

УДК 621.81/85

РОЛЬ МОДЕЛЕЙ В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ УСТРОЙСТВ

© 2017 А.Г. Мудров

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Статья поступила в редакцию 08.02.2017

Показана роль моделей в создании новой группы пространственных механизмов и устройств на их базе, содержащие только вращательные шарниры на стандартных подшипниках качения. Механизмы этой группы были малочисленны и исследовались только теоретически, не были изготовлены не только натурные образцы механизмов, но и работоспособные модели. В этой группе наблюдался существенный разрыв между теорией и практическим использованием пространственных механизмов в технике. Проблема заключалась в том, что в теоретических исследованиях длины смежных звеньев пересекались в одной точке, а в моделях длины теоретические не равнялись длинам по материальным звеньям, они не пересекались в одной точке, в результате звенья не проворачивались.

Разработана технология изготовления, как моделей, так и натуральных образцов, которая способствовала созданию и развитию нового научного направления теории пространственных механизмов только с вращательными шарнирами. Было образовано более сотни новых механизмов и на их базе разнообразных устройств на уровне изобретений, многие из которых внедрены в технику с разными функциями. Устройства показали высокие технико-экономические показатели во многих технологических процессах и различные функции без переналадок.

Ключевые слова: *пространственный механизм, вращательный шарнир, модель, смеситель, галтователь*

Модели механизмов часто используются для их визуального исследования, ибо они наглядно дают представление о жесткости, работоспособности, проворачиваемости звеньев и других свойствах механизма. В некоторых случаях модели механизмов могут использоваться при предварительных лабораторных исследованиях различных устройств. Особую роль играют модели при исследовании пространственных механизмов, в частности, при структурном анализе и при выявлении характера движения шатунов и других звеньев. Изготовление моделей пространственных механизмов с шаровыми, шаровыми с пальцем, «шар-труба», поступательными, цилиндрическими кинематическими парами не вызывает особых трудностей. Другое дело – модели пространственных механизмов, содержащих только вращательные шарниры. Здесь между теорией и практикой образовался большой разрыв.

Первым в производственном исполнении пространственным механизмом с вращательными шарнирами можно считать сферический механизм Кардана-Гука, теоретически открытый еще 250 лет до новой эры и практически примененный лишь через 1800 лет для подвеса морских компасов. Сейчас этот механизм широко используется в конструкциях автомобилей как передаточный. Других примеров использования пространственных механизмов с вращательными шарнирами в технике известно не было. Лишь в 1903 г. английский математик Беннетт теоретически описал четырехзвенный механизм с цилиндрическими шарнирами [1, 2], оси шарниров которых не параллельны и не пересекаются. Однако построить модель он не смог, поэтому сомневался в его практическом использовании. Статья Беннетта вызвала интерес многих зарубежных и отечественных ученых, которые исследовали его, опять же, только теоретически [3, 4].

Появились публикации о пятизвенных и шести-звенных механизмах этой группы. Но ни одному из ученых или производственников не удалось изготовить ни одной модели или натурального образца механизма этой группы. Механизмы считали бесперспективными, представляющие интерес только с чисто теоретической стороны. Почему же возникла трудность в изготовлении моделей? Почему звенья механизмов моделей не проворачивались и часто образовывали неподвижное соединение – раму?

Проблема состояла в том, что в теоретических расчетах у механизмов концы кратчайших расстояний (длины) звеньев кинематических пар совпадают, т.е. пересекаются в одной точке. Это достаточно хорошо представлялось теоретически, однако в моделях или производственных образцах добиться совпадения кратчайших расстояний звеньев в одной точке ученым не удавалось, поэтому звенья не проворачивались и механизм был не работоспособным. Лишь 75 лет после теоретического описания механизма Беннетта казанским ученым профессорам Б.В. Шитикову [5] и П.Г. Мудрову [6] удалось решить проблему изготовления моделей и натуральных образцов.

Четырехзвенный механизм с цилиндрическими шарнирами (впоследствии механизм Беннетта) стал первообразующим из группы пространственных механизмов с вращательными шарнирами, хотя описан он был как механизм с цилиндрическими шарнирами. На историческом уровне развития пространственных механизмов изготовление моделей, на первый взгляд, является ничем не примечательным событием, не заслуживающим серьезного внимания. Но факты говорят об обратном, ибо за 75 лет после открытия механизма не было создано ни одной работоспособной модели механизма ни у нас в стране, ни за рубежом из этой группы, и ни один из механизмов не был доведен до практического использования в технике. И лишь после изготовления моделей эти механизмы получили развитие от теории до практического внедрения [7, 8].



Рис. 1. Применение механизма Беннетта в технике

В чем же было преткновение при изготовлении моделей? Как в моделях, так и в натурных образцах только у одного звена, как правило, шатуна, концы кратчайших расстояний между геометрическими осями шарниров равны конструктивному расстоянию между геометрическими осями тела

звена. У других звеньев кратчайшее расстояние между геометрическими осями шарниров расположено вне звена, т.е. у тела звена расстояние между его осями не равнялось теоретическому кратчайшему расстоянию. В отсутствии определения и согласования теоретического кратчайшего расстояния и

действительного расстояния между осями тела звена, высотой головки подшипников и заключалась причина неработоспособности моделей.

Модели пространственных механизмов с вращательными парами сыграли ключевую роль в исследовании и, самое главное, в практическом использовании механизмов в технике. Вот факты, подтверждающие это. Если за 75 лет не было ни одного практического использования механизмов в технике и имелось их небольшое количество в теоретическом исполнении, то с изготовлением моделей за 15-20 лет образовано около сотни новых механизмов и что важно, изготовлено и внедрено в различных разделах техники более 50 устройств. Следует отметить, что только на базе механизма Беннетта создано 34 устройств на уровне изобретений (рис. 1) [9].

Развитие механизмов в моделях началось с механизма Беннетта, кинематическая схема которого показана на рис. 2, параметры механизма имеют следующие значения. Угол α_1 скрещивания геометрических осей шарниров ведущего кривошипов 1 и α_3 ведомого кривошипа 3 равны, т.е. $\alpha_1 = \alpha_3$. Кратчайшие расстояния между этими осями также равны, т.е. $l_1 = l_3$. Соответственно равны углы скрещивания геометрических осей шарниров шатуна 2 и стойки 4 и кратчайшие расстояния между ними, т.е. $\alpha_2 = \alpha_4$ и $l_2 = l_4$. Параметры связаны между собой соотношением, $\sin \alpha_1 / l_1 = \sin \alpha_2 / l_2$.

На схеме рис.2 кратчайшие расстояния у звеньев 1, 3, 4 показаны вне тела, у шатуна 2 кратчайшее расстояние l_2 будет по телу. Поскольку оси шарниров звеньев расположены в пространстве (см. рис. 3-5) на плоском чертеже углы и кратчайшие расстояния изображены с некоторым искажением.

Модель механизма показана на фото рис. 2, фотография механизма - на рис.3, на рис.4 - фото лабораторного смесителя вместимостью емкости 10 л. У лабораторного смесителя угол скрещивания геометрических осей шарниров шатуна 2 и угол у стойки равны 90° , это сделано для упрощения изготовления шатуна и стойки. Кроме приведенных на рис. 2-5 иллюстраций, на базе механизма Беннетта создано 35 устройств самого различного функционального назначения для многих направлений техники (рис. 1), 34 из которых признаны изобретениями.

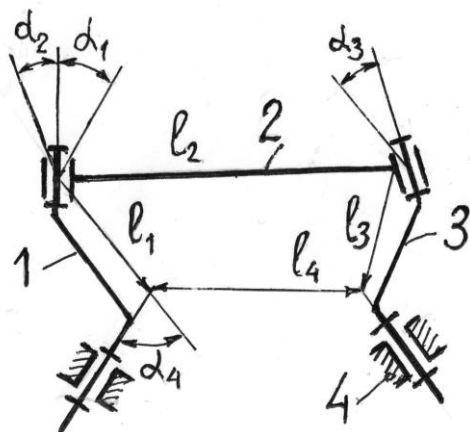


Рис. 2. Схема механизма Беннетта

Особенность пространственных механизмов с вращательными шарнирами заключается в том, что из-за особой структуры при постоянной угловой скорости ω ведущего кривошипа, ведомый кривошип будет вращаться с переменной угловой скоростью ω_3 в пределах одного оборота, определяемой выражением

$$\omega_3 = \frac{c\omega}{a - b \cos \varphi}, \quad (1)$$

где $c = \cos \alpha_2 - \cos \alpha_1$; $a = \alpha_1 - \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2$; $b = \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2$; φ — угол поворота ведущего кривошипа.

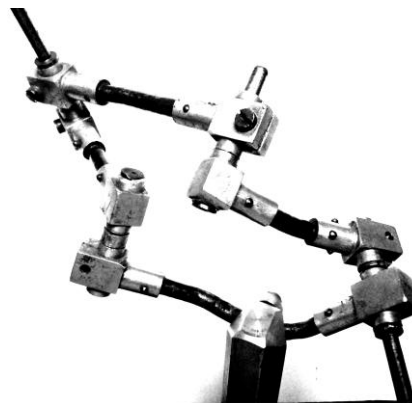


Рис. 3. Модель механизма

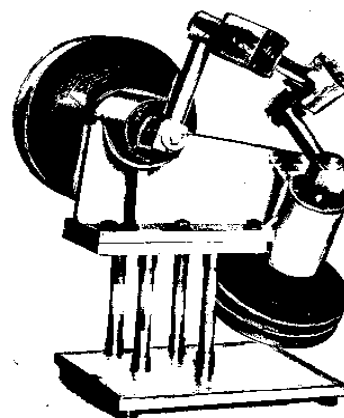


Рис. 4. Фото механизма

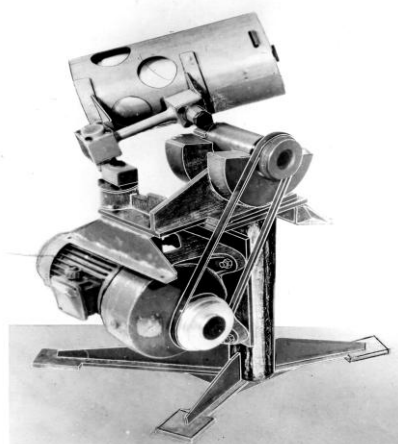


Рис. 5. Фото смесителя

Максимальное значение угловой скорости будет при угле φ поворота ведущего кривошипа, равном 0° , будет

$$\omega_{\max} = \frac{c\omega}{a-b},$$

минимальное значение при $\varphi=180^\circ$:

$$\omega_{\min} = \frac{c\omega}{a+b}.$$

Степень неравномерности δ вращения ведомого кривошипа определится как

$$\delta = \pm 2 \frac{b}{c} = \pm 2 \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2}{\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1}. \quad (2)$$

Так как ведущий кривошип вращается с постоянной угловой скоростью за оборот, а ведомый кривошип – с переменной, и вращаются они в плоскостях, расположенных под углом α , то шатун будет иметь сложное пространственное неравномерное движение, соответственно, закрепленная с шатуном емкость будет иметь такое же сложное пространственное неравномерное движение. Материал, находящийся в емкости, будет иметь сложное турбулентное движение с дополнительным силовым инерционным воздействием, что в совокупности будет содействовать существенной интенсификации обработки материала (перемешивание, поверхностная обработка деталей, дробление, очистка и мойка деталей и т.п.).

С таким же успехом изготавливались модели и производственные устройства пространственных пятизвенных и шестизвенных механизмов, в качестве примера показана на рис. 6 модель, а на рис. 7 на базе пятизвенного механизма показано производственное устройство – смеситель. Как видно из приведенных рисунков, производственные устройства не всегда копируют модель, иногда фото модели выглядит сложнее, чем производственное устройство.

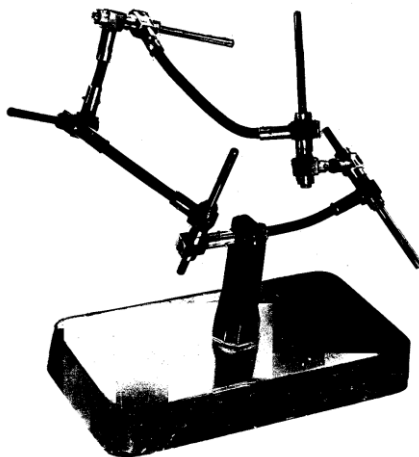


Рис. 6. Модель пятизвенника

Итак, модели пространственных механизмов с вращательными шарнирами существенно развили и расширили знания о пространственных механизмах. Вот краткие сведения о роли моделей в

исследовании пространственных механизмов с вращательными шарнирами.

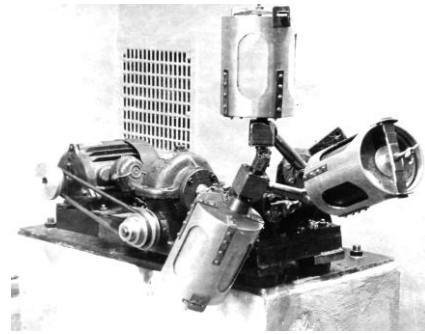


Рис. 7. Фото смесителя

- На моделях в первую очередь проверялось теоретическое условие проворачиваемости звеньев. Подтверждалось или опровергалось свободное вращение звеньев, проверялась жесткость механизмов.

- На моделях определялось движение звеньев относительно друг друга и стойки, т.е. кинематические параметры механизмов, в частности, зависимость угла поворота ведомого звена относительно ведущего и т.д.

- На моделях проверялись аналитические зависимости кинематических параметров. В нашем случае аналитические зависимости полностью совпали с экспериментальными данными, полученными на моделях.

- Модели позволили наглядно увидеть и оценить законы движения звеньев и наметить возможные варианты использования механизмов в технике. С помощью моделей выявлен огромный функциональный потенциал механизма Беннетта, по этому показателю ему нет равных среди сотен известных механизмов. Это подтверждается 34 авторскими свидетельствами на изобретения, созданными на базе механизма Беннетта [10].

- Модели использовались на этапе предварительных экспериментальных лабораторных исследований по практическому использованию механизмов в том или ином устройстве или процессе.

- Модели способствовали созданию семи направлений техники, где механизмы начали эффективно использоваться. Приводы сельскохозяйственных машин (элеватор картофелекопателя, диск свеклокомбайна, режущий аппарат, передаточные механизмы и т.д.), устройства для первичной обработки изделий (для галтовки и полировки деталей, для протравливания семян, для шлифовки семян, для закалки изделий, для гальванопластической обработки деталей), устройства для мойки и очистки изделий (устройства для жидкостной обработки изделий, для очистки полых изделий, устройства для мойки изделий), устройства для копирования движений (привод крыла птиц, гребное устройство, захват, землеройная машина, для расчесывания меха), устройства для измельчения (молотковая мельница, для переработки полимерных материалов, измельчитель), инерционные устройства (инерционный двигатель, для погружения свай, тренажеры), устройства для эффектов (вращающийся фонтан, устройства для развлечений).

Выводы:

1. Следует отметить, что первым рождением пространственных механизмов с вращательными шарнирами стало теоретическое открытие механизма Беннетта, ставшего модулем образования пяти, шести, семизвенных и дифференциальных механизмов.

2. Вторым рождением пространственных механизмов можно считать год создания моделей и изготовления устройств производственного назначения. С этого момента началось активное и плодотворное развитие механизмов этой группы, их всестороннее исследование и внедрение в различные разделы техники.

3. Четырехзвенный механизм Беннетта за 80 лет со дня опубликования исследовался отечественными и зарубежными учеными только теоретически, сведений о внедрении его в производство за этот период не выявлено.

4. Механизмы комплексно были исследованы, изготовлены в моделях и производственных образцах и внедрены в производство казанскими учеными.

5. Механизм Беннетта является «жемчужиной» функциональных свойств, по числу которых ему нет равных среди сотен других механизмов.

6. Инженерно-технические специалисты нашей страны и конструкторы новой техники практически не знакомы с пространственными механизмами этой группы, так как ни в одном учебнике по теории механизмов и машин (ТММ) о них нет даже элементарных сведений.

7. Отечественные и зарубежные ученые исследуют механизмы этой группы только теоретически и в своих статьях и диссертациях вообще не упоми-

нают о том, что эти механизмы уже изготовлены в моделях, производственных образцах и внедрены в производство. Это нам не понятно и труднообъяснимо. Создание моделей механизмов этой группы сыграло решающую роль в исследовании и создании нового направления в теории пространственных механизмов и их внедрение в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Bennett, G.T. A new mechanism. – Engineering, London, 1903. P. 777-778.
2. Bennett, G.T. The skew isogram mechanism. – Proceeding of London Mathematics Society, 2nd series. V. 13. 1914. P. 151-173.
3. Bricard, R. Demonstration elementaires de proprietes fondamentales du tore. – Nouvelles anales de mathematiques. 1924. P. 308-313.
4. Goldberg, M. New five-bar and six-bar linkages in three dimensions. – Trans. ASME, V. 65. 1943. P. 649-663.
5. Шумиков, Б.В. Исследование пространственных шарнирных механизмов. Рукопись. Отчет о научно-исследовательской работе. – Казань: КХТИ, 1958. 30 с.
6. Мудров, П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1976. 264 с.
7. Мудров, А.Г. Пространственные механизмы с особой структурой. – Казань: РИЦ «Школа», 2003. 300 с.
8. Мудров, А.Г. Пространственные механизмы с особой структурой (исследование). – Казань: РИЦ «Школа», 2004. 180 с.
9. Мудров, А.Г. Механизм Беннетта и использование его в технике. – Казань: КГСХА, 1999. 80 с.
10. Мудров, А.Г. Практическое использование механизма Беннетта в технике. – The Eight IFToMM International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, SYROM 2001. Bucharest-ROMANIA, 2001. Vol. 11. P. 221-228.

ROLE OF MODELS IN THE SPATIAL DEVICES RESEARCH

© 2017 A.G. Mudrov

Kazan State University of Architecture and Engineering

The role of models in creation of new group of spatial mechanisms and devices on their base, containing only rotary hinges on standard rolling bearings is shown. Mechanisms of this group were small and were researched only theoretically, not only natural samples of mechanisms, but also efficient models weren't made. In this group the essential gap between the theory and practical use of spatial mechanisms in the equipment was observed. The problem was that in theoretical researches the length of adjacent links were crossed in one point, and the length of theoretical models didn't equal to lengths on material links, they weren't crossed in one point, as a result links weren't turned.

The manufacturing techniques, both models, and natural samples which promoted creation and development of the new scientific direction of the theory of spatial mechanisms only with rotary hinges are developed. More than one hundred new mechanisms and on their base the various devices at the level of inventions were formed, many of which are implemented in the equipment with different functions. Devices showed high technical and economic rates in many engineering procedures and various functions without readjustments.

Key words: spatial mechanism, rotary hinge, model, mixer, fillet-maker