

Е. П. Пичуев<sup>1</sup>, В. Ю. Линейцев<sup>1</sup>, Г. И. Комогорцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

## УЧЕТ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРЕХМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С МАЛОЙ КОНУСНОСТЬЮ

**Аннотация.** В статье кратко описаны примеры применения конических соединений в различных узлах и механизмах машин, дан упор на соединения с малой конусностью. Введены условные понятия конический вал и коническая втулка и их сопряжение по конической поверхности. Отражено влияние конусности и шероховатости на точность и прочность конического соединения, а также ряда других параметров. Описано свойство самоторможения соединений с малой конусностью, которое позволяет обеспечивать точность на конце рабочего органа и передавать крутящий момент без приложения сборочной силы.

Написанное ранее программное обеспечение для выполнения имитационного моделирования сборки деталей конического соединения позволило проанализировать влияние сил трения на процесс сопряжения и определить характер контактного взаимодействия реальных конических поверхностей. Сделан вывод, что наличие трения приводит к постепенному затуханию колебаний, возникших при соударениях взаимодействующих поверхностей. Описано влияние сил трения при сборке на формальном языке и предложены пути его учета в случае разборки соединения с малой конусностью.

Проведенный анализ говорит о том, что необходимо опытным путем формализовать влияние сил трения покоя при решении вопросов по разъединению деталей собранного конического соединения с малой конусностью. В основу решения данного вопроса поставлена зависимость модуля максимального трения покоя от нормальных сил, действующих по конической поверхности при контактном взаимодействии вала и втулки.

**Ключевые слова:** силы трения, трение покоя, моделирование, взаимодействие конических поверхностей, уравнения движения.

Е. P. Pichuev<sup>1</sup>, V. YU. Lineycev<sup>1</sup>, G. I. Komogortzev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zabaikalsky Institute of railway transport, Chita, Russian Federation.

## CONSIDERATION OF FRICTION FORCES IN MODELING THREE-DIMENSIONAL MOTION OF CONICAL SURFACES WITH A SMALL CONE

**Abstract.** The article briefly describes examples of the use of conical connections in various units and mechanisms of machines, focusing on connections with a small taper. The conventional concepts of a conical shaft and a conical bushing and their conjugation along a conical surface are introduced. The influence of taper and roughness on the precision and strength of the conical connection, as well as a number of other parameters, is reflected. The property of self-braking of connections with a small taper is described, which makes it possible to ensure accuracy at the end of the working body and transmit torque without applying assembly force.

Previously written software for performing simulation modeling of the assembly of conical joint parts allowed us to analyze the effect of friction forces on the coupling process and determine the nature of contact interaction of real conical surfaces. It is concluded that the presence of friction leads to a gradual damping of vibrations that occur when interacting surfaces collide. The influence of friction forces during assembly in a formal language is described and ways to account for it in the case of disassembly of a connection with a small taper are proposed.

The analysis shows that it is necessary to experimentally formalize the influence of the static friction forces when solving problems on the separation of parts of an assembled conical joint with a small taper. The solution to this problem is based on the dependence of the maximum static friction modulus on the normal forces acting on the conical surface during the contact interaction of the shaft and the bushing.

**Keywords:** the friction force, static friction, modeling, interaction of the conical surfaces, the equations of motion.

### Введение

В настоящее время известны примеры применения конических соединений в различных узлах и механизмах машин. Рабочими поверхностями таких соединений являются две конические поверхности – внешняя коническая поверхность (условное название - вал) и

внутренняя коническая поверхность (условное название - втулка). Обе конические поверхности должны быть изготовлены с определенными допусками, особенно если через их сопряжение будут передаваться какие-либо силы или моменты.

Одними из основных характеристик нагруженных конических поверхностей являются конусность, т.е. отношение разности диаметров на концах конуса к его длине и шероховатость поверхностей. Чем меньше конусность и выше класс шероховатости, тем будет выше точность сборки соединения, а само коническое соединение будет способно передать большие усилия при прочих равных характеристиках таких как, материал вала и втулки, размеры и форма конического профиля и т.п.

Конические соединения с малой конусностью (менее 1:10) обладают свойствами самоторможения, т.е собранное под действием сборочной силы коническое соединение остается в таком состоянии и после ее снятия и при этом данное соединение способно выполнять полезную работу, т.е. обеспечивать точность на конце рабочего органа и передавать крутящий момент. А для разборки соединения необходимо приложить внешнюю силу в несколько раз большую исходной силы затяжки.

### Учет сил трения при формировании конического сопряжения

Обеспечивается это в т.ч. и силами трения, которые при сборке соединения учитываются как силы трения скольжения, а при самоторможении и разборке соединения силы трения покоя. На рисунке 1 показан процесс сборки соединения под действием сборочной силы.

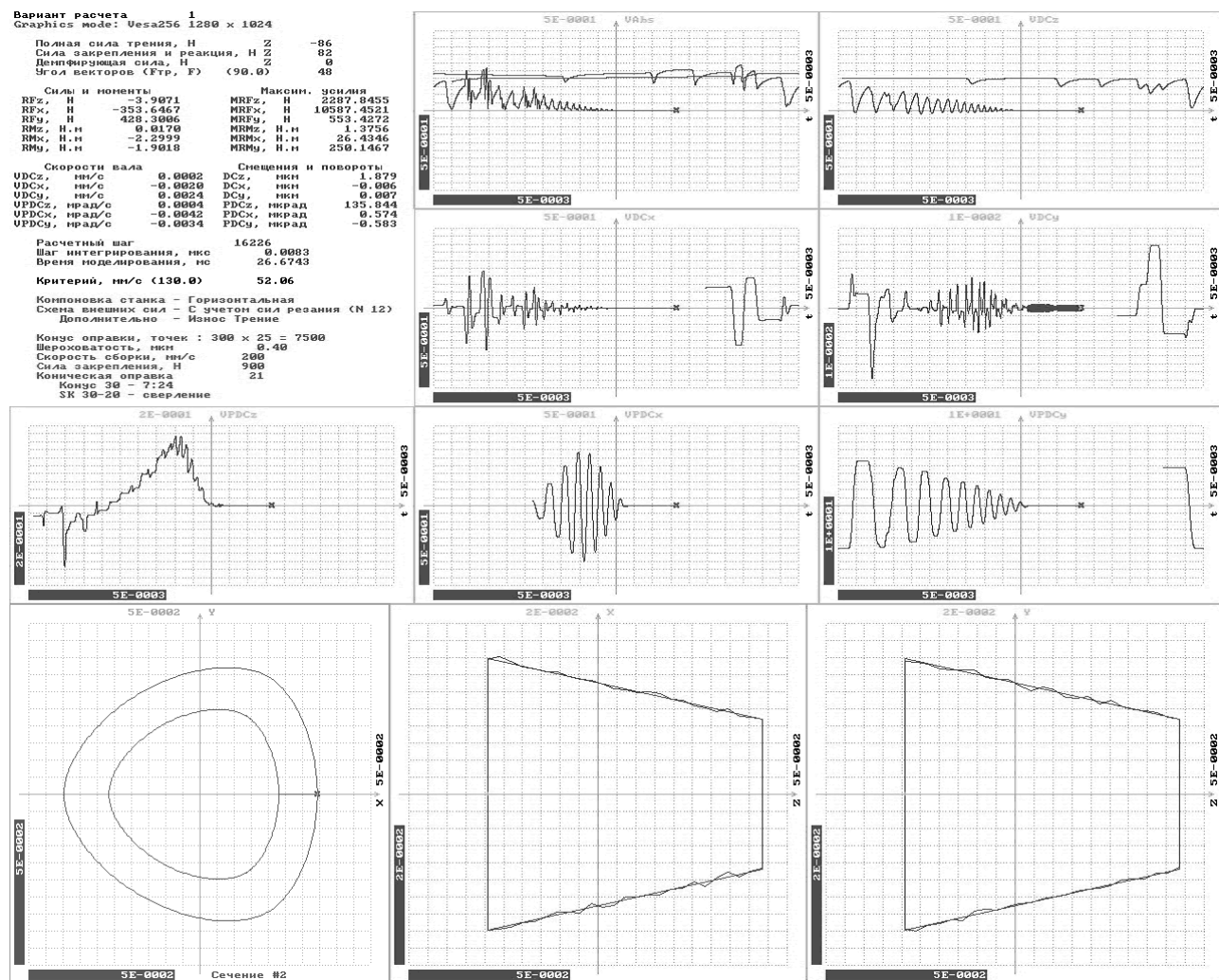
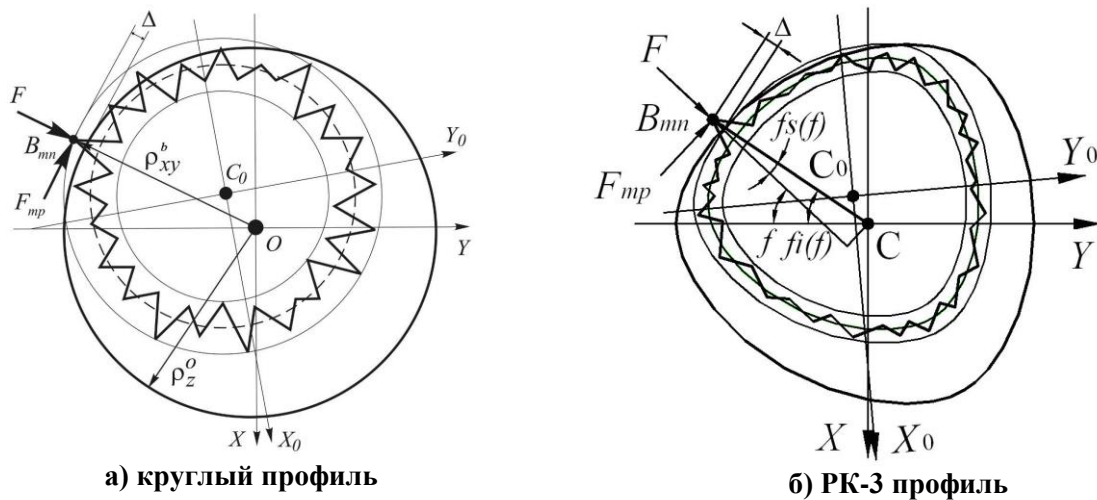


Рис. 1. Моделирование процесса сопряжения РК-3 профильных деталей

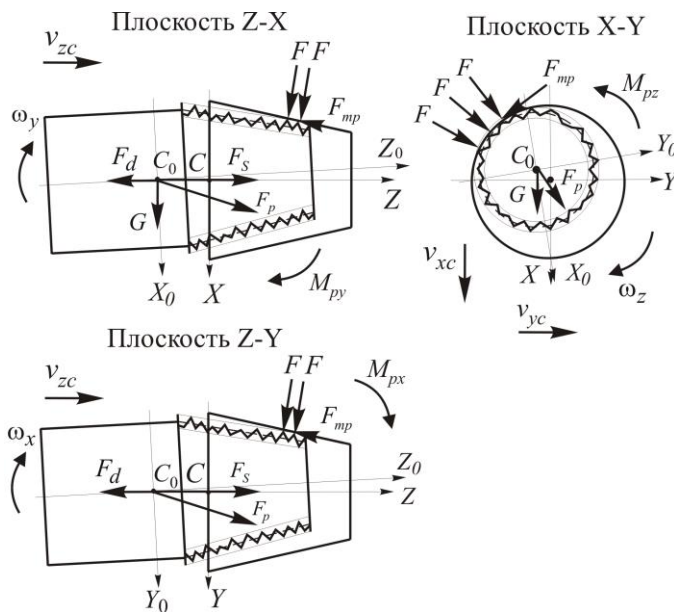


а) круглый профиль

б) РК-3 профиль

Рис. 2. Расчетная модель контактного взаимодействия конических поверхностей

Детальное изучение процесса сборки соединения показывает, что наличие трения приводит к постепенному затуханию колебаний вала в отверстии втулки при образовании конического соединения. При этом имитационная модель предполагает учет сил трения скольжения, которые в каждой контактной точке (рис.2) направлены против скорости скольжения данной точки вала по поверхности отверстия втулки и уравнения на рисунке 3 это подтверждают [1].



Полная сила трения скольжения в контактной точке определяется зависимостью (1)

$$F_{\delta\delta} = f \cdot F \quad (1)$$

Распределение силы трения по проекциям

$$F_{z\delta\delta} = -F_{\delta\delta} \cdot \frac{v_z}{v},$$

$$F_{x\delta\delta} = -F_{\delta\delta} \cdot \frac{v_x}{v},$$

$$F_{y\delta\delta} = -F_{\delta\delta} \cdot \frac{v_y}{v}. \quad (2)$$

В данных формулах  $f$  – коэффициент трения скольжения,  $F$  и  $F_{mp}$  – контактная сила и сила трения,  $v$ ,  $v_z$ ,  $v_x$ ,  $v_y$  – абсолютная скорость и ее проекции по координатным осям.

Рис. 3. Движение вала под действием сил контактного взаимодействия

В случае разборки соединения с малой конусностью, как и в случае его функционирования без силы затяжки смоделировать процессы работы соединения имеет смысл, если заменить силы трения скольжения на силы трения покоя. При этом для обеспечения равновесия в коническом соединении силы трения покоя должны быть противоположно направлены суммарной составляющей распорных сил.

Следует отметить, что силы трения покоя должны быть заведомо больше распорных сил для обеспечения равновесия системы самотормозящего конического соединения в целом. Тогда убирая составляющие силы затяжки из общих уравнений движения конического вала в отверстии втулки [1: формула 2.34] можно получить в проекциях уравнения равновесия самотормозящего конического соединения (3):

$$\begin{aligned}
F_{pz} &= -\sum_{m,n} F_z^{mn} + \sum_{m,n} F_{0z\delta\delta}^{mn}, & M_{pz} &= -\sum_{m,n} M_z^{mn} + \sum_{m,n} M_{0z\delta\delta}^{mn}, \\
F_{px} &= G - \sum_{m,n} F_x^{mn} + \sum_{m,n} F_{0x\delta\delta}^{mn}, & M_{px} &= -\sum_{m,n} M_x^{mn} + \sum_{m,n} M_{0x\delta\delta}^{mn}, \\
F_{py} &= -\sum_{m,n} F_y^{mn} + \sum_{m,n} F_{0y\delta\delta}^{mn}, & M_{py} &= -\sum_{m,n} M_y^{mn} + \sum_{m,n} M_{0y\delta\delta}^{mn},
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $m, n$  - индексы контактных точек поверхности конического вала;

$\sum_{m,n} F_z^{mn}$ ,  $\sum_{m,n} F_x^{mn}$ ,  $\sum_{m,n} F_y^{mn}$  - распорные силы, действующие по всем контактным точкам;

$\sum_{m,n} F_{0z\delta\delta}^{mn}$ ,  $\sum_{m,n} F_{0x\delta\delta}^{mn}$ ,  $\sum_{m,n} F_{0y\delta\delta}^{mn}$  - суммарные силы трения покоя.

Сложность моделирования разборки самотормозящего конического соединения (соединения с малой конусностью) заключается в том, что пока не представляется возможным математически точно определить модуль силы трения покоя. Известно лишь, что максимальная сила трения покоя обычно несколько выше, чем сила трения скольжения и определяется она через коэффициент трения покоя  $f_0$  по формуле вида

$$F_{0\delta\delta} = f_0 \cdot F \quad (4)$$

### Заключение

Проведённые в настоящей статье рассуждения позволяют на первоначальном этапе смоделировать разборку конического соединения как круглого, так и РК-3 профильного (рис.2). Для разборки подобного соединения к нему необходимо приложить внешнюю силу, которая в сумме с распорными силами, действующими по поверхности соединения, позволить преодолеть силы трения покоя и разъединить конический вал и втулку с малой конусностью. Задаваясь коэффициентом трения покоя  $f_0$ , появляется возможность «заглянуть» внутрь процессов, происходящих при разборке самотормозящего конического соединения [2-4].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Линейцев В.Ю. Контактная прочность, жесткость и точность разъёмных неподвижных конических соединений в инструментальных системах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук / Иркутск, 2006.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
3. Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Расчет и конструирование моментопередающих профильных соединений с равноосным контуром с натягом. Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2012. Т. 2. С. 493-497
4. Рожкова Е.А., Ильиных В.А., Линейцев В.Ю. Расчет на прочность РК-3-профильных соединений с натягом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 17-20.

### REFERENCES

1. Linejcev V.Yu. Kontaktnaja prochnost', zhestkost' i tochnost' raz#jomnyh nepodviznyh konicheskikh soedinenij v instrumental'nyh sistemah [Contact strength, rigidity and accuracy of split fixed conical connections in tool systems]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk [Dissertation for the degree of candidate of technical sciences] / Irkutsk, 2006.
2. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [A guide to mathematics for scientists and engineers] / per. s angl. – М.: Nauka, 1984. – 832 p.

3. Rozhkova E.A., Il'nyh V.A. Raschet i konstruirovaniye momentoperedajushhih profil'nyh soedinenij s ravnoosnym konturom s natjagom [Calculation and design of moment-transfer profile connections with an equiaxed contour with an interference fit]. *Transportnaja infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2012. T. 2. pp. 493-497

4. Rozhkova E.A., Il'nyh V.A., Linejcev V.Yu. Raschet na prochnost' RK-3-profil'nyh soedinenij s natjagom [Strength calculation of RK-3-profile connections with interference] // *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [*Modern Technologies. System Analysis. Modeling*], 2012. № 2 (34). pp. 17-20.

#### **Информация об авторах**

*Пичуев Егор Павлович* – студент специальности «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: egorpichuev@yandex.ru

*Линейцев Владимир Юрьевич* - к. т. н., доцент кафедры «Строительство железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: Linetzev@mail.ru

*Комогорцев Геннадий Иванович* – старший преподаватель кафедры «Строительство железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, e-mail: strelokgk59@mail.ru

#### **Authors**

*Egor Pavlovich Pichuev* – student of the specialty "Construction of railways, bridges and transport tunnels", Zabaikalsky Institute of railway transport, Chita, e-mail: egorpichuev@yandex.ru

*Vladimir YUr'evich Lineycev* – Candidate of technical science, associate professor of the department "Construction of railways", Zabaikalsky Institute of railway transport, Chita, e-mail: Linetzev@mail.ru

*Gennadiy Ivanovich Komogortzev* – senior lecturer of the department "Construction of railways", Zabaikalsky Institute of railway transport, Chita, e-mail: strelokgk59@mail.ru

#### **Для цитирования**

Пичуев Е. П. Учет сил трения при моделировании трехмерного движения конических поверхностей с малой конусностью [Электронный ресурс] / Е. П. Пичуев, В. Ю. Линейцев, Г. И. Комогорцев // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2020. — №4(10). — Режим доступа: <http://mnv.irknps.ru/toma/11-2020>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 09.11.2020)

#### **For citation**

E. P. Pichuev, V. YU. Lineycev, G. I. Komogortzev. *Uchet sil trenija pri modelirovanii trehmernogo dvizhenija konicheskikh poverhnostej s maloj konusnost'ju* [Consideration of friction forces in modeling three-dimensional motion of conical surfaces with a small cone]. *Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2020, no. 4(10). [Accessed 09/11/20]