

УДК 629.463.3:519.6

НАУКА И ТЕХНИКА

# Контактные давления на цилиндрических поверхностях пятникового узла



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 (мл.) – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия. Зин Эй Мин – аспирант МИИТ, Республика Мьянма.*

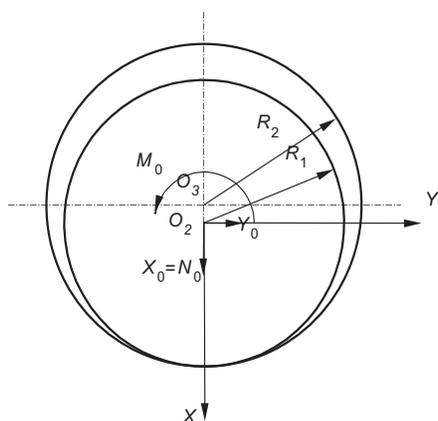
**Одним из основных факторов, влияющих на величину и характер износа, является контактное давление в зоне сопряжения. В случае цилиндрических поверхностей распределения контактных давлений по зоне сопряжения неравномерны. Для проведения численного анализа влияния различных диаметров пятника и подпятника на изменение контролируемых величин была разработана компьютерная программа. Полученные результаты показали, что величины контактных давлений зависят от зазора между пятником и подпятником. В начальный момент эксплуатации они для номинальных значений диаметров пятника и подпятника меньше, чем при изготовлении их с допустимыми отклонениями.**

*Ключевые слова:* железная дорога, цистерна, трибология, пятниковые узлы, контактное давление, численный анализ.

**В** процессе эксплуатации подвижного состава особое внимание уделяется высоконагруженным узлам и деталям, к которым относятся и пятниковые узлы. Такой узел обеспечивает опору кузова подвижного состава на тележки и работает в условиях трения под нагрузкой, он должен обладать достаточной прочностью и износостойкостью.

Трибосопряжение пятникового узла состоит из двух пар соприкасающихся опорных и цилиндрических поверхностей пятника и подпятника. Они поворачиваются относительно друг друга вокруг общего центра, но контактные давления и характер износа у этих поверхностей существенно отличаются.

В ряде работ [1–3 и др.] описана методика расчетной оценки распределения контактных давлений и износов на опорных поверхностях пятниковых узлов грузовых вагонов и показано влияние различных факторов на их работоспособность. Контактные давления для этих поверхностей зависят главным образом от тары и загруженности вагона, и несколько изменяют свой характер распределения в зависимости от величины износа, особенно на этапе приработки. Износ опорных поверхностей



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

**Fig. 1.** Connection of cylindrical surfaces of central plate arrangement when traction effort coincides with its axle.

при этом зависит и от геометрических размеров вагона — в частности его базы, материалов пятника и подпятника, условий эксплуатации, в том числе наличия кривых, имеющих малый радиус, и т. п.

Цилиндрические поверхности пятниковых узлов конструктивно имеют различные радиусы пятника и подпятника. В начальный момент эксплуатации зона контакта между ними получает небольшую протяженность, а следовательно, и величина контактных давлений, зависящая от тягового усилия, приобретает большее значение в центре этой зоны.

Для описания первоначального распределения контактных давлений на цилиндрических поверхностях пятника и подпятника, имеющих разности диаметров, примем, что зона контакта расположена симметрично относительно действующей силы и уменьшается с увеличением расстояния от центра ее приложения.

В этом случае расчетная схема для определения контактных давлений на цилиндрических поверхностях пятника и подпятника строится с учетом того, что пятник представляет собой толстый круглый диск находящийся внутри отверстия, расположенного в центре массивного тела и закрепленного по контуру. Тогда соотношение между радиусами расчетной модели можно записать в виде  $R_3 - R_2 \gg R_2 - R_1 = \Delta_0$  (рис. 1), где  $R_3$  — расстояние до точек закрепления массивного тела.

Учитывая, что сила  $N_0$ , прижимающая пятник к подпятнику при прямолинейном движении, образует площадку контакта, симметричную относительно точки ее

приложения, то силами трения при определении нормального контактного давления можно пренебречь. Однако при движении в кривой тянущее усилие не совпадает с продольной осью вагона, и площадка контакта перемещается (рис. 2), что требует учета сил трения. Положение площадки контакта можно определить по углу  $\beta$ , зависящему от радиуса кривой и базы вагона, на котором расположен пятниковый узел [4]. В этом случае

$$\beta = 2 \cdot \arcsin \left( \frac{2l}{2R_{кр}} \right), \quad (1)$$

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

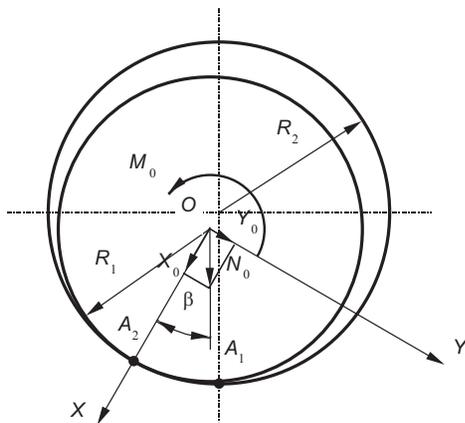
В процессе эксплуатации подвижного состава реализуется то одна, то другая схема нагружения (вал во втулке), продолжительность процессов зависит от характера пути. Применительно к трибосопряжению пятникового узла первая схема расчета соответствует условиям, близким к эксплуатации рассматриваемого узла на прямолинейном участке пути, а вторая — при движении в кривой.

В ряде работ [5–8 и др.] показано влияние сил трения на внутренний контакт цилиндрических тел близких радиусов с учетом касательных сил. Если упругие свойства материалов контактируемых тел одинаковы, то решение задачи о нахождении контактного давления упрощается, и для этого случая в [6] дается точное решение. Однако пятник и подпятник изготавливаются из разных материалов, что отражается при разработке расчетной модели.



Рис. 2. Сопряжение цилиндрических поверхностей пятникового узла при несовпадении тянущего усилия с его осью.

Pic.2. Connection of cylindrical surfaces of central plate arrangement when traction effort doesn't coincide with its axle.



Для определения области контакта с начальным радиальным зазором  $\Delta(t)$ , отличным от нуля, но с близкими радиусами вала и отверстия  $R_1 \cong R_2$ , безразмерное контактное давление может быть выражено в виде тригонометрического многочлена [9], содержащего  $n$  слагаемых:

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

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

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

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

$$X^* = 2\pi \frac{\Delta(t)}{R_1} \cos(\alpha_0/2) \sum_{i=1}^n b_i i s^i \left[ \sin(i\pi/2) + f \cos(i\pi/2) \right]; \quad (3)$$

$$Y^* = 2\pi \frac{\Delta(t)}{R_1} \cos(\alpha_0/2) \sum_{i=1}^n b_i i s^i \left[ f \sin(i\pi/2) - \cos(i\pi/2) \right]; \quad (4)$$

$$M = 2\pi f R_1 \Delta(t) G_1 \sum_{i=1}^n b_i s^i \sin(i\pi/2). \quad (5)$$

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:

$$\beta = \operatorname{arctg}(Y^*/X^*), \quad (6)$$

$$P_0 = X_0 / \cos \beta. \quad (7)$$

Последнее равенство представляет собой трансцендентное уравнение относительно  $\alpha_0$ . Для проведения численного анализа по величинам контактных давлений, протяженности зоны контакта и зазоров между пятником и подпятником в трибосопряжении пятникового узла с использованием полученных уравнений был разработан алгоритм, укрупненная схема которого приведена на рис. 3.

Блок «Ввод исходных данных» передает в память компьютера геометрические размеры пятника и подпятника, свойства материалов, из которых они изготовлены, а также характеристик и режимов нагружения.

В блоке «Обработка исходных данных» проводится проверка корректности введенных значений, и при обнаружении ошибки программа требует повторить ввод исходных данных (блок «Корректировка исходных данных»).

Далее включается блок «Заполнение элементов матрицы системы уравнений».

В блоках «Определение зазора» и «Изменение зазора» производится выбор зазора между пятником и подпятником, для которого важны протяженность зоны контакта и распределение в ней давлений.

В блоке «Формирование вектора нагрузок» происходит заполнение столбца свободных членов системы уравнений.

После полного формирования системы уравнений и вектора столбца свободных

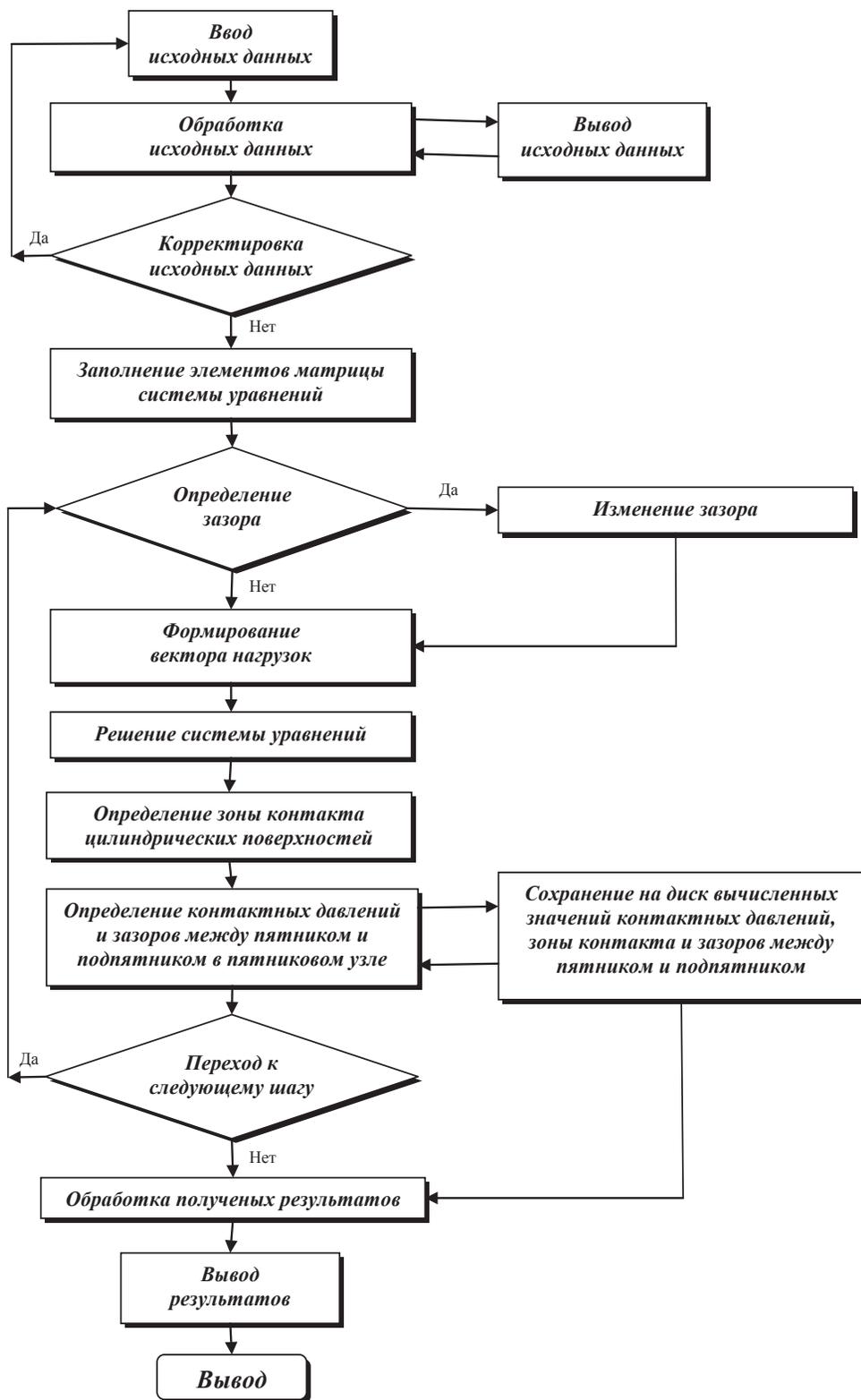
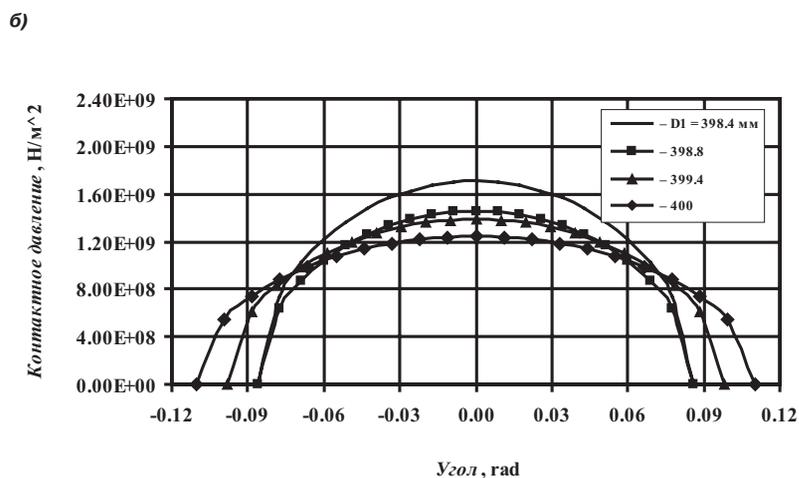
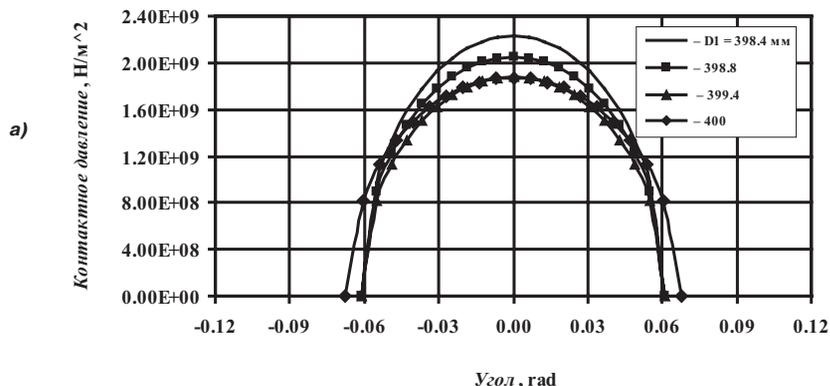


Рис. 3. Укрупненная схема вычисления контактных давлений, зоны контакта и зазоров между пятником и подпятником.

Fig.3. Block diagram of calculation of contact pressure, zones of contact and clearances between top and bottom parts of center plate arrangement.





**Рис. 4.**  
Распределение  
контактных  
давлений  
в пятниковом  
узле 8-осной  
цистерны:  
а)  $D_2 = 405$  мм;  
б)  $D_2 = 402$  мм.

**Рис. 4.**  
Distribution of  
contact pressure  
in center plate  
arrangement  
of 8-axle  
tank wagon:  
а)  $D_2=405$  mm,  
б)  $D_2=402$  mm.

членов продолжение операции передается блоку «Решение системы уравнений», где главенствует метод Гаусса.

В блоках «Определение зоны контакта цилиндрических поверхностей» и «Определение контактных давлений и зазоров между пятником и подпятником в пятниковом узле» вычислительный процесс осуществляется следующим образом. Задаются величины  $\alpha_0, f, R_1, \Delta(0), E_j, \nu_j$ , по которым вычисляются коэффициенты  $b_j$ , а по ним с помощью приведенных соотношений (3) – (7) определяются величины  $P_0, M, \beta$ . Задавая последовательно несколько значений  $\alpha_0$ , подбирается такой размер площадки контакта, при котором вычисленное  $q(t, \alpha)$  соответствует заданному значению нагрузки  $N_0$ .

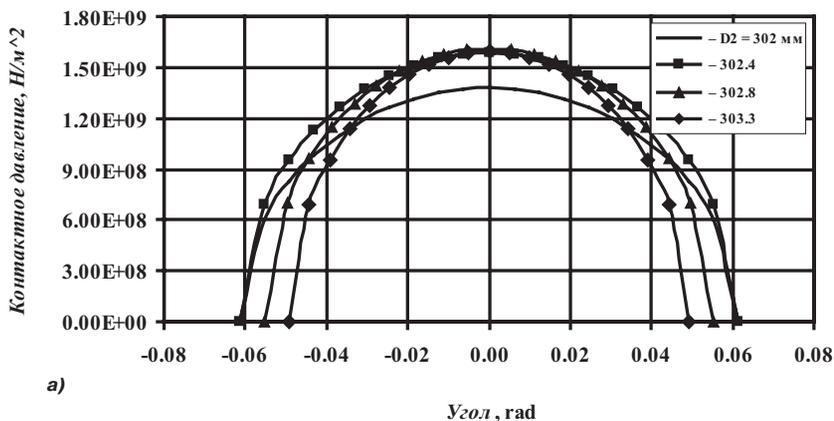
Блок «Сохранение на диск вычисленных значений контактных давлений, зоны контакта и зазоров между пятником и подпятником» непосредственно связан с логическим блоком «Переход к следующему шагу». При выполнении всех заданных

шагов вычислительный процесс заканчивается.

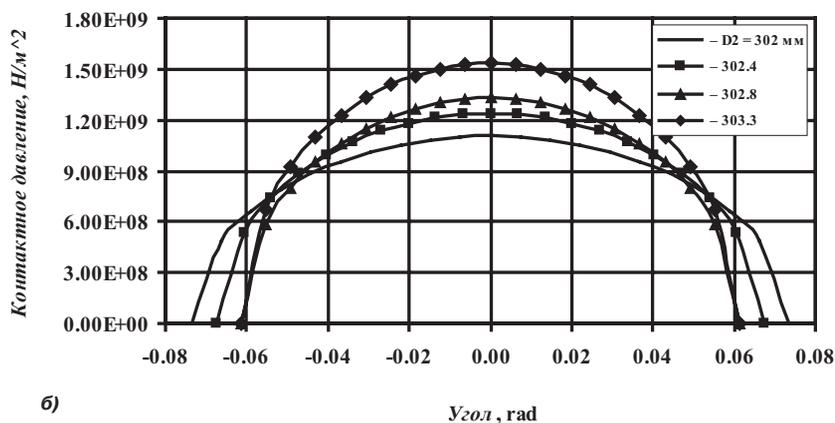
В блоке «Обработка полученных результатов» производится заполнение выходных массивов для графического представления материалов, а блок «Вывод результатов» в численном виде дает их на экран и по ним строятся графики распределения давлений в зоне контакта.

На основе разработанного алгоритма написана программа расчета определения зоны контакта цилиндрических поверхностей, контактных давлений и зазоров между пятником и подпятником.

В качестве примера на рис. 4 и 5 приведены распределения контактных давлений в пятниковых узлах 8-осной цистерны от продольной силы в соответствии с существующими нормами [10]. Данные несколько идеализированы и соответствуют случаю, когда направление продольной силы не меняется в процессе движения. Из приведенных распределений видно, что при строгом следовании чертежным раз-



а)



б)

**Рис. 5.**  
Распределение  
контактных  
давлений  
в пятниковом  
узле тележки  
8-осной цистерны:  
а)  $D1 = 299$  мм;  
б)  $D1 = 300$  мм.

**Pic.5.** Distribution  
of contact pressure  
in center plate  
arrangement of  
8-axle tank wagon:  
а)  $D1=299$  mm,  
б)  $D1=300$  mm.

мерам зона контакта имеет небольшую протяженность, величины давлений достигают максимальных значений в центре данной зоны, а их распределения носят параболический характер. При отступлении от чертежных размеров в сторону, когда размеры диаметров пятника ( $D1$ ) и подпятника ( $D2$ ) сближаются, зона контакта расширяется, а максимальное контактное давление снижается. В пятниковом узле между соединительной балкой и цистерной (рис. 4) зона контакта имеет большую протяженность по сравнению с зоной контакта между соединительной балкой и 2-осной тележкой (рис. 5), что связано с различными их диаметрами.

Полученные контактные давления используются для определения износов и ресурса работы пятниковых узлов вагонов.

## 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. Воронин Н. Н. Алгоритм расчетной оценки износа пятникового узла вагона // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда в условиях Сибирского региона: Межвуз. темат. сборник науч. трудов. – Омск: ОмГУПС, – 1998. – С. 34–39.

4. Воронин Н. Н. Разработка метода оценки ресурса пятникового узла вагона по критерию износа / Дис ... канд. техн. наук: – М., 1999. – 141 с.

5. Теплый М. И. Контактные задачи для областей с круговыми границами. – Львов: Вища школа, 1983. – 176 с.

6. Панасюк В. В., Теплый М. И. Об одной контактной задаче с учетом сил трения // Прикладная механика. – 1972. – Т. 8, Вып. 7. – С. 8–14.

7. Морарь Г. А., Попов Г. Я. К теории контактных задач для цилиндрических тел с учетом сил трения // Механика твердого тела. – 1976. – № 2. – С. 87–96.

8. Теплый М. И. Влияние трения на распределение напряжений во вращательной паре // Машиностроение. – 1981. – № 6. – С. 12–16.

9. Каландия А. И. Математические методы двумерной упругости. – М.: Наука, 1973. – 303 с.

10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с. ●

