



# Приработка цилиндрических поверхностей пятниковых узлов вагонов



Николай ВОРОНИН  
Nickolay N. VORONIN

Николай ВОРОНИН (мл.)  
Nickolay N. VORONIN (Jr.)



ЗИН ЭЙ МИН  
ZIN AYE MIN

*Воронин Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.  
Воронин Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.  
Зин Эй Мин – аспирант МИИТ, Мьянма.*

**В статье даны методологические подходы к обоснованию и созданию алгоритма определения износов в пятниковых узлах вагонов и цистерн. Показано, что в начале эксплуатации зона контакта имеет небольшую протяженность, а по мере увеличения пробега вагона происходит износ цилиндрических поверхностей, и ее размер возрастает. При этом демонстрируются методика расчета сопутствующих величин и исходных данных, численный анализ износа трущихся частей конструкции. В расчетах учитывалось, что при перевозке нефтепродуктов цистерна возвращается порожняком, а сами их результаты свидетельствуют, что износ поверхностей пятниковых узлов зависит от распределения контактных давлений и зазоров между пятником и подпятником.**

*Ключевые слова:* железная дорога, цистерна, вагон, трибология, пятниковые узлы, цилиндрические поверхности, контактное давление, численный анализ, методика расчета.

**П**ятниковый узел осуществляет связь между рамой вагона и тележкой, передает вертикальные и горизонтальные нагрузки. Современные вагоны оборудуются различными конструкциями пятниковых узлов, отличающихся в основном геометрическими размерами. Трибосопряжение узла состоит из соприкасающихся опорных и цилиндрических поверхностей пятника и подпятника. Они поворачиваются относительно друг друга вокруг общей оси, но характер износа у этих поверхностей существенно различается.

В ряде работ [1, 2 и др.] описана методика расчетной оценки распределения контактных давлений и износов на опорных поверхностях пятниковых узлов грузовых вагонов. Проведенные исследования показали, что износ зависит от загруженности вагонов, его геометрических размеров, а также материалов, из которых изготовлены пятник и подпятник, условий эксплуатации – в первую очередь наличия кривизны пути и т. п.

Цилиндрические поверхности пятниковых узлов конструктивно могут иметь различные диаметры как у пятника, так и подпятника из-за заложенных допусков при изготовлении. В связи с этим в началь-

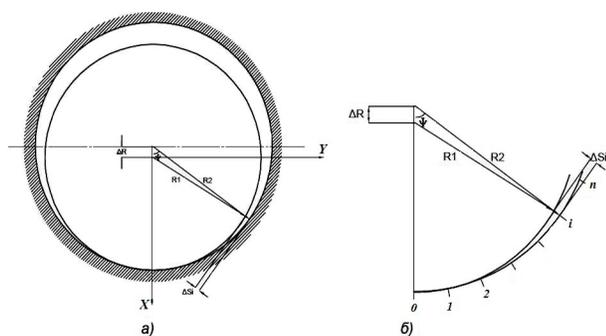


Рис. 1. Сопряжение цилиндрических поверхностей пятникового узла при совпадении тянущего усилия с его осью.

Pic. 1. Coupling of cylindrical surfaces of a center plate unit, when pulling force coincides with its axis.

ный момент эксплуатации зона контакта между ними имеет разную протяженность, а следовательно, величина контактных давлений в период приработки оказывается не одинаковой в процессе эксплуатации пар трения трущихся поверхностей. При этом изменяется такой важный параметр в зоне контакта, как распределение контактных давлений.

Повышенный износ опорной и цилиндрической поверхностей особенно значителен у пятниковых узлов 8-осных цистерн. Как показали данные экспериментального обследования, у таких цистерн после пробега 400 тыс. км износ цилиндрической поверхности подпятников составляет более 11 мм [3].

### 1.

В процессе эксплуатации пятникового узла происходит износ контактируемых поверхностей, что приводит к увеличению зазора между цилиндрическими поверхностями и изменению их геометрических размеров. Причем изменяются и площадь соприкосновения между деталями, и распределение контактных давлений по ней. То есть в расчетной модели необходимо учитывать предысторию в каждый последующий момент времени.

Поскольку величина радиального износа напрямую зависит от силы  $N(t)$ , а она от режима ведения поезда, трогания, торможения, наличия спусков и подъемов, нагруженности вагона, состояния пути — износ опорных поверхностей пятника и подпятника также зависит от этих факторов. Когда грузовой поезд начинает двигаться, пятник смещается относительно подпятника. Это наблюдается вплоть до касания цилиндрических поверхностей, и дальнейшее их упругое деформирование

происходит за счет сил натяжения, действующих между вагонами железнодорожного состава, и сил сопротивления перекачиванию колес по рельсам. Результирующую этих сил будем обозначать через  $N(t)$ , радиус неизношенной цилиндрической поверхности подпятника — через  $R_2$ , а радиус неизношенной цилиндрической поверхности пятника — через  $R_1$ , тогда первоначальный радиальный зазор  $\Delta_0$  между цилиндрическими поверхностями пятника и подпятника составит:

$$\Delta_0 = R_2 - R_1. \quad (1)$$

Учитывая, что сила  $N_0$ , прижимающая пятник к подпятнику при прямолинейном движении, образует площадку контакта, симметричную относительно точки ее приложения, то силами трения в данном случае можно пренебречь. Перемещение площадки контакта определяется по углу  $\beta$ , зависящему от радиуса кривой и базы вагона, на котором расположен пятниковый узел [4]. В этом варианте

$$\beta = 2 \cdot \arcsin \left( \frac{2l}{2R_{кр}} \right), \quad (2)$$

где  $2l$  — база вагона;  $R_{кр}$  — радиус кривизны участка пути.

Протяженность зоны контакта  $2\alpha_0$  зависит от величины силы  $N(t)$ , но обычно значительно больше  $\beta$ , так что можно считать  $\beta/\alpha_0 < 1$ .

$$N(t) = R_1 \int_{-\alpha(t)}^{\alpha(t)} p(t, \vartheta) \cos \vartheta d\vartheta. \quad (3)$$

Примем, что к центру вала приложены сила  $N_0$  и момент  $M_0$ , причем относительно оси  $OX$  сила  $N_0$  наклонена под углом  $\beta$ . Тогда проекции этой силы на оси координат будут равны:





$$\begin{aligned} X_0 &= N_0 \cos \beta, \\ Y_0 &= N_0 \sin \beta. \end{aligned} \quad (4)$$

При таком выборе координатных осей область контакта симметрична относительно оси  $OX$ . Допустим, что под действием сил  $X_0$ ,  $Y_0$  и момента  $M_0$  тела находятся в состоянии статического равновесия, а на площадке контакта кроме нормальных (радиальных) напряжений  $\sigma_r(\alpha)$  действуют силы трения (касательные напряжения). Тогда, согласно закону Кулона [5], для предельного состояния равновесия можно записать:

$$\tau(\alpha) = f \sigma_r(\alpha), \quad (5)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения,  $\alpha$  – угловая координата рассматриваемой точки на площадке контакта.

Примем также, что радиусы вала и отверстия близки, т. е.  $R_1(t) \cong R_2(t)$ , но радиальный зазор  $\Delta(t)$  отличен от нуля:

$$\begin{aligned} \Delta(t) &= R_2(0) + h_2(t,0) - R_1(0) + h_1(t,0) = \\ &= \Delta(0) + h_2(t,0) + h_1(t,0) \neq 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_j(0)$  – радиусы в начальный момент времени,  $h_j(t,0)$  – износы пятника и подпятника,  $\Delta(0)$  – начальный радиальный зазор.

Величина износа в центре площадки контакта связана с контактным давлением  $p(t,0)$  и параметрами износостойкости материалов соотношениями:

$$\begin{aligned} q(t,0) &= p(t,0)/G_1, \\ i_j &= i_{0j}/G_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$h_j(t,0) = \int_0^t \left[ \frac{q(\tau,0)}{i_j} \right]^{m_j} R_j \omega(\tau) d\tau.$$

Величина контактного давления может быть выражена в виде тригонометрического многочлена [6], содержащего  $n$  слагаемых:

$$q(t,\alpha) = \frac{\Delta(t)}{R_1} \sum_{i=1}^n b_i \sin \left[ i \arccos \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha / 2}{a} \right) \right], \quad (8)$$

где  $b_i$  – неизвестные коэффициенты, тождественно удовлетворяющие это уравнение во всех  $n$  равноотстоящих точках, находящихся в зоне контакта.

Полученную систему из  $n$  алгебраических уравнений можно решить относительно такого же количества неизвестных коэффициентов  $b_i$ .

## 2.

Усилия и моменты, возникающие в зоне контакта, вычисляются после нахождения неизвестных коэффициентов  $b_i$  по следующим выражениям [4]:

$$X^* = 2\pi \frac{\Delta(t)}{R_1} \cos(\alpha_0/2) \cdot \sum_{i=1}^n b_i i^i \left[ \sin(i\pi/2) + f \cos(i\pi/2) \right]; \quad (9)$$

$$Y^* = 2\pi \frac{\Delta(t)}{R_1} \cos(\alpha_0/2) \cdot \sum_{i=1}^n b_i i^i \left[ f \sin(i\pi/2) - \cos(i\pi/2) \right]; \quad (10)$$

$$M = 2\pi f R_1 \Delta(t) G_1 \sum_{i=1}^n b_i s^i \sin(i\pi/2), \quad (11)$$

где  $s = \operatorname{tg}(\alpha_0/4)$ ;  $f$  – коэффициент трения.

Для определения угла смещения центра области контакта  $\beta$  и угла контакта  $\alpha_0$  необходимо воспользоваться соотношениями:

$$\beta = \arctg(Y^*/X^*), \quad (12)$$

$$P_0 = X_0 / \cos \beta. \quad (13)$$

Величины износа цилиндрических поверхностей деталей трибосопряжения пятникового узла можно найти равенством [7].

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\alpha/2) &= a \cos \theta; \\ \operatorname{tg}(\chi/2) &= a \cos \phi; \\ a &= \operatorname{tg}(\alpha(t)/2). \end{aligned} \quad (14)$$

Учитывая выражение (14), область контакта протяженностью  $2\alpha$  преобразуется в отрезок прямой  $[0, \pi]$ . Разобьем полученный отрезок на  $n$  равных отрезков. Угол  $\theta_k$ , образованный радиусами, проведенными через соседние точки, можно определить выражением:

$$\theta_k = \frac{k\pi}{n+1}. \quad (15)$$

При разработке алгоритма определения износов цилиндрических поверхностей пятниковых узлов за основу был принят алгоритм, предназначенный для вычисления износов на опорных поверхностях [1]. Принимая во внимание, что между цилиндрическими поверхностями имеются зазо-

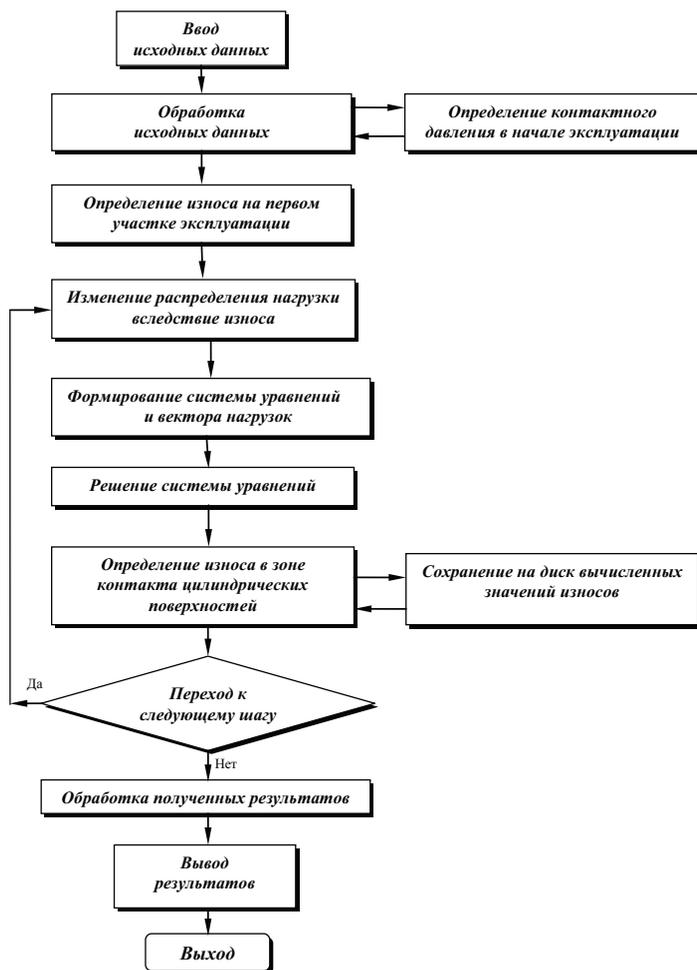


Рис. 2. Укрупненная схема вычисления износов в пятниковом узле.

Fig. 2. Enlarged scheme of wear calculation in a center plate unit.

ры, потребовались переработка алгоритма и программа расчета. С этой целью цилиндрические поверхности были представлены в виде пластин, отстоящих друг от друга на величину зазора. Первоначальная зона контакта и последующее ее изменение определялись по специально созданной программе, учитывающей контактное взаимодействие двух цилиндрических поверхностей вал-втулка [7]. Величину зазора для каждой точки цилиндрической поверхности пятникового узла можно найти, зная первоначальные размеры пятника и подпятника. На рис. 1 приведена схема, поясняющая эту задачу. За величину зазора в каждой точке пятникового узла приняты расстояния отрезков прямых ( $\Delta S_i$ ), проведенных из центра подпятника и ограниченных цилиндрическими поверхностями.

Для определения отрезков  $\Delta S_i$  была получена зависимость, учитывающая радиусы пятника и подпятника, а также угол

$\Psi$ , образованный проведенной прямой к точке зазора и направлением тянущего усилия, совпадающего с продольной осью вагона.

Чтобы вычислить зазор по длине окружности между цилиндрическими поверхностями пятника и подпятника, дуга окружности разбивается на  $n$  равных отрезков и для них определяются расстояния  $\Delta S_i$  (см. рис. 1):

$$\Delta S_i = R_2 - \left[ R_1 \cos \left\{ \arcsin \left( \frac{\Delta_R \sin \Psi}{R_1} \right) \right\} + \right. \\ \left. + \Delta_R \cos \Psi \right], \quad (16)$$

где  $\Delta_R = R_2 - R_1$ .

### 3.

С целью проведения численного анализа износов цилиндрической поверхности в пятниковых узлах вагонов на основе полученных уравнений разработаны алгоритм, укрупненная схема которого приве-



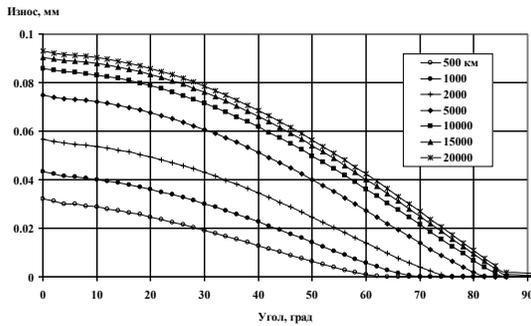


Рис. 3. Изменение зоны контакта и величины износа.  
Pic. 3. Change in the contact area and wear figures.

дена на рис. 2, и программа, учитывающая величину износа в сопряжении пятникового узла. В качестве исходной информации в ней используются параметры вагона, механические характеристики материалов пятника и подпятника, протяженность зоны контакта, а также зазор между пятником и подпятником, величина пробега, загруженность вагона и др.

Блок «Ввод исходных данных» на схеме служит для ввода в память компьютера геометрических размеров пятника и подпятника, свойств материалов, из которых они изготовлены, а также характеристик режимов нагружения, необходимых для проведения численных экспериментов.

После ввода числового значения управление передается в блок «Обработка исходных данных». В нем проводится проверка корректности введенных значений и очистка рабочих массивов, используемых в дальнейших вычислениях. Вычисляются зазоры по длине, зона контакта между цилиндрическими поверхностями пятника и подпятника в зависимости от отклонений их размеров от номинальных, указанных на чертежах. Для этой цели окружности разбиваются на  $n$  равных отрезков и определяются расстояния  $\Delta S_i$  до цилиндрической поверхности подпятника (см. рис. 1).

В блоке «Определение контактного давления» вычисляются величины контактных давлений в зависимости от размеров пятника и подпятника и с учетом тянущего усилия  $N(t)$ .

Следующий затем блок «Определение износа на первом участке эксплуатации» предполагает установление искомого значения в ограниченной зоне контакта в начальный период эксплуатации — они являются исходной информацией для последующих вычислений изменения

контактных давлений и износов в зависимости от пробега вагона и характеристики пути.

Блок «Формирование системы уравнений и вектора нагрузок» необходим для создания элементов матрицы системы уравнений и вектора нагрузок. В нем производится заполнение величин распределения контактных давлений в пятниковом узле, с помощью которых устанавливаются величины износов на различных участках трибосопряжения.

После полного формирования системы уравнений эстафета передается блоку «Решение системы уравнений».

В блоке «Определение износа в зоне контакта цилиндрических поверхностей» оценивается характер изменения износов с учетом величин контактных давлений. Далее наступает очередь блока «Сохранение на диск вычисленных значений износов».

В логическом блоке «Переход к следующему шагу» выявляется необходимость дальнейшего определения износа. При выполнении всех шагов, предусмотренных исходными данными, вычислительный процесс заканчивается.

Блок «Обработка полученных результатов» обеспечивает заполнение массивов для графического представления результатов с использованием данных, сохраненных на диске.

Блоком «Вывод результатов» в численном виде выдается на экран имеющаяся информация и по ней строятся графики изменения износов в зоне контакта.

На основе разработанного алгоритма написана программа расчета износа цилиндрических поверхностей в пятниковом узле в зависимости от их геометрических размеров, материалов и условий эксплуатации.

На рис. 3 приведено изменение износов цилиндрических поверхностей пятниково-го узла для 4-осной цистерны с учетом величины их пробега в период приработки по одному и тому же маршруту.

## ВЫВОДЫ

Из полученных данных видно, что в начальный период зона контакта имеет небольшую протяженность, а при пробеге размер ее увеличивается за счет возрастания износов.

Численные исследования показали, что износ поверхностей пятниковых узлов зависит от распределения контактных давлений и зазоров между пятником и подпятником. В расчётах учитывалось, что при перевозке нефтепродуктов цистерна возвращается порожняком.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин Н. Н., Воронин Н. Н., Зин Эй Мин. Износы в пятниковых узлах цистерн // Мир транспорта. – 2013. – № 1. – С. 30–35.
2. Воронин Н. Н., Воронин Н. Н., Филиппов В. Н. Влияние загруженности и типа вагона на износ пятникового узла // Транспорт, наука, техника, управление. – 2000. – № 4. – С. 27–29.
3. Аксёнов Ю. Н., Богачёв А. Ю., Павлов Н. В., Голышев А. И. Анализ характеристик износа пятниковых зон надрессорных и соединительных балок // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 3. – С. 40–45.
4. Воронин Н. Н. Разработка метода оценки ресурса пятникового узла вагона по критерию износа / Дис... канд. техн. наук: – М., 1999. – 141 с.
5. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: Оникс; Мир и образование, 2006. – 1056 с.
6. Каландия А. И. Математические методы двумерной упругости. – М.: Наука, 1973. – 303 с.
7. Теплый М. И. Контактные задачи для областей с круговыми границами. – Львов: Вища школа, 1983. – 176 с. ●

## RUNNING IN OF CYLINDRICAL SURFACE OF CENTRE PLATE UNITS OF CARS

**Voronin, Nickolay N.** – D. Sc. (Tech.), Professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Voronin, Nickolay. N. (Jr.)** – Ph.D. (Tech.), Associate Professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

**Zin Aye Min** – Ph. D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Myanmar.

### ABSTRACT

*This article presents an algorithm and its description to determine wear in center plate units of cars and rail tanks. It is shown that in the beginning of operation contact area has a small length, and with the growth of the car's distance run, wear of cylindrical surfaces occurs and its size increases. At the same time the method of calculating the respective quantities and source data, numerical analysis of wear of rubbing parts of the structure is demonstrated. The calculations took into account that when the oil was transported, rail tank returned empty, and their own results show that wear of center plate units' surfaces depends on the contact pressure distribution and gaps between center plate and center pad.*

### ENGLISH SUMMARY

#### Background.

Centre plate unit provides connection between the frame of the car and bogie, passes vertical and horizontal loads. Modern cars are equipped with various designs of centre plate units, differing mainly in geometric dimensions. Tribocoupling of centre plate units consists of contacting support and cylindrical surfaces of centre plate and centre pad. They turn relative to each other about a common axis, but the nature of the wear of these surfaces varies considerably.

A number of studies [1, 2, etc.] describes a method of estimation of distribution of contact pressure and wear on the supporting surfaces of centre plate units of freight cars. Studies have shown that wear depends on the load of cars, their geometrical dimensions, as well as on the materials

*from which centre plates and centre pads are made, and on operating conditions – primarily on the presence of track curvature, etc.*

*Cylindrical surfaces of centre plates constructively can have different diameters of centre plate as well as of centre pad due to inherent manufacturing allowances. In this connection, at the initial moment of operation contact zone between them is of varying length and hence the magnitude of the contact pressure in the running-in period is not the same during the operation of friction pairs of rubbing surfaces. This changes such an important parameter in the contact zone as the distribution of contact pressure.*

*Increased wear of supporting and cylindrical surfaces is particularly significant for centre plate units of 8-axle rail tanks. As it is shown by the data of the pilot survey, in such rail tanks after 400 thousand km mileage wear of cylindrical surface of centre pads is more than 11 mm [3].*

#### Objective.

*The objective of the authors is to show methodological approaches to justification and creation of a special algorithm of calculating wear of center plate units of cars and rail tanks.*

#### Methods.

*The study is based on mathematical methods and calculations.*

#### Results.

*During operation of centre plate unit, wear of contact surfaces occurs, which leads to the increase in the gap between cylindrical surfaces and changes in their geometrical dimensions. Besides there are changes in the area of contact between the parts and the distribution of contact pressure on it. That is, in the*

