

	<p><b>Нгуен Ван Хоан</b> Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Механика машин», Государственного Технического Университета им. Ле Куи Дона Научное направление – Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов, анализ динамики и прочности машин.</p>
	<p><b>До Мань Тунг</b> Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Государственного Технического Университета им. Ле Куи Дона Научное направление - Разработка математических моделей и численных методов, анализ динамики и прочности машин, ресурсное проектирование.</p>
	<p><b>Динг Куанг Банг</b> Магистр, сотрудник Государственного Технического Университета им. Ле Куи Дона Научное направление – Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов; анализ динамики и прочности машин.</p>

## АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ЭЛАСТИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

В данной работе рассмотрены функциональные особенности эластичного тора в качестве средства герметизации различных машин и механизмов. Построена система уравнений для исследования кинематики конструкции с цилиндрическим эластичным тором. Также даны важные результаты при анализе кинематики цилиндрического эластичного тора.

*Ключевые слова:* эластичный тор, герметизация, давление, скорость, ускорение.

## ANALYSIS KINEMATICS OF FLEXIBLE MECHANISMS

This paper discusses the characteristics of elastic torus as a means of sealing in different machines and mechanisms. The authors build a system of equations for the study of the kinematics of structure with a cylindrical elastic torus and also provides important results of the analysis of the kinematics of the cylindrical elastic torus.

*Keywords:* elastic torus, sealing, pressure, velocity, acceleration.

### Постановка задачи.

В настоящее время эластичные оболочечные конструкции могут найти свое применение практически во всех областях техники, промышленности и народного хозяйства в качестве мягких движителей, защитных и силовых пневмоконструкций, стационарных строительных сооружений, аварийных спасательных средств, индивидуальных и коллективных пользователей благодаря своим уникальным свойствам: многофункциональность,

мобильность, быстрота монтажа и демонтажа, простота эксплуатации в различных условиях и т.д. [1-5]. Они обладают комплексом свойств конструкционного материала: прочностью, герметичностью, эластичностью, агрессивностойкостью, а также свойствами рабочей среды: плотностью, текучестью, упругостью. Такие конструкции могут эксплуатироваться при длительных и кратковременных внешних воздействиях; в статических, квазистатических и динамических режимах нагружения; в условиях сосредоточенной и распределенной, асимметричной и несоосно приложенной внешней сжимающей нагрузки [6-11].

Особое место среди таких конструкций занимают тороидальные выворачивающиеся оболочки. Под воздействием внешних или внутренних сил тороидальный механизм имеет следующие функциональные особенности:

- + Перемещается путем выворачивания или наволакивания по жесткой, эластичной и любой другой опорной поверхности, «омывая» ее деформированные участки и инородные включения, при этом самоуплотняется в замкнутой, охватывающей его периферию, поверхности «сам себя находит».

- + Обеспечивает широко регулируемую площадь контакта и небольшие удельные давления на опорную поверхность с низким давлением текучей среды в своей оболочке.

- + Создает тяговые усилия и ударный эффект.

- + Преобразовывает виды движения, например, поступательное во вращательное и наоборот.

- + Наволакиваясь на предмет, захватывает его независимо от его формы, удерживает или перемещает его внутри себя с регулируемым обжимающим усилием (мягкий захват).

- + Выворачиваясь, выталкивает с различной начальной скоростью находящийся внутри себя предмет.

- + Выворачиваясь и/или наволакиваясь переходит из одного устойчивого состояния в другое.

- + При выворачивании и наволакивании скорость поступательного движения центрального жгута, по крайней мере, в два раза больше скорости поступательного движения тороида относительно его периферии.

- + Перемещается дополнительно и в поперечном направлении при продольном перемещении и т. п.

То есть, тороидальное движение является высшим (базовым, основным, главным, образующим) видом движения, а не отдельным подвидом.

Функциональные возможности машины или механизма, имеющего в своем составе эластичного тороида, увеличиваются, как минимум, в два раза, поскольку эластичный тороид на своей внешней поверхности имеет две рабочие поверхности – центральную часть и периферию, плавно переходящих друг в друга – двухсторонняя замкнутая поверхность.

Для реализации своих потенциальных возможностей эластичные тороиды могут иметь различные формы и быть кинематически связаны с конструктивными элементами, как центральное и/или внешнее и/или внутреннее периферийные тела различной формы, выполненные из различных материалов.

На основании возможностей тороидальных оболочек рассмотрим использование цилиндрического эластичного тора в качестве органа герметизации движущихся частей механизма. На рис. 1 показан эластичный цилиндрический тор, который наполнен жидкостью или газом и размещён в жёстком цилиндрическом корпусе. В отверстии тора установлен и удерживается жёсткий цилиндр с диаметром  $D$  (мм).

Для определения траектории точек поверхности эластичного тора, рассмотрим конструкцию в общей системе координат  $OXY$  (рис. 1) и используются допущения:

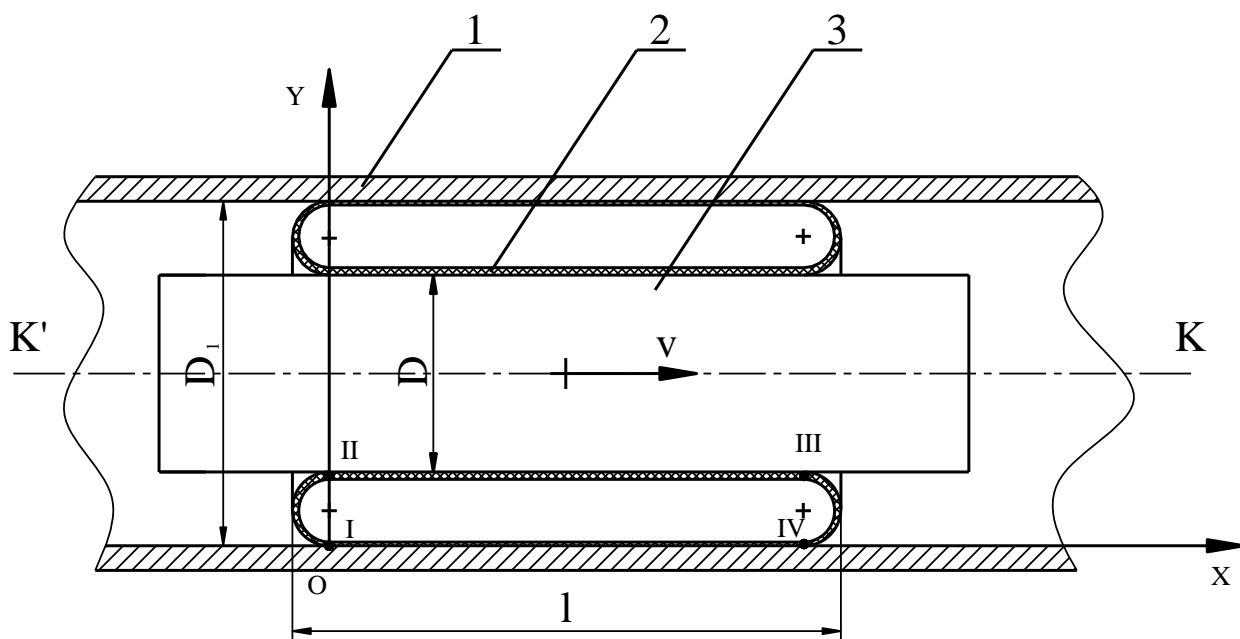


Рис. 1. Цилиндрический эластичный тор в качестве средства герметизации (1-корпус; 2-цилиндрический эластичный тор; 3-жесткий цилиндр)

Зависимость пути, скорость и ускорение движения точек поверхности эластичного тора могут быть определены предварительными экспериментами на основе подтвержденной возможности перемещения тора выворачиванием и наволакиванием, без скольжения.

- Движение точек, лежащих на поверхности торцов тора, может быть представлено как движение точек обода колеса. При этом траектория этих точек является участками циклоиды. Движение же точек, соприкасающихся с поверхностью цилиндра, является прямолинейным, а движение точек, соприкасающихся со стенками корпуса, будет отсутствовать.

Тогда уравнения движения точек на участках I-II-III-IV эластичного тора (рис. 1) в течение любого отрезка времени можно представить в виде:

$$\begin{cases} x = vt - r \sin\left(\frac{vt}{r}\right) \\ y = r \left(1 - \cos\left(\frac{vt}{r}\right)\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi r}{v}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = 2vt - \pi r \\ y = 2r \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{\pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = l - 2r + vt + r \sin\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right) \\ y = r \left(1 + \cos\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right)\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + \pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + 2\pi r}{v}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = 2(l - 2r + \pi r) \\ y = 0 \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + 2\pi r}{v} \leq t < 2 \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (4)$$

где  $v$  - скорость цилиндра и  $v = const$ ;  $x$  и  $y$  - координаты точки на поверхности эластичного тора;  $t$  - время;  $D$  - диаметр цилиндра и  $D = const$ ;  $D_1$  - внешний диаметр тора и  $D_1 = const$ ;  $l$  - длина цилиндрического эластичного тора и  $l = const$ ;  $\alpha$  - угол изгиба

корпуса и  $\alpha = 180^0$ .

Очевидно, что уравнения (1-4) отражают движение точки соответственно на левом конце тора, его продольной оси, правом конце и боковой цилиндрической поверхности.

Уравнения скорости любой точки на поверхности тора от времени могут быть определены путем дифференцирования уравнений (1-4):

$$\begin{cases} v_x = v - v \cos\left(\frac{vt}{r}\right) \\ v_y = v \sin\left(\frac{vt}{r}\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi r}{v}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_x = 2v \\ v_y = 0 \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{\pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_x = v + v \cos\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right) \\ v_y = -v \sin\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + \pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + 2\pi r}{v}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_x = 0 \\ v_y = 0 \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + 2\pi r}{v} \leq t < 2 \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (8)$$

где  $v_x$  и  $v_y$  - проекции вектора скорости движения точек поверхности цилиндрического эластичного тора на оси OX и OY  $v = const$ ;  $D = const$ ;  $D_1 = const$ ;  $l = const$  и  $\alpha = 180^0$ .

Аналогично, уравнения ускорения любой точки на поверхности тора от времени могут быть определены путем дифференцирования уравнений (4-8):

$$\begin{cases} a_x = \frac{v^2}{r} \sin\left(\frac{vt}{r}\right) \\ a_y = \frac{v^2}{r} \cos\left(\frac{vt}{r}\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi r}{v}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{\pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} a_x = -\frac{v^2}{r} \sin\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right) \\ a_y = -\frac{v^2}{r} \cos\left(\frac{vt + 2r - \pi r - l}{r}\right) \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + \pi r}{v} \leq t \leq \frac{l - 2r + 2\pi r}{v}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = 0 \end{cases} \quad \text{при} \quad \frac{l - 2r + 2\pi r}{v} \leq t < 2 \frac{l - 2r + \pi r}{v}, \quad (12)$$

где  $a_x$  и  $a_y$  - проекции вектора ускорения движения точек поверхности цилиндрического эластичного тора по осям OX и OY;  $v = const$ ;  $D = const$ ;  $D_1 = const$ ;  $l = const$  и  $\alpha = 180^0$ .

### Результаты исследования.

В качестве примера рассмотрим конструкцию с цилиндрическим эластичным тором. Геометрические размеры и скорость цилиндра рассчитываемой конструкции:  $D = 0,08(\text{м})$ ,  $D_1 = 0,14(\text{м})$ ,  $l = 0,236(\text{м})$ ,  $v = 0,03(\text{м/с})$ .

Результаты расчета траектория движения точек на поверхности цилиндрического

эластичного тора в зависимости от времени приведены на рис. 2.

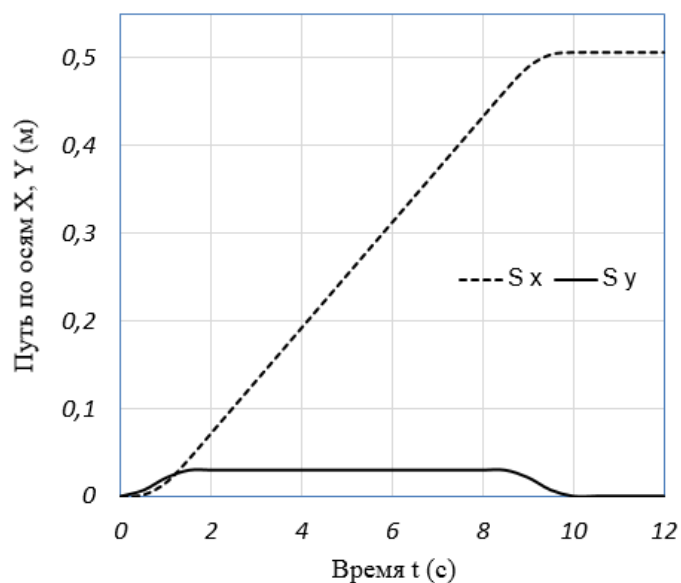


Рис. 2. Зависимость пути, пройденного эластичным тором и его точками от времени ( $S_x$ ,  $S_y$  - длина пути лежащей точки на поверхности тора по осям OX и OY)

Результаты расчета скорости и ускорения точек на поверхности эластичного тора в зависимости от времени приведены на рис. 3 и 4.

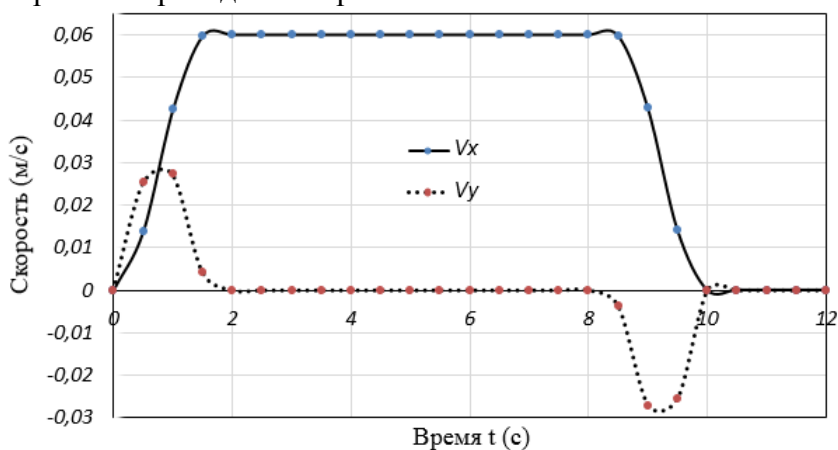


Рис. 3. Зависимость скорости точек на поверхности цилиндрического эластичного тора от времени по осям OX и OY

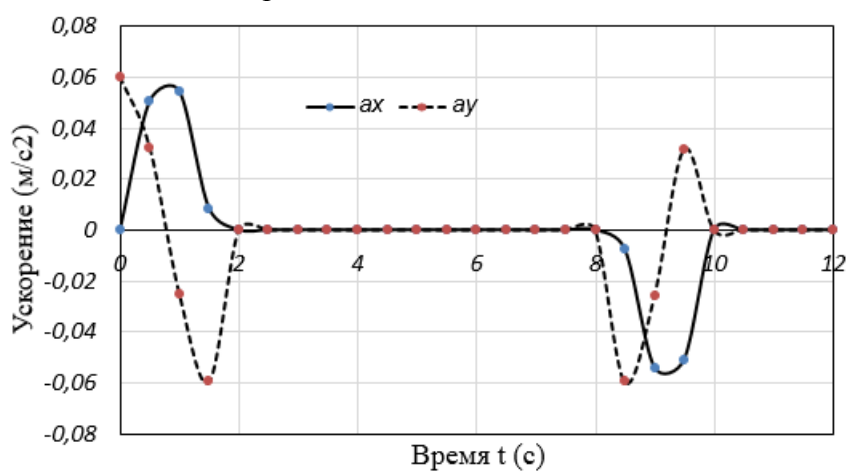


Рис. 4. Зависимость ускорения точек на поверхности цилиндрического эластичного тора от времени по осям OX и OY

## Выводы.

Из рис. 2-4 видно, что когда жесткий цилиндр движется с постоянной скоростью  $v$ , то эластичный тор тоже движется с постоянной скоростью  $v/2$ , а скорость точек на поверхности эластичного тора изменяется по следующим законам: скорость точек на левом конце тора (I-II) увеличивается с нулём до максимальной скорости  $v_{\max} = 0,06 \text{ м/с}$ ; скорость точек на поверхности, примыкающей к внешней поверхности жесткого цилиндра (II-III) движется с постоянной максимальной скоростью  $v_{\max} = 0,06 \text{ м/с}$ ; скорость точек на правом конце тора (III-IV) снижается с максимальной скоростью  $v_{\max} = 0,06 \text{ м/с}$  до нуля и скорость точек на поверхности, примыкающей к внутренней поверхности корпуса (IV-I) движется с постоянной минимальной скоростью  $v_{\min} = 0 \text{ м/с}$ . Эти результаты позволяют решать задачи динамики и повышения прочности цилиндрических эластичных торов в качестве средства герметизации при их проектировании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хайман Б., Гердт В., Попп К., Репецкий О.В. Мехатроника: компоненты – методы примеры. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010, 602 с.
2. Репецкий О.В., До Мань Тунг. Математическое моделирование и численный анализ колебаний идеальных циклически-симметричных систем методом конечных элементов // [Известия ИГЭА](#).- 2012, [№ 3](#), С. 149-153.
3. Репецкий О.В., Буй Мань Кьонг. К вопросу выбора численного метода анализа напряжений при оценке многоциклового усталости лопаток транспортных турбомашин. [Известия ИГЭА](#).- 2010, [№ 6](#), С. 153-158.
4. Репецкий О.В., До Мань Тунг. Исследование характеристик колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на основе моделирования уменьшенного порядка методом конечных элементов// Вестник СибГАУ.-2014, [№ 1 \(53\)](#), С. 60-66.
5. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности машин. Иркутск: изд-во ИрГТУ, 1999, 301 с.
6. 1. Шихирин В.Н., Ионова В.Ф., Шальнев О.В., Котляренко В.И. Эластичные механизмы и конструкции: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 286 с.
7. 2. Шальнев О.В., Осоловская Н.А., Ионова Ш.К. Перемещения эластичных пневмооболочек. Пневмоконструкции. // Сборник трудов НИИ Резиновой промышленности. Сергиев Посад: Изд-во ВСП, 2010. - с. 426 - 520.
8. 3. Таскаева П.В. Эластичные механизмы. Пневмоконструкции / П.В. Таскаева [и др.] // Сб. трудов НИИ Резиновой промышленности. - Сергиев Посад: Изд-во ВСП, 2010. - С. 7-117.
9. 4. Шальнев О.В, Кожевникова Е.И. эластичные перистальтические механизмы: материалы докл. 6-й междунар. науч.-прак. конф. "Торовые технологии". - Иркутск: Изд-воИрГТУ, 2009. - С.134-161.
10. 5. Шальнев О.В. Конструктивные особенности тороидных оболочек. Материалы докл. междунар. науч.-прак. конф. Торовые технологии. - Иркутск: Изд-во: ИрГТУ 2004. - С. 63-73.
11. 6. Шальнев О.В., Котляренко В.И. Метод моделирования - новая концепция исследования напряжения, складкообразования и создания теории мягких оболочек: материалы докл. 4-й междунар. науч.-прак. конф. "Торовые технологии". - Иркутск: Изд-во: ИрГТУ, 2007. - С. 76-94.