

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»**

**РЕФЕРАТ**

**к кандидатскому экзамену**

**по дисциплине «Философия естественных наук. История математики»  
направление подготовки 01.06.01 «Математика и механика»  
направленность (профиль) подготовки 05.13.18 «Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ»**

**Тема реферата: «История развития нелинейных методов исследования  
задач об устойчивости и стабилизации стационарных движений  
механических систем»**

Выполнил:  
аспирант 1 года  
очной формы  
обучения  
кафедры ИБиТУ  
Колегова Л.В.

Проверил:  
к.ф.-м. наук, доцент  
Веревкин А.Б.

Оценка: *отлично*

Дата: *27.02.2019*

Подпись: *Веревкин*

Ульяновск, 2019 г.

## **Содержание:**

<b>1. Введение.....</b>	<b>стр.3</b>
2. Изучение механики в 18 веке.....	стр.4
3. Механические задачи в 19-20 вв.....	стр.6
4. Механика и теория устойчивости 20 века.....	стр.13
5. Современное развитие механики.....	стр.15
6. Применение принципов устойчивости в робототехнике.....	стр.18
<b>7. Список литературы.....</b>	<b>стр.26</b>

## 1. Введение

*«Сближение теории с практикой дает самые благотворные результаты, и не одна только практика от этого выигрывает; сами науки развиваются под влиянием ее, она открывает им новые предметы для исследования или новые стороны в предметах, давно известных». (П.Л. Чебышев)*

Теоретическая механика есть научная основа важнейших направлений развития современной техники. Потребности человеческого общества последовательно выдвигают в качестве актуальных и неотложных проблем исследования все новые и новые явления механического движения. Теоретическая механика в значительной степени формировалась и растет сейчас на материалах изучения конкретных частных задач, появление которых обусловлено развитием техники. Это отчетливо видно из всей многовековой истории развития механики. Можно напомнить, что практические применения простейших машин (блоки, рычаги, полиспасты) в античное время при строительстве крупных зданий в Греции, Риме и Египте привлекли внимание ученых и в результате были разработаны методы определения центров тяжести тел простой геометрической формы и формулирован закон равновесия рычага. Развитие мореплавания, военной техники и гражданского строительства в XV—XVIII вв. способствовали открытию основных законов механического движения и появлению фундаментальных трудов по динамике твердого тела и небесной механике.

Общие принципы учения о движении рассматриваются Аристотелем в Физике. Из античных сочинений по механике до наших дней дошли трактаты Архимеда, связанные с понятием центра тяжести и его применением к обоснованию закона рычага и к решению геометрических задач об определении площадей и объёмов, Механика Герона, в которой действие различных простых машин также сводится к закону рычага, 10 глава трактата Витрувия об архитектуре, в которой речь идёт о практических применениях механических приспособлений, а также ряд сочинений по строительству военных машин. И Герон, и Витрувий выказывают своё знакомство с Механическими проблемами, неоднократно приводя содержащиеся в них рассуждения. Многие идеи Механических проблем были усвоены также и средневековой традицией «науки о тяжестях» (Clagett 1959, Зубов 1962), вплоть до механики Ренессанса (Гуковский 1947, Rose & Drake 1971)

Автор Механических проблем, так же как и Аристотель в Физике, говорит о том, что одни движения происходят согласно природе, а другие – вопреки природе. Однако у Аристотеля движение по природе – это прежде всего подъём лёгких тел вверх от центра Земли и падение тяжёлых тел вниз к центру Земли. Автор трактата выделяет другую сторону дела: с помощью

различных механических приспособлений человек может «обхитрить природу», подняв малой силой тяжёлый груз.

## 2. Изучение механики в 18 веке

Среди ученых всех времен и народов в области точного естествознания Леонарду Эйлеру принадлежит одно из первых мест. Эйлер обладал изумительной трудоспособностью и гениальным дарованием. В настоящее время выяснено, что за свою творческую жизнь он написал более 800 работ по различным разделам математики, механики, физики, астрономии и техники. В изданиях только Петербургской Академии наук им было опубликовано около 600 работ.



*Леонард Эйлер (1707—1783)*

Работы по механике публиковались Эйлером с 1728 года. Среди этих работ: «Механика, или Наука о движении в аналитическом изложении» (2 тома — 980 стр., издано в Петербурге в 1736 г.); «Морская наука, или Трактат о строении кораблей и управлении ими» (2 тома — 978 стр., издано в Петербурге в 1749 г.); «Метод нахождения кривых линий, обладающих свойствами максимума либо минимума» (480 стр., издано в Женеве в 1744 г.); «Теория движения твердых тел» (520 стр., издано в

Ростке в 1765 г.); «Новая теория движения Луны» (790 стр., издано в Петербурге в 1772 г.); Итоговые статьи по гидромеханике (512 стр., изданы в Петербурге в 1768—1772 гг.) — представляют фундаментальные исследования, излагающие наиболее важные результаты, достигнутые предыдущим ходом развития науки и открывающие новые пути дальнейшего изучения различных разделов механики.

В области теоретической механики Л. Эйлер является родоначальником аналитического метода исследования реальных задач. Достоинства нового метода были подтверждены Эйлером крупнейшими оригинальными научными открытиями: разработкой теории несвободного движения точки, созданием теории движения твердого тела, точной формулировкой меры устойчивости равновесия плавающих тел,

открытием основных методов и уравнений гидромеханики идеальной жидкости, точными расчетами баллистических траекторий в сопротивляющейся среде, а также созданием теории движения Луны.

В предисловии к своей книге «Механика, или Наука о движении в аналитическом изложении» Эйлер указывает, что наиболее значительными произведениями мировой литературы по теоретической механике XVII и XVIII веков являются «Статика» Вариньона, «Форономия» Германа (Герман (1678—1733)—швейцарский математик. В 1725 году был приглашен академиком Петербургской академии наук. Его наиболее известное сочинение по механике называется: «Форономия, или о силах и движениях твердых и жидких тел». Оно было напечатано в лейпцигском журнале «Acta eruditorum», 1716) и «Начала» Ньютона. Однако, как пишет Эйлер, изучению и пониманию произведений Германа и Ньютона мешает то обстоятельство, что все доказательства приведены в этих сочинениях «по обычаю древних при помощи синтетически геометрических доказательств» без применения математического анализа, «благодаря которому только и можно достигнуть полного понимания этих вещей». «Если анализ где-либо и необходим, так это особенно относится к механике». Если читатель даже хорошо понял какое-либо положение, доказанное геометрически, то стоит немного изменить условия задачи, как самостоятельное исследование становится трудным, требующим особой проницательности и остроумия. «Это как раз случилось со мной, — пишет Эйлер, — когда я начал знакомиться с «Принципами» Ньютона и «Форономией» Германа; хотя мне казалось, что я достаточно ясно понял решение многих задач, однако задач, чуть отступающих от них, я уже решить не мог. И вот тогда-то я попытался, насколько умел, выделить анализ из этого синтетического метода и те же предложения для собственной пользы проработать аналитически; благодаря этому я значительно лучше понял суть вопроса» (Л. Эйлер, Основы динамики точки, ОНТИ, 1938, стр, 34).

Заслуга Эйлера состояла в том, что, правильно оценив преимущества дифференциального и интегрального исчислений, а также вариационного исчисления, как методов наиболее адекватных сущности задач механики, он подвергнул аналитическому исследованию как задачи уже решенные, так и разрешил большое число новых проблем. «При этих занятиях я не только встретился с целым рядом вопросов, ранее совершенно не затронутых, которые я удачно разрешил, но я нашел много новых методов, благодаря которым не только механика, но и самый анализ, по-видимому, в значительной степени обогатился. Таким образом, и возникло это сочинение о движении, в котором я изложил аналитическим методом и в удобном порядке как то, что я нашел у других в их работах о движении тел, так и то, что я получил в результате своих размышлений».

До работ Эйлера теоретическая механика была наукой для избранных, а механические задачи — средством для испытания тонкости и глубины ума. Если решенная задача была важна для практических приложений, то

обычно давались рецепты, как полученное решение следует использовать. Даже небольшие отклонения от полученного результата при несущественных видоизменениях условий были трудно объяснимы, а новые решения казались особой удачей, случайным счастьем, сверхчеловеческим прозрением, ибо не был найден общий метод, который подчиняет человеческому уму сразу широчайший класс явлений. Хотя анализ бесконечно малых был открыт до Эйлера, а решения некоторых задач в «Principia» Ньютона позволяют утверждать, что Ньютон хорошо знал преимущества нового метода для исследований механического движения, исторически именно Эйлеру принадлежит честь всестороннего раскрытия человечеству подлинного могущества этого великого открытия. Эйлер показал механике широкую дорогу быстрого прогресса.

### 3. Механические задачи в 19-20 вв.

Говоря о теории устойчивости движения, нельзя не упомянуть русского математика, Академика Петербургской Академии наук Александра Михайловича Ляпунова (1857—1918).

Первым этапом в решении задачи на равновесие было определение положения равновесия, или закона движения тела; стали решаться задачи на равновесие тел или механической системы. После определения положения равновесия вставал вопрос: будет ли найденное положение соответствовать устойчивому или неустойчивому равновесий)? Практическое значение могли иметь только устойчивые положения; они характеризовались тем, что находящиеся в таком положении тела при небольшом отклонении автоматически возвращались в положение равновесия. Может быть впервые такая задача была поставлена в приписываемых Аристотелю «Механических проблемах».

Такой же задачей занимался и Архимед, рассматривавший положение равновесия тяжелого параболического сегмента, плававшего в жидкости различной плотности; как истинный практик Архимед рассматривал лишь устойчивые положения равновесия, проверяя, может ли рассматриваемое тело, будучи выведено из положения равновесия, самостоятельно в него вернуться.

После него во избежание затруднительной работы стремились получить критерий, при помощи которого можно было бы без расчетов определить, будет ли данное положение равновесия устойчивым или нет. Первый такой критерий для механической системы тел, находящихся под действием силы тяжести, дал ученик Галилея *Торричелли* (1608 — 1647); он указал, что устойчивое равновесие соответствует таким положениям системы, в которых высота центра тяжести имеет минимальное значение. Для часто встречающегося случая, когда тяжелое тело имеет только одну точку опоры, принцип Торричелли толковался так, что устойчивое

положение равновесия получается, когда центр тяжести находится ниже точки опоры.

Обобщение второго принципа для сил, обладающих силовой функцией, было дано теоремой *Дирихле* (1805—1859).

Случай устойчивости равновесия системы тел, имеющей несколько степеней свободы, был рассмотрен Лагранжем при помощи обычного в настоящее время приема — «первого приближения, когда дело сводилось к рассмотрению системы линейных дифференциальных уравнений; если для небольших отклонений получались уравнения, соответствующие гармоническим колебаниям, то положение равновесия считалось устойчивым. Для этого требовалось, чтобы корни характеристического уравнения, при помощи которого определяются возможные периоды колебаний, были мнимыми.

Вопрос об устойчивости движения возник в XVIII в. на чисто астрономической почве. После того как было установлено, что движения небесных тел не являются вечными «по своей природе», а совершаются под действием сил всемирного тяготения, необходимо было решить, можно ли считать эти движения устойчивыми. Имелось в виду только периодическое движение планет, совершающееся по эллипсам, близким к окружностям. Если рассматривать движение только под действием силы притяжения Солнца, то возможности падения планеты на Солнце или, наоборот, удаления от него устранялись при помощи законов площадей и сохранения энергии; при наличии трансверсальной скорости планета, приближаясь к Солнцу, увеличивала свою скорость и таким образом ускользала от него; при удалении же от Солнца ее скорость тормозилась работой силы притяжения к Солнцу и планета должна была возвращаться к нему.

Однако на планеты кроме Солнца действуют также силы притяжения и других планет. Если эти возмущения будут все время действовать в одном и том же направлении, то кроме возмущений, носящих характер колебательных движений и со временем не могущих превзойти некоторой предельной величины, могут возникнуть и вековые возмущения, способные произвести с течением времени очень заметное изменение в движении рассматриваемой планеты. Исследованием этих возмущений занялся Лаплас, показавший в своей «Небесной механике», что для Солнечной системы вековые возмущения незначительны и устойчивость движений всех планет можно считать обеспеченной на очень долгое время.

Планеты далеко не всегда можно рассматривать как материальные точки; в действительности они даже являются не сферами, а всего лишь сфероидами. Таким образом, встает вопрос об устойчивости движений тел конечных размеров. Впервые этот вопрос возник при исследовании движения твердого тела в случае Пуансо — Эйлера. Было показано, что без воздействия посторонних сил тела могут вращаться только вокруг осей, совпадающих с главными центральными осями инерции, причем

устойчивыми будут вращения только вокруг осей, для которых момент инерции является или наибольшим, или наименьшим.

Развитие машинной техники в XIX в. поставило еще одну задачу — регулирование хода машин, а именно получение равномерной скорости (или близкой к равномерной), когда действующие силы являются переменными. Простейшим таким прибором является обыкновенный маховик, снимающий избыток кинетической энергии при ускоренном движении и вновь отдающий его при замедлении. Затем последовали и другие типы регуляторов, изучение которых стало предметом особой дисциплины — теории регулирования хода машин. В последнее время эти вопросы стали еще более актуальными в связи с проведением автоматизации в различных отраслях промышленности: наряду с обыкновенным возникло еще автоматическое регулирование хода машин, которое развивается особенно быстро в связи с успехами строительства и оборудования скоростных самолетов и спутников.

Вопрос об автоматизации управления ставит новые задачи перед механикой. С одной стороны, заданное движение можно поддерживать путем автоматических силовых воздействий — автоматическое регулирование; с другой стороны, можно сохранить имеющееся движение при помехах и возмущениях со стороны внешних факторов, не зависящих от воли человека. Определением прочности или устойчивости движения против случайных возмущений, имеющих небольшую величину, занимались Раус (Routh), Н. Е. Жуковский, Анри Пуанкаре, но наибольшие успехи сделал А. М. Ляпунов.

А. М. Ляпунов родился 25 мая 1857 г. в Ярославле. Его отец окончивший Казанский университет, работал в нем сначала в качестве астронома-наблюдателя, а потом заведующим обсерваторией. В 1856 г. он переселился в Ярославль, где стал директором Демидовского лицея. Кроме старшего сына Александра он имел еще двоих: Сергея (1859—1924), известного композитора, и Бориса (1864—1942), действительного члена Академии наук по славянской филологии.

Первоначальное образование А. М. Ляпунов получил у отца, а потом у дяди по материнской линии Р. М. Сеченова, брата знаменитого физиолога. По окончании гимназии в Нижнем Новгороде в 1876 г. с золотой медалью он поступил в Петербургский университет на физико-математический факультет, сначала на естественное отделение, но уже через месяц перешел на математическое.

В это время главой Петербургской школы математиков был П. Л. Чебышев, оказавший на А. М. Ляпунова очень большое влияние. После окончания А. М. Ляпуновым университета в 1880 г. П. Л. Чебышев предложил ему заняться исследованиями относительно фигуры небесных тел. Первое решение этой задачи было дано Клеро и затем Лапласом. Рассматривая форму планеты как поверхность уровня в силовом поле под действием сил ньютонова тяготения и центробежной силы во вращении вокруг оси планеты, Клеро и Лаплас пришли к выводу, что поверхность Земли должна иметь форму эллипсоида вращения. Однако при некоторой



величине угловой скорости эллипсоидальные формы перестают служить устойчивыми формами равновесия вращающейся жидкости. П. Л. Чебышев поставил задачу так: не переходят ли они при этом в какие-нибудь новые формы равновесия, которые при малом увеличении угловой скорости мало отличались бы от эллипсоидов?

После некоторых попыток А. М. Ляпунов отложил полное решение этой задачи, ограничившись магистерской диссертацией «Об устойчивости эллипсоидальных форм равновесия». Защитив успешно диссертацию, А. М. Ляпунов становится заведующим кафедрой теоретической механики в Харьковском университете. В это время им была подготовлена докторская диссертация «Общая задача об устойчивости равновесия», защищенная им в 1892 г.

В 1902 г. А. М. Ляпунов переезжает в Петербург, где он посвящает себя исключительно научным исследованиям.

Основные работы петербургского периода деятельности А. М. Ляпунова относятся к теории фигур небесных тел и форм равновесия равномерно вращающейся жидкости, частицы которой взаимно притягиваются по закону Ньютона. В это время он получил сочинение Анри Пуанкаре о фигурах равновесия жидких масс. Прочтя работу, он убедился, что Пуанкаре остался на тех же самых позициях, которые он занимал 17 лет тому назад. Поэтому А. М. Ляпунов продолжал свои исследования, которые получили особый интерес вследствие того, что они переплелись с новой космогонической теорией, выдвинутой Джорджем Дарвином — сыном знаменитого естествоиспытателя Чарльза Дарвина, — касавшейся происхождения Луны.

Выдвинутая Дж. Дарвином теория приливной эволюции и происхождения Луны заключалась в следующем. Среди всех планетных спутников Луна выделяется своими размерами и массой; это обстоятельство делает трудно приложимой к ней теорию захвата, которой можно объяснить происхождение большого числа планетных спутников.

Рассмотрим механическую систему Земля — Луна. На эти планеты действуют силы притяжения Солнца. Если пренебречь разницей в расстоянии до Солнца от центра Земли и Луны, то можно считать обе эти планеты имеющими по направлению к Солнцу одинаковые нормальные ускорения; в таком случае относительные движения обеих планет не изменятся и можно считать центр Земли неподвижным; при этом, конечно, сохраняются как вращения обеих планет вокруг собственной оси, так и движение Луны вокруг Земли. В таком случае можно считать постоянным кинетический момент системы, складывающийся из кинетических моментов собственных вращений Земли и Луны вокруг своих осей и кинетического момента движения Луны вокруг Земли.

Так как ближайшие к Луне частицы воды на земной поверхности притягиваются сильнее, чем частицы в центре Земли, а частицы, находящиеся на противоположной стороне Земли, наоборот» слабее, то

разность этих сил притяжения обуславливает две приливообразующие силы, которые на ближайшей к Луне части земной поверхности направлены к Луне, а на более отдаленной — наоборот, от Луны. Если считать диаметр Земли весьма малым по сравнению с расстоянием между Землей и Луной, то, дифференцируя формулу, выражающую закон всемирного притяжения, обратно пропорционального квадрату расстояния, нетрудно показать, что приливообразующая сила изменяется обратно пропорционально кубу расстояния. Этим объясняется то обстоятельство, что хотя силы притяжения Земли Солнцем больше, чем Луной, но приливообразующая сила Луны гораздо больше приливообразующей силы Солнца.

Эти две силы оттягивают воды океана в обе стороны от поверхности Земли, образуя приливную волну, которая при вращении Земли вокруг своей оси два раза в сутки обходит вокруг Земли. Действие этой приливной волны, идущей против направления вращения Земли, несколько тормозит вращение Земли (длительность суток незначительно возрастает). То же самое происходило и на Луне. Обе силы, действующие на Землю и на Луну, согласно третьему закону Ньютона, равны, но, поскольку масса и момент инерции Луны гораздо меньше, чем у Земли, действие ч приливов на Луну гораздо больше, чем на Землю. Но если кинетические моменты собственного вращения Земли и Луны уменьшаются, а общий кинетический момент системы сохраняет постоянную величину, то расстояние между Землей и Луной должно со временем увеличиваться, ибо нет причин, которые могли бы увеличить скорость Луны в ее движении вокруг Земли.

Теперь, если рассматривать движение в направлении, обратном течению времени, то можно сделать вывод, что ранее Луна была ближе к Земле и угловые скорости Земли и Луны вокруг своих осей были больше. Вычисления Дж. Дарвина показали, что когда Луна находилась в непосредственной близости к Земле, то продолжительность суток в системе Земля — Луна составляла всего пять часов. Так как исследования Пуанкаре показали, что одной из форм равновесия вращающейся жидкой массы является грушевидная, а Дарвин определил, что при скорости вращения, соответствующей продолжительности суток около пяти часов, устойчивость грушевидной формы жидкой массы нарушится, то Луна — меньшая часть груши — должна оторваться от остальной части, которая и составит Землю.

Теория приливной эволюции в настоящее время является общепризнанной; она объясняет, почему Луна обращена к Земле всегда одной стороной (угловая скорость собственного вращения Луны одинакова со скоростью ее обращения вокруг Земли).

Однако теория Дж. Дарвина о происхождении Луны не оказалась справедливой. А. М. Ляпунов показал, что Пуанкаре и Дарвин в своих исследованиях применяли только первые приближения, и отброшенные ими члены в действительности могли иметь такую величину, что делают результаты, полученные Дарвином, невозможными, а именно грушевидная

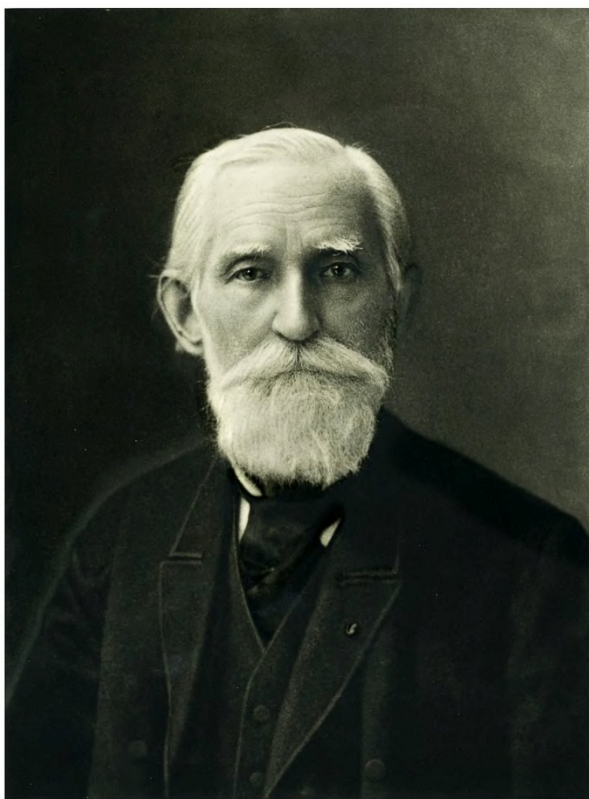
форма равновесия была неустойчивой с самого начала и, следовательно, не могла образоваться.

В дальнейшем английский астроном Джине произвел пересмотр вычислений Дарвина по приближенным формулам. Ему удалось обнаружить в вычислениях Дарвина пренебрежение членами, которые сам Дарвин считал ничтожными, но которые в действительности оказались достаточно большими. Когда было произведено вторичное вычисление уже по формулам второго приближения, то полученные результаты оказались в полном согласии с теорией Ляпунова.

Материал, касающийся фигур равновесия жидкой массы, опубликованный за период 1905—1918 г. и только в «Записках Русской Академии наук», составляет около 750 страниц текста. Разработка оставленного Ляпуновым материала представляет громадную задачу, которая выполняется его последователями как в нашей стране, так и за рубежом.

В настоящее время теория устойчивости Ляпунова является одним из сильнейших математических средств в исследованиях, касающихся космических полетов.

Великий русский математик **Пафнутий Львович Чебышёв** (1821—1894) также занимался исследованиями в области механики. С исследованиями по теории механизмов неразрывно связаны многочисленные изобретения Чебышёва. И. И. Артоболовский и Н. И. Левитский в работе, посвященной изобретениям и исследованиям Чебышёва по теории механизмов и машин, выделяют 41 "основной механизм Чебышёва" и около 40 модификаций этих механизмов, "которые могут в некоторых случаях также рассматриваться как самостоятельные механизмы".



Интерес Чебышёва к решению технических задач связан с рядом обстоятельств. Значительное влияние на формирование Чебышёва как ученого оказал Н. Д. Брашман (1796—1866), профессор Московского университета, где в 1837—1841 гг. обучался Чебышёв. Брашман одним из первых в университете был сторонником широкого развития прикладных исследований. Он вел курс механики, по его инициативе в университете предлагались для диссертаций темы прикладной механики, а в 1846 г. была создана

Объективным фактором, способствующим усилению внимания к прикладным исследованиям, являлась растущая необходимость применения механики к решению конкретных технических задач, что было связано с быстрым развитием машинной техники в середине и второй половине XIX века.

В своей первой зарубежной поездке (1852 г.) во Францию и Великобританию Чебышёв с большим интересом изучает работу различных механизмов и машин. Наряду с паровыми машинами и гидравлическими колесами "внимание мое,— пишет Чебышёв в отчете о командировке,—привлекли машины занимательного механика Вокансона, арифметическая машина Паскаля, различные приводы для поднятия воды, машины бумагопрядильные и льнопрядильные, машины металлургические".

Пафнутий Львович считал, что любые математические расчеты можно и нужно проверять на практике. Вот и сконструированная Чебышевым машина оказалась воплощением двух разработанных им теорий – приближения функций и синтеза механизмов. Практическая механика была для него продолжением его математических изысканий, когда цифры и символы превращаются в осязаемые шарниры и звенья. Стопоходящая машина Чебышева не стоит на месте как истукан, а ходит благодаря так называемым лямбда-механизмам. Вокруг оси по окружности вращается один из шарниров механизма, толкая ведомый шарнир, который, в свою очередь, передвигает ногу со «стопой». Одна ось приводит в действие два механизма, то есть две ноги. Соответственно, две оси – четыре ноги. Первую стопоходящую машину, созданную самим Чебышевым, сегодня можно увидеть в Политехническом музее в Москве. Настоящий профессор всегда может удивить и ввести окружающих в ступор. У Чебышева для этого был один механизм, который двигался весьма загадочным даже для современных исследователей образом. Он так и называется – парадоксальный механизм. Чебышев был настоящим новатором, намного раньше других выведя структурную формулу плоских механизмов и доказав знаменитую теорему о существовании трехшарнирных четырехзвенников. Он построил имитирующий движение весел лодки гребной механизм, самокатное кресло, оригинальную модель сортировальной машины. Всего он создал около 40 механизмов и около 80 их модификаций, на конструирование которых тратил большую часть своего профессорского оклада. Многие придуманные Чебышевым механизмы мы, сами того не зная, можем и сегодня видеть в современных приборах.

#### 4. Механика и теория устойчивости 20 века.

В Ново-Савиновском районе Казани есть улица Четаева. Это один из выдающихся ученых не только города Казани, России, но и, пожалуй, всего мира.

Обычному обывателю, не связанному с физикой и механикой, это имя может быть неизвестно, но сталкиваясь со многими повседневными вещами, будь то электродрель, автомобиль, самолет, мы не задумываемся, что при проектировании этих вещей и приборов применялись основы механики Четаева. Его работа «Об устойчивости движения» сделала рывок в будущее, позволила быстрее запустить человека в космос.

Николай Гурьевич Четаев был всесторонне развитым человеком. Помимо большой научной деятельности, преподавал в вузах, редактировал множество научных изданий и журналов, участвовал в проведении научных слетов, съездов, конференций. Еще он любил футбол и рыбалку, читал и хорошо был знаком с основными произведениями И. Канта, включая «Критику чистого разума».

Только за период 1940-1959 годов, в так называемый московский период, Четаев разработал и издал свыше сорока работ. По признанию современников, он был поразительно работоспособным человеком, готов был сидеть в лаборатории по несколько дней, заметив какое-нибудь интересное и неизвестное явление.

Николай Гурьевич в студенческие и особенно в аспирантские годы расширял свой кругозор не совсем общепринятым путем широкого ознакомления с классическими и новыми научными исследованиями в избранной области. Он сосредоточил внимание на выдающемся ученом последнего времени – А. Пуанкре и решил штудировать всё им созданное и опубликованное. Конечно, это требовало обхвата и многих смежных трудов.

Пуанкре был изучен досконально, что можно было сделать только при исключительной подготовленности. Хорошо известен диапазон творчества этого ученого, одного из крупнейших на западе физиков и математиков конца XIX – начала XX столетия. на нашего Ляпунова.

Столь же тщательно ознакомится Николай Гурьевич с трудами корифея точных наук А.М. Ляпунова, на которого оказали влияние труды Пуанкре. Еще будучи студентом, Четаев переписывался с его учеником – выдающимся советским математиком, академиком В.А. Стекловым, который и предложил ему заняться сложными проблемами устойчивости движения. Это был импульс, весьма важный для дальнейшей творческой деятельности Николая Гурьевича.

К сожалению, письма эти, по-видимому, не сохранились. Аспирантские работы 1926-1929 годов показывают, что к тому времени Четаев завершил изучение трудов Ляпунова, включая его знаменитые исследования по фигурам равновесия.

Научные успехи Николая Гурьевича послужили поводом для предоставления ему ВСНХ СССР в марте 1929 года командировки на один год в Германию для работы в Геттингенском университете. В Германии он тщательно знакомится с передовой для того времени аэродинамической школой Л. Прандля, продолжая вместе с тем и свои исследования преимущественно по устойчивости движения.

С конца 20-х годов наша высшая школа переживала довольно длительный и болезненный период исканий в методах преподавания, учебных планах и даже в целевом назначении выпускаемых специалистов. Возникли настойчивые стремления быстрее дать стране ученых-прикладников, инженеров. В более конкретной и задорной студенческой форме на физмате это звучало почти лозунгами: «Долой теоремы существования, да здравствуют практически необходимые методы!».

Один этот формальный перечень указывает на огромную широту научной, педагогической и общественной деятельности Н.Г. Четаева в московский период его жизни. За этими перечислениями, разумеется, кроется и громадная реальная работа. Институт механики АН СССР под руководством Николая Гурьевича достиг своего расцвета, завоевал серьезный авторитет и стал ведущим в ряде разделов механики. Большая заслуга Четаева в укреплении престижа журнала ПММ как у нас, так и за рубежом. На этой общественной работе Николай Гурьевич заслужил всеобщее уважение своей принципиальностью в суждениях и объективностью в оценку поступавших в редакцию статей.

Славная Четаевская научная школа в московский период жизни Николая Гурьевича значительно расширяется и получает всеобщее признание. Она становится советской школой общей механики и устойчивости движения, выходит на передовые рубежи в мировой науке.

Исключительно плодотворным было научное творчество, в первую очередь, главы школы – Н.Г. Четаева. В период 1940-1959 годов им выполнено свыше сорока работ, в том числе написана монография «Устойчивости движения». Многие из этих исследований завершали его «казанскую программу» и прежние замыслы 30-х годов.

Выдающиеся результаты были получены Н.Г. Четаевым в классических проблемах аналитической динамики. Дано весьма интересное видоизменение принципа Гаусса с подключением идей термодинамики, проведено оригинальное и многообещающее рассмотрение задач аналитической механики систем трением, значительно обобщены и развиты результаты Пуанкаре по внедрению в механику математических методов теории групп Ли. Здесь Четаевым, по существу, создан новый раздел динамики систем в групповых переменных, получивший вскоре дальнейшее развитие.

Несомненно, классические результаты получены в проблеме оптико-механической аналогии, завершенные его прекрасной, последней при жизни, статьей «О продолжении оптико-механической аналогии», в которой установлена аналогия между математической теорией света по Коши и

устойчивыми движениями голономных консервативных механических систем.

Большое число работ московского периода относится, конечно, и к теории устойчивости. Укажем на важное расширение ляпуновской постановки общей задачи устойчивости, в котором Н.Г. Четаевым введено понятие о так называемой «(X, A, T<sub>0</sub>, T)»– устойчивости, важной для задач техники и уже получившей дальнейшее развитие. Дан весьма изящный и эффективный метод интегральных связей для построения функций Ляпунова, метод, породивший множество других работ по устойчивости, в частности систем гироскопической техники. Многие результаты, в том числе по устойчивости неустановившихся движений, вошли в монографию «Устойчивость движения», изданную в 1946 году (2-е издание 1955 г.) Переведенная на иностранные языки, она послужила несомненным стимулом развития теории устойчивости далеко за рубежом и утвердила приоритет и передовые позиции советской школы в этой области.

Если в Казани Николай Гурьевич исследовал вопрос об устойчивости самолета в полете, то в Москве он весьма результативно занимался задачами устойчивости движений артиллерийского снаряда, твердого тела, тела с полостью, заполненной жидкостью, гироскопа в кардановом подвесе и др. В таких прикладных задачах Четаева подчеркивал большое значение и эффективность общей теории Ляпунова и важность её развития для проблем новой техники, в частности, автоматического регулирования и управления сложными объектами.

Можно быть уверенным, что проблемы общей механики по-прежнему остаются важнейшими, какими они были всегда. Трудно назвать другую науку, где тысячелетиями накопленные теоретические выводы и результаты точнее подтверждались бы человеческой практикой, техникой, начиная с архимедова рычага и отнюдь не кончая космонавтикой. По методологическим основам механики формировались и будут формироваться многие другие области наук. Почти любой физический процесс (вероятно, не только физический) удобнее, нагляднее и убедительнее начинать изучать на изоморфных механических примерах, моделях и аналогиях.

## **5. Современное развитие механики**

В двадцатом столетии занимались и сейчас продолжают заниматься решением многих новых задач механики. Особенно активно это было после появления современных вычислительных средств. Прежде всего, это новые сложные проблемы управляемого движения, космической динамики, робототехники, биомеханики, квантовой механики. Можно отметить работы выдающихся ученых, многих научных школ Вузов и исследовательских коллективов России.

·**Николай Егорович Жуковский** (1847—1921), основоположник аэродинамики, исследовал движение твердого тела с неподвижной точкой и проблему устойчивости движений, вывел формулу для определения подъемной силы крыла, занимался теорией удара.

*Рисунок 14.*

·**Александр Михайлович Ляпунов** (1857—1918), основные работы посвящены теории устойчивости равновесия и движения механических систем, основоположник современной теории устойчивости [1; 5; 7].

·**Константин Эдуардович Циолковский** (1857—1935), основоположник современной космонавтики, аэродинамики и ракетодинамики, создал теорию поезда на воздушной подушке и теорию движения одноступенчатых и многоступенчатых ракет.

·**Иван Всеволодович Мещерский** (1859—1935), исследовал движение тел переменной массы, составил сборник задач по механике, который используется и в настоящее время.



***Рисунок 15.***

·**Алексей Николаевич Крылов** (1863—1945), основные исследования относятся к строительной механике и кораблестроению, непотопляемости судна и его устойчивости, гидромеханике, баллистике, небесной механике, теории реактивного движения, к теории гироскопов и численным методам, перевел на русский язык труды многих классиков науки [4; 5; 9].

·**Сергей Алексеевич Чаплыгин** (1869—1942), основные работы относятся к неголономной механике, гидродинамике, теории авиации и аэродинамики, дал полное решение задачи о воздействии воздушного потока на обтекаемое тело.

·**Николай Гурьевич Четаев** (1902—1959) исследовал свойства возмущённых движений механических систем, вопросы устойчивости движения, доказал основные теоремы о неустойчивости равновесия.

***Рисунок 16.***

**Лев Семенович Понтрягин** (1908—1988) исследовал теорию колебаний, вариационное исчисление, теорию управления, создатель математической теории оптимальных процессов.

### *Рисунок 17.*

#### **6. Применение принципов устойчивости в робототехнике.**

**Робототехника** - сравнительно новое и интенсивно развивающееся научное направление, вызванное к жизни необходимостью освоения новых сфер и областей деятельности человека, а также потребностью широкой автоматизации современного производства, направленной на резкое повышение его эффективности. Использование автоматических программируемых устройств - роботов - в исследовании космоса и океанских глубин, а с 60-х гг. нашего столетия и в производственной сфере, быстрый прогресс в области создания и использования роботов в последние годы обусловили необходимость интеграции научных знаний ряда смежных фундаментальных и технических дисциплин в едином научно-техническом направлении - робототехнике.

Идея создания роботов - механических устройств, своим внешним видом и действиями подобных людям или каким-либо живым существам, увлекала человечество с незапамятных времен. Даже в легендах и мифах человек стремился создать образ рукотворных существ, наделенных фантастической физической силой и ловкостью, способных летать, жить под землей и водой, действовать самостоятельно и в то же время беспрекословно подчиняться человеку и выполнять за него самую тяжелую и опасную работу. Еще в "Илиаде" Гомера (VI в. до н. э.) говорится о том, что хромоногий кузнец

Гефест, бог огня и покровитель кузнечного ремесла, выковал из золота девушек, которые исполняли его поручения.

... Навстречу ему золотые служанки вмиг подбегали,  
Подобные девам живым, у которых  
Разум в груди заключен и голос, и сила,  
Которых самым различным трудам обучали  
Бессмертные боги...

У современного человека эти "служанки" непременно ассоциируются с антропоморфными, т.е. созданными по образу и подобию человека, автоматическими универсальными устройствами - роботами.

**Теория робототехники** опирается на такие дисциплины, как электроника, механика, информатика, а также радиотехника и электротехника. Выделяют строительную, промышленную, бытовую, авиационную и экстремальную (военную, космическую, подводную) робототехнику.

Сегодня человечество практически вплотную подошло к тому моменту, когда роботы будут использоваться во всех сферах жизнедеятельности. Поэтому курсы робототехники и компьютерного программирования необходимо вводить в образовательные учреждения.

Изучение робототехники позволяет решить следующие задачи, которые стоят перед информатикой как учебным предметом. А именно, рассмотрение линии алгоритмизация и программирование, исполнитель, основы логики и логические основы компьютера.

Также изучение робототехники возможно в курсе математики (реализация основных математических операций, конструирование роботов), технологии (конструирование роботов, как по стандартным сборкам, так и произвольно), физики (сборка деталей конструктора, необходимых для движения робота-шасси).

- **Классы роботов**

**Манипуляционный робот** — автоматическая машина (стационарная или передвижная), состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и устройства программного управления, которая служит для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций. Такие роботы производятся в напольном, подвесном и портальном исполнениях. Получили наибольшее распространение в машиностроительных и приборостроительных отраслях.

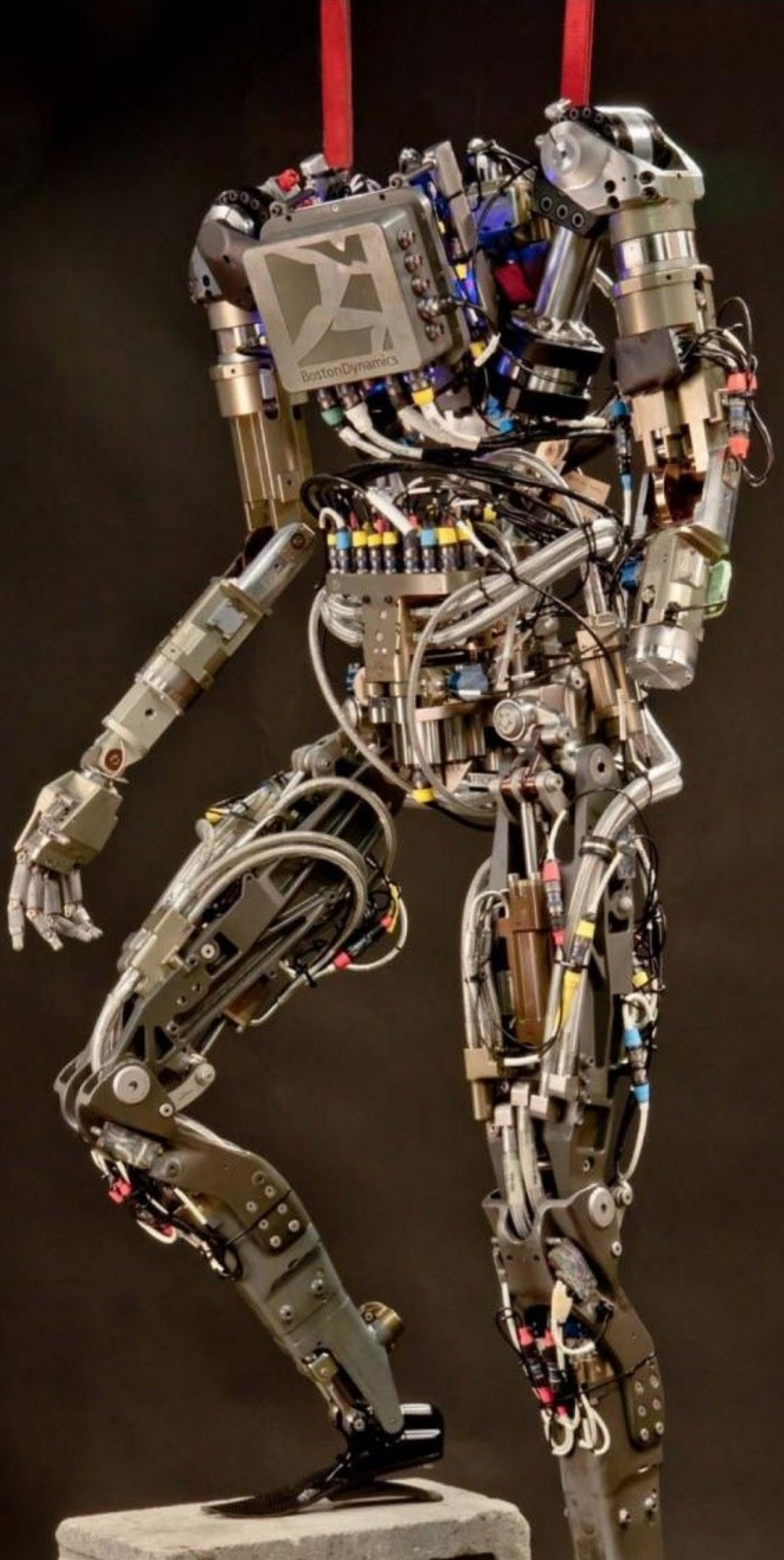


**Мобильный робот** — автоматическая машина, в которой имеется движущееся шасси с автоматически управляемыми приводами. Такие роботы могут быть колёсными, шагающими и гусеничными (существуют также ползающие, плавающие и летающие мобильные робототехнические системы).

- **Способы перемещения**

**Колёсные и гусеничные роботы**

**Шагающие роботы**



- **Другие методы перемещения:**

- Летающие роботы (в том числе БПЛА – беспилотные летательные аппараты).
- Ползающие роботы.
- Роботы, перемещающиеся по вертикальным поверхностям.
- Плавающие роботы.

- **Системы управления**

Под управлением роботом понимается решение комплекса задач, связанных с адаптацией робота к кругу решаемых им задач, программированием движений, синтезом системы управления и её программного обеспечения.

По типу управления робототехнические системы подразделяются на:

1. **Биотехнические:**

- 1.1. командные (кнопочное и рычажное управление отдельными звеньями робота);
- 1.2. копирующие (повтор движения человека, возможна реализация обратной связи, передающей прилагаемое усилие, экзоскелеты);
- 1.3. полуавтоматические (управление одним командным органом, например, рукояткой всей кинематической схемой робота);

2. **Автоматические:**

- 2.1. программные (функционируют по заранее заданной программе, в основном предназначены для решения однообразных задач в неизменных условиях окружения);
- 2.2. адаптивные (решают типовые задачи, но адаптируются под условия функционирования);
- 2.3. интеллектуальные (наиболее развитые автоматические системы);

3. **Интерактивные:**

- 3.1. автоматизированные (возможно чередование автоматических и биотехнических режимов);
- 3.2. супервизорные (автоматические системы, в которых человек выполняет только целеуказательные функции);

3.3. диалоговые (робот участвует в диалоге с человеком по выбору стратегии поведения, при этом как правило робот оснащается экспертной системой, способной прогнозировать результаты манипуляций и дающей советы по выбору цели).

Среди основных задач управления роботами выделяют такие:

- планирование положений;
- планирование движений;
- планирование сил и моментов;
- анализ динамической точности;
- идентификация кинематических и динамических характеристик робота.

**В развитии методов управления роботами огромное значение имеют достижения технической кибернетики и теории автоматического управления.**

- **Подвиды современных роботов:**
  - **Промышленные роботы**





- **Медицинские роботы**
- **Бытовые роботы**
- **Роботы для обеспечения безопасности**
- **Боевые роботы**





- **Роботы-учёные**

К настоящему времени роботы внедрены во многие сферы деятельности человека и продолжают дополнять и иногда заменять людской труд как в опасных видах деятельности, так и в повседневной жизни.

## 7. Список литературы:

1. Тюлина И.А. История механики. – Москва: Изд-во Московского университета, 1979.
2. Бородин А.И., Бугай А.С. Биографический словарь деятелей в области математики. - Киев: Радянська школа. 1979.
3. Космодемьянский А.А. Теоретическая механика и современная техника.-Москва: Просвещение,2-е издание.1975
4. Румянцев В.В. Жизнь и деятельность Н.Г.Четаева в московский период. – Казань: Изд-во КГУ, 1986.;
5. Татарский энциклопедический словарь. – Казань: Институт Татарской энциклопедии АН РТ, 1998. – С.647.
6. Сайт «ВикиЧтение» <https://fis.wikireading.ru/1142>
7. Сайт «FizPortal». Все для физики. <http://fizportal.ru/walking-robots>