



Метод оценки воздействия грузовых вагонов на путь



Пётр АНИСИМОВ

Petr S. ANISIMOV

Автор предлагает экспериментально-расчетный метод воздействия грузовых вагонов на железнодорожный путь. Такой способ имеет в виду свой математический аппарат, систему коэффициентов и уравнений, методику определения напряжений на основной площадке земляного полотна и в балласте. Как альтернатива дорогостоящим и длительным испытаниям метод выглядит корректным и вполне применимым на основе сопоставления расчетных и проверочных данных. Расхождения в получаемых результатах не превышают в среднем 4–5%.

Ключевые слова: железнодорожный путь, грузовой вагон, рельсы, земляное полотно, рессорное подвешивание, динамические нагрузки, оценка воздействий, экспериментально-расчетный метод.

Анисимов Пётр Степанович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

По действующим правилам производства расчётов верхнего строения железнодорожного пути на прочность [1] вертикальная динамическая нагрузка от вертикальных колебаний грузёного кузова на рессорном подвешивании (от колёс на рельс) определяется по формуле: $P_p = j z_{\max}$, где j – приведенная к колесу жёсткость рессорного подвешивания в вертикальной плоскости; z_{\max} – максимальный динамический прогиб рессорного подвешивания, мм.

Например, для четырёхосного грузового вагона с тележками модели 18–100 $z_{\max} = 10 + 16 \cdot 10^{-4} V^2$, а восьмиосного с четырёхосными тележками модели 18–101 с базой 3200 мм – $z_{\max} = 9,5 + 9 \cdot 10^{-4} V^2$.

Однако в этих формулах учитывается только скорость движения вагона в км/ч и не учитываются сопротивление колебаниям кузова вагона, создаваемое фрикционными клиновыми гасителями колебаний, и неровности железнодорожного пути в вертикальной плоскости. Кроме того, эти формулы были составлены ещё 55–60 лет тому назад, и за это время произошли существенные изменения: увеличилась максимальная скорость движения грузовых поездов до 90 км/ч, а средняя техническая

скорость — до 45–48 км/ч; возросла осевая нагрузка грузовых вагонов до 23,5 т (в перспективе ожидается до 25 т); погонная нагрузка дошла до 8,6 т/м (в перспективе ожидается до 10,5 т/м); усилилась конструкция верхнего строения пути (уложены рельсы типа Р65 на щебёночном балласте и железобетонных шпалах, появился бесстыковой путь); растёт грузонапряжённость отдельных магистральных направлений и меняются условия текущего содержания и ремонта пути.

1.

С учётом произошедших изменений предлагается максимальную динамическую нагрузку определять по формуле $P_{\text{дин.мах.}} = P_{\text{ст}} (1 + k_{\text{дн.в}})$, где $P_{\text{ст}}$ — статическая нагрузка от колеса на рельс $P_{\text{ст}} = \frac{Q+T}{m}$ (Q — грузоподъёмность вагона, T — тара, m — количество колёс, $k_{\text{дн.в}}$ — коэффициент динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе вагона).

Коэффициент $k_{\text{дн.в}}$ можно найти экспериментальным путём при динамических (ходовых) испытаниях реального вагона на реальном железнодорожном пути как отношение динамических напряжений к статическим, замеренным с помощью тензометрических датчиков (проволочные, фольговые, полупроводниковые) в боковой раме тележки или оси колёсной пары. Этот коэффициент помогает выявить реальные динамические силы от колебания кузова (обрессоренная масса) вагона на рессорном подвешивании с фрикционными гасителями колебаний и силы инерции от колебания необрессоренной массы.

В предварительных расчётах (до проведения динамических испытаний) вертикальной нагрузки $P_{\text{дин.мах}}$ коэффициент $k_{\text{дн.в}}$ может быть определён [2] по формуле

$$k_{\text{дн.в}} = \lambda_{\text{в}} \left(A + \frac{BV}{f_{\text{ст}}} \right),$$

где $\lambda_{\text{в}}$ — величина, зависящая от осности тележки (при двухосной тележке она равна 1,0, трёхосной — 0,9, четырёхосной — 0,8);

A — величина, зависящая от параметров рессорного подвешивания вагона:

для двухосной, трёхосной и четырёхосной тележек $A = 8,125 (f_{\text{ст}} - 0,0463)$;

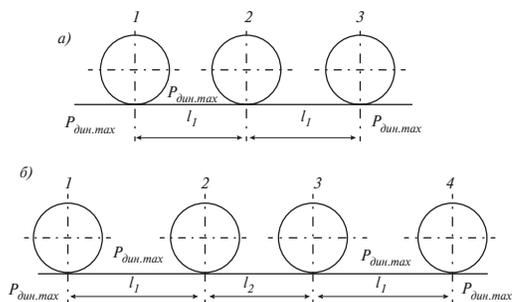


Рис. 1. Схема влияния смежных колёс тележек для определения эквивалентных нагрузок от колёс на рельсы: а) трёхосная тележка, б) четырёхосная тележка.

Fig. 1. Layout of the influence of adjacent wheels of a bogie on determining of equivalent load of the wheels on the road: а) three-axle bogie; б) four-axle bogie.

B — величина, зависящая от типа вагона (для четырёхосных, шестиосных и восьмиосных $B \times 10^4 = 5,94$);

V — скорость движения вагона, км/ч;

$f_{\text{ст}}$ — статический прогиб рессорного подвешивания вагона, м.

Эта формула получена на основании статистической обработки экспериментальных данных в ходе динамических (ходовых) испытаний, и теоретического анализа с учётом вероятности повторения динамической вертикальной нагрузки.

В дальнейшем расчёт железнодорожного пути на прочность под воздействием вагонов с двухосными, трёхосными и четырёхосными тележками с разной базой в зависимости от коэффициента динамической добавки вертикальной силы, расстояния между смежными колёсами тележек и скорости движения проводится по правилам производства расчётов верхнего строения пути на прочность [1]. Однако в отличие от этих правил в предлагаемой методике от всех колёс на рельсы действуют одинаковые максимальные силы, а не только от расчётного колеса, как предлагается в руководящем документе (от остальных колёс действуют средние по величине силы).

В соответствии с правилами эквивалентные нагрузки $P_{\text{экв}}$ от колёс на рельсы определялись отдельно для крайних колёс всех типов тележек, среднего колеса трёхосной тележки и двух средних колёс четырёхосной тележки с учётом расстояний между центрами смежных колёс (рис. 1).



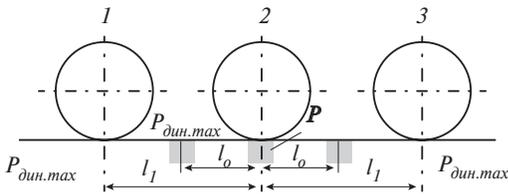


Рис. 2. Схема нагружения трёх смежных шпал для определения напряжений в балласте и шпалах на сжатие, P – расчётная шпала.

Fig. 2. Layout of load of three adjoining sleepers serving to determine stress in ballast and sleepers that causes bearing stress, P – scale.

Для определения напряжений в рельсах эквивалентная нагрузка равна:

$$P_{\text{экв}}^I = P_{\text{дин.мах}} + \mu P_{\text{дин.мах}} \text{ — для двухосной тележки,}$$

$$P_{\text{экв}}^I = P_{\text{дин.мах}} + \sum \mu P_{\text{дин.мах}} \text{ — для трёх- и четырёхосной тележек.}$$

Для определения напряжений в подрельсовом основании эквивалентная нагрузка равна:

$$P_{\text{экв}}^{II} = P_{\text{дин.мах}} + \eta P_{\text{дин.мах}} \text{ — для двухосной тележки,}$$

$$P_{\text{экв}}^{II} = P_{\text{дин.мах}} + \sum \eta P_{\text{дин.мах}} \text{ — для трёх- и четырёхосной тележек,}$$

где μ и η – ординаты линий влияния смежных колёс в функции kl_1 (k – коэффициент относительной жёсткости рельсового основания и рельса, при этом $k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}}$;

где U – модуль упругости рельсового основания; EJ – жёсткость рельса; E – модуль упругости стали, из которой сделан рельс; J – момент инерции рельса).

Значения U , J , μ и η для различных типов рельсов и шпал, различной эпюры шпал – количество шпал на один километр пути – приведено в правилах расчёта [1].

Для трёхосной тележки $\sum \mu = \mu_{1-2} + \mu_{1-3}$, $\sum \eta = \eta_{1-2} + \eta_{1-3}$ (крайнее колесо 1) и $\sum \mu = \mu_{3-2} + \mu_{3-1}$, $\sum \eta = \eta_{3-2} + \eta_{3-1}$ (крайнее колесо 3).

Для четырёхосной тележки $\sum \mu = \mu_{1-2} + \mu_{1-3} + \mu_{1-4}$, $\sum \eta = \eta_{1-2} + \eta_{1-3} + \eta_{1-4}$ (крайнее колесо 1), $\sum \mu = \mu_{4-1} + \mu_{4-2} + \mu_{4-3}$ и $\sum \eta = \eta_{4-1} + \eta_{4-2} + \eta_{4-3}$ (крайнее колесо 4).

Для среднего колеса трёхосной тележки $\sum \mu = \mu_{2-1} + \mu_{2-3}$ и $\sum \eta = \eta_{2-1} + \eta_{2-3}$.

Для среднего колеса 2 четырёхосной тележки $\sum \mu = \mu_{2-1} + \mu_{2-3} + \mu_{2-4}$ и $\sum \eta = \eta_{2-1} + \eta_{2-3} + \eta_{2-4}$, а для среднего

колеса 3 $\sum \mu = \mu_{3-1} + \mu_{3-2} + \mu_{3-4}$ и $\sum \eta = \eta_{3-1} + \eta_{3-2} + \eta_{3-4}$.

2.

За исходные данные при проведении расчётов по определению напряжений в элементах верхнего строения пути и на основной площадке земляного полотна принимались параметры железнодорожного пути (рельсы типа Р50, деревянные шпалы типа 1А, эпюра шпал 1840 шт/км, щебёночный балласт) и вагонов (осевая нагрузка 22,5 т, база двухосной тележки модели 18–100 от 1750 до 1960 мм, трёхосной тележки – от 3000 до 3500 мм, четырёхосной тележки – от 3200 до 3600 мм, расстояние между центрами средних колёс четырёхосной тележки – от 1350 до 1750 мм).

Максимальные значения коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележек находились экспериментальным путём по напряжениям в боковых балках рамы тележек при динамических (ходовых) испытаниях вагонов на реальном железнодорожном пути [3, 4]. Максимальные напряжения под средним колесом трёхосной тележки и двумя средними колёсами четырёхосной тележки и поездные (средние) напряжения на основной площадке земляного полотна в зависимости от коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележек, расстояния между смежными колёсами и скорости движения вагона определены отдельно под крайними колёсами и средними колёсами (одного в трёхосной тележке и двух в четырёхосной тележке) по формуле [1]:

$$\sigma_h = \sigma_h^1 + \sum \sigma_{hc} = \sigma_b [mC_1 + (2-m)C_2] + 0,25$$

$A\sigma_{bc}$, где σ_h^1 – напряжения, обусловленные нагрузкой основной расчётной шпалы P (рис. 2.),

$\sum \sigma_{hc}$ – напряжения, обусловленные нагрузкой шпал, смежных с расчётной шпалой,

σ_b – напряжения в балласте на сжатие под расчётной и смежными шпалами.

Поездные (средние) напряжения на основной площадке земляного полотна:

$$\sigma_h^n = \frac{2\sigma_h^{kp} + \sigma_h^{cp}}{3} \text{ — для трёхосных тележек,}$$

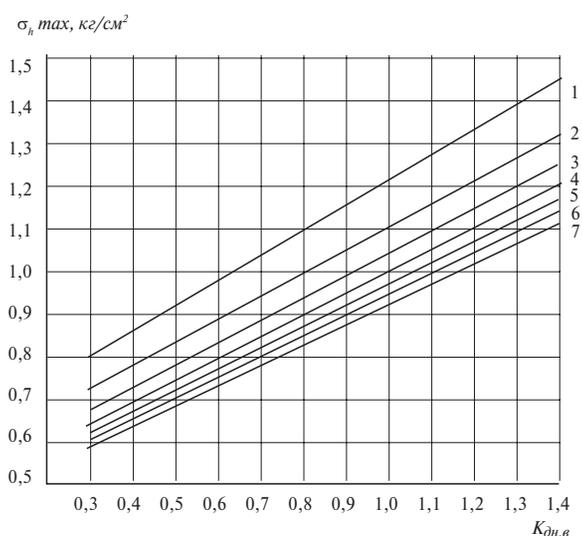


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележек:
1 – трёхосная тележка, расстояние между смежными колёсами 1500 мм,
2 – трёхосная тележка, расстояние между смежными колёсами 1650 мм,
3 – трёхосная тележка, расстояние между смежными колёсами 1750 мм,
4 – двухосная тележка, расстояние между смежными колёсами 1750 мм,
5 – двухосная тележка, расстояние между смежными колёсами 1850 мм,
6 – четырёхосная тележка, расстояние между смежными средними колёсами 1350 мм,
7 – четырёхосная тележка, расстояние между смежными средними колёсами 1750 мм.

Pic. 3. Dependence of maximum stresses on the main platform of subgrade on the rate of dynamic addition of vertical forces along mass of bogies without springs.

$$\sigma^{kp} = \frac{2\sigma_h^{kp} + 2\sigma_h^{cp}}{4} \text{ — для четырёхосной}$$

тележки, где σ_h^{kp} — напряжения на основной площадке земляного полотна под крайними колёсами тележки,

σ_h^{cp} — напряжения на основной площадке земляного полотна под средними колёсами тележек.

В расчётах использована методика определения напряжений на основной площадке земляного полотна и в балласте, изложенная в [1].

Из рис. 3 видно, что при одинаковом расстоянии между смежными колёсами и одинаковых значениях коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележек наибольшее отрицательное влияние на напряжённое состояние основной площадки земляного полотна оказывают вагоны с трёхосными и четырёхосными тележками вследствие большего количества колёсных пар.

Принимая во внимание реальное влияние колёсных пар, при одинаковых значениях коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележки расстояние между смежными колёсами трёхосной и четырёхосной тележек должно быть больше, чем у двухосной, или при одинаковом расстоянии между смежными колёсами коэффициент динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележки у мно-

гоосных тележек должен оказаться меньше, чем у двухосной.

Так, например, чтобы получить воздействие трёхосной тележки модели 18–102 с базой 3500 мм на основную площадку земляного полотна не хуже, чем двухосной модели 18–100, у трёхосной, исходя из напряжений на основной площадке земляного полотна $0,9 \text{ м/с}^2$ (как и под воздействием двухосной тележки), коэффициент динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележки должен быть не больше 0,85.

Такая оценка, впрочем, была бы справедлива лишь в том случае, если бы количество шестиосных вагонов с трёхосными тележками на сети железных дорог оказалось намного меньше, чем четырёхосных вагонов с двухосными тележками. В том случае, когда шестиосных вагонов было бы намного больше, чем четырёхосных, или использовались только шестиосные вагоны, при выборе базы трёхосной тележки и установлении коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележки необходимо брать в расчет максимальные напряжения на основной площадке земляного полотна, то есть напряжения под средним колесом тележки. Тогда максимальное значение коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе трёхосной тележки с базой 3500 мм должно быть порядка 0,72.



Следовательно, база тележки и коэффициент динамической добавки вертикальных сил находятся между собою в тесной взаимосвязи, и чем больше база тележки, тем меньше коэффициент динамической добавки, и наоборот. Так, например, у трёхосной тележки с базой 3300 мм коэффициент динамической добавки должен быть порядка 0,62, исходя из максимального напряжения (под средним колесом) на основной площадке земляного полотна, и порядка 0,78, исходя из поездных (средних) напряжений на той же площадке.

Практически это нереальное или трудно достижимое желание, поскольку фрикционный клиновой гаситель колебаний вагона призван создавать для того большое сопротивление, то есть большую силу трения. Это приводит к тому, что рессорные комплекты вагона начнут работать лишь при более высокой скорости движения вагона или больших возмущающих силах со стороны железнодорожного пути. В таком случае при меньших скоростях движения, ниже резонансной скорости, и меньших силах возмущения колебаний вагона со стороны железнодорожного пути рессорные комплекты вагона, по сути, не работают, и вся масса вагона является почти необрессоренной, что приводит: а) к сильному воздействию на железнодорожный путь; б) более напряжённо-деформированному состоянию узлов и деталей самого вагона.

За счёт увеличения статического прогиба рессорного комплекта или уменьшения необрессоренной массы тележки меньшего значения коэффициента динамической добавки получить не представляется возможным, поскольку такой прогиб не должен превышать 50–60 мм по условиям сцепления автосцепок гружёного и порожнего вагонов, а уменьшить необрессоренную массу трудно, ибо необходимы прочность боковины рамы тележки и колёсной пары, особенно принимая во внимание увеличение осевой нагрузки вагона до 23,5 т и выше (до 25 т).

Поэтому для уменьшения, в частности, напряжений на основной площадке земляного полотна следует идти прежде всего на увеличение базы тележки, что вызовет, конечно, и увеличение необрессоренной массы тележки с центральным рессорным

подвешиванием (при надбуксовом рессорном подвешивании этого не происходит), а также на усиление конструкции верхнего строения железнодорожного пути (более тяжёлые типы рельсов, большая толщина балласта, применение плитного рельсового основания, увеличение количества шпал на километр пути и т. д.). Потребуется, естественно, и улучшение технического состояния и ремонта железнодорожного пути с целью уменьшения динамического воздействия на него вагона, что приведёт наверняка к большим первоначальным материальным и трудовым затратам в пути хозяйстве, которые должны окупиться за счёт улучшения напряжённо-деформированного состояния и увеличения долговечности верхнего строения пути и земляного полотна.

3.

Расстояние между смежными колёсами трёхосной и четырёхосной тележек оказывает влияние на напряжения в рельсах, однако оно обратное влиянию на напряжения на основной площадке земляного полотна, то есть чем расстояние меньше, тем напряжения в рельсах ниже. Под воздействием шестiosных вагонов с трёхосными тележками и восьмиосных вагонов с четырёхосными тележками наибольшие напряжения в рельсах возникают под крайними колёсами, а под средними они меньше, чем под крайними вследствие разгружающего влияния последних. Причём это разгружающее влияние тем больше, чем меньше расстояние между смежными колёсами.

Под воздействием вагонов с трёхосными тележками, у которых расстояние между смежными колёсами 1500 мм при базе тележки 3000 мм и расстояние 1750 мм — при базе тележки 3500 мм, и четырёхосными тележками, у которых расстояние между средними колёсами 1350 мм при базе тележки 3200 мм и расстояние 1750 мм — при базе тележки 3600 мм, напряжения в рельсах меньше, чем под воздействием четырёхосного вагона с двухосными тележками, у которых расстояние между смежными колёсами 1850 мм. Например, под воздействием вагона с трёхосными тележками с расстоянием между смежными колёсами 1750 мм напряжения

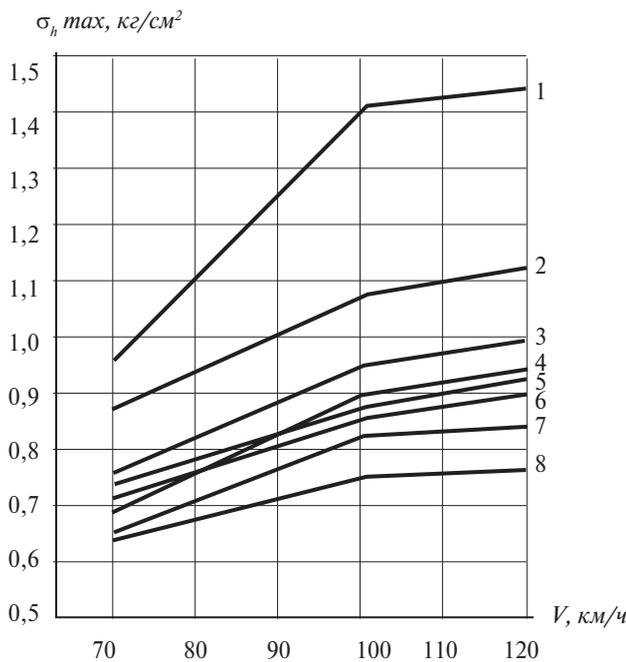


Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от скорости движения вагона:
 1 – трёхосная тележка типа КВЗ-1м с базой 3000 мм,
 2 – трёхосная тележка типа УВЗ-10м с базой 3030 мм,
 3 – трёхосная тележка модели 18-102 (тип УВЗ-9м) с базой 3500 мм,
 4 – трёхосная тележка модели 18-102 (тип КВСЗ) с базой 3500 мм,
 5 – двухосная тележка модели 18-100 с базой 1850 мм,
 6 – трёхосная тележка модели 18-102 (тип УВЗ-10м) с базой 3500 мм,
 7 – четырёхосная тележка модели 18-101 с базой 3200 мм,
 8 – четырёхосная тележка модели 18-101 с базой 3600 мм.

Рис. 4. Dependence of maximum stresses on the main platform of subgrade on the velocity of a car.

в рельсе при скорости движения 120 км/ч равны 1100 кг/см², с расстоянием между смежными колёсами 1500 мм – 910 кг/см², а вагона с четырёхосными тележками с расстоянием между смежными средними колёсами 1750 мм – 1100 кг/см², расстоянием 1350 мм – 920 кг/см².

Восьмиосные вагоны с четырёхосными тележками с базой 3200 мм оказывают на земляное полотно примерно такое же воздействие, как и четырёхосные вагоны с тележками модели 18-100 с базой 1850 мм, вследствие меньших значений коэффициента динамической добавки вертикальных сил из-за большего количества колёсных пар у четырёхосной тележки. При базе четырёхосной тележки 3600 мм восьмиосные вагоны воздействуют на земляное полотно даже лучше, чем четырёхосные. Например, при скорости движения 120 км/ч поездные (средние) напряжения на основной площадке земляного полотна равны 0,65 кг/см² под восьмиосным вагоном и 0,87 кг/см² под четырёхосным, а максимальные напряжения – соответственно 0,7 и 0,87. Под воздействием четырёхосных вагонов максимальные и поездные напряжения, естественно, одинаковые по величине.

Для того чтобы при одинаковых коэффициентах динамических добавок вертикальных сил напряжения на основной

площадке земляного полотна были одинаковыми под воздействием четырёхосных и восьмиосных вагонов, база четырёхосной тележки должна быть равной 3700 мм, при которой расстояние между всеми смежными колёсами четырёхосной тележки было бы 1850 мм, то есть как и у двухосной тележки.

Из рис.4 видно, что при одинаковых коэффициентах динамических добавок вертикальных сил максимальные напряжения на основной площадке земляного полотна под воздействием вагонов с различными типами тележек не одинаковые из-за различных расстояний между смежными колёсами в тележках.

Из рис. 5 следует, что при одинаковом значении коэффициента динамической добавки вертикальных сил напряжения на основной площадке земляного полотна уменьшаются с увеличением расстояния между смежными колёсами в тележках. При этом наибольшее влияние на увеличение напряжений оказывает коэффициент динамической добавки, а не расстояние между смежными колёсами в тележке.

Например, при расстоянии 1850 мм между колёсами двухосной тележки при увеличении коэффициента динамической добавки от 0,5 до 1,0 напряжения на основной площадке увеличиваются в 1,3 раза при двухосных и трёхосных тележках, а при



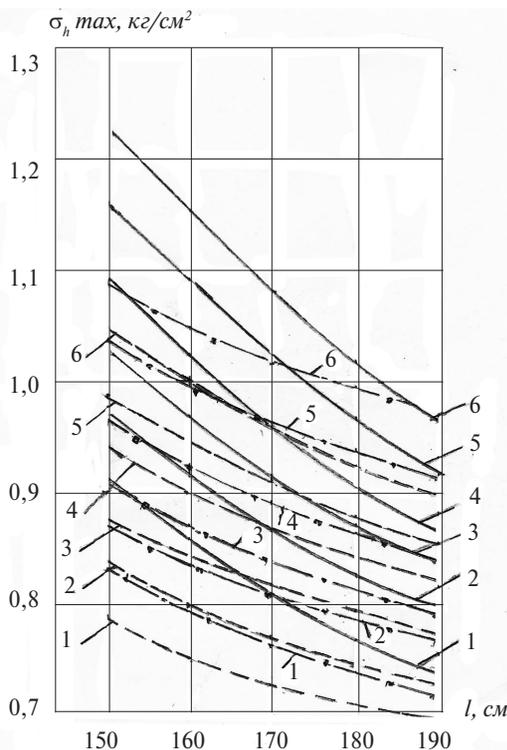


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений на основной площадке земляного полотна от расстояния между смежными колёсами при различных значениях коэффициента динамической добавки вертикальных сил по необрессоренной массе тележки ($k_{д.в.}$).
Условные обозначения:
— трёхосная тележка; - - - - двухосная тележка;
- · - · - четырёхосная тележка; 1, 2, 3, 4, 5, 6 — коэффициент $k_{д.в.}$ соответственно 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.

Рис. 5. Dependence of maximum stresses on the main platform of subgrade on the distance between adjacent wheels (with different values of the rate of dynamic addition of vertical forces along mass of bogies without springs).

уменьшении расстояния между смежными колёсами с 1850 до 1500 мм — увеличиваются в 1,14 раза под воздействием вагонов с двухосными и четырёхосными тележками и в 1,2 раза — с трёхосными. Из этого вытекает, что наибольшее внимание должно уделяться конструктивным мероприятиям с целью улучшения динамических качеств вагонов и росту технического состояния железнодорожного пути с целью снижения возмущающих сил, вызывающих динамические колебания вагонов, а следовательно, и динамических сил, действующих на вагон и железнодорожный путь.

Проведенные расчёты напряжений в шпале на смятие и в балласте показали, что с увеличением расстояния между смежными колёсами трёхосных и четырёхосных тележек при прочих равных условиях они уменьшаются. Допустим, под воздействием шестиосного вагона с трёхосными тележками с увеличением расстояния между смежными колёсами с 1500 до 1750 мм напряжения в шпале и балласте уменьшаются в 1,22 раза (с 16 до 13,3 кг/см² в шпале и 5,7 до 4,65 кг/см² в балласте) при скорости движения вагона 120 км/ч. Под воздействием восьмиосного вагона с увеличением расстояния между средними смежными колёсами с 1350 до 1750 мм напряжения в шпале и балласте уменьшаются в 1,3 раза (с 9,95 до 7,65 кг/см² в шпале и с 2,0 до 1,54 кг/см² в балласте) при скорости движения вагона 120 км/ч. Допускаемые напряжения под вагонами в сосновой и еловой шпалах равны 22 кг/см², а в крупном (25–75 мм) щебёночном балласте — 3,5 кг/см².

Корректность и возможность применения экспериментально-расчётного метода оценки воздействия вагонов на железнодорожный путь вместо проведения дорогостоящих и длительных испытаний были доказаны сопоставлением результатов расчётов и данными проведенных проверок. Расхождение в результатах составило в среднем 4–5%, причём большие значения получены при расчётах, что идёт в некоторый запас прочности и долговечности работы верхнего строения железнодорожного пути и земляного полотна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила производства расчётов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. Литография. — М.: МПС, 1954.
2. Конструирование и расчёт вагонов/ Лукин В. В., Анисимов П. С., Котуранов В. Н., Хохлов А. А., Кобищанов В. В.; под ред. Анисимова П. С. — М.: Учеб. — метод. центр по образованию на ж. д. транспорте, 2011. — 688 с.
3. Вериго М. Ф., Грачёва Л. О., Алексеев М. В., Анисимов П. С. Оценка динамических (ходовых) качеств и воздействие на путь шестиосных полувагонов грузоподъёмностью 95 т. Труды ВНИИЖТ. Вып. 268. — М.: Трансжелдориздат, 1963. — С. 5–63.
4. Вериго М. Ф., Грачёва Л. О., Алексеев М. В., Львов А. А., Анисимов П. С. Динамические испытания и испытания по воздействию на путь восьмиосных полувагонов // Труды ВНИИЖТ. Вып. 296. — М.: Транспорт, 1965. — С. 118–160.