	1,20	0,070	3,20	0,047	1,24	1,35
4-осный вагон на тележках ЦНИИ-ХЗ-0	115*	9,95	2,0	0,95	0,048	1,85	0,068	1,18	1,35

*Вагон с повышенной осевой нагрузкой 23 т/ось.

Результаты расчетов сведены в табл. 4.14*.

Таблица 4.14*

V	$f_{ст}$	\mathcal{K}_p	Z_{\max}	P_p^{\max}	$P_p^{ст}$	$P_{ст}$	P_{cp}
ЧС4							
5,6	197			10406	7805	105000	112805
13,9	197			13041	9781	105000	114781
27,8	197			22490	16868	105000	121867
38,9	197			33735	25301	105000	130301
ВЛ8							
5,6		1180000	0,01093	12898	9673	115000	124673
13,9		1180000	0,011085	13081	9811	115000	124811
27,8		1180000	0,011642	13737	10266	115000	125266
Вагон							
5,6		2000000	0,01005	20100	15075	115000	130075
13,9		2000000	0,010309	20618	15464	115000	130464
27,8		2000000	0,011237	22473	16800	115000	131800

Среднее квадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки от колеса на рельс

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{\text{нп}}^2 + 0,05S_{\text{инк}}^2 + 0,95S_{\text{ннк}}^2} \quad (4.45)$$

Среднее квадратическое отклонение нагрузки, Н, от вертикальных колебаний наддрессорного строения

$$S_p = 0,08 P_p^{\text{max}}; \quad (4.46)$$

ЧС 4 $S_p = 0,08 \cdot 22490 = 1799 \text{ Н};$

ВЛ8 $S_p = 0,08 \cdot 13688 = 1095 \text{ Н};$

вагон $S_p = 0,08 \cdot 22400 = 1792 \text{ Н}.$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.15.

Таблица 4.15

V	S _p			V	S _p		
	ЧС4	ВЛ8	Вагон		ЧС4	ВЛ8	Вагон
5,6	833	1032	1608	27,8	1799	1095	1792
13,9	1043	1046	1649	38,9	2699		

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от сил инерции необдрессоренных масс P_{нп}^{max}, Н, вызванных неровностью пути:

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \alpha_1 \varepsilon \beta \gamma l \sqrt{\frac{U q_k}{k}} P_{\text{ср}} v; \quad (4.47)$$

ЧС4

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,55 \sqrt{\frac{100 \cdot 18500}{1,338}} \times \\ \times 121867 \cdot 27,8 = 11623 \text{ Н};$$

ВЛ8

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,55 \sqrt{\frac{100 \cdot 31700}{1,338}} \times \\ \times 125266 \cdot 27,8 = 15639 \text{ Н};$$

вагон

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,55 \sqrt{\frac{100 \cdot 9950}{1,338}} \times \\ \times 131800 \cdot 27,8 = 9219 \text{ Н}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.16.

Таблица 4.16

V	S _{нп}					
	ЧС4		ВЛ8		Вагон	
	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м
5,6	2169	2007	3138	2903	1834	1697
13,9	5478	5068	7797	7214	4566	4225
27,8	11623	10762	15639	14484	9219	8539
38,9	17402					

Среднее квадратическое отклонение нагрузки, Н, от сил инерции, вызванных изолированной неровностью на колесе:

$$S_{\text{инк}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot y_{\text{max}} \frac{U}{k} e_n \alpha_n; \quad (4.48)$$

ЧС4

$$S_{\text{инк}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{100}{1,338} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 10405 \text{ Н};$$

ВЛ8

$$S_{\text{инк}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{100}{1,338} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 10405 \text{ Н};$$

вагон

$$S_{\text{инк}} = 0,5 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{100}{1,338} \cdot 0,068 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 15054 \text{ Н}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.17.

Таблица 4.17

V	S _{инк}					
	ЧС4		ВЛ8		Вагон	
	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м
5,6	10405	10777	10405	10777	15054	15592
13,9	10405	10777	10405	10777	15054	15592
27,8	10405	10777	10405	10777	15054	15592
38,9	10405					

Среднее квадратическое отклонение нагрузки, Н, от сил инерции необрессоренной массы при движении колеса с непрерывной неровностью катания

$$S_{\text{ннк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot v^2 \cdot \alpha_0 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{k \cdot U - 326k^2 \cdot q_k \cdot 10^{-6}}}; \quad (4.49)$$

ЧС4

$$S_{\text{ннк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 27,8^2 \cdot 0,403 \sqrt{18500}}{1,25^2 \sqrt{1,338 \cdot 100 - 326 \cdot 1,338^2 \cdot 18500 \cdot 10^{-6}}} = 1647 \text{ Н};$$

ВЛ8

$$S_{\text{ннк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 27,8^2 \cdot 0,403 \sqrt{31700}}{1,20^2 \sqrt{1,338 \cdot 100 - 326 \cdot 1,338^2 \cdot 31700 \cdot 10^{-6}}} = 2417 \text{ Н};$$

вагон

$$S_{\text{ннк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 27,8^2 \cdot 0,403 \sqrt{9950}}{0,95^2 \sqrt{1,338 \cdot 100 - 326 \cdot 1,338^2 \cdot 9950 \cdot 10^{-6}}} = 2051 \text{ Н}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.18.

Таблица 4.18

V	S _{ннк} , Н					
	ЧС4		ВЛ8		Вагон	
	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м
5,6	67	68	98	100	83	85
13,9	412	419	604	613	513	521
27,8	1647	1647	2417	2453	2051	2085
38,9	3226					

Среднее квадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки от колеса на рельс в прямом участке пути

ЧС4

$$S = \sqrt{1799^2 + 11623^2 + 0,05 \cdot 10405^2 + 0,95 \cdot 1647^2} = 12096 \text{ Н};$$

ВЛ8

$$S = \sqrt{1095^2 + 15639^2 + 0,05 \cdot 10405^2 + 0,95 \cdot 2417^2} = 16023 \text{ Н};$$

вагон

$$S = \sqrt{1792^2 + 9219^2 + 0,05 \cdot 15054^2 + 0,95 \cdot 2051^2} = 10175 \text{ Н}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4.19.

Таблица 4.19

V	S, Н					
	ЧС4		ВЛ8		Вагон	
	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м
5,6	3288	3245	4041	3913	4158	4199
13,9	6055	5722	8225	7700	5929	5743
27,8	12096	11292	16023	14917	10175	9614
38,9	18040					

Расчетная нагрузка, Н, колеса на рельс определяется по формуле

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ср}} + 2,5S; \quad (4.50)$$

$$\text{ЧС4} \quad P_{\text{расч}} = 121867 + 2,5 \cdot 12096 = 152107 \text{ Н};$$

$$\text{ВЛ8} \quad P_{\text{расч}} = 125266 + 2,5 \cdot 16023 = 165324 \text{ Н};$$

$$\text{вагон} \quad P_{\text{расч}} = 132800 + 2,5 \cdot 10175 = 158238 \text{ Н}.$$

Все расчетные величины $P_{\text{расч}}$ для трех типов подвижного состава, движущегося в прямом и кривом участке пути, сведены в табл. 4.20.

Таблица 4.20

V	P _{расч}					
	ЧС4		ВЛ8		Вагон	
	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м	прямая	R = 500 м
5,6	121026	120918	134776	134455	140470	140572
13,9	129919	129087	145373	144062	145286	144821
27,8	152107	150099	165324	162596	157823	155891
38,9	175400					

Из табл. 4.20 следует, что при номинальной нагрузке $P_{ст} = 115$ кН и $V = 27,8$ м/с в прямых участках пути большую нагрузку на рельс оказывают колеса электровоза ВЛ8, чем колеса электровоза ЧС4 и четырехосного вагона ЦНИИ-ХЗ-0 (на 13,3 кН и 8,1 кН соответственно). При скорости движения $V = 38,9$ м/с нагрузка на рельс от колес локомотива ЧС4 увеличивается до 175,4 кН.

Для определения влияния соседних колес тележки ($\Sigma P_{ср} \mu_{кр}$ и $\Sigma P_{ср} \eta_{кр}$) на величину соответственно изгибающего момента M и нагрузки на шпалу Q выбираем расчетную ось, руководствуясь схемами на рис. 4.2.

Наибольший изгибающий момент M_{max} возникает под одним из колес. Если выполняется условие $x = \pi/4k < l_{min}$, где l_{min} — минимальное расстояние между осями колесных пар, то за расчетную ось принимается первая ось тележки.

Для локомотива ЧС4 получим, что $x = 3,1416.../4 \cdot 1,338 = 0,587$ м $< 2,30$ м.

Исходя из этого расчета, за расчетную ось принимаем первую ось тележки. Оси 2 и 3 находятся в отрицательной зоне линии влияния для $\mu_{кр}$.

При определении наибольшего прогиба рельса y и нагрузки на шпалу Q за расчетную ось в трехосной тележке принимается первая ось, если выполняется условие $x = 3\pi/4k < l_{min}$. Тогда $x = 3 \cdot 3,1416.../4 \cdot 1,338 = 1,761$ м $< 2,30$ м.

За расчетную принимаем первую ось, 2 и 3-я оси располагаются в отрицательной зоне линии влияния $\eta_{кр}$.

Определим $\Sigma P_{ср} \mu_{кр}$ и $\Sigma P_{ср} \eta_{кр}$ для трехосной тележки электровоза ЧС4, имеющего расстояние между осями $l_1 = l_2 = 2,3$ м:

1) в прямом участке пути для 2-й оси тележки $kx = 1,338 \cdot 2,3 = 3,08$ и ординаты линий влияния $\mu_2 = -0,0490$ и $\eta_2 = -0,0430$; для 3-й оси ординаты линии влияния настолько малы, что они не оказывают существенного влияния.

Для скорости движения электровоза 27,8 м/с:

$$\Sigma P_{ср} (\mu_2 + \mu_3) = 121867 \cdot (-0,0490 + 0) = -5971 \text{ Н};$$

$$\Sigma P_{ср} (\eta_2 + \eta_3) = 121867 \cdot (-0,0430 + 0) = -5240 \text{ Н};$$

2) в кривом участке расчеты аналогичные.

Эквивалентные грузы при воздействии на путь электровоза ЧС4 имеют следующие значения в прямом участке пути ($V = 27,8$ м/с):

$$P_{эkv}^1 = P_{расч} + \Sigma P_{ср} \mu_{кр} = 152107 - 5971 = 146158 \text{ Н};$$

$$P_{эkv}^2 = P_{расч} + \Sigma P_{ср} \eta_{кр} = 152107 - 5240 = 146889 \text{ Н}.$$

Расчетные величины $P_{эkv}^1$ и $P_{эkv}^2$ представлены в табл. 4.21.

Таблица 4.21

Подвижной состав	V, м/с	P ^{1 экв} , Н	σ _{кр} , МПа		P ^{2 экв} , Н	σ _{пр} , МПа		σ _б , МПа	
			прямая	кривая R=500 м		прямая	кривая R=500 м	прямая	кривая R=500 м
ЧС4	5,6	115499	62,1	95,4	116175	0,825	0,796	0,144	0,139
		117195			116123				
	13,9	124295	66,8	102,0	124983	0,888	0,852	0,155	0,148
		125299			124208				
	27,8	146158	78,6	118,9	146889	1,043	0,994	0,182	0,173
		146077			144919				
38,9	165938	89,2		169797	1,206		0,210		
ВЛ8	5,6	135624	75,4	110,4	132482	0,941	0,912	0,164	0,159
		135539			132934				
	13,9	146221	81,2	118,2	143076	1,016	0,978	0,177	0,170
		145148			142539				
27,8	166253	92,4	133,3	163096	1,159	1,105	0,202	0,192	
	163686			161068					
Вагон	5,6	125095	66,1	104,1	138636	0,985	0,940	0,171	0,164
		127785			136994				
	13,9	129865	68,7	107,5	143446	1,019	0,969	0,177	0,169
		131996			141233				
27,8	141733	74,9	116,4	155459	1,104	1,044	0,192	0,182	
	142929			152265					

Примечание. В числителе — данные для прямого участка пути, в знаменателе — для кривой R = 500 м.

Определим напряжения в рельсах, резиновых прокладках и в балласте от воздействия электровоза ЧС4 при скорости движения $V=27,8$ м/с:

$$\sigma_k = \frac{f \cdot 10^{-6}}{4kW_n} P_{\text{экв}}^1 = \frac{1,20 \cdot 10^{-6} \cdot 146158}{4 \cdot 1,338 \cdot 417 \cdot 10^{-6}} = 78,6 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{ш}} = \frac{kl \cdot 10^{-6}}{2\omega} P_{\text{экв}}^2 = \frac{1,338 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} \cdot 146889}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,04 \text{ МПа},$$

$$\sigma_6 = \frac{kl \cdot 10^{-6}}{2\Omega_\alpha} P_{\text{экв}}^2 = \frac{1,338 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} \cdot 146889}{2 \cdot 2975 \cdot 10^{-4}} = 0,182 \text{ МПа}.$$

Результаты определения σ_i для всех расчетных скоростей движения и типов подвижного состава сведены в табл. 4.21.

Зависимости роста напряжений от повышения скорости движения локомотива ЧС4 показаны на рис. 4.5.

Анализ результатов расчета

- При повышении скорости с 5,6 до 38,9 м/с в прямой и до 27,8 м/с в кривой напряжения в рельсах возросли на 44 % в прямой и 25 % в кривой, в напшальных прокладках и в балласте соответственно 46 % и 25 %.

- Наибольшие кромочные напряжения в рельсах достигают 133,3 МПа в кривой под локомотивом ВЛ8 при скорости 27,8 м/с, что значительно меньше допускаемой величины 228 МПа при грузонапряженности 40 млн т·км брутто на 1 км в год.

- Наибольшие напряжения в напшальных прокладках и балласте возникают также под локомотивом ВЛ8 при скорости 27,8 м/с, но в отличие от рельсов в прямом участке. Величины этих напряжений достигают соответственно 1,159 и 0,202 МПа, что также меньше допускаемых величин 1,6 и 0,42 МПа.

- При сопоставимых скоростях наибольшие напряжения во всех элементах пути возникают под грузовым локомотивом ВЛ8.

- Результаты расчетов показали, что рассмотренная конструкция пути может эксплуатироваться при заданных скоростях и осевых нагрузках.

Определим напряжения на основной площадке от расчетной шпалы (шпалы1) от воздействия электровоза ЧС4 при $V=27,8$ м/с в прямой

$$\sigma'_h = r_1 [0,635mC_1 + 1,275(2-m)C_2] \sigma_6. \quad (4.51)$$

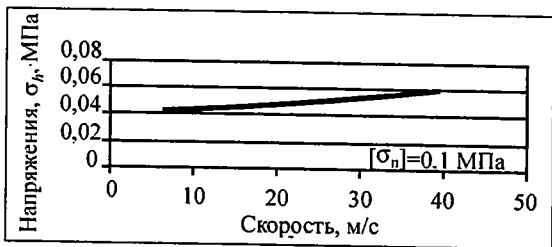
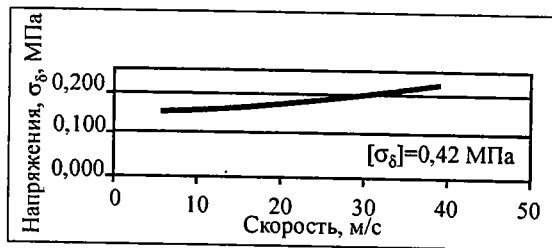
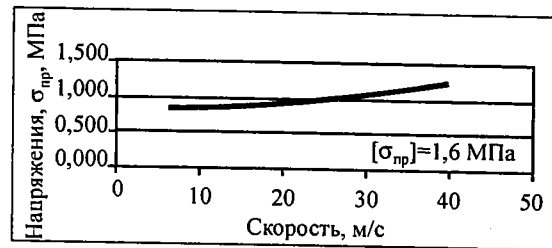
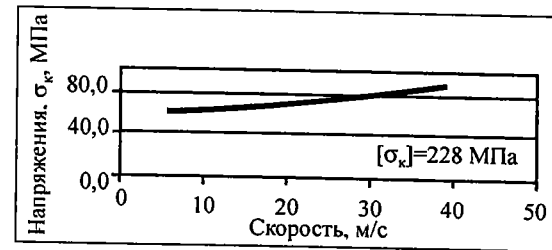


Рис. 4.5. Зависимости роста напряжений от повышения скорости движения локомотива ЧС4:

σ_k — напряжения в кромках подошвы рельса; $\sigma_{\text{ш}}$ — напряжения в шпальных прокладках; σ_6 — напряжения в балласте под шпалой; σ_h — напряжения в основной площадке земляного полотна

Тогда

$$m = \frac{0,89}{\sigma_6 + 0,435} = \frac{0,89}{0,182 + 0,435} = 1,44,$$

$$\sigma'_h = 0,7[0,635 \cdot 1,44 \cdot 0,227 + 1,275(2 - 1,44) \cdot 0,110] \cdot 0,182 = 0,036 \text{ МПа.}$$

Напряжения на основной площадке от соседней справа шпалы (шпалы 2) определяются по расчетной схеме рис. 4.6 и формулам

$$\sigma''_{hc} = -\frac{r}{\pi} A_h \sigma''_{6c}; \quad (4.52)$$

$$\sigma'_{6c} = \frac{Q_c}{\Omega_\alpha}; \quad (4.53)$$

$$Q_c'' = \frac{kl}{2} \left[P_{\text{расч}} \eta''_{\text{расч}} + \sum P_{\text{ср}} (\eta''_{c-2} + \eta''_{c-3}) \right], \quad (4.54)$$

где $\eta''_{\text{расч}} = 0,6740$, принимаем по $kl = 1,338 \cdot 0,55 = 0,74$; $\eta''_{c-2} = -0,0311$ принимаем по $k(l + l_1) = 1,338(-0,55 + 2,3) = 3,81$; $\eta''_{c-3} = 0$ принимаем по $k(l + l_1 + l_2) = 1,338(-0,55 + 2,3 + 2,3) = 6,89$.

Отсюда

$$Q_c'' = \frac{1,338 \times 0,55}{2} [152129 \times 0,6740 + 121868 \times (-0,0311 + 0)] = 37548 \text{ Н,}$$

$$\sigma''_{6c} = \frac{37548}{2975 \cdot 10^{-4}} = 126212 \text{ Па} = 0,126 \text{ МПа,}$$

$$\sigma''_{hc} = \frac{0,7}{3,1416} \cdot 0,274 \cdot 126212 = 7705 \text{ Па} = 0,008 \text{ МПа.}$$

Аналогично определяем напряжения на основной площадке от соседней шпалы слева (шпалы 3):

$$\sigma'_{hc} = -\frac{r}{\pi} A_h \sigma''_{6c};$$

$$\sigma'_{6c} = \frac{Q_c'}{\Omega_\alpha}, \quad (4.55)$$

$$Q_c' = \frac{kl}{2} \left[P_{\text{расч}} \eta'_{\text{расч}} + \sum P_{\text{ср}} (\eta'_{c-2} + \eta'_{c-3}) \right], \quad (4.56)$$

где $\eta'_{\text{расч}} = 0,6740$ при $kl = 0,74$; $\eta'_{c-2} = -0,015$ при $k(l_1 - l) = 1,338(2,3 - 0,55) = 2,48$; $\eta'_{c-3} = 0$ при $k(l_1 + l_2 - l) = 1,338(2,3 + 2,3 - 0,55) = 5,55$.

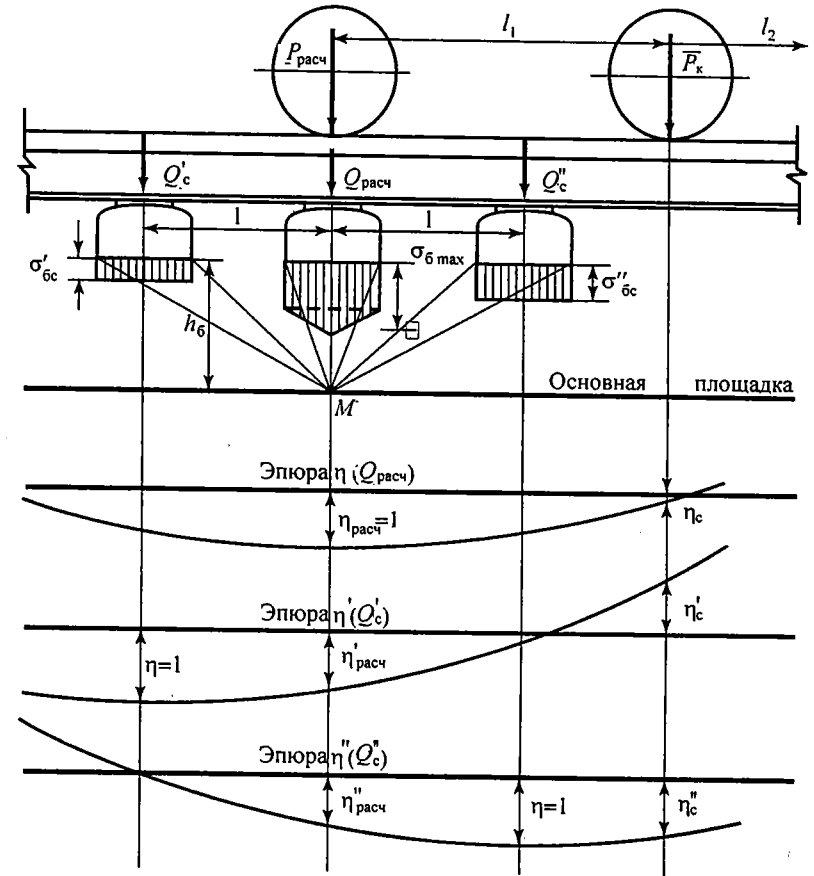


Рис. 4.6. Расчетная схема определения напряжений на основной площадке земляного полотна:

$Q_{\text{расч}}$ и Q_c — давления на расчетную и соседние шпалы; $\sigma_{6 \text{ макс}}$, σ'_{6c} и σ''_{6c} — ординаты эпюр максимальных и средних напряжений в балласте под шпалами; l — расстояние между шпалами; l_1 и l_2 — расстояния между осями 2 и 3-осной тележек; $\eta_{\text{расч}}$ и η_c — ординаты линий влияния под расчетной и соседней шпалами

Отсюда:

$$Q_c' = 36336 \text{ Н;}$$

$$\sigma'_{6c} = 122148 \text{ Па} = 0,122 \text{ МПа;}$$

$$\sigma'_{hc} = 5580 \text{ Па} = 0,005 \text{ МПа};$$

$$\sigma_h = 0,036 + 0,008 + 0,005 = 0,049 \text{ МПа}.$$

Полные результаты расчета σ'_h , σ'_{hc} и σ''_{hc} для рельсов типа Р65 и прямого участка пути представлены в табл. 4.22 и 4.23 (рис. 4.5). Расчет для кривой $R = 500$ м не проводился.

Анализ результатов расчета.

- Напряжения на основной площадке земляного полотна при повышении скорости локомотива ЧС4 с 5,6 до 38,9 м/с увеличиваются на 19 %, а при повышении скорости с 5,6 до 27,8 м/с от локомотива — на 11 % и от вагона — на 6 %.

- Наибольшие напряжения на основной площадке земляного полотна достигают 0,06 МПа, что меньше допускаемой величины 0,10 МПа.

Пример 4.2. Цель расчета. Определить возможность эксплуатации пути до капитального ремонта в заданных эксплуатационных условиях без ограничения скоростей.

Исходные данные.

Эксплуатационные условия:

грузонапряженность 25 млн ткм/км год брутто;

подвижной состав: электровоз ВЛ60^а и 4-осный грузовой вагон с тележками ЦНИИ-ХЗ-0 и осевыми нагрузками до 230 кН;

скорость грузового поезда — до 50 км/ч.

Характеристика пути:

прямой участок и кривая с радиусом $R = 400$ м.

Конструкция пути:

рельсы Р50 нетермообработанные с приведенным износом 6 мм, шпалы железобетонные ШС-1 с прокладками повышенной упругости, эпюра шпал в прямой 1840 шт./км и в кривой 2000 шт./км, скрепления КБ, балласт двухслойный (щебень 35 см и песчаная подушка 20 см).

Расчетные характеристики пути и подвижного состава. Основные расчетные характеристики пути и подвижного состава, необходимые для расчета нагрузок на путь и полученные из табл. 4.1 и 4.2, сгруппированы в табл. 4.24 и 4.25.

Таблица 4.22

Расстояние от шпалы до оси колесной пары x_p , м	K_x			η		v , м/с	$\Sigma P_{флкс}$, Н	$P_{расч}$, Н	$P_{расч} P_{расч} + \Sigma P_{флкс}$, Н	σ_{flp} , МПа
	Расчетная ось	Ось 2	Ось 3	$K'_{расч}$	K'_{c-2}					
Расчетная ось	0	0,55	0,74	0	-0,043	0	-4851	121025,99	116175	0,029
	Ось 2	2,85	3,81	0,674	-0,004	0	-4936	129919,04	124983	0,031
	Ось 3	4,6	6,15	1	1	0	-5240	152129	146889	0,036
Номер шпалы	0,55	2,85	0,74	0,674	-0,004	0	-5603	175400	169797	0,042
	2	2,85	3,81	0,674	-0,004	0	-406	81572	81165	0,006
	3	4,6	6,15	1	1	0	-413	87565	87152	0,007
Расчетная нагрузка ЧС4	0,55	2,85	0,74	0,674	-0,004	0	-439	102535	102097	0,008
	2	2,85	3,81	0,674	-0,004	0	-469	118220	117751	0,009
	3	4,6	6,15	1	1	0	-1647	81572	79925	0,006
Расчетная ось	0,55	1,85	0,74	0,674	-0,015	0	-1676	87565	85890	0,006
	2	1,85	2,48	0,674	-0,015	0	-1779	102535	100756	0,008
	3	4,15	5,55	0,674	-0,015	0	-1902	118220	116317	0,009

Продолжение таблицы 4.22

Расчетная нагрузка	Номер шпалы	Расстояние от шпалы до оси колесной пары x_i , м			k_x			ψ_i			v_i , м/с	$\Sigma P_{\text{сп}}^{\text{Квс}} \text{ Н}$	$P_{\text{расч}}^{\text{Прасч}} \text{ Н}$	$P_{\text{расч}}^{\text{Прасч}} + \Sigma P_{\text{сп}}^{\text{Квс}} \text{ Н}$	$\sigma_{\text{нб}} \text{ МПа}$
		Расчетная ось	Ось 2	Ось 3	Расчетная ось	Ось 2	Ось 3	$k'_{\text{расч}}$	$k'_{\text{с-2}}$	$k'_{\text{с-3}}$					
ВЛ8	1	0	3,2		0	4,28		1	-0,018		5,6	-2294	134776	132482	0,033
	2	0,55	3,75		0,74	5,02		0,674	-0,004		13,9	-2297	145373	143076	0,035
	3	0,55	2,65		0,74	3,55		0,674	-0,038		27,8	-2306	165401	163096	0,040
											5,6	-549	90839	90291	0,007
											13,9	-549	97981	97432	0,007
											27,8	-551	111481	110929	0,008
											5,6	-4713	90839	86127	0,007
											13,9	-4718	97981	93263	0,007
											27,8	-4736	111481	106744	0,008

Окончание таблицы 4.22

Расчетная нагрузка	Номер шпалы	Расстояние от шпалы до оси колесной пары x_i , м			k_x			ψ_i			v_i , м/с	$\Sigma P_{\text{сп}}^{\text{Квс}} \text{ Н}$	$P_{\text{расч}}^{\text{Прасч}} \text{ Н}$	$P_{\text{расч}}^{\text{Прасч}} + \Sigma P_{\text{сп}}^{\text{Квс}} \text{ Н}$	$\sigma_{\text{нб}} \text{ МПа}$
		Расчетная ось	Ось 2	Ось 3	Расчетная ось	Ось 2	Ось 3	$k'_{\text{расч}}$	$k'_{\text{с-2}}$	$k'_{\text{с-3}}$					
Вагон	1	0	1,85		0	2,48		1	-0,015		5,6	-1899	140470	138571	0,034
	2	0,55	2,4		0,74	3,21		0,674	-0,144		13,9	-1905	145286	143381	0,036
	3	0,55	1,3		0,74	1,74		0,674	-0,144		27,8	-1925	157318	155393	0,038
											5,6	-5593	94677	89083	0,007
											13,9	-5610	97922	92313	0,007
											27,8	-5670	106032	100363	0,008
											5,6	18666	94677	113342	0,009
											13,9	18722	97922	116644	0,009
											27,8	18921	106032	124954	0,009

Таблица 4.23

Подвижная нагрузка	Скорость V , м/с	Напряжения $\sigma_{\text{н}}$, МПа	Подвижная нагрузка	Скорость V , м/с	Напряжения $\sigma_{\text{н}}$, МПа	Подвижная нагрузка	Скорость V , м/с	Напряжения $\sigma_{\text{н}}$, МПа
ЧС4	5,6	0,041	ВЛ8	5,6	0,046	Вагон	5,6	0,050
	13,9	0,044		13,9	0,050		13,9	0,051
	27,8	0,049		27,8	0,057		27,8	0,056
	38,9	0,060						

Таблица 4.24

Расчетные характеристики пути

Конструкция пути	P50(6), ЖБ, Щ			
	Зима		Лето	
План линии	Кривая	Прямая	Кривая	Прямая
U , МПа	185	170	110	100
K , M^{-1}	1,867	1,827	1,638	1,600
$J_s \cdot 10^{-8}$, M^{-4}	1813	1813	1813	1813
W_p	273	273	273	273
W_r	227	227	227	227
α_0	0,433	0,433	0,433	0,433
α_1	0,931	0,931	0,931	0,931
ϵ	0,322	0,322	0,322	0,322
β	1	1	1	1
γ	1	1	1	1
$\omega \cdot 10^{-4}$, M^{-2}	518	518	518	518
$\Omega_{св}$, м	0,3092	0,3092	0,3092	0,3092
b	27,6	27,6	27,6	27,6
C_1	0,241	0,241	0,241	0,241
C_2	0,116	0,116	0,116	0,116
A_h	0,295	0,295	0,295	0,295

Таблица 4.25

Расчетные характеристики подвижного состава

Подвижная единица	$P_{ст}$, кН	V_k , м/с	q_k , кН	$J_{рп}$, МН/м	$f_{ст}$, м	d , м	l_b , м	$l_0 \cdot 10^2$, м	f	
									в прямой	в кривой
Электровоз ВЛ60 ^п	115*	27,7	30,8	1,16	0,60	1,25	2,30— 2,30	0,047	1,15	1,71
4-осный грузовой вагон на тележках ЦНИИ-ХЗ-0	115	13,88	9,95	2,00	0,48	0,95	1,85	0,068	1,18	—

*В кривой $R = 400$ м скорость электровоза ограничивается до 92 км/ч или 25,5 м/с.

Последовательность расчета:

➤ определение динамической нагрузки P_p^{\max} от колес локомотива на рельс в прямой и кривой летом и зимой, а от вагона — летом в прямой.

Коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса

$$K = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (4.57)$$

где E — модуль упругости рельсовой стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа);

I — момент инерции поперечного сечения рельса в вертикальном направлении, m^4 .

Коэффициент относительной жесткости летом в прямой — $1,600 m^{-1}$ и кривой — $1,638 m^{-1}$, а модуль упругости основания летом — 100 и 110 МПа (табл. 1), а зимой 170 и 185 МПа [11].

Подсчитаем коэффициент K для зимы

$$K = \sqrt[4]{\frac{170}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1813 \cdot 10^{-8}}} = 1,827;$$

$$K = \sqrt[4]{\frac{185}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1813 \cdot 10^{-8}}} = 1,867;$$

➤ определение динамической нагрузки P_p^{\max} от колес подвижного состава на рельс в прямой и кривой летом и зимой.

Расчет начнем с определения средней динамической нагрузки на рельс.

Находим максимальный дополнительный прогиб комплекта рессор в прямом и кривом участке по формулам:

электровоз ВЛ60^п

$$z_{\max} = a + bV^2 = 9,9 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot V^2;$$

в прямой

$$z_{\max} = 9,9 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 27,7^2 = 15,654 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

в кривой

$$z_{\max} = 9,9 + 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 25,5^2 = 14,770 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

4-осный вагон ЦНИИ-ХЗ-0

$$z_{\max} = a + bV^2 = 10,0 + 16,0 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 = 10,0 + 16,0 \cdot 10^{-3} \cdot 13,88^2 = 13,082 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Максимальные значения сил инерции P_p^{\max} определяются через экспериментальное значение коэффициента динамики (табл. 4.6) по формулам: электровоз ВЛ60^п

$$P_p^{\max} = k_d (P_{ст} - q) \quad (4.58)$$

в прямой

$$P_p^{\max} = 0,29 \cdot (115 - 30,8) = 24420 \text{ Н};$$

в кривой

$$P_p^{\max} = 0,26 \cdot (115 - 30,8) = 21892 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$P_p^{\max} = Z_{\max} = 2,0 \cdot 10^6 \cdot 13,082 = 26164, \text{ Н.}$$

Средняя вертикальная нагрузка от колеса на рельс:

$$\bar{P}_p = P_{\text{ст}} + P_p^{\text{ср}}; \quad (4.59)$$

$$\bar{P}_p^{\text{ср}} = 0,75 \cdot P_p^{\max}; \quad (4.60)$$

электровоз ВЛ60^а

в прямой

$$\bar{P}_p^{\text{ср}} = 115000 + 0,75 \cdot 24420 = 133315 \text{ Н;}$$

в кривой

$$\bar{P}_p^{\text{ср}} = 115000 + 0,75 \cdot 21892 = 131419 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$\bar{P}_p^{\text{ср}} = 115000 + 0,75 \cdot 26164 = 134623 \text{ Н.}$$

Определим среднее квадратическое отклонение составляющих динамической нагрузки колеса на рельс $P_{\text{дин}}$ в прямом и кривом участках пути от электровоза ВЛ60^а и 4-осного вагона.

Расчетная сила складывается из постоянной величины статической нагрузки на колесо и переменных дополнительных сил инерции от колебаний экипажа:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{ст}} + P_p + P_{\text{нп}} + P_{\text{инк}} + P_{\text{ннк}},$$

где $P_{\text{ст}}$, P_p , $P_{\text{нп}}$, $P_{\text{инк}}$, $P_{\text{ннк}}$ — составляющие соответственно от веса экипажа, колебаний кузова на рессорах, сил инерции необрессоренных масс при изолированных неровностях на пути и колесах, а также непрерывных неровностях на колесах.

Электровоз ВЛ60^а ($V = 27,7$ м/с в прямой и $V = 25,5$ м/с в кривой).

Летом в прямой. Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс от вертикальных колебаний наддрессорного строения

$$S_p = 0,08 \cdot P_p;$$

$$S_p = 0,08 \cdot 24420 = 1954 \text{ Н.}$$

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс $S_{\text{нп}}$ от сил инерции необрессоренных масс $P_{\text{нп max}}$, возникающих при проходе изолированной неровности пути:

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_1 \cdot \varepsilon \cdot \beta \cdot \gamma \cdot l_{\text{ш}} \cdot \bar{P} \cdot \sqrt{\frac{U}{k}} \cdot \sqrt{q_k} \cdot V; \quad (4.61)$$

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,55 \cdot 133315 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,600}} \times \\ \times \sqrt{30800 \cdot 27,7} = 13584 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,50 \cdot 131419 \cdot \sqrt{\frac{110}{1,638}} \times \\ \times \sqrt{30800 \cdot 25,5} = 11485 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$S_p = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,55 \cdot 133315 \cdot \sqrt{\frac{170}{1,827}} \cdot \sqrt{30800 \cdot 27,7} = \\ = 15518 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,50 \cdot 131419 \cdot \sqrt{\frac{185}{1,867}} \times \\ \times \sqrt{30800 \cdot 25,5} = 13074 \text{ Н;}$$

4-осный вагон ($V = 13,88$ м/с)

$$S_p \cdot 0,08 \cdot P_p = 0,08 \cdot 26164 = 2093 \text{ Н;}$$

$$S_{\text{нп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} \cdot 0,931 \cdot 0,322 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,85 \cdot 134623 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,600}} \times \\ \times \sqrt{9950 \cdot 13,88} = 13641 \text{ Н.}$$

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс $S_{\text{инк}}$ от силы инерции необрессоренной массы $P_{\text{инк max}}$, возникающей из-за наличия изолированной неровности на колесе

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot y_{\text{max}} \cdot \frac{U}{k} \cdot \alpha_0 \cdot e_0, \quad (4.62)$$

где α_0 — коэффициент учета взаимодействия массы пути и необрессоренной массы экипажа (деревянные шпалы — 0,433, железобетонные — 0,403);

e_0 — расчетная глубина изолированной неровности принимается 2/3 от наибольшей глубины ползуна на колесах по ПТЭ (для локомотивов с подшипниками скольжения $e_0 = 0,067 \cdot 10^{-2}$ м и качения — $e_0 = 0,047 \cdot 10^{-2}$ м, а вагонов соответственно $e_0 = 0,133 \cdot 10^{-2}$ м и $e_0 = 0,067 \cdot 10^{-2}$ м).

y_{\max} — максимальный дополнительный прогиб рельса, отнесенный к единице глубины неровности (безразмерная величина).

Электровоз ВЛ60^п

летом в прямой

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{1,600} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 4350 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{110 \cdot 10^6}{1,638} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 4674 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{170 \cdot 10^6}{1,827} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 6477 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{185 \cdot 10^6}{1,867} \cdot 0,047 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 6897 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$S_{\text{инк}} = 0,25 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot \frac{100 \cdot 10^6}{1,600} \cdot 0,067 \cdot 10^{-2} \cdot 0,403 = 6202 \text{ Н.}$$

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс $S_{\text{инк}}$ от сил инерции необрессоренной массы при движении колеса с непрерывной неровностью на колесе

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot UV^2 \alpha_0 \sqrt{g_k}}{d^2 \cdot \sqrt{kU - 326k^2 \cdot g_k \cdot 10^{-6}}}, \quad (4.63)$$

электровоз ВЛ60

летом в прямой

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 0,403 \cdot 100 \cdot 27,7^2 \cdot \sqrt{30800}}{1,25^2 \cdot \sqrt{1,600 \cdot 100 - 326 \cdot 1,600^2 \cdot 30800 \cdot 10^{-6}}} = 212,6 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 0,403 \cdot 110 \cdot 25,5^2 \cdot \sqrt{30800}}{1,25^2 \cdot \sqrt{1,638 \cdot 110 - 326 \cdot 1,638^2 \cdot 30800 \cdot 10^{-6}}} = 176,6 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 0,403 \cdot 170 \cdot 27,7^2 \cdot \sqrt{30800}}{1,25^2 \cdot \sqrt{1,827 \cdot 170 - 326 \cdot 1,827^2 \cdot 30800 \cdot 10^{-6}}} = 191,0 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 0,403 \cdot 185 \cdot 25,5^2 \cdot \sqrt{30800}}{1,25^2 \cdot \sqrt{1,867 \cdot 185 - 326 \cdot 1,867^2 \cdot 30800 \cdot 10^{-6}}} = 159,2 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$S_{\text{инк}} = \frac{6,739 \cdot 10^{-3} \cdot 0,403 \cdot 100 \cdot 13,88^2 \cdot \sqrt{9950}}{0,95^2 \cdot \sqrt{1,600 \cdot 100 - 326 \cdot 1,600^2 \cdot 9950 \cdot 10^{-6}}} = 49,3 \text{ Н.}$$

Среднее квадратическое отклонение динамической нагрузки колеса на рельс:

электровоз ВЛ60^п

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{\text{нп}}^2 + 0,05 \cdot S_{\text{инк}}^2 + 0,95 \cdot S_{\text{инк}}^2}, \quad (4.64)$$

летом в прямой

$$S = \sqrt{1954^2 + 13584^2 + 0,05 \cdot 4350^2 + 0,95 \cdot 212,6^2} = 13760 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$S = \sqrt{1751^2 + 11485^2 + 0,05 \cdot 4674^2 + 0,95 \cdot 176,6^2} = 11665 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$S = \sqrt{1954^2 + 15508^2 + 0,05 \cdot 6477^2 + 0,95 \cdot 191,0^2} = 15699 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$S = \sqrt{1751^2 + 13074^2 + 0,05 \cdot 6897^2 + 0,95 \cdot 159,2^2} = 13281 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$S = \sqrt{2093^2 + 13641^2 + 0,05 \cdot 6202^2 + 0,95 \cdot 49,3^2} = 13870 \text{ Н;}$$

расчетная нагрузка колеса на рельс:

$$P_{\text{расч}} = \bar{P} + 2,5 \cdot S; \quad (4.65)$$

электровоз ВЛ60^а

летом в прямой

$$P_{\text{расч}} = 133315 + 2,5 \cdot 13760 = 167715 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$P_{\text{расч}} = 131419 + 2,5 \cdot 11665 = 160581 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$P_{\text{расч}} = 133315 + 2,5 \cdot 15699 = 172562 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$P_{\text{расч}} = 131419 + 2,5 \cdot 13281 = 164621 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

$$P_{\text{расч}} = 134623 + 2,5 \cdot 13870 = 169298 \text{ Н;}$$

эквивалентные нагрузки при воздействии на путь электровоза ВЛ60 и четырехосного вагона:

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = P_{\text{расч}} + \sum P_{\mu_{\text{кх}}}, \quad (4.66)$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = P_{\text{расч}} + \sum P_{\eta_{\text{кх}}}, \quad (4.67)$$

электровоз ВЛ60^а

летом в прямой

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = 167715 - 1173 = 166542 \text{ Н;}$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = 167715 - 4613 = 163102 \text{ Н;}$$

летом в кривой

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = 160581 - 670 = 159911 \text{ Н;}$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = 160581 - 4232 = 156349 \text{ Н;}$$

зимой в прямой

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = 172562 - 1026 = 171536 \text{ Н;}$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = 172562 - 2133 = 170429 \text{ Н;}$$

зимой в кривой

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = 164621 - 1051 = 163570 \text{ Н;}$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = 164621 - 1761 = 162860 \text{ Н;}$$

4-осный вагон

летом в прямой

$$P_{\text{ЭКВ}}^1 = 169298 - 8118 = 161180 \text{ Н;}$$

$$P_{\text{ЭКВ}}^2 = 169298 - 5614 = 163684 \text{ Н;}$$

➤ определение напряжений в рельсах, в напальной прокладке под подкладкой и в балласте:

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{пр}} = \frac{kl_{\text{ш}} \cdot 10^{-6}}{2\omega} P_{\text{ЭКВ}}'' \leq [\sigma_{\text{ш}}, \sigma_{\text{пр}}], \quad (4.68)$$

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{kl_{\text{ш}} \cdot 10^{-6}}{2\Omega_{\alpha}} P_{\text{ЭКВ}}'' \leq [\sigma_{\text{б}}]; \quad (4.69)$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{f \cdot 10^{-6}}{4kW_{\text{п}}} \cdot P'_{\text{ЭКВ}}; \quad (4.70)$$

электровоз ВЛ60^а

летом в прямой

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{пр}} = \frac{1,600 \cdot 0,55 \cdot 163102 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,38 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{1,600 \cdot 0,55 \cdot 163102 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2975 \cdot 10^{-4}} = 0,23 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 166542}{4 \cdot 1,600 \cdot 273 \cdot 10^{-6}} = 107,79 \text{ МПа;}$$

летом в кривой

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{пр}} = \frac{1,638 \cdot 0,50 \cdot 156349 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,24 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{1,600 \cdot 0,50 \cdot 156349 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2975 \cdot 10^{-4}} = 0,21 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{1,62 \cdot 10^{-6} \cdot 159911}{4 \cdot 1,638 \cdot 273 \cdot 10^{-6}} = 144,83 \text{ МПа;}$$

зимой в прямой

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{пр}} = \frac{1,827 \cdot 0,55 \cdot 170429 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,65 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 171536}{4 \cdot 1,827 \cdot 273 \cdot 10^{-6}} = 97,16 \text{ МПа;}$$

зимой в кривой

$$\sigma_{\text{ш}} = \sigma_{\text{пр}} = \frac{1,867 \cdot 0,50 \cdot 162860 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,47 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_k = \frac{1,62 \cdot 10^{-6} \cdot 163570}{4 \cdot 1,867 \cdot 273 \cdot 10^{-6}} = 129,97 \text{ МПа};$$

4-осный вагон летом в прямой

$$\sigma_{ш} = \sigma_{пр} = \frac{1,600 \cdot 0,55 \cdot 163684 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 518 \cdot 10^{-4}} = 1,39 \text{ МПа};$$

$$\sigma_6 = \frac{1600 \cdot 0,55 \cdot 163684 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2975 \cdot 10^{-4}} = 0,24 \text{ МПа};$$

$$\sigma_k = \frac{1,18 \cdot 10^{-6} \cdot 161180}{4 \cdot 1,600 \cdot 273 \cdot 10^{-6}} = 108,85 \text{ МПа}.$$

Результаты расчетов сводятся в табл. 4.26.

Таблица 4.26

Результаты расчета напряжений в элементах верхнего строения пути

Подвижная единица	Электровоз ВЛ60 ^п				4-осный вагон	
	Лето		Зима			
Температурные условия	Лето		Зима		Лето	
План линии	Кривая	Прямая	Кривая	Прямая	Прямая	
\bar{P} , Н	131419	133315	131419	133315	134623	
V , м/с	25,5	27,7	25,5	27,7	13,88	
k , м ⁻¹	1,638	1,600	1,867	1,827	1,600	
l_i	l_1	2,30	2,30	2,30	2,30	1,85
	l_2	2,30	2,30	2,30	2,30	
kx_i	kx_1	3,77	3,68	4,49	4,38	2,96
	kx_2	7,53	7,36	8,97	8,76	
μ_i	μ_1	-0,0051	-0,0088	-0,0080	-0,0077	-0,0603
	μ_2	—	—	—	—	
η_i	η_1	-0,0322	-0,0346	-0,0134	-0,0160	-0,0417
	η_2	—	—	—	—	
$\sum \bar{P}\mu_i$, Н	-670	-1173	-1051	-1026	-8118	
$\sum \bar{P}\eta_i$, Н	-4232	-4613	-1761	-2133	-5614	
$P_{расч}$, Н	160581	167715	164621	172562	169298	
$P'_{ЭКВ}$, Н	159911	166542	163570	171536	161180	
$P''_{ЭКВ}$, Н	156349	163102	162860	170429	163684	
σ_k , МПа	144,83	107,71	129,97	97,16	108,85	
σ_6 , МПа	0,21	0,23	—	—	0,24	

Анализ результатов расчета

• Наибольшие напряжения в рельсах возникают в кривой летом от локомотива ВЛ60^п и достигают величины 144,8 МПа, что меньше допускаемого значения 200 МПа.

• Наибольшие напряжения в балласте возникают от вагона — 0,24 МПа. Это меньше допускаемого 0,42 МПа.

• Напряжения в кривой в рельсах больше, а в шпалах и балласте меньше, чем в прямой.

• Напряжения зимой в рельсах меньше, чем летом, а в нащпальных прокладках и балласте больше.

• В заданных условиях путь может работать до капитального ремонта.

Пример 4.3. Расчет прочности основной площадки земляного полотна. Исходные данные — из примера 4.2.

Определим величины давлений на шпалы от колес вагона в прямой:

$$Q = \frac{kl}{2} P_{расч} \eta_{расч} + P_c^{ср} \eta_c. \quad (4.71)$$

По расчетной схеме (см. рис. 4.6) и табл. 4.8 определим ординаты линий влияния соседних колес (для расчетного колеса ординаты приведены в табл. 4.26, пример 4.2).

Ординаты для определения Q'_c

k	x'_1	x'_2	kx'_1	kx'_2	$\eta'_{расч}$	η'_c
1,600	0,55	2,40	0,88	3,84	0,5840	-0,0056

Ординаты для определения Q''_c

k	x''_1	x''_2	kx''_1	kx''_2	$\eta''_{расч}$	η''_c
1,600	0,55	1,30	0,88	2,08	0,5840	-0,3355

$$Q_{расч} = \frac{1,6 \cdot 0,55}{2} (169298 \cdot 1 + 134623 \cdot 0,1078) = 80876,6 \text{ Н}; \quad (4.72)$$

$$Q'_c = 0,44(169298 \cdot 0,5840 - 134623 \cdot 0,0056) = 43171,1 \text{ Н}; \quad (4.73)$$

$$Q''_c = 0,44(169298 \cdot 0,5840 + 134623 \cdot 0,3355) = 63375,9 \text{ Н}. \quad (4.74)$$

Величины средних напряжений в балласте под шпалами:

$$\sigma_6^{cp} = \frac{Q_{расч}}{\Omega_\alpha} = \frac{80876,6 \cdot 10^{-6}}{0,3092} = 0,2616 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}'_{6c} = \frac{Q'_c}{\Omega_\alpha} = \frac{431741 \cdot 10^{-6}}{0,3092} = 0,1396 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}''_{6c} = \frac{Q''_c}{\Omega_\alpha} = \frac{63375,9 \cdot 10^{-6}}{0,3092} = 0,2050 \text{ МПа}.$$

Коэффициент, характеризующий концентрацию напряжений под шпалой:

$$m = \frac{0,89}{\sigma_6^{cp} + 0,435} = \frac{0,89}{0,24 + 0,435} = 1,32.$$

Величина максимального напряжения под расчетной шпалой:

$$\sigma_6^{max} = m \sigma_6^{cp} = 1,32 \cdot 0,2616 = 0,345 \text{ МПа}.$$

Напряжение на основной площадке земляного полотна от соседних шпал:

$$\sigma'_{hc} = \frac{0,7}{3,14} \cdot 0,295 \cdot 0,1396 = 0,009 \text{ МПа},$$

$$\sigma''_{hc} = \frac{0,7}{3,14} \cdot 0,295 \cdot 0,2050 = 0,013 \text{ МПа}.$$

Напряжение на основной площадке земляного полотна от расчетной шпалы:

$$\sigma'_h = 0,7 \cdot [0,635 \cdot 1,32 \cdot 0,241 + 1,275 \cdot (2 - 1,32) \cdot 0,116] \cdot 0,24 = 0,051 \text{ МПа}.$$

При толщине балластного слоя $h = 0,5$ м под железобетонными шпалами примем параметры $C_1 = 0,241$; $C_2 = 0,116$; $A = 0,295$.

Суммарное напряжение на основной площадке земляного полотна от воздействия трех шпал:

$$\sigma_h = \sigma'_h + \sigma'_{hc} + \sigma''_{hc} = 0,051 + 0,09 + 0,013 = 0,073 \text{ МПа}.$$

Вывод: напряжения на основной площадке земляного полотна при обращении грузовых вагонов с осевой нагрузкой 230 кН достигают 0,073 МПа, что не превышает допустимой величины 0,08 МПа.

4.2. Комплексный расчет прочности и устойчивости бесстыкового пути

4.2.1. Расчет устойчивости бесстыкового пути

При повышении температуры рельсовой плети в ее средней неподвижной части возникают значительные продольные температурные силы сжатия и нарастает запас потенциальной энергии. Наступает критический момент, когда рельсо-шпальная решетка оказывается неустойчивой, следствием чего может быть выброс пути в сторону или вверх. Это сопровождается освобождением части потенциальной энергии.

Расчет устойчивости бесстыкового пути сводится к определению наибольшего допустимого значения продольной температурной силы.

На основе энергетического метода С.П. Першин получил расчетную формулу для определения критической температурной силы, при достижении которой колея в целом теряет устойчивость:

$$N_k = \frac{A}{i^\mu} k_1 k_2 k_3, \quad (4.75)$$

где A и μ — параметры, зависящие от типа рельсов и плана линии (табл. 4.27);

i — средний уклон начальной неровности (2—3‰);

k_1 — коэффициент, зависящий от сопротивления балласта поперечному сдвигу шпалы (рис. 4.7, а);

k_2 — коэффициент, зависящий от эпюры шпал (0,9 при 1600 шт./км; 1 при 1840 шт./км; 1,08 при 2000 шт./км);

k_3 — коэффициент, учитывающий влияние сопротивлению повороту рельсов по подкладкам и шпалам (рис. 4.7, б).

Таблица 4.27

Параметры A и μ для определения критической силы

Тип рельса	Параметр	Прямая	Радиус кривой, м			
			1000	800	600	400
P75	A	6500	4280	3760	3210	2560
	μ	0,560	0,385	0,350	0,280	0,175
P65	A	5830	3830	3610	3150	2480
	μ	0,585	0,410	0,385	0,335	0,232
P50	A	5170	3600	3320	2950	2380
	μ	0,600	0,450	0,410	0,365	0,300