

**РАСЧЕТ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ  
при нестационарном режиме нагружения**

Ташкент - 2007

ГАЖК «□□□□□□□□□□ □□□□□ □□□□□□□□»  
Ташкентский институт инженеров  
железнодорожного транспорта

***РАСЧЕТ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ  
при нестационарном режиме нагружения***

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКОЙ И  
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

для подготовки  
магистрантов по специальности 5А521104 «Вагоны»  
и бакалавров по специальности 5521100 «Наземные транспортные  
системы»

Ташкент – 2007

УДК 629.43/46(075)

Методические указания к практической и самостоятельной работе предназначены для подготовки магистрантов по специальности 5А521104-«Вагоны» и бакалавров по специальности 5521100-«Наземные транспортные системы».

В методических указаниях приведен метод расчета оси колесной пары при нестационарном режиме нагружения, приведены справочные данные о массах и размерах существующих узлов и деталей вагонов, находящихся в эксплуатации, а также даны рекомендации по использованию современной компьютерной техники при выполнении данного расчета.

Методические указания могут быть полезны инженерам и специалистам в области проектирования вагонов.

Рекомендованы к изданию решением Учебно-методической комиссии Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта.

Составитель к.т.н., доцент кафедры «Вагоны» С.А. Хромов.

Рецензенты: к.т.н., доцент ТАДИ Д.И. Хашимов;  
к.т.н., доцент кафедры «Городской и промышленный электрический транспорт» ТашИИТа  
В.П. Связев.

## Введение

Колесная пара является одной из главных и ответственных частей вагона. Она направляет движение по рельсовому пути и воспринимает все нагрузки, передающиеся от вагона на рельсы и обратно.

От конструкции, материала, технологии изготовления и качества ремонта колесных пар зависит безопасность движения поездов.

Конструкция и состояние колесных пар оказывают сильное влияние на динамические показатели вагонов, плавность хода, величину сил, возникающих при движении вагонов, а также на величину сил сопротивления движению поезда.

При разработке вагонов новых конструкций, а также при модернизации существующих вагонов, затрагивающей их геометрию, базовые размеры, грузоподъемность или замены материалов, необходимо в обязательном порядке выполнять расчет оси колесной пары уточненным методом с учетом нестационарности режима ее нагружения.

В качестве критерия оценки прочности оси по этому методу расчета принимается величина коэффициента запаса прочности оси по отношению к ее пределу усталости.

Поскольку нагруженность оси и механические свойства ее материала подчиняются статистическим закономерностям, целесообразно оценивать их вероятностными характеристиками.

Таким образом, уточненный расчет оси колесной пары позволяет оценить усталостную прочность, рассчитав коэффициент запаса прочности для каждого ответственного сечения оси.

### **1. Порядок расчета оси колесной пары при нестационарном режиме нагружения**

Коэффициент запаса прочности оси показывает во сколько раз предел усталостной прочности оси по излому больше приведенных напряжений в расчетном сечении [1].

Оценка прочности производится по следующим расчетным сечениям (рисунок 1): I – по шейке оси в плоскости внутренней кромки заднего подшипника, II – по шейке оси в плоскости начала задней галтели, III – по подступичной части оси в плоскости круга катания колеса, IV – в средней части оси.

Условием прочности оси является неравенство  $n \geq [n]$ ,

где  $n$  – коэффициент запаса прочности оси по отношению к пределу ее усталости;

$[n]$  – допускаемый коэффициент запаса прочности оси.

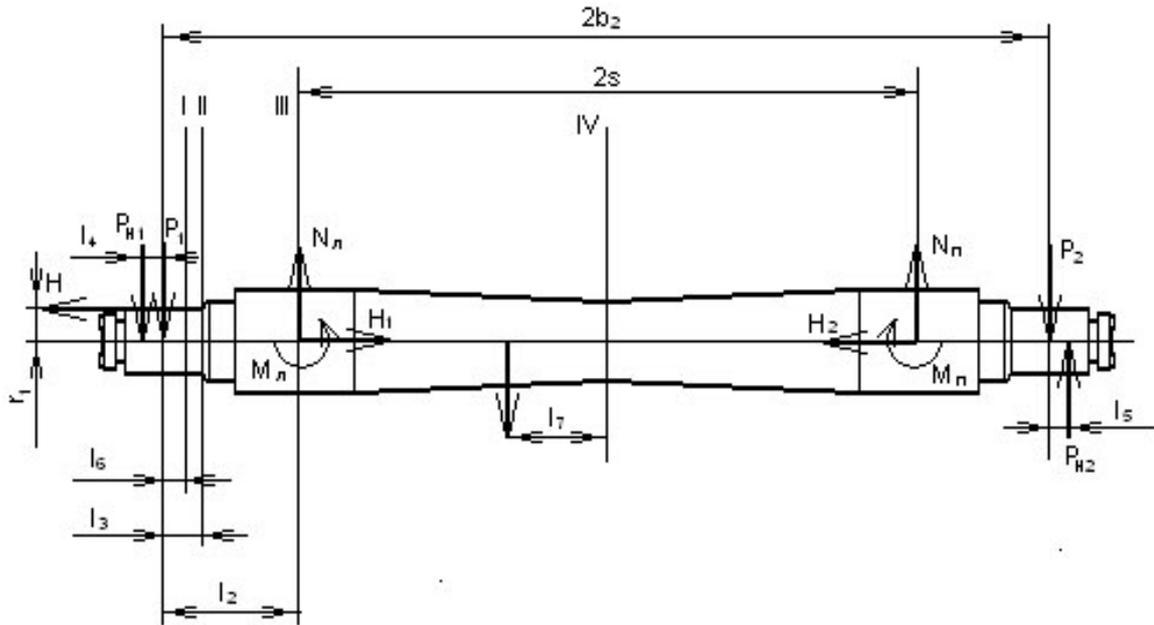


Рисунок 1.- Расчетная схема для оси колесной пары.

Расчет оси колесной пары при нестационарном режиме нагружения весьма трудоемок по объему выполняемых вычислений, особенно при необходимости учета различных вариантов нагружения. Многовариантные вычисления также необходимы при проектировании новых вагонов или модернизации существующих. Поэтому ниже предлагается порядок расчета, легко поддающийся алгоритмизации для последующего написания программы на каком-либо алгоритмическом языке программирования для компьютера.

Расчет состоит из шести последовательных блоков:

1. Ввод исходных данных, зависящих от типа и характеристик вагона.
2. Определение данных, характерных для типовых осей.
3. Определение расчетных нагрузок.
4. Расчет изгибающих моментов и напряжений в расчетных сечениях оси.
5. Определение коэффициентов перегрузки оси.
6. Расчет коэффициентов запаса прочности в расчетных сечениях.

## 2. Исходные данные для расчета оси

### 2.1. Исходные данные, зависящие от типа и характеристик вагона и их обозначения

$M_{br}$  - масса вагона брутто, кг

$F$  - площадь боковой проекции кузова вагона, м<sup>2</sup>

$m_0$  - число осей в вагоне

$h_k$  - высота центра тяжести вагона над уровнем осей колесных пар, м

$h_v$  - высота равнодействующей ветровой нагрузки над уровнем осей колесных пар, м

$V$  - расчетная скорость движения вагона, м/с

$w$  - удельное давление ветра на боковую поверхность кузова, Па

$\lambda$  - коэффициент использования грузоподъемности вагона

$f_{st}$  - статический прогиб рессорного подвешивания вагона, м

Число осей в вагоне, статический прогиб рессорного подвешивания и коэффициент использования грузоподъемности определяются типом вагона.

Для всех типов крытых грузовых, цистерн и рефрижераторных вагонов  $\lambda \leq 1$ , для пассажирских вагонов  $\lambda = 1$ , а для всех типов открытых грузовых вагонов  $\lambda$  может быть меньше или равен 1, а может быть больше 1.

Статический прогиб грузовых вагонов (вагонов с одинарным рессорным подвешиванием)  $0,018 \leq f_{st} \leq 0,05$  м. Статический прогиб пассажирских вагонов (с двойным рессорным подвешиванием)  $0,1 \leq f_{st} \leq 0,25$  м.

Удельное давление ветра на боковую поверхность кузова вагона считается действующей перпендикулярно поверхности и принимается: 500 Па для маловетренных районов, 700 Па для районов с преобладающими ветрами (равнины и низины), и 1000 Па для районов с частыми сильными ветрами (побережье морей и океанов).

Высота равнодействующей ветровой нагрузки и высота центра тяжести вагона определяются с учетом погруженного груза.

### 2.2. Определение данных, зависящих от типа оси и типа вагона

Ниже перечислены значения масс и геометрических размеров элементов вагонов для типовых унифицированных деталей и узлов.

В случае расчета оси колесной пары для вновь спроектированного вагона или новой колесной пары эти значения могут отличаться от приведенных значений.

Значения, зависящие от типа вагона, приведены в таблице 1, а значения, зависящие от типа колесной пары, приведены в таблице 2.

Значения, принимающиеся по умолчанию для расчета, зависящие от типа вагона.

Таблица 1.

Обозначение	Единица измерения	Наименование	Тип вагона			
			Грузовой		Пассажирский	Изо-термический
			4-х осный	8-и осный		
1	2	3	4	5	6	7
$m_p$	кг	Масса половины боковой рамы тележки (для грузового вагона) или половина массы пружин на буксе (для пассажирского)	340	340	18	18
$m_b$	кг	Масса буксы и связанных с ней необрессоренных деталей	400	450	70	75
$m_{\Xi}$	кг	Масса необрессоренных частей, жестко связанных с шейкой оси, включая саму шейку	95	105	105	100
$m_{nk}$	кг	Масса необрессоренных частей, приходящихся на колеса	430	475	95	100

Значения, принимающиеся по умолчанию для расчета, зависящие от типа колесной пары.

Таблица 2.

Обозначение	Единица измерения	Наименование	Тип колесной пары			
			РУ-1050	РУ-950	РУ1-950	РУ1Ш-950
1	2	3	4	5	6	7
$m_{kp}$	кг	Масса колесной пары	1320	1280	1220	1240
$m_k$	кг	Масса колеса	480	450	450	450
$m_{sh}$	кг	Масса консольной части оси до круга катания	20	15	15	15
$m_s$	кг	Масса средней части оси между кругами катания	280	250	270	280
$r$	м	Радиус колеса	0.525	0.475	0.475	0.475
$d_1$	м	Диаметр шейки оси	0.135	0.135	0.130	0.130
$d_2$	м	Диаметр подступичной части оси	0.194	0.194	0.194	0.194
$d_3$	м	Диаметр средней части оси	0.165	0.165	0.165	0.165
$2b_2$	м	Расстояние между точками приложения вертикальной нагрузки на шейки оси	2.036	2.036	2.036	2.036
$2s$	м	Расстояние между кругами катания колес	1.580	1.580	1.580	1.580
$l_2$	м	Расстояние от середины шейки оси до круга катания колеса	0.228	0.228	0.228	0.228
$l_3$	м	То же до задней галтели шейки	0.1	0.1	0.1	0.1

1	2	3	4	4	4	4
$l_4 = l_5$	м	Эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки	0.01	0.01	0.01	0.01
$l_6$	м	Расстояние от середины шейки оси до внутренней кромки кольца заднего подшипника	0.08	0.08	0.08	0.08
$l_7$	м	Расстояние от среднего сечения оси до равнодействующей сил инерции массы средней части оси	0.526	0.526	0.526	0.526

### 2.3. Другие данные

При расчете оси колесной пары используются различные коэффициенты, значения которых приведены ниже, а также эмпирические формулы, в которые входят коэффициенты, приведенные в таблице 3.

$\mu = 0.25$  - коэффициент трения колеса о рельс при скольжении в поперечном направлении.

$\beta = 0.7$  - коэффициент передачи сил инерции на внутренние сечения оси.

$\eta_c$  - коэффициент боковой нагрузки:

$\eta_c = 0,1$  - для пассажирских вагонов,

$\eta_c = 0,075$  - для грузовых вагонов.

$r_1 = \frac{d_1}{2}$  - радиус шейки оси.

$m$  - котангенс угла наклона кривой усталости к оси абсцисс в полулогарифмических координатах (показатель корня в формуле для расчета коэффициента запаса прочности оси) таблица 4.

Значения коэффициентов для эмпирических формул. Таблица 3.

Тип вагона	V, м/с	A	B · 10 <sup>4</sup>	$\lambda_v$	$\lambda_g$	C	D	E	F <sub>k</sub>	$\delta \cdot 10^3$
Грузовой 4-х осный	<33	8,125( $f_{st} - 0,0463$ )	5,94	1	1	204	13,2	38	3,8	1
Грузовой 8-и осный	<33	8,125( $f_{st} - 0,0463$ )	5,94	0,8	0,8	204	13,2	38	3,8	1
Пассажир- ский	< 33	0,06	5,94	1	1	204	13,2	38	3,8	0,94
	> 33	0,06	5,94	1	1	204	11,5	38	3,8	0,94
Изотерми- ческий	< 33	0,06	5,94	1	1	204	13,2	38	3,8	0,94

### 3. Определение расчетных нагрузок

Статическая нагрузка на шейку оси с учетом коэффициента использования грузоподъемности вагона

$$P_{st} = \frac{1 + \lambda}{2} \cdot \frac{m_{br} - m_0 m_{kp} + 2m_0 m_{sh}}{2m_0} g \quad (1)$$

Коэффициент вертикальной динамики

$$k_d = \lambda_v \left( A + \frac{BV}{f_{st}} \right) \quad (2)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (2), принимаются по таблице 3.

Динамическая нагрузка:

от вертикальных колебаний кузова на рессорах

$$P_d = k_d P_{st} \quad (3)$$

вертикальная нагрузка от центробежной силы в кривых, загружающая одну шейку и разгружающая другую

$$P_c = \eta_c P_{st} \frac{h_c}{b_2} \quad (4)$$

от силы ветра

$$P_v = wF \frac{h_v}{2b_2 m_0} \quad (5)$$

Расчетная вертикальная нагрузка:

на левую шейку оси

$$P_1 = P_{st} (1 + k_d) + P_c + P_v \quad (6)$$

на правую шейку оси

$$P_2 = P_{st} - (P_c + P_v) \quad (7)$$

Ускорение буксовых узлов:

левого

$$j_{b1} = \frac{C + DV}{\sqrt{m_{nk}}} g \quad (8)$$

правого

$$j_{b2} = \frac{l_2}{l_2 + 2s} j_{b1} \quad (9)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (8), принимаются по таблице 3.

Ускорение левого колеса

$$j_k = \frac{2s}{l_2 + 2s} j_{b1} \quad (10)$$

Вертикальная сила инерции, действующая:  
на левую шейку оси

$$P_{H1} = m_{\Sigma} j_{b1} \quad (11)$$

на правую шейку оси

$$P_{H2} = m_{\Sigma} j_{b2} \quad (12)$$

От левого колеса на рельс (на правом колесе она равна 0)

$$P_{Hk} = m_k j_k \quad (13)$$

Вертикальная сила инерции средней части оси

$$P_{Hs} = 0,5m_s j_k \quad (14)$$

Коэффициент горизонтальной динамики

$$k_g = \lambda_g \delta(E + F_k V) \quad (15)$$

Значения коэффициентов, входящих в формулу (15), принимаются по таблице 3.

Горизонтальная сила, действующая от колесной пары на рельс,  
(рамная сила)

$$H = \frac{m_{br}}{m_0} k_g g \quad (16)$$

Вертикальная реакция рельса, действующая на:  
левое колесо

$$R_A = P_1 \frac{l_2 + 2s}{2s} + P_{H1} \frac{l_2 + 2s + l_4}{2s} + H \frac{r + r_1}{2s} + P_{Hk} + \frac{2}{3} P_{Hs} - P_2 \frac{l_2}{2s} + P_{H2} \frac{l_2 + l_5}{2s} \quad (17)$$

правое колесо

$$R_B = P_2 \frac{l_2 + 2s}{2s} - P_{H2} \frac{l_2 + 2s + l_4}{2s} - H \frac{r + r_1}{2s} + \frac{1}{3} P_{Hs} - P_1 \frac{l_2}{2s} - P_{H1} \frac{l_2 + l_4}{2s} \quad (18)$$

Вертикальная реакция, действующая:  
на левую опору оси

$$R_C = R_A - P_{Hk} \quad (19)$$

на правую опору оси

$$R_D = R_B + P_{H1} \frac{l_2 + l_4}{2s} (1 - \beta) \quad (20)$$

Поперечная составляющая силы трения правого колеса о рельс

$$H_2 = \mu R_B \quad (21)$$

Боковая сила

$$H_1 = H + H_2 \quad (22)$$

Изгибающий момент от инерционных сил, действующий в сечении:

под левой опорой оси

$$M_L = H_1 r + (1 - \beta) P_{H1} (l_2 + l_4) \quad (23)$$

под правой опорой оси

$$M_P = H_2 r \quad (24)$$

#### 4. Изгибающие моменты и напряжения в расчетных сечениях

От расчетных нагрузок

$$M_{pI} = P_1 l_6 + P_{H1} (l_6 + l_4) + H r_1 \quad \sigma_{pI} = \frac{M_{pI}}{W_I}$$

$$M_{pII} = P_1 l_3 + P_{H1} (l_3 + l_4) + H r_1 \quad \sigma_{pII} = \frac{M_{pII}}{W_{II}}$$

$$M_{pIII} = P_1 l_2 + P_{H1} (l_2 + l_4) + H r_1 + M_L \quad \sigma_{pIII} = \frac{M_{pIII}}{W_{III}}$$

$$M_{pIV} = P_1 b_2 + P_{H1} (b_2 + l_4) + H r_1 + M_L - R_C s + P_{Hs} l_7 \quad \sigma_{pIV} = \frac{M_{pIV}}{W_{IV}}$$

где  $W_I, W_{II}, W_{III}, W_{IV}$  - моменты сопротивлений изгибу расчетных

сечений, определяющихся для круглых сечений по формуле  $W_i = \frac{\pi d_i^3}{32}$ .

От статической нагрузки

$$M_{stI} = P_{st} l_6 \quad \sigma_{stI} = \frac{M_{stI}}{W_I}$$

$$M_{stII} = P_{st} l_6 \quad \sigma_{stII} = \frac{M_{stII}}{W_{II}}$$

$$M_{stIII} = M_{stIV} = P_{st} l_2 \quad \sigma_{stIII} = \frac{M_{stIII}}{W_{III}} \quad \sigma_{stIV} = \frac{M_{stIV}}{W_{IV}}$$

Коэффициенты перегрузки оси:  
максимальные

$$\alpha_{\max I} = \frac{M_{pI}}{M_{stI}} \quad \alpha_{\max II} = \frac{M_{pII}}{M_{stII}} \quad \alpha_{\max III} = \frac{M_{pIII}}{M_{stIII}} \quad \alpha_{\max IV} = \frac{M_{pIV}}{M_{stIV}}$$

МИНИМАЛЬНЫЕ

$$\alpha_{\min I} = \frac{\sigma_{-IdkI}}{2\sigma_{stI}} \quad \alpha_{\min II} = \frac{\sigma_{-IdkII}}{2\sigma_{stII}} \quad \alpha_{\min III} = \frac{\sigma_{-IdkIII}}{2\sigma_{stIII}} \quad \alpha_{\min IV} = \frac{\sigma_{-IdkIV}}{2\sigma_{stIV}}$$

где  $\sigma_{-Idki}$  - пределы выносливости оси в расчетных сечениях, определены экспериментально, зависят от вида обработки поверхности оси и приведены в таблице 4.

Значения пределов выносливости осей колесных пар. Таблица 4.

Вид обработки	Предел выносливости (МПа), в сечении				Котангенс m
	I	II	III	IV	
Не накатанная	80	80	80	135	8
Накатанная	150	150	130	180	18

## 5. Расчет коэффициентов запаса прочности оси

По результатам расчета максимальных и минимальных коэффициентов перегрузки рассчитываются коэффициенты запаса прочности оси для всех сечений по формуле

$$n = \frac{2\alpha_{\min}}{\frac{S_{\sigma}^2(m-1)}{e^2}} \sqrt{\frac{N_{-1}}{N_c [\Phi(Z_{\max}) - \Phi(Z_{\min})]}} \geq [n]$$

где  $N_{-1} = 10^8$  - базовое число циклов испытания оси;

$N_c$  - число циклов нагружения оси за весь срок службы;

Принимают  $N_c = 2,7 \cdot 10^9$  - для пассажирских вагонов,  $N_c = 5 \cdot 10^8$  - для всех типов грузовых и изотермических вагонов [1 с. 114].

$S_{\sigma}$  - среднеквадратичное отклонение амплитуд напряжений;

$$S_{\sigma} = t_0 - \sqrt{t_0^2 - 2 \ln \alpha_{\max}}$$

$t_0$  - число, определяющее границы доверительного интервала статистического распределения. Для пассажирских вагонов  $t_0 = 4,5$ , для грузовых и изотермических вагонов  $t_0 = 4$  [1 с. 113].

$\Phi(Z_{\max})$  и  $\Phi(Z_{\min})$  - интегралы вероятности, рассчитываемые по формулам

$$\Phi(Z_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Z_{\max}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \Phi(Z_{\min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Z_{\min}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

в которых

$$Z_{\max} = \frac{\ln \alpha_{\max} + \frac{S_{\sigma}^2}{2}}{S_{\sigma}} - S_{\sigma} m \qquad Z_{\min} = \frac{\ln \alpha_{\min} + \frac{S_{\sigma}^2}{2}}{S_{\sigma}} - S_{\sigma} m$$

Значения интегралов вероятности можно принимать по таблицам интегралов вероятности или вычислять, применяя численные методы [2,3].

После этого вычисляются коэффициенты запаса по всем сечениям и сравниваются с допускаемыми, приведенными в таблице 5.

Допускаемые коэффициенты запаса.

Таблица 5.

Тип вагона	Допускаемый коэффициент запаса
Почтовые, багажные, вагоны-электростанции	2,1
Другие пассажирские	2,3
Грузовые	1,9 – 2,0

Если в результате расчета во всех сечениях оси получено  $n \geq [n]$ , то образование трещин в таких осях будет наблюдаться не чаще, чем у надежно эксплуатируемых колесных пар. При  $n < [n]$  ось имеет пониженную долговечность.

## 6. Применение вычислительной техники для расчета оси колесной пары

Как уже отмечалось, расчет оси колесной пары требует большого объема вычислений. Для упрощения расчетов, а также для сокращения числа чисто механических ошибок при вычислениях целесообразно использовать современные компьютеры и соответствующее программное обеспечение. При этом возможны два основных направления: 1 – написание вычислительной программы на алгоритмическом языке (Visual Basic, C++, Pascal и др.), 2 – использование математических пакетов (MathCad, Mathematica, MatLab и др.).

В любом варианте имеется возможность сократить объем ручного ввода данных и возложить контроль за таким вводом на компьютер. При этом необходимо предусмотреть возможность оперативной замены введенных по умолчанию данных на другие значения.

В работе предложены оба варианта программ: одна написана на Visual Basic 6.0, другая – в среде MathCad 12.

## 6.1. Программа «Расчет оси колесной пары» написанная на Visual Basic 6.0

Программа написана в полном соответствии с порядком расчета оси колесной пары, изложенным в настоящих методических указаниях.

Внешний вид работающей программы показан на рисунке 2.

Исходные данные	
Статический прогиб вагона, м	0.05
Тип вагона	Пассажирский
Тип колесной пары	РЧ1Ш-950
Обработка оси	Накатанная
Масса вагона брутто, кг	60000
Скорость движения, м/с	33
Давление ветра на боковую поверхность, Па	500
Площадь боковой проекции кузова, м кв	56
Высота приложения ветровой нагрузки над уровнем осей кол пар, м	2
Высота центра тяжести вагона над уровнем осей кол пар, м	1.1
Кэф. использования грузоподъемности вагона	1

Запас прочности [n] должен быть не менее для:  
почтовых, багажных и вагонов-электростанций - 2.1  
остальных пассажирских - 2.3  
грузовых - 1.9

Кэф. использования грузоподъемности вагона: 1

Кэф. коэффициента запаса прочности оси равен 1,56669746313736

Данные по умолчанию, определяемые типом вагона и типом колесной пары	
Половина массы пружин на буксе, кг	50
Масса колесной пары, кг	1240
Масса буксы и связанных с ней необрессоренных деталей, кг	70
Масса колеса, кг	400
Масса консольной части оси до круга катания, кг	230
Масса средней части оси между кругами катания, кг	280
Масса необрессоренных частей, жестко связанных с шейкой оси, включая самц шейк, кг	105
Масса необрессоренных частей, приходящихся на колеса, кг	105
Радиус колеса r, м	0.475
Расстояние между точками приложения вертикальной нагрузки на шейки оси 2b, м	2.036
Расстояние от середины шейки оси до круга катания колеса l2, м	0.23
Тоже до задней галтели шейки оси l3, м	0.097
Тоже до внутренней кромки кольца заднего подшипника l6, м	0.075
Расстояние от среднего сечения оси до равнодействующей сил инерции массы средней части оси (2s/3) l7, м	0.526
Эксцентриситеты приложения нагрузки от середины шеек l4 и l5, м	0.005

Рисунок 2.- Внешний вид программы «Расчет оси колесной пары»

В верхней части формы имеется область для ввода исходных данных. При этом предлагается выбор типа вагона, типа оси колесной пары и вид обработки ее поверхности. Некоторые значения предлагаются по умолчанию (например, давление ветра на боковую поверхность вагона).

На основании введенных первоначальных данных, в программе определяются данные по умолчанию (данные о массах и размерах

типовых узлов и деталей вагона). Эти данные не видны в начальный момент работы программы, но, нажав кнопку «Показать», их можно будет увидеть на экране компьютера. При этом их все можно редактировать. На кнопке надпись изменится на «Скрыть».

Такой подход позволяет оперативно вычислять коэффициенты запаса прочности оси, меняя один или несколько показателей в программе.

После ввода всех первоначальных данных, нажав кнопку «Выполнить расчет», можно увидеть вычисленные коэффициенты запаса прочности. Эта же кнопка выполняет расчет и в случае изменения данных по умолчанию.

Данные по умолчанию можно скрыть, нажав соответствующую кнопку на форме.

В программе вычисление интервалов вероятности реализовано численным методом Ньютона-Котеса [2 с. 117].

## **6.2. Программа «Расчет оси колесной пары» в среде MathCad 12**

Программа для расчета оси представляет собой стандартный MathCad-документ в котором в начале размещена область исходных данных, затем область данных по умолчанию, записанная с использованием операторов программирования среды и булевых операторов, а затем, в изложенной выше последовательности, выполняется определение действующих нагрузок, изгибающих моментов и напряжений в сечениях, и расчет коэффициентов запаса прочности оси.

Изменяя численные значения исходных данных в начале документа, можно полностью проследить процесс вычисления коэффициентов запаса прочности оси со всеми промежуточными результатами.

В приложении приводится полный текст документа «Расчет оси колесной пары».

### **Литература**

1. Вагоны. Учебник для ВУЗов ж.д. транспорта. Под ред. Л.А. Шадура. М.: Транспорт, 1980. –439 с.
2. В.П. Дьяконов. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. –240 с.

3. Волков Е.А. Численные методы. М.: Наука, 1987. – 248 с.
4. А.И. Ананьев, А.Ф. Федоров. Самоучитель Visual Basic 6.0. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2000. –624 с.
5. Е.Г. Макаров. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003. –448 с.

## **Приложение**

Mathcad-документ программы расчета оси колесной пары при  
нестационарном режиме нагружения



$$m_b := \begin{cases} 75 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \\ 70 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \\ 450 & \text{if Tip\_vagon} = 2 \\ 400 & \text{if Tip\_vagon} = 1 \end{cases}$$

- масса буксы и связанных с ней необрессоренных деталей, кг

$$m_b = 450$$

$$m_k := \begin{cases} 450 & \text{if Tip\_KP} = 4 \\ 450 & \text{if Tip\_KP} = 3 \\ 450 & \text{if Tip\_KP} = 2 \\ 480 & \text{if Tip\_KP} = 1 \end{cases}$$

- масса колеса, кг

$$m_k = 450$$

$$m_{sh} := \begin{cases} 15 & \text{if Tip\_KP} = 4 \\ 15 & \text{if Tip\_KP} = 3 \\ 15 & \text{if Tip\_KP} = 2 \\ 20 & \text{if Tip\_KP} = 1 \end{cases}$$

- масса консольной части оси до круга катания, кг

$$m_{sh} = 15$$

$$m_c := \begin{cases} 280 & \text{if Tip\_KP} = 4 \\ 270 & \text{if Tip\_KP} = 3 \\ 250 & \text{if Tip\_KP} = 2 \\ 280 & \text{if Tip\_KP} = 1 \end{cases}$$

- масса средней части оси между кругами катания, кг

$$m_c = 270$$

$$m_s := \begin{cases} 100 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \\ 105 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \\ 105 & \text{if Tip\_vagon} = 2 \\ 95 & \text{if Tip\_vagon} = 1 \end{cases}$$

- масса необрессоренных частей, жестко связанных с шейкой оси, включая саму шейку, кг

$$m_s = 105$$

$$m_{nk} := \begin{cases} 100 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \\ 95 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \\ 475 & \text{if Tip\_vagon} = 2 \\ 430 & \text{if Tip\_vagon} = 1 \end{cases}$$

- масса необрессоренных частей, приходящихся на колеса, кг

$$m_{nk} = 475$$

$$r := \begin{cases} .475 & \text{if Tip\_KP} = 4 \\ .475 & \text{if Tip\_KP} = 3 \\ .475 & \text{if Tip\_KP} = 2 \\ .525 & \text{if Tip\_KP} = 1 \end{cases}$$

- радиус колеса, м

$$r = 0.475$$

$$b_2 := \frac{2.036}{2}$$

- расстояние между точками приложения вертикальной нагрузки

на шейки оси, м

$$s_{\text{ш}} := \frac{1.58}{2}$$

- половина расстояние между кругами катания, м

$l_2 := .228$	- расстояние от середины шейки оси до круга катания колеса, м
$l_3 := .1$	- то же до задней галтели шейки оси, м
$l_6 := .09$	- то же до внутренней кромки кольца заднего подшипника, м
$l_7 := .526$	- расстояние от среднего сечения оси до равнодействующей сил инерции массы средней части оси ( $\frac{2}{3}s$ ), м
$l_4 := .01 \quad l_5 := l_4$	- эксцентриситеты приложения нагрузки от середины шеек, м
$d_1 := \begin{cases} .135 & \text{if Tip\_KP} = 1 \vee \text{Tip\_KP} = 2 \\ .13 & \text{if Tip\_KP} = 3 \vee \text{Tip\_KP} = 4 \end{cases}$	$d_1 = 0.13$ - диаметр шейки оси, м
$d_2 := .194$	- диаметр подступичной части, м
$d_3 := .165$	- диаметр средней части оси, м
$r_1 := \frac{d_1}{2}$	- радиус шейки оси, м

### Задание табличных коэффициентов

$$A := \begin{cases} .06 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \vee \text{Tip\_vagon} = 3 \\ 8.125(f_{st} - .0468) & \text{if Tip\_vagon} = 2 \vee \text{Tip\_vagon} = 1 \end{cases} \quad A = 0.026$$

$$B := 5.94 \cdot 10^{-4} \quad g := 9.81 \quad - \text{ускорение свободного падения, м/с}^2$$

$$\lambda_v := \begin{cases} 1 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \\ 1 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \\ .8 & \text{if Tip\_vagon} = 2 \\ 1 & \text{if Tip\_vagon} = 1 \end{cases} \quad \lambda_g := \begin{cases} 1 & \text{if Tip\_vagon} = 4 \\ 1 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \\ .8 & \text{if Tip\_vagon} = 2 \\ 1 & \text{if Tip\_vagon} = 1 \end{cases}$$

$$\lambda_v = 0.8 \quad \lambda_g = 0.8$$

$$C := 204 \quad D := \begin{cases} 13.2 \\ 11.5 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \wedge V \geq 30 \end{cases} \quad D = 13.2$$

$$E := 38 \quad F_k := 3.8 \quad \delta := \begin{cases} 1 \cdot 10^{-3} \\ .94 \cdot 10^{-3} & \text{if Tip\_vagon} = 3 \vee \text{Tip\_vagon} = 4 \end{cases} \quad \delta = 1 \times 10^{-3}$$

$$\eta_c := \begin{cases} .075 \\ .1 & \text{if Tip\_vagon} = 3 \vee \text{Tip\_vagon} = 4 \end{cases} \quad - \text{коэффициент боковой нагрузки} \\ \eta_c = 0.075$$

$\mu := .25$  - коэффициент трения

$\beta := .7$  - коэффициент упругости колеса

$t_0 := \begin{cases} 4 \\ 4.5 \text{ if Tip\_wagon} = 3 \vee \text{Tip\_wagon} = 4 \end{cases}$   $t_0 = 4$  - число, определяющее границы доверительного интервала статистического распределения

$m := \begin{cases} 8 \text{ if Nakat} = 0 \\ 18 \text{ if Nakat} = 1 \end{cases}$  - котангенс угла наклона кривой усталости к оси абсцисс в полулогарифмических координатах (показатель корня)  
 $m = 18$

$N_c := \begin{cases} 2.7 \cdot 10^9 \text{ if Tip\_wagon} = 3 \vee \text{Tip\_wagon} = 4 \\ 5 \cdot 10^8 \text{ if Tip\_wagon} = 1 \vee \text{Tip\_wagon} = 2 \end{cases}$  - число циклов нагружения за весь срок службы оси  
 $N_c = 5 \times 10^8$

### Начало расчета

$$P_{st} := \frac{1 + \lambda}{2} \cdot \frac{M_{br} - m_0 \cdot m_{kp} + 2 \cdot m_0 \cdot m_{sh}}{2 \cdot m_0} \cdot g \quad P_{st} = 5.189 \times 10^4$$

$$k_d := \lambda_v \cdot \left( A + \frac{B \cdot V}{f_{st}} \right) \quad k_d = 0.334$$

$$P_d := k_d \cdot P_{st} \quad P_d = 1.735 \times 10^4$$

$$H_c := \eta_c \cdot 2 \cdot P_{st} \quad H_c = 7.783 \times 10^3$$

$$P_{kc} := H_c \cdot \frac{h_k}{2 \cdot b_2} \quad P_{kc} = 4.205 \times 10^3$$

$$P_v := w \cdot F \cdot \frac{h_v}{2 \cdot b_2 \cdot m_0} \quad P_v = 2.302 \times 10^3$$

$$P_1 := P_{st} \cdot (1 + k_d) + P_{kc} + P_v \quad P_1 = 7.575 \times 10^4$$

$$P_2 := P_{st} - (P_{kc} + P_v) \quad P_2 = 4.538 \times 10^4$$

$$j_{b1} := \frac{C + D \cdot V}{\sqrt{m_{nk}}} \cdot g \quad j_{b1} = 287.893$$

$$j_{b2} := \frac{l_2}{l_2 + 2 \cdot s} \cdot j_{b1} \quad j_{b2} = 36.305$$

$$j_k := \frac{2 \cdot s}{l_2 + 2 \cdot s} \cdot j_{b1}$$

$$j_k = 251.588$$

$$P_{n1} := m_s \cdot j_{b1}$$

$$P_{n1} = 3.023 \times 10^4$$

$$P_{n2} := m_s \cdot j_{b2}$$

$$P_{n2} = 3.812 \times 10^3$$

$$P_{nk} := m_k \cdot j_k$$

$$P_{nk} = 1.132 \times 10^5$$

$$P_{nc} := .5 \cdot m_c \cdot j_k$$

$$P_{nc} = 3.396 \times 10^4$$

$$k_g := \lambda_g \cdot \delta \cdot (E + F_k \cdot V)$$

$$k_g = 0.131$$

$$H := \frac{M_{br}}{m_0} \cdot k_g \cdot g$$

$$H = 1.523 \times 10^4$$

$$R_a := P_1 \cdot \frac{l_2 + 2 \cdot s}{2 \cdot s} + P_{n1} \cdot \frac{l_2 + 2 \cdot s + l_4}{2 \cdot s} + H \cdot \frac{r + r_1}{2 \cdot s} + P_{nk} + \frac{2}{3} \cdot P_{nc} - P_2 \cdot \frac{l_2}{2 \cdot s} + P_{n2} \cdot \frac{l_2 + l_5}{2 \cdot s}$$

$$R_a = 2.565 \times 10^5$$

$$R_b := P_2 \cdot \frac{l_2 + 2 \cdot s}{2 \cdot s} - P_{n2} \cdot \frac{l_2 + 2 \cdot s + l_4}{2 \cdot s} + \frac{1}{3} \cdot P_{nc} - H \cdot \frac{r + r_1}{2 \cdot s} - P_1 \cdot \frac{l_2}{2 \cdot s} - P_{n1} \cdot \frac{l_2 + l_4}{2 \cdot s}$$

$$R_b = 3.817 \times 10^4$$

$$R_c := R_a - P_{nk}$$

$$R_c = 1.433 \times 10^5$$

$$R_d := R_b + P_{n1} \cdot \frac{l_2 + l_4}{2 \cdot s} \cdot (1 - \beta)$$

$$R_d = 3.954 \times 10^4$$

$$H_2 := \mu \cdot R_b$$

$$H_2 = 9.543 \times 10^3$$

$$H_1 := H + H_2$$

$$H_1 = 2.477 \times 10^4$$

$$M_1 := H_1 \cdot r + (1 - \beta) \cdot P_{n1} \cdot (l_2 + l_4)$$

$$M_1 = 1.392 \times 10^4$$

$$M_p := H_2 \cdot r$$

$$M_p = 4.533 \times 10^3$$

$$M_{p1} := P_1 \cdot l_6 + P_{n1} \cdot (l_6 + l_4) + H \cdot r_1$$

$$M_{p1} = 1.083 \times 10^4$$

$$M_{p2} := P_1 \cdot l_3 + P_{n1} \cdot (l_3 + l_4) + H \cdot r_1$$

$$M_{p2} = 1.189 \times 10^4$$

$$M_{p3} := P_1 \cdot l_2 + P_{n1} \cdot (l_2 + l_4) + H \cdot r_1 + M_1$$

$$M_{p3} = 3.938 \times 10^4$$

$$M_{p4} := P_1 \cdot b_2 + P_{n1} \cdot (b_2 + l_4) + H \cdot r_1 + M_1 - R_c \cdot s + P_{nc} \cdot l_7$$

$$M_{p4} = 2.773 \times 10^4$$

$$W_1 := \frac{\pi \cdot d_1^3}{32}$$

$$W_1 = 2.157 \times 10^{-4}$$

$$W_2 := \frac{\pi \cdot d_1^3}{32}$$

$$W_2 = 2.157 \times 10^{-4}$$

$$W_3 := \frac{\pi \cdot d_2^3}{32}$$

$$W_3 = 7.168 \times 10^{-4}$$

$$W_4 := \frac{\pi \cdot d_3^3}{32}$$

$$W_4 = 4.41 \times 10^{-4}$$

$$\sigma_{p1} := \frac{M_{p1}}{W_1}$$

$$\sigma_{p1} = 5.021 \times 10^7$$

$$\sigma_{p2} := \frac{M_{p2}}{W_2}$$

$$\sigma_{p2} = 5.512 \times 10^7$$

$$\sigma_{p3} := \frac{M_{p3}}{W_3}$$

$$\sigma_{p3} = 5.494 \times 10^7$$

$$\sigma_{p4} := \frac{M_{p4}}{W_4}$$

$$\sigma_{p4} = 6.288 \times 10^7$$

$$M_{st1} := P_{st} \cdot l_6$$

$$M_{st1} = 4.67 \times 10^3$$

$$M_{st2} := P_{st} \cdot l_3$$

$$M_{st2} = 5.189 \times 10^3$$

$$M_{st3} := P_{st} \cdot l_2$$

$$M_{st3} = 1.183 \times 10^4$$

$$M_{st4} := P_{st} \cdot l_2$$

$$M_{st4} = 1.183 \times 10^4$$

$$\sigma_{st1} := \frac{M_{st1}}{W_1}$$

$$\sigma_{st1} = 2.165 \times 10^7$$

$$\sigma_{st2} := \frac{M_{st2}}{W_2}$$

$$\sigma_{st2} = 2.406 \times 10^7$$

$$\sigma_{st3} := \frac{M_{st3}}{W_3}$$

$$\sigma_{st3} = 1.65 \times 10^7$$

$$\sigma_{st4} := \frac{M_{st4}}{W_4}$$

$$\sigma_{st4} = 2.682 \times 10^7$$

$$\alpha_{1\max} := \frac{M_{p1}}{M_{st1}} \quad \alpha_{1\max} = 2.319$$

$$\alpha_{2\max} := \frac{M_{p2}}{M_{st2}} \quad \alpha_{2\max} = 2.291$$

$$\alpha_{3\max} := \frac{M_{p3}}{M_{st3}} \quad \alpha_{3\max} = 3.329$$

$$\alpha_{4\max} := \frac{M_{p4}}{M_{st4}} \quad \alpha_{4\max} = 2.344$$

$$\alpha_{1\min} := \frac{150 \cdot 10^6}{2 \cdot \sigma_{st1}} \quad \alpha_{1\min} = 3.464$$

$$\alpha_{2\min} := \frac{150 \cdot 10^6}{2 \cdot \sigma_{st2}} \quad \alpha_{2\min} = 3.118$$

$$\alpha_{3\min} := \frac{130 \cdot 10^6}{2 \cdot \sigma_{st3}} \quad \alpha_{3\min} = 3.939$$

$$\alpha_{4\min} := \frac{180 \cdot 10^6}{2 \cdot \sigma_{st4}} \quad \alpha_{4\min} = 3.355$$

$$\alpha_{\min} := \begin{cases} \alpha_{\min} \leftarrow \alpha_{1\min} \\ \alpha_{\min} \leftarrow \alpha_{2\min} & \text{if } \alpha_{\min} > \alpha_{2\min} \\ \alpha_{\min} \leftarrow \alpha_{3\min} & \text{if } \alpha_{\min} > \alpha_{3\min} \\ \alpha_{\min} \leftarrow \alpha_{4\min} & \text{if } \alpha_{\min} > \alpha_{4\min} \end{cases}$$

$$\alpha_{\max} := \begin{cases} \alpha_{\max} \leftarrow \alpha_{1\max} \\ \alpha_{\max} \leftarrow \alpha_{2\max} & \text{if } \alpha_{\max} < \alpha_{2\max} \\ \alpha_{\max} \leftarrow \alpha_{3\max} & \text{if } \alpha_{\max} < \alpha_{3\max} \\ \alpha_{\max} \leftarrow \alpha_{4\max} & \text{if } \alpha_{\max} < \alpha_{4\max} \end{cases}$$

$$\alpha_{\min} = 3.118$$

$$\alpha_{\max} = 3.329$$

$$S_{\sigma} := t_0 - \sqrt{t_0^2 - 2 \cdot \ln(\alpha_{\max})}$$

$$S_{\sigma} = 0.313$$

$$z_{\max} := \frac{\ln(\alpha_{\max}) + \frac{S_{\sigma}^2}{2}}{S_{\sigma}} - S_{\sigma} \cdot m$$

$$z_{\max} = -1.632$$

$$z_{\min} := \frac{\ln(\alpha_{\min}) + \frac{S_{\sigma}^2}{2}}{S_{\sigma}} - S_{\sigma} \cdot m$$

$$z_{\min} = -1.841$$

$$\Phi_{z_{\max}} := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{z_{\max}} \frac{e^{-\frac{z_{\max}^2}{2}}}{e^{\frac{z_{\max}^2}{2}}} dz$$

$$\Phi_{z_{\max}} = -1.472$$

$$\Phi_{z_{\min}} := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{z_{\min}} \frac{e^{-\frac{z_{\min}^2}{2}}}{e^{\frac{z_{\min}^2}{2}}} dz$$

$$\Phi_{z_{\min}} = -1.844$$

$$n := \frac{2 \cdot \alpha_{\min}}{S_{\sigma}^2 \cdot (m-1)} \cdot \sqrt{\frac{10^8}{N_c \cdot (\Phi_{z_{\max}} - \Phi_{z_{\min}})}} \cdot e^{\frac{2}{2}}$$

$$n = 2.621$$

## Содержание

Введение .....	3
1. Порядок расчета оси колесной пары при нестационарном режиме нагружения .....	3
2. Исходные данные для расчета оси .....	5
2.1. Исходные данные, зависящие от типа и характеристик вагона и их обозначения .....	5
2.2. Определение данных, зависящих от типа оси и типа вагона .....	5
2.3. Другие данные .....	8
3. Определение расчетных нагрузок .....	9
4. Изгибающие моменты и напряжения в сечениях .....	11
5. Расчет коэффициентов запаса прочности оси .....	12
6. Применение вычислительной техники для расчета оси колесной пары .....	13
6.1. Программа «Расчет оси колесной пары» написанная на Visual Basic 6.0 .....	14
6.2. Программа «Расчет оси колесной пары» в среде MathCad 12 .....	15
Литература .....	15
Приложение .....	17
Содержание .....	26

Редактор: Т.И. Умурзакова

---

Подписано в печать.  
Формат бумаги 60x84 1/16

Объем 1,625 п.л.  
Тираж 50 экз. Заказ №

---

Типография ТашИИТ.

Ташкент, ул. Адылходжаева, 1