


УДК 004.92:621.01

Трехмерное компьютерное моделирование в преподавании дисциплины «Теория механизмов и машин»

О.В. Егорова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Three-dimensional Computer Modeling in Teaching «Theory of Mechanisms and Machines» Discipline

O.V. EgorovaBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: cuba2006@inbox.ru

i Эффективный метод обучения студентов, используемый в преподавании дисциплины «Теория механизмов и машин» (ТММ), основан на трехмерном компьютерном моделировании сложных моделей. Данный метод способствует лучшему восприятию предмета, популяризации и распространению научных знаний с многократно усиливающимся эффектом в случае открытого доступа к 3D-документам, размещенным в сети Интернет. На кафедре «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана студенты 3-го курса в процессе выполнения курсового проекта в качестве объекта исследования и 3D-моделирования использовался необычный планетарный механизм, представляющий собой усеченную копию модели Солнечной системы (The Orrery). Оригинальная модель была создана шотландским астрономом Дж. Фергюсоном в XVIII в. для иллюстрации движения узлов и апогея орбиты Луны. Особенностью исследуемой модели № 9 из Русской коллекции при МГТУ им. Н.Э. Баумана является то, что вращательное движение входного звена механизма преобразуется в поступательное движение выходного звена («парадокс Фергюсона»). Изучение и объяснение столь необычного движения звеньев механизма требует от студентов дополнительных знаний в области ТММ и истории техники в сочетании с навыками работы с 3D-технологиями. Новые образовательные технологии, основанные на использовании мультимедийного оборудования и автоматизированных программ трехмерного моделирования, относятся к информационно-развивающим и позволяют организовать направленную исследовательскую работу студентов, способствуя развитию объемно-пространственного мышления и творческого воображения будущих инженеров.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, «парадокс Фергюсона», планетарный механизм, 3D-моделирование, образовательные технологии.

i The paper presents an efficient method for teaching students the «Theory of Mechanisms and Machines» (TMM). The method is based on a three dimensional computer modeling of complex models. It is aimed at the best comprehensibility of the discipline, popularization and dissemination of scientific knowledge with an increasing effect in case of open access to 3D-documents hosted on the Internet network. The 3rd course students during their study at the «Theory of Mechanisms and Machines» Department at the Bauman Moscow State Technical University investigated a 3D-model called the «Ferguson's planetary train No. 9, which represents a part of a scaled copy of the Solar system model called the Orrery. The original model was created in the 18th century by a Scottish astronomer – James Ferguson

to illustrate the direct motion of the Moon's apogee and the retrograde motion of its nodes. The main feature of «Ferguson's planetary train» No. 9 from the Russian collection at the Bauman University is that rotational motion of the mechanism input link is converted into the translational motion of the output link («Ferguson's Paradox»). To study and to explain such an unusual movement of the mentioned mechanism, the students were required to show advanced knowledge in the field of the TMM and the History of Technics, combined with the skills of 3D-modeling technology. New educational technologies based on the use of multimedia and 3D-modeling can be used to support students' research work, develop spatial thinking and the creative imagination of the future engineers.

Keywords: theory of Mechanisms and Machines, TMM, Ferguson's Paradox, planetary train, 3D-modeling, new educational technologies.

Методы преподавания дисциплины «Теория механизмов и машин» (ТММ), как и сама наука о машинах, постоянно развиваются и совершенствуются [1–3]. Наряду с изданием учебников и учебных пособий [4, 5], выпуском специализированных фильмов и видеороликов знания можно передавать с помощью создания и исследования моделей машин. Неслучайно с конца XVIII в. в обучении ТММ стали широко использовать масштабные копии реальных машин и механизмов, выполненные в металле или дереве [6].

Считается, что первая коллекция механических моделей была собрана в Париже в Академии наук (Académie des Sciences), основанной еще в 1666 г. [7]. Изобретателям, а также членам академии было предложено с целью демонстрации физических или технических открытий изготовить масштабные копии своих изобретений, новых машин или инструментов и передать их в специальный Кабинет моделей академии, где желающие могли ознакомиться с самыми последними достижениями в науке и технике. С помощью действующих моделей (визуализации) предлагалось повысить роль механики в промышленной инженерии.

Вскоре эта идея была успешно реализована в других европейских странах, включая Россию. С того времени в традиционный курс инженерной подготовки, включающий преподавание ТММ, входили не только лекции и семинары, но и практические и лабораторные занятия, сопровождающиеся демонстрацией моделей. Тем самым обучающиеся получали тактильную и визуальную информацию об объекте, что было инновационным в то время.

Во многих университетах и учебных заведениях стали создаваться коллекции моделей, называемые кабинетами машин, или учебными кабинетами [6]. Масштабные модели механизмов использовались как в учебных целях, так и для исследования преимуществ новых образцов техники, подтверждая на практике возможность реализации новаторской идеи.

Одним из основателей высшего инженерно-технического образования в России считается гениальный испанский инженер Августин де Бетанкур (1758–1824). К моменту своего переезда в 1808 г. в Санкт-Петербург и перехода на военную службу в чине генерал-майора в свиту русского императора Александра I он уже имел опыт организации Мадридской высшей школы каналов и дорог [8–10]. Кроме того, в соответствии с приказом короля Испании Бетанкур занимал должность директора Королевского кабинета машин, коллекция которого содержала около 300 моделей и 327 машин в чертежах. Свой колоссальный опыт Бетанкур успешно использовал в 1809 г. при создании первого в России высшего инженерно-технического учебного заведения — Института корпуса инженеров путей сообщения (в настоящее время — Петербургский государственный университет путей сообщения, ПГУПС). Нововведением в институте стали основанные Бетанкуром ремесленные мастерские, библиотеки и учебные кабинеты, для которых в Париже были закуплены масштабные модели механизмов и диковинных инструментов. У студентов появилась возможность совмещать теоретическое обучение с практической работой в мастерских, знакомиться с масштабными моделями машин и проходить инженерную практику вне института.

В 1837 г. выпускник Института Корпуса инженеров путей сообщения Адольф Андреевич Розенкамф (1800–1868) был назначен директором Московского ремесленного учебного заведения, преобразованного в МВТУ им. Н.Э. Баумана (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана) [11]. Он последовал примеру Бетанкура и основал Кабинет машин. Позже, в 1845–1869 гг., значительный вклад в развитие Русской коллекции моделей механизмов при МГТУ им. Н.Э. Баумана внес Александр Степанович Ершов (1800–1869), который занимал должность Смотрителя кабинета Прикладной механики [6]. Под его руководством студенты

создали около 100 моделей механизмов, многие из которых являются копиями известных моделей Фердинанда Редтенбахера (1809–1863) и Франца Рело (1829–1905). Эти модели используются в учебном процессе в преподавании ТММ и в настоящее время.

Русская коллекция моделей механизмов при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Русская коллекция моделей механизмов на кафедре «Теория механизмов и машин» при МГТУ им. Н.Э. Баумана является сегодня крупнейшей в мире и включает более 500 экспонатов [6], из которых около трети относится к историческим. Среди них большой интерес вызывает модель № 9 — «Планетарный механизм Фергюсона» (рис. 1), который состоит из двух одинаковых цилиндрических зубчатых колес (Z_1 , Z_3), установленных на входном звене — водиле (h) механизма, и соединенных через третье зубчатое колесо меньшего диаметра (Z_2).

Все колеса имеют внешние зубья. Сам механизм установлен на треноге, но возможен и другой способ фиксации. Каждое зубчатое колесо крепится на валы через шарикоподшипники для замены трения скольжения на трение качения. При вращении водила h колесо Z_3 совершает поступательное движение. Подставка, расположенная на этом колесе, находится постоянно в горизонтальном положении.

Исследование механизма, проведенное студентами при освоении курса ТММ, началось с атрибуции модели, поскольку изначально не было известно кто такой Фергюсон и с какой целью была создана модель № 9.

Джеймс Фергюсон и его модели. Изучение литературных источников и консультации с исто-

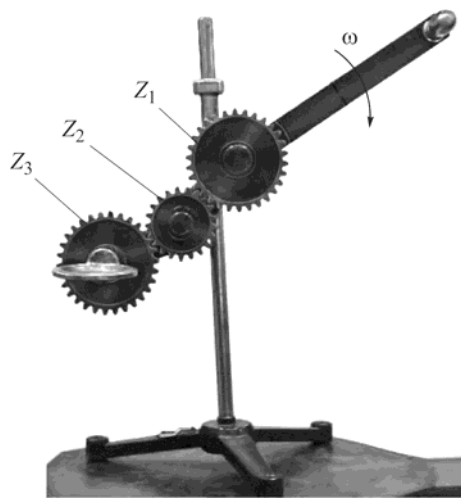


Рис. 1. Планетарный механизм Фергюсона [6]

риками техники подтвердили гипотезу о том, что модель № 9 представляет собой усеченную модель Солнечной системы шотландского астронома Джеймса Фергюсона (The Orrery), созданную им в XVIII в. и иллюстрирующую движение узлов и апогея орбиты Луны [12–16]. Луна движется по эллиптической орбите вокруг Земли, а вместе с Землей — вокруг Солнца. Плоскость орбиты Луны наклонена к плоскости орбиты Земли (эклиптике) на угол чуть более 5° . Точки пересечения лунной орбиты с плоскостью эклиптики называют лунными узлами. Узлы не занимают постоянного положения на эклиптике, они смещаются, обходя полный круг за 18,6 лет. Это явление называют отступлением узлов, так как они двигаются против хода Солнца и Луны по эклиптике, а сам период длиной в 18,6 лет еще с древности называется саросом. По окончании периода повторяются все солнечные и лунные затмения. Луна обращается вокруг Земли по эллиптической орбите, а значит, имеются точки перигея, где она подходит ближе всего к Земле, и апогея, где она расположена дальше всего от Земли. Модель Солнечной системы, созданная Джеймсом Фергюсоном (рис. 2), наглядно демонстрирует движение узлов, лунные и солнечные затмения.

Планетарный механизм Фергюсона из Русской коллекции является усеченной копией его модели Солнечной системы и демонстрирует, как вращательное движение входного звена преобразуется в поступательное движение выходного звена. Эта особенность получила название «парадокс Фергюсона».

Модель № 9 была изготовлена в мастерских МВТУ им. Н.Э. Баумана в середине XX в. для демонстрации именно «парадокса Фергюсона», который можно наблюдать, поставив, например, стакан воды на горизонтально расположенную подставку, жестко прикрепленную к

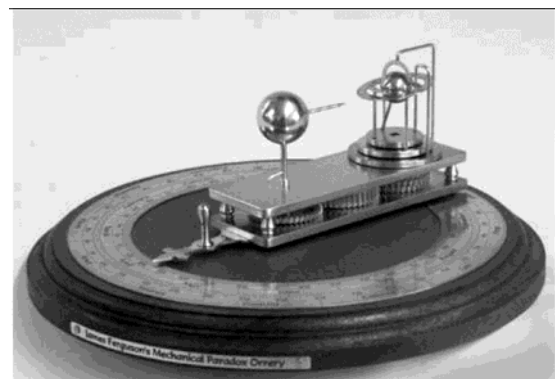


Рис. 2. Модель Солнечной системы Дж. Фергюсона [14]

зубчатому колесу Z_3 (см. рис. 1). При вращении водила (входного звена) положение стакана на подставке не меняется, что наглядно подтверждает поступательное движение выходного звена рассматриваемого механизма.

Дж. Фергюсон (1710–1776) [12–16] был самоучкой и не получил специального образования. Однако это не помешало ему стать известным астрономом, педагогом-лектором и писателем научных книг. Легенда гласит, что мальчиком Джеймс увлекся механикой, наблюдая, как его отец использовал рычаг при ремонте крыши их дома.

Фергюсон подарил миру множество открытий, сконструировал глобус и деревянные часы, придумал и изготовил большое количество механических моделей, которые объясняют движение планет, Солнца и Луны. Он получил мировое признание и считается одним из первых популяризаторов науки, оказавшим огромное влияние на распространение научных знаний посредством своих лекций, книг и моделей.

«Парадокс Фергюсона». Модель Солнечной системы Дж. Фергюсона [13, 14] необычна, поскольку она иллюстрирует движение узлов и апогея орбиты Луны, а не самой Луны. Узлы указывают на такие важные события, как затмения, когда все три тела — Солнце, Земля и Луна — выстраиваются вдоль одной прямой.

Фергюсон с помощью своей модели мог предсказывать как солнечные, так и лунные затмения и наглядно демонстрировать все положения Луны относительно Солнца и Земли, которые, «вопреки» законам механики, казались невозможными и были названы впоследствии «парадоксом Фергюсона» [14].

Объяснить «парадокс» можно с помощью рис. 3. При рассмотрении зацепления зубчатых колес A , B и C планетарного механизма колесо A (Z_1) неподвижно, а колеса B (Z_2) и C (Z_3) совершают эпициклическое движение вокруг него. Колесо A прикреплено к неподвижной стойке механизма и предназначено в модели

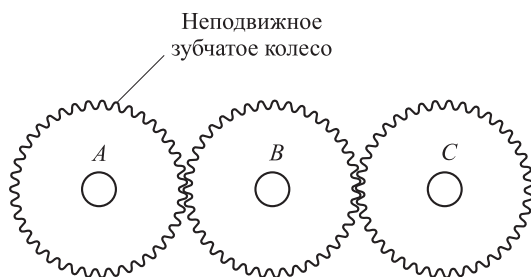


Рис. 3. Иллюстрация «парадокса Фергюсона» [14]

Солнечной системы Фергюсона для закрепления на нем Солнца. Когда у всех трех колес количество зубьев одинаковое, то колесо B совершает два оборота вокруг своей оси за один оборот механизма, а колесо C сохраняет свое положение относительно неподвижной системы координат. Такое движение колес планетарного механизма впоследствии было названо «парадоксом Фергюсона», так как в его модели оно позволяет сохранять направление земной оси в пространстве.

Оригинальная модель Фергюсона была сделана из дерева. Для тех кто хотел понять движение планет в Солнечной системе она стала интересной головоломкой. С ее помощью можно было наблюдать и необычное движение звеньев планетарного механизма.

3D-моделирование планетарного механизма Фергюсона. 3D-моделирование — процесс получения с помощью современных компьютерных технологий трехмерного изображения объекта, максимально приближенного к реальному образу, с целью наиболее информативного, точного и реалистичного представления, ощущения формы, размера, цвета и материала объекта. Виртуальную модель можно «посмотреть» со всех сторон (сверху, снизу, сбоку), встроить в любое окружение. Чертежи, макеты, словесные описания не могут дать такого точного и наглядного представления об объекте, как 3D-документ.

Трехмерная графика может быть любой сложности: с низкой детализацией и упрощенной формой; сложная модель, в которой присутствует проработка самых мелких деталей, фактуры, отражения и преломления света и т.д. Степень детализации влияет на время, затраченное на моделирование, а также на стоимость изготовления прототипа модели.

Для 3D-моделирования студентами кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана была выбрана разработанная фирмой Autodesk программа 3D Studio MAX [17–19] — полнофункциональная профессиональная программная система для создания и редактирования трехмерной графики и анимации. Процесс моделирования в этой программе сводится к тому чтобы задать на плоскости типовой профиль, придать ему пространственные свойства, построив так называемую базовую форму, а затем добавить к ней новые конструкторско-технологические элементы (стандартные или описываемые типовыми профилями).

Прежде чем приступить к трехмерному моделированию, планетарный механизм Фергюсона № 9 условно разбивается на части: стойка с треногой (неподвижное звено), три зубчатых колеса, водило с ручкой, подставка, жестко закрепленная на колесе; подшипники и другие более мелкие элементы. Каждая из частей исследуется, анализ и моделируется на компьютере отдельно, а затем все они соединяются в единую «сборку» (рис. 4, 5).

Чтобы смоделировать стойку (рис. 4), зубчатые колеса, подшипники, водило, подставку (см. рис. 5), используется встроенные функции системы 3D Studio MAX по созданию стандартных трехмерных объектов: «Box», «Cylinder», «Tube», а также метод построения поверхности объемного объекта как огибающей ряда плоских или трехмерных форм-сечений, размещенных вдоль заданного пути.

Использование созданных форм в качестве сечений наряду с модификацией и преобразованием базовых объектов позволяет получить существенные результаты при сложном геометрическом моделировании элементов планетарного механизма Фергюсона.

За счет наложения кинематических и струк-

турных связей, определяющих взаимное расположение звеньев относительно друг друга, осуществляется «сборка» и визуализация моделируемого механизма. Важной составляющей при визуализации является подбор соответствующего освещения и выигрышного ракурса наблюдения сцены. Комбинация этих двух составляющих способствует созданию реалистической модели (рис. 6).

Привлекательность моделирования в 3D Studio MAX состоит и в возможности выполнить анимацию, «оживить» и заставить двигаться все звенья исследуемого механизма. В результате разработанная 3D-модель наглядно демонстрирует «парадокс Фергюсона» — преобразование вращательного движения входного звена планетарного механизма в поступательное движение выходного звена, при котором подставка сохраняет свое горизонтальное положение. «Оживление» изображения достигается за счет последовательного показа на экране компьютера серии отдельных кадров со скоростью, достаточной для создания иллюзии плавного движения. Этот принцип полностью аналогичен тому, который используется в мультипликации. Анимация ис-

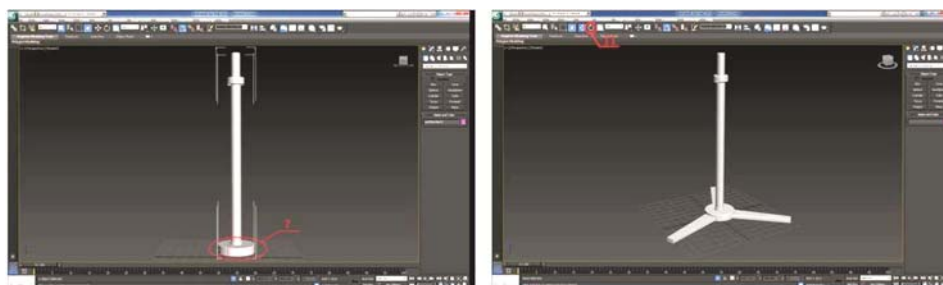


Рис. 4. Интерфейс 3D-моделирования стойки механизма

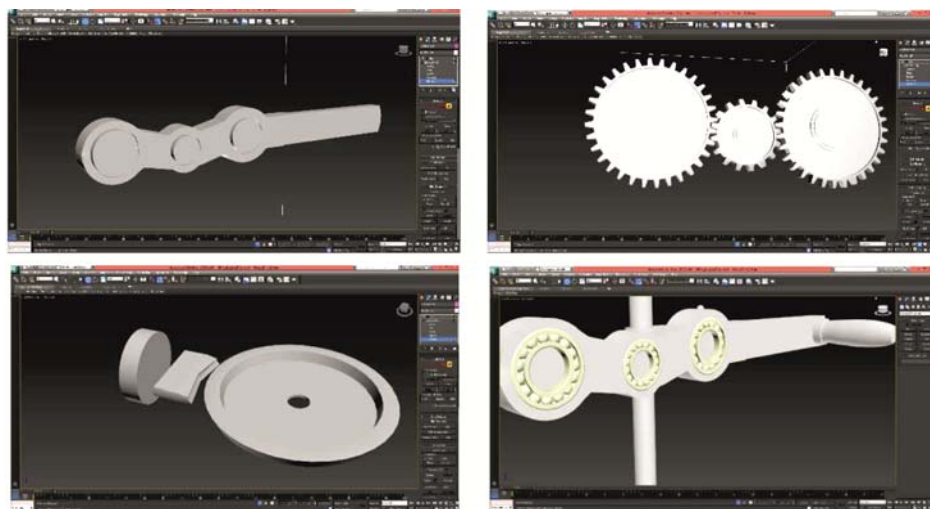


Рис. 5. Интерфейс 3D-моделирования водила, зубчатых колес, подшипников, подставочки

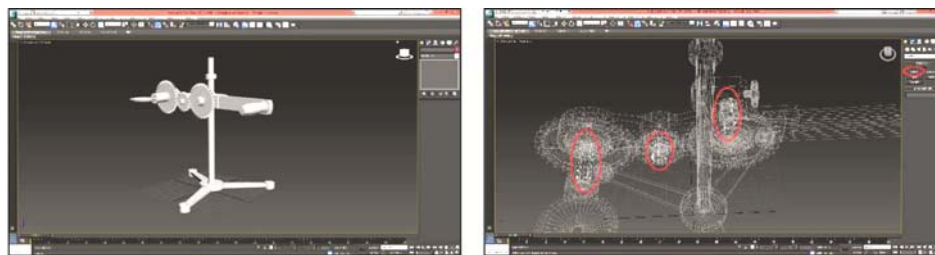


Рис. 6. Интерфейс 3D-документы механизма Фергюсона

следуемого механизма базируется на выборе ключевых кадров, создании эскиза (рис. 6) и назначении контроллера движения. Правильная организация процесса визуализации и установка соответствующих параметров позволяет студентам достичь высокой степени реалистичности модели.

Для изготовления прототипа 3D-модель воссозданного механизма № 9 необходимо сохранить в формате .stl или .step. Файлы в указанных форматах могут обрабатывать программы-слайсеры, применяющиеся с установками быстрого прототипирования. Прототип можно изготовить по технологии PolyJet компании Stratasys, на 3D-принтере Objet Eden 250. Для изготовления всех деталей данного механизма необходимо около 1 800 г модельного материала (жидкого фотополимера) и около 1 200 г материала поддержки (вспомогательного материала, впоследствии удаляемого с готовой модели) [20].

Разработанный 3D-документ планетарного механизма Фергюсона № 9 может быть использован при дальнейшем исследовании, включая кинематический и динамический анализ механизма.

С развитием сетевых технологий и открытым доступом к 3D-видеодокументам, размещенным в сети Интернет, университеты, институты, школы или любые организации могут получить доступ к виртуальным 3D-моделям воссозданных механизмов самых необычных конструкций, представляющих интерес, в том числе с точки зрения изучения истории техники и теории механизмов и машин.

Новые образовательные технологии. Новые образовательные технологии, основанные на использовании мультимедийного оборудования и компьютерных программ трехмерного моделирования, относятся к информационно-развивающим и позволяют организовать направленную исследовательскую работу студентов. Совместно с практико-ориентированными технологиями они могут с успехом применяться в технических университетах, в частности, на лабораторных занятиях и при проектировании по курсу «Теория машин и механизмов». Овладение студентами способов и приемов создания трехмерных объектов способствует развитию объемно-пространственного мышления и творческого воображения будущих инженеров. В настоящее время для создания конструкторской и технологической документации, чертежей и спецификаций широко используют системы автоматизированного проектирования (САПР), что обуславливает специальные требования к подготовке инженеров в техническом вузе. Закономерно, что 3D-моделирование становится одной из самых перспективных ветвей IT-инженерии. Обучение студентов младших курсов общетехническим дисциплинам, включая ТММ, на основе трехмерного компьютерного моделирования повышает профессиональную культуру будущего специалиста, стимулируя его потребность в постоянном самосовершенствовании. Новые образовательные технологии являются эффективным методом обучения студентов и способствуют лучшему пониманию предмета, популяризации и распространению научных знаний.

Литература

- [1] Evgrafov A., Egorova O., Khisamov A. Experience of Modernization of the Curriculum TMM in St. Petersburg State Polytechnical University. *New Trends in Educational Activity in the Field of Mechanism and Machine Theory*. Springer, 2014, vol. 19, pp. 239–247.
- [2] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. *Theory of Machines and Mechanisms*. Oxford University Press, 2011, 928 p.

- [3] Ceccarelli M. Evolution of TMM (Theory of Machines and Mechanisms) to MMS (Machine and Mechanism Science): An Illustration Survey. *Proc. of 11th IFToMM World Congress, Tianjin (PR China)*, 2004, vol. 1, pp. 13–24.
- [4] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и машин*. Москва, Издательство Юрайт, 2010. 351 с.
- [5] Леонов И.В., Леонов Д.И., Павлов Б.И., Егорова О.В. *Применение системы MathCAD в курсовом проектировании по теории механизмов и машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Баумана, 2012. 49 с.
- [6] Golovin A., Tarabarin V. *Russian Models from the Mechanisms Collection of Bauman University*. Springer, 2008. 261 p.
- [7] Histoire du musée. URL: <http://www.arts-et-metiers.net/musee/histoire-du-musee> (дата обращения 10 февраля 2015).
- [8] Егорова О.В., Тимофеев Г.А. Августин де Бетанкур — один из основоположников высшего инженерно-технического образования в России. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 1(78), с. 115–124.
- [9] Егорова О.В., Моисеев А.Н. По следам «русского испанца». *Международная жизнь*, 2011, № 10, с. 120–140.
- [10] Egorova O. *Agustin de Betancourt. Secretos cubanos de un ingeniero hispano-ruso (in Spanish)*. Ediciones Abril, La Habana (Cuba), 2010. 128 с.
- [11] Федоров И.Б., Павлихин Г.П. *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. 175 лет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 352 с.
- [12] *James Ferguson (1710–1776)*. URL: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/962220> (дата обращения 1 марта 2015).
- [13] *James Ferguson (Scottish astronomer)*. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/James_Ferguson_\(Scottish_astronomer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Ferguson_(Scottish_astronomer)) (дата обращения 20 февраля 2015).
- [14] *James Ferguson's Mechanical Paradox Orrery*. URL: <http://armstrongmetalcrafts.com/Products/ParadoxOrrery.aspx> (дата обращения 10 февраля 2015).
- [15] *Sun and planet gear*. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Sun_and_planet_gear (дата обращения 1 марта 2015).
- [16] *Explanation of Ferguson's Paradox*. URL: http://www.mekanizmalar.com/fergusons_paradox.html (дата обращения 25 февраля 2015).
- [17] *Autodesk 3ds Max Design 2014 (Version 16.0)*. URL: <http://www.seedoff.net/torrent/78777-autodesk-3ds-max-design-2014> (дата обращения 1 марта 2015).
- [18] URL: <http://www.kakprosto.ru/kak-53090-kak-nauchitsya-rabotat-v-autocad#ixzz3X51Qylud> (дата обращения 1 марта 2015).
- [19] *Autodesk 3ds Max*. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max (дата обращения 1 марта 2015).
- [20] Брекалов В.Г., Терехова Н.Ю., Сафин Д.Ю. Применение технологии трехмерного прототипирования в образовательном процессе. *Дизайн и технологии*, 2012, № 29(71), с. 118–123.

References

- [1] Evgrafov A., Egorova O., Khisamov A. Experience of Modernization of the Curriculum TMM in St. Petersburg State Polytechnical University. *New Trends in Educational Activity in the Field of Mechanism and Machine Theory*. Springer, 2014, vol. 19, pp. 239–247.
- [2] Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. *Theory of Machines and Mechanisms*. Oxford University Press, 2011, 2011. 928 p.
- [3] Ceccarelli M. Evolution of TMM (Theory of Machines and Mechanisms) to MMS (Machine and Mechanism Science): An Illustration Survey. *Proc. of 11th IFToMM World Congress, Tianjin (PR China)*, 2004, vol. 1, pp. 13–24.
- [4] Timofeev G.A. *Teoriia mekhanizmov i mashin* [Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow, Iurait publ., 2010. 351 p.
- [5] Leonov I.V., Leonov D.I., Pavlov B.I., Egorova O.V. *Primenenie sistemy MathCAD v kursovom proektirovanii po teorii mekhanizmov i mashin* [Application of MathCAD in course design on the theory of mechanisms and machines]. Moscow, Bauman Press, 2012. 49 p.

- [6] Golovin A., Tarabarin V. *Russian Models from the Mechanisms Collection of Bauman University*. Springer, 2008. 261 p.
- [7] *Histoire du musée*. Available at: <http://www.arts-et-metiers.net/musee/histoire-du-musee> (accessed 10 February 2015).
- [8] Egorova O.V., Timofeev G.A. Avgustin de Betankur – odin iz osnovopolozhnikov vysshego inzhenerno-tekhnicheskogo obrazovaniia v Rossii [Agustin de Betancourt – One of Founders of Higher Engineering Education in Russia]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2010, no. 1(78), pp. 115–124.
- [9] Egorova O.V., Moiseev A.N. Po sledam «russkogo ispantsa» [In the footsteps of «Russian Spaniard»]. *Mezhdunarodnaia zhizn'* [International affairs: a Russian journal of world politics, diplomacy and international relations]. 2011, no. 10, pp. 120–140.
- [10] Egorova O. *Agustin de Betancourt. Secretos cubanos de un ingeniero hispano-ruso* (in Spanish). Ediciones Abril, La Habana (Cuba), 2010. 128 p.
- [11] Fedorov I.B., Pavlikhin G.P. *Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana. 175 let* [Bauman Moscow State Technical University. 175 years]. Moscow, Bauman Press, 2005. 352 p.
- [12] *James Ferguson (1710–1776)*. Available at: <http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/962220> (accessed 1 March 2015).
- [13] *James Ferguson (Scottish astronomer)*. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/James_Ferguson_\(Scottish_astronomer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Ferguson_(Scottish_astronomer)) (accessed 20 February 2015).
- [14] *James Ferguson's Mechanical Paradox Orrery*. Available at: <http://armstrongmetalcrafts.com/Products/ParadoxOrrery.aspx> (accessed 10 February 2015).
- [15] *Sun and planet gear*. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Sun_and_planet_gear (accessed 1 March 2015).
- [16] *Explanation of Ferguson's Paradox*. Available at: http://www.mekanizmalar.com/fergusons_paradox.html (accessed 25 February 2015).
- [17] *Autodesk 3ds Max Design 2014 (Version 16.0)*. Available at: <http://www.seedoff.net/torrent/78777-autodesk-3ds-max-design-2014> (accessed 1 March 2015).
- [18] Available at: <http://www.kakprosto.ru/kak-53090-kak-nauchitsya-rabotat-v-autocad#ixzz3X51Qylud> (accessed 1 March 2015).
- [19] *Autodesk 3ds Max*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max (accessed 1 March 2015).
- [20] Brekalov V.G., Terekhova N.Iu., Safin D.Iu. Primenenie tekhnologii trekhmernogo prototirovaniia v obrazovatel'nom protsesse [The use of three-dimensional prototyping technology in the educational process]. *Dizain i tekhnologii* [Design and technology]. 2012, no. 29(71), pp. 118–123.

Статья поступила в редакцию 11.03.2015

Информация об авторе

ЕГОРОВА Ольга Владимировна (Москва) — доктор исторических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: cuba2006@inbox.ru).

Information about the author

EGOROVA Olga Vladimirovna (Moscow) — Dr. Sc. History, Professor of «Theory of Mechanisms and Machines» Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: cuba2006@inbox.ru).