

В.А. Глазунов

Парадигмальные прививки в робототехнике

В данной работе ставится задача подробно исследовать процесс осуществления парадигмальной прививки из одной области знания в другую. Особое внимание уделяется одному конкретному случаю междисциплинарного взаимодействия между физической химией (кристаллографией) и робототехникой. В данном взаимодействии непосредственное участие принимал автор этой статьи, находившийся внутри своеобразного научного этоса. При этом для решения научной задачи и для рефлексирования этого процесса использовалась робототехническая модель, описывающая переход самоорганизующейся системы на новый уровень развития.

Попытаемся исследовать процесс решения научной задачи на основе парадигмальной прививки. Автор, решая научную задачу, находился внутри самоорганизовавшейся системы, объединявшей нескольких ученых. Эту систему можно соотнести с классическим определением «научного этоса», данного Р.Мертон¹. Кроме того, автор одновременно отслеживал стадии решения проблемы. Интересно, что парадигмальная прививка оказалась направленной не в одну сторону, она дала объект и импульс исследования и той области, из которой прививка исходила.

Конкретно вопрос заключался в том, чтобы определить условия подвижности моделей, описывающих фрагменты кристаллических структур. Для этого использовалась методология винтового исчисления, описывающего сложные пространственные кинематические цепи. При решении задачи пришлось пройти все необходимые стадии соответствующего процесса, которые М.Полани, ссылаясь на А.Пуанкаре, определил следующим образом: подготовка, вызревание,

озарение и проверка². Эти стадии мы представляем на наглядной модели, описывающей процесс бифуркации, поскольку решение научной задачи можно описать как именно такой процесс. В.С.Степин, приводя мнение Т.Куна об аномалиях и кризисах, предшествующих смене парадигм, указывал, что существует «...вариант научных революций, когда они осуществляются за счет междисциплинарных взаимодействий и “парадигмальных прививок” из одной науки в другую»³. В данном случае рассматривается сложная самоорганизующаяся система, и она, «...подвергаемая насильственному и активному силовому давлению извне, может не породить новых состояний и новых структур, а будет “сбиваться” к прежним структурам. Но если она проходит через точку бифуркации, то небольшое энергетическое воздействие – укол в нужном пространственно-временном локусе оказывается достаточным, чтобы система перестроилась и возник новый тип структур»⁴. «Научные революции представляют собой своеобразные “точки бифуркации” в развитии знания, когда обнаруживаются различные возможные направления (сценарии) развития науки. Из них реализуются те направления, которые не только дают позитивный эмпирический и теоретический сдвиг проблем (И.Лакатос), но и вписываются в культуру эпохи, согласуются с возможными модификациями смысла ее мировоззренческих универсалий»⁵.

При решении рассматриваемой научной задачи невозможно было прибегнуть к известным алгоритмизированным приемам, требовались эвристические подходы. На каждом этапе решения задачи подтверждалось следующее положение М.Полани: «...различие между двумя типами решения задач, систематическим и эвристическим, воспроизводится в том факте, что если систематическая операция есть всецело запрограммированный акт, эвристический процесс есть комбинация активных и пассивных фаз». Решая проблему, следует «...смотреть на известные данные, но не на сами по себе, а как на ключи к неизвестному, ...как на его части». «Достичь открытия, опираясь на привычную систему понятий, логически невозможно». Следует согласиться с критикой М.Полани положения Маха «...о том, что преимущество теории заключается просто в экономности описания наблюдаемых фактов»⁶.

Частые ссылки на М.Полани не случайны. Дело в том, что этот автор по своей научной специальности занимался физической химией и кристаллографией. Он так характеризовал основной подход при описании кристаллических структур: «...32 класса симметрии являются в данной теории [кристаллографии] основным и единственным средством классификации кристаллов»⁷. (Имеются в виду 32 возмож-

ные комбинации шести видов организации симметричных структур: отражение, инверсия, двойное, тройное, четырехкратное и шестикратное вращение.) Теоретическая кристаллография является одним из разделов современной геометрии, которая предполагает «...рассматривать кристаллическую структуру, целиком заполняющую все трехмерное евклидово пространство или же евклидову плоскость». Решетка кристалла переходит сама в себя при всех трансляциях вдоль некоторых установленных векторов⁸.

Процесс решения задачи, описываемый в нашей работе, в известной мере можно сопоставить с процессом, описываемым М.Полани: «Импульс, содержащийся в первоначальном эвристическом акте, был страстным и необратимым преобразованием, которому открыватель подверг свои собственные концепции; за этим преобразованием мог последовать столь же бурный процесс обращения других. После этого тот же процесс воспроизводится в смягченной версии: сначала как окончательное признание публикой данного открытия, и наконец в такой форме, в которой все его динамическое качество утрачено»⁹. Конечно, в рассматриваемом нами случае еще весьма далеко от этапа обращения других к новой парадигме. Нас прежде всего интересует адекватность робототехнической модели творческого акта, а также роль «ортогональных» воздействий (важнейшими из которых являются парадигмальные прививки) в формировании новой парадигмы.

Обратимся к рассмотрению различных трактовок, описывающих творческий акт при изобретении. Например, В.А.Коваленко так обозначил творческие этапы решения изобретательской или научной задачи: постановка проблемы, рождение замысла, атака (перебор вариантов), релаксация, инкубация, инсайт¹⁰. Обратим внимание на наличие этапов формирования противоречия, релаксации и выхода на иной уровень. В цитируемой работе отмечается наличие сходных этапов в рассмотрении творческого акта, предпринятых Г.С.Альтшуллером¹¹, а также П.К.Энгельмейером, который трактовал создание изобретения как «трехакт»: желание, знание, умение¹².

Переход на иной, более высокий парадигмальный уровень наблюдается при решении различных научных задач робототехники и составляющих ее дисциплин (теории механизмов и кибернетики). Для постановки мысленных экспериментов, характеризующих этот процесс, разработаны наглядные модели¹³. Здесь две кинематические цепи АВ и ВС обеспечивают функционирование системы в плоскости — это старая парадигма. В недрах упомянутой парадигмы зреет новая подсистема ВЕ, для чего важна флуктуация параметров, накоп-

ление какого-либо признака. Формирование новой подсистемы ВЕ приводит к появлению внутренних напряжений, противоречий, для разрешения которых система должна перейти на более высокий уровень (после этого в рассматриваемом случае она будет функционировать в трехмерном пространстве). Но сначала необходим период некоторой релаксации.

Дело в том, что имеющийся хаос, проявляющийся в невозможности независимого функционирования подсистем, легче преодолеть, когда двигатели находятся в «плавающем» состоянии. В этот момент система должна сканировать то пространство (в данном случае плоскость), где она пока вынуждена пребывать, «ища» ортогональное воздействие, способное направить ее на более высокую ступень развития. Тут-то и нужна парадигмальная прививка, направленная извне парадигмы и обуславливающая изменение конструкции некоторых структурных элементов.

Попытаемся сопоставить представленные модели с задачей по осуществлению парадигмальной прививки из теории пространственных манипуляционных шарнирных механизмов в кристаллографию. В Институте физической химии РАН при изучении строения кристаллических структур было введено понятие модуля, который представляет собой многогранник, охватывающий атомы структуры¹⁴. Нарушение каких-либо связей в модуле может привести к относительной подвижности группы атомов и переходу к другой кристаллической модификации. Для описания указанных модулей может применяться геометрический подход, когда каждый атом (в некотором масштабе) снабжается набором координат в трехмерном пространстве, и энергетический метод, когда всякое изменение формы модуля связывается с приращениями энергии системы.

Модель модуля выполнена в виде шариков, соединенных металлическими стержнями. Здесь имеются «атомы» 2–5, между которыми существуют неизменные связи – по длине и по углу между ними. «Атомы» 6–9, напротив, подвержены наиболее существенным относительным смещениям, остальные «атомы» могут смещаться в меньшей степени. Методами кристаллографии были установлены параметры модели: расстояние между соседними «атомами» одинаковы (их можно принять равными единице), а идеальный угол между соседними связями составляет $109,47^\circ$. В этой модели, по сведениям кристаллографов, можно обнаружить все тела Платона – правильные многогранники. Например, «атомы» 2–5 – это вершины тетраэдра, а «атом» 1 – центр этого тела.

Данная модель имеет внутреннюю подвижность: она может несколько менять свою форму. Вопрос заключался в том, что является условием наличия подвижности. Этот вопрос важен для кристаллографии, так как разные физические воздействия могут нарушать структуру кристалла, нужно уметь предвидеть данные изменения, а быть может, удастся и управлять ими. (В данной работе нас интересует не физическая или геометрическая сторона проблемы, а ход решения задачи и осмысление последствий этого процесса).

Представление связи между «атомами» в виде металлического стержня, обуславливающего возможность поворота вокруг его оси, но не позволяющего менять взаимное положение осей звеньев, является довольно грубым приближением (но это закругление, как известно, при моделировании бывает весьма плодотворно). Дело в том, что в кристалле атомы углерода при изменении своего взаимного положения вызывают изменение энергии связей между ними. При этом нарушение угла между осями соседних связей или длины связи дает приращение энергии, примерно в 100 раз большее, чем то, которое обусловлено торсионным вращением вокруг оси связи. Поэтому в изготовленной модели есть некоторая возможность изгиба металлических стержней, расположенных между «атомами», и наличествует вращение вокруг осей стержней.

Можно отметить, что модель представляет достаточно сложный объект. Она содержит большое (21) число тел, охватываемых 28 связями, и, на первый взгляд, трудно усмотреть возможность применения методов теории механизмов к ее исследованию (скорее, как может показаться, это уместнее отнести к строительной механике). Но в Институте физической химии РАН был изготовлен механизм, представляющий один контур модели фрагмента кристаллической структуры. Этот механизм имеет шесть вращательных кинематических пар и по структурной формуле должен обладать нулевой подвижностью. Однако данная кинематическая цепь характеризуется одной степенью свободы, и, таким образом, здесь присутствует одна избыточная связь. Весьма примечательным для специалистов в области структуры механизмов явился тот факт, что рассматриваемая кинематическая цепь может быть собрана двумя способами. Первый способ характеризует взаимное положение «атомов» в модели, и здесь имеется подвижность. Второй способ (он соответствует кристаллам алмаза) отличается отсутствием подвижности. Следует отметить, что представленный и выполненный в металле механизм не встречался в литературе по механизмам с избыточными связями.

В данной работе мы хотим защитить тезис, что решение научной или другой творческой задачи описывается моделью: сначала выстраивание некоторой цепочки, обуславливающей противоречия, напряжения в старой парадигме, а потом момент инсайта – выход (может быть, под действием парадигмальной прививки) в новую парадигму, характеризующую более высокой размерностью. Мы, кроме того, утверждаем, что решение каждой малой части общей научной задачи, связанной, например, с установлением некоторых положений внутри старой парадигмы, должно иметь элементы инсайта и также в какой-то степени подчиняется модели. В этом смысле любая научная задача и ее решение представляют фрактальное образование.

Рассмотрение модели фрагмента кристаллической структуры мы начали с составления матрицы координат (так называемых Плюккеровых координат) единичных векторов осей вращательных кинематических пар, расположенных вдоль стержней. Уже в данном случае мы имеем некоторое лингвистическое отличие от имевшегося языка описания фрагмента структуры кристалла. До его момента записывались координаты центров «атомов», а теперь имеют место координаты связей. Такой переход потребовал некоего творческого усилия и позволил выяснить, возможна ли мгновенная (бесконечно малая) подвижность этой системы. Оказалось, что в матрице размером 27148 (27 столбцов и 48 строк), состоящей из упомянутых координат, имеются лишь 27 независимых строк – это свидетельствует о наличии подвижности.

Обратим внимание на два момента. Во-первых, укажем, что здесь мы воспользовались известным в механике подходом, разработанным румынскими учеными Р.Войня и М.Атанасиу¹⁵, и в этом смысле мы оставались «внутри» родной парадигмы, хотя некоторые творческие усилия понадобились для осознания этого метода и «приспособления» его к конкретному случаю. (Вообще, по нашему мнению, понимание, осознание научного метода – это весьма творческий герменевтический процесс, требующий своих моментов инсайта). Во-вторых, укажем, что сам «запрос» о парадигмальной прививке подтолкнул некоторое развитие методологии в теории механизмов, дал новый объект изучения. Чисто лингвистическое различие описания структуры фрагмента кристалла (координаты атомов или координаты связей) вызвало, по существу, семантическое различие в постановке задачи о подвижности и в ее решении.

Следующим шагом, потребовавшим значительных творческих усилий, стало решение вопроса о том, каковы условия наличия подвижности (иными словами избыточной связи) в кинематической

цепи, имитирующей контур. На схеме кинематические пары представлены в виде цилиндров, углы между осями которых составляют $109,47^\circ$, длина каждой связи принимается равной единице. Предстояло выяснить, только ли при указанных условиях подвижность будет иметь место, или имеются другие варианты. Мы приступили к «сканированию» пространства внутри имевшейся у нас старой парадигмы с целью приобретения «ортогонального воздействия» — мы стали тщательным образом изучать известные публикации в области механизмов с избыточными связями. Но механизм, подобный рассматриваемому, нигде не встречался.

Напомним, что наиболее ранний из известных механизмов с избыточными связями — это механизм Беннета¹⁶, имеющий четыре вращательные кинематические пары. Длины звеньев в этом механизме относятся друг к другу как синусы углов между осями соседних кинематических пар. Затем М. Гольдбергом было предложено соединить два механизма Беннета, убирая общее звено и получая пяти- и шестизвенные механизмы с избыточными связями¹⁷. Этот подход впоследствии развит П. Г. Мудровым¹⁸ и Д. Э. Бейкером¹⁹. Но параметры интересующего нас механизма нельзя было соотнести с параметрами механизма Беннета или Гольдберга.

Наибольшие «подозрения» у нас (автора этой статьи, аспиранта Института машиноведения РАН Р. Э. Быкова и старшего научного сотрудника Института физической химии РАН Д. Л. Тытика) вызывала группа механизмов Брикара²⁰ (и потом эти «подозрения» подтвердились). Однако в указанных механизмах (вернее, в наиболее известных из них) оси соседних кинематических пар скрещиваются, а не пересекаются, как в рассматриваемом нами механизме. Были проанализированы механизмы с избыточными связями, полученные в 60-х, 70-х годах К. Уолдроном (нынешним президентом IFToMM — Международной Федерации по теории механизмов и машин, созданной по инициативе академика И. И. Артоболевского). Однако и те механизмы, отличающиеся симметрией и наличием винтовых кинематических пар, не подходили для интересующего случая.

Здесь подчеркнем не только значимость существования в литературе схемы механизма, но и важность обоснования необходимости и достаточности условий избыточных связей. Это тот «язык», на котором исследователь мыслит и моделирует объект. Будучи учеником и последователем Ф. М. Диментберга, автор данной работы, естественно, придерживается разработанного Ф. М. Диментбергом подхода, основанного на винтовом исчислении и методе результата²¹. В этом

методе предусматривается получение алгебраических полиномиальных выражений для тригонометрических функций угловых координат звеньев механизмов, а затем определяются условия, при которых какие-то перемещения равны нулю (при этом используются так называемые результаты, дающие возможность найти общие корни полиномов).

Однако «напрямую» применить подход Ф.М.Диментберга здесь не удалось — слишком сложные получались выражения для результатов. Мы попытались воспользоваться недавно разработанным алгоритмом Б.Росса (в прошлом президент IFToMM) и С.Мавройдиса (в настоящее время президент Американского национального комитета по теории механизмов и машин)²². В этом подходе используются матрицы Денавита-Хартенберга размером $4i4$, описывающие изменение координат некоторой точки при переходе от одной координатной системы к другой. Но мы не смогли до конца разобраться в этом методе, хотя автор имел личные беседы и с Б.Россом, и С.Мавройдисом. Это происходило во время X Всемирного конгресса по ТММ в Финляндии в 1999 г. и во время XIII Международного симпозиума по робототехнике в Польше в 2000 г. Удалось лишь установить, что речь идет о некоторых преобразованиях векторов, поставленных в соответствие звеньям и кинематическим парам механизмов. Преобразования осуществляются на основе скалярных и векторных перемножений упомянутых векторных величин, в результате чего возникает возможность решить задачу о положениях и выявить условия наличия избыточной связи.

Несмотря на то, что мы пытались (с помощью пакета Mathcad) проделать все указанные в статье Росса и Мавройдиса операции, успеха добиться не удалось. Мы в этой ситуации попали в состояние некоторого хаоса, противоречия, и для осуществления герменевтического акта понимания были нужны новые «ортогональные воздействия».

Но, оставив попытки овладеть подходом Б.Росса и С.Мавройдиса, мы смогли осуществить собственный «момент инсайта», изменив модель (иными словами «микрорадиангу») рассмотрения данного механизма. Было подмечено, что в кинематической цепи существуют неизменные расстояния между некоторыми точками соответственно. Появилась возможность рассматривать эту одноконтурную кинематическую цепь как механизм параллельной структуры. Правда, у некоторых коллег, занимающихся ТММ, вызвала сомнение правомочность такого перехода, поэтому пришлось составить уравнения связей в кинематических цепях. После этого обоснованность нового подхода подтвердилась.

Далее рассуждения основывались на следующих положениях. В механизме можно выделить три контура, включающие по две вращательные и две сферические кинематические пары. При этом можно использовать функции положения²³, выведенные для одноконтурных механизмов, а затем и воспользоваться «родным» методом результанта. Этим путем мы и пошли, получив в результате полином шестнадцатой степени. Тожественное равенство нулю коэффициентов полинома позволило констатировать наличие избыточной связи.

На каждом этапе рассмотрения проблемы мы ощущали пригодность модели, характеризующей моменты инсайта, причем не меньших, а может, и больших творческих усилий требует герменевтический акт понимания научного текста (вернее, заключенной в нем идеи). Например, в нашем случае лишь после разработки своего подхода к анализу избыточной связи в механизме нам удалось понять, что этот механизм соответствует одному из механизмов Брикара — так называемому октаэдральному механизму, симметричному относительно линии. То же можно сказать о применении метода результанта для решения задач о положениях механизмов параллельной структуры. Соответствующий алгоритм применяли В.Паренти-Кастелли и С.Инносенти²⁴ (но они не решали задачу об избыточных связях). Соответствующая статья была в нашем распоряжении, но не был совершен герменевтический акт понимания данного алгоритма.

Несмотря на то, что формально парадигмальная прививка происходила из теории механизмов в кристаллографию, тем не менее наблюдался и обратный процесс. Из кристаллографии был дан не известный ранее объект для изучения — многоконтурный и одноконтурный механизмы с избыточными связями. Это, в свою очередь, стало некоторым импульсом в развитии методологии исследования пространственных механизмов. Были получены новые многоконтурные механизмы параллельной структуры с избыточными связями, дополнены методы их исследования. Было выявлено также некоторое новое свойство, касающееся особых положений механизмов параллельной структуры: было впервые установлено, что принципиально возможны такие особые положения (точки бифуркации), будучи в которых система имеет конечную (а не бесконечно малую, как считалось ранее) подвижность.

Хотя здесь рассмотрена лишь одна задача, одна парадигмальная прививка из теории механизмов в кристаллографию (а вернее, эта прививка оказалась обоюдной), тем не менее отсюда можно усмотреть возможные приложения теории роботов в нанотехнологиях. Эти приложения, прежде всего, видятся в использовании методов теоре-

тической робототехники в исследованиях структур, представляющих объекты нанотехнологий. Например, речь может идти о цепочках атомов, охваченных связями, позволяющими изменять конфигурацию цепи. В этом случае весьма уместно было бы воспользоваться алгоритмами решения задач о положениях, разработанными в робототехнике. Это же может касаться и геной инженерии, поскольку информация о наследственном коде может скрываться не только в структуре взаимосвязей между частями ДНК, но и в геометрии их взаимного положения.

Другим аспектом, обуславливающим возможное проникновение робототехники в нанотехнологию и в геноую инженерию, может явиться использование микроманипулирующих устройств в этих областях. Например, именно робототехническая система лежит в основе туннельного растрового микроскопа²⁵ — устройства, позволяющего исследовать поверхности на наноуровне и манипулировать атомами. Заметим также, что, говоря о манипулировании генами, мы должны иметь в виду некие микромеханизмы, работающие на принципах робототехнических систем, могущих автономно в изменяющихся условиях осуществлять предписанную программу.

Что касается кристаллографии, то трудно предсказать, приживется ли (и с какой степенью трудности) описанная парадигмальная прививка в теле этой науки. Во всяком случае, этому подходу придется преодолевать сопротивление добросовестных приверженцев наличествующей парадигмы. А ведь изначально все различие свелось к лингвистическому аспекту математического описания фрагмента кристаллической структуры: координаты атомов заменены на координаты связей (шестимерные плюккеры координаты единичных векторов, расположенных вдоль осей связей). Однако лингвистические различия уже привели и к семантическим расхождениям, связанным с разной постановкой задач, а в дальнейшем возможны и еще более глубокие отличия.

По результатам этой работы была опубликована статья в журнале по проблемам машиноведения²⁶. В этой статье в более или менее логической («линейной») форме было представлено решение описанной задачи. Если бы некий будущий историк науки задумал бы по данной статье воссоздать действительный процесс этого решения, то он скорее всего пошел бы по ложному пути. Он бы, наверно, предположил, что мы сначала уяснили результаты работ Бейкера, Уолдрона, Паренти-Кастелли и др. и воспользовались ими, а затем уже привнесли свое развитие в эту парадигму. На самом же деле мы смогли понять эти работы (да и то лишь в какой-то степе-

ни) только после того, как нашли свой путь решения вопроса о подвижности кинематических цепей, имитирующих фрагменты кристаллических структур.

Подведем некоторые итоги предпринятого исследования. Мы рассмотрели лишь одну задачу по осуществлению парадигмальной прививки из робототехники и теории механизмов в кристаллографию. Изначально суть прививки свелась к использованию лингвистически отличного (с точки зрения математики) описания фрагмента кристаллических структур. Однако это лингвистическое отличие привело и к более глубоким расхождениям в постановке задач исследования и в методах их решения. Парадигмальная прививка происходит не односторонне из одной сферы науки в другую, а обоюдно. Например, в данном случае в теорию механизмов с избыточными связями привнесен новый объект исследования, развита методика анализа и синтеза этих механизмов.

Разработанная модель творческого акта хорошо служит для описания процесса решения научной задачи в целом и ее отдельных частей (и помогает при их решении). При этом необходимы значительные творческие усилия не только для нахождения алгоритма решения какого-то вопроса, но и для осуществления герменевтического акта понимания некоторого научного текста. Более того, само понимание может произойти уже после того, как найден собственный алгоритм решения задачи. Укажем также на фрактальность решения проблемы, которая, на наш взгляд, связана с тем, что каждый этап этого процесса в большей или меньшей степени обуславливает либо некоторый отход от парадигмы, либо хотя бы акт понимания уже существующих алгоритмов. И то и другое требует творческих усилий (это «нелинейный» процесс) и перехода на новый уровень исследований с более высоким числом «измерений» («степеней свободы»).

Примечания

- ¹ *Merton R.K.* The Institutional Imperatives of Science // *Sociology of Science* /Ed. B.Barnes. L., 1972. P. 65–79; *Merton R. K.* The Sociology of Science. Chicago, 1973. P. 267–278.
- ² *Полани М.* Личностное знание: на пути к посткритической философии. М., 1985. С. 178.
- ³ *Степин В.С.* Теоретическое знание. М., 2000. С. 12.
- ⁴ Там же. С. 696.
- ⁵ Там же. С. 712.
- ⁶ *Полани М.* Личностное знание: на пути к посткритической философии. М., 1985. С. 185, 187, 208, 211.
- ⁷ Там же. С. 76.

- 8 *Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т.* Современная геометрия. Методы и приложения. М., 1979. С. 165, 166.
- 9 *Полани М.* Личностное знание: на пути к посткритической философии. М., 1985. С. 248.
- 10 *Коваленко В.А.* Организация творческого мышления // *Вопр. философии.* 2002. № 8. С. 78–87.
- 11 *Альтшуллер Г.С.* Алгоритм изобретения. М.: Моск. рабочий, 1969. 272 с.
- 12 *Коваленко В.А.* Организация творческого мышления. С. 82.
- 13 См.: *Глазунов В.А.* Междисциплинарность робототехники. Самоорганизация, бифуркации, многокритериальность. М., 2000. С. 67–78.
- 14 *Bulienkov N.A.* Three Possible Branches of Determinate Modular Generalization of Crystallography, in Quasi-crystals and Discrete Geometry // *Fields Institute Monographs.* American Mathematical Society. 1998. Vol. 10. P. 67–134.
- 15 *Voinea R., Atanasiu M.* Contributions a la Theorie geometrique des Vis // *Buletinul Institutului Politichnic.* Bucuresti, 1959. № 21, f. 3. P. 69–90.
- 16 *Bennett G.T.* A New Mechanism // *Engineering.* L., 1903. P. 778.
- 17 *Goldberg M.* New Five-Bar and Six-Bar Linkages in Three Dimensions // *Transactions of the ASME.* 1943. Vol. 46, № 6. P. 649–661.
- 18 *Мудров П.Г.* Пространственные механизмы с вращательными парами. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 19787. 264 с.
- 19 *Baker J.E.* Overconstrained 5-Bars with Parallel Adjaicent Joint Axes. I. Method of Analysis // *Mechanism and Machine Theory.* 1978. Vol. 13, № 2. P. 213–218.
- 20 *Baker J.E.* An Analysis Of the Bricard Linkages // *Mechanism and Machine Theory.* 1980. Vol. 15, № 4. P. 267–286.
- 21 *Диментберг Ф.М.* Теория пространственных шарнирных механизмов. М.: Наука, 1982. 336 с.
- 22 *Mavroidis C., Roth B.* Analysis of Overconstrained Mechanisms // *Transactions of the ASME. Journal of Mechanical Design.* 1995. Vol. 117. P. 69–74.
- 23 *Диментберг Ф.М.* Теория пространственных шарнирных механизмов. М.: Наука, 1982. 336 с.
- 24 *Parenti-Castelli V., Innocenti C.* Direct displacement Analysis for some Class of Spatial Parallel mechanisms // *VIII CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.* Italy, 1990. P. 134–142.
- 25 *Бинниг Д., Рорер Г.* Растровый туннельный микроскоп // *В мире науки.* 1985. № 10. С. 26–33.
- 26 *Быков Р.Э., Глазунов В.А., Тьтик Д.Л., Новикова Н.Н.* Моделирование модулей кристаллических структур с помощью механизмов с избыточными связями // *Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение.* 2002. № 2. С. 89–96.