

УДК 621.833/.91

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

© Дмитрий Тихонович Бабичев, Андрей Эрикович Волков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» (ТюмГНГУ), Тюмень, Россия*

[babichevdi@rambler.ru](mailto:babichevdi@rambler.ru)

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский Государственный Технологический Университет "СТАНКИН", Москва, Россия*

[volkov411@gmail.com](mailto:volkov411@gmail.com)

**Аннотация.** Рассмотрены исторические этапы развития теории зубчатых передач. Представлены примеры использования зубчатых передач в механизмах в Древнем мире и в Средние века. Описаны этапы становления теории зубчатых передач как науки. Показана ведущая роль отечественных ученых в развитии теории зубчатых передач. Определены основные направления развития теории зубчатых зацеплений.

**Ключевые слова:** зубчатые передачи, теория зубчатых зацеплений, синтез и анализ зубчатых зацеплений, формообразование

## HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF THE GEARS THEORY

© D.T. BABICHEV, A.E. VOLKOV

*Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia*

*Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia*

**Abstract.** The historical steps for the development of the gears theory are presented. The examples of gear mechanisms using in the Antiquity and in the Middle Ages are given. The stages of formation of the gears theory as a science are described. It is shown the leading role of Russian scientists in the development of the gears theory. The main directions of development of the gears theory are formulated.

**Keywords:** gears, gearing theory, synthesis and analysis of gearing, shaping

«Наука заключается в такой группировке фактов, которая позволяет выводить на основании их общие законы и заключения»

Ч. Дарвин

**Введение.** Механика как наука прошла в своем развитии два периода.

Первый период – эмпирический, доньютоновский. Этот период в основном характеризуется решением различных механических задач, которые ставила практика в строительном, военном деле и т.п. Это этап накопления фактов, их качественного и количественного описания, установления отдельных законов.

Второй период – научный, ньютоновский – начинается становлением механики как самостоятельной науки. Накопленные за первый период знания были обобщены и оформлены И. Ньютоном в систему аксиом, а благодаря работам Ж.Л. Даламбера,

Ж.Л. Лагранжа и других выдающихся ученых, механика получила мощный аппарат для решения практических задач. Это положило начало бурному развитию механики, результатом которого, в частности, стало появление многих разделов механики, сложившихся в дальнейшем в самостоятельные науки. К таким наукам можно отнести гидродинамику, аэродинамику, сопротивление материалов и многие другие, в том числе и теорию механизмов и машин, которая прошла в своем развитии аналогичные периоды.

Теория механизмов и машин также дала старт многим своим разделам в качестве самостоятельных наук, таким как, робототехника, динамика машин, теория гироскопических приборов и систем, теория зубчатых передач и др.

Цель данной статьи – проследить историю развития теории зубчатых передач и показать роль отечественных ученых в создании теории зубчатых зацеплений.

**1. Эмпирический период развития теории зубчатых передач.** Элементы теории механизмов и машин, в том числе зубчатых механизмов, начали развиваться неотделимо от механики, начиная со строительства пирамид в Древнем Египте, а, возможно, и еще раньше. Для реализации грандиозных планов строительства неизвестные "инженеры" древнего мира придумывали и реализовывали многие механические конструкции (колесо, винтовая передача и другие). К сожалению, многие из них не дошли до нашего времени.

Впоследствии механики древности создавали грузоподъемные и военные машины, турбины и даже простейшие автоматы. Здесь достаточно упомянуть такие имена как Архимед, Марк Витрувий, Герон Александрийский.

М. Витрувий, римский архитектор и механик (1-й век до н.э.), изобрел годометр [1, с.64] для измерения пройденного расстояния и часы, в которых использовал пространственную зубчатую передачу [1, с.181].

В своем трактате «Основы механики» Витрувий приводит первое известное определение машины: «Машина есть сочетание соединённых вместе деревянных частей, обладающее огромными силами для передвижения тяжестей» [2, с.186]. Здесь же дана и первая классификация машин. Витрувий делит машины на подмостные, воздушные и подъемные.

Герон (1-й век н.э.) в книге «Об автоматах» [1, с.61] описал изобретенные им различные автоматические устройства, в том числе, автоматический театр кукол, в котором все фигуры приводятся в движение автоматически одна за другой при помощи системы зубчатых колес и шнурков. В изобретенном Героном годометре использовались зубчатые колеса с 8-ю и 30-ю зубцами [1, с.63].

В Средние века продолжался период эмпирического создания все более сложных машин с использованием зубчатых колес. Например, в IX-X веках в Китае применялись часы с песочным двигателем, в которых кинематическая цепь состояла из нескольких зубчатых передач с разными числами зубцов: 16, 33, 36 и т.д. [3, с.102].

Сохранилось описание планетарных (астрономических) часов итальянского часовщика Джаованни Донди (1318-1387) [3, с.149]: «Рама часов изготовлена из бронзы, а валы, колеса, циферблат – из латуни. Из 297 частей часов Донди 100 составляли колеса и шестерни, зубцы которых были нарезаны вручную. Зубцы треугольной формы, но для различных астрономических зубчатых передач употреблялись тупые зубья – округленные, со срезанными краями. Для воспроизведения движения Луны нужно было иметь колесо со 157 зубцами, нарезка которых представляла задачу весьма трудную. Не менее трудной была нарезка на одном колесе 365 зубцов».

Бурное развитие машинной техники в эпоху Возрождения дало толчок развитию зубчатых передач. Механизмы зубчатых передач различных видов рассматривает в своих трудах Леонардо да Винчи.

Итальянский математик и инженер Джероламо Кардано (1501-1576) стал известен благодаря конструированию различных механизмов, в том числе, систем зубчатых передач с большими передаточными отношениями, которые применялись в башенных часах [3, с.169].

Это требовало знания важнейших кинематических соотношений, например, "числа оборотов колес и трибов при определенном количестве зубцов и трибов".

Немецкий механик чешского происхождения Якоб Лейпольд (1674-1727) в своей многотомной энциклопедии технических знаний "Театр машин" описал зубчатые зацепления и элементы зубчатых редукторов [4, с.129].

Русский математик и механик Пафнутий Львович Чебышёв (1821-1894) по праву считается основателем русской научной школы по теории механизмов. Однако он внес значительный вклад и в теорию зубчатых зацеплений, что, к сожалению, недооценено отечественными зубчатниками. В работе "О зубчатых колёсах" [5, с.710] он на основе теории функций, наименее уклоняющихся от нуля, решил задачу синтеза профилей зубьев "очерченных дугами кругов, при котором неправильности движения колёс достигают самого низкого предела". Таким образом, он предложил математическую модель синтеза профилей зубьев по критерию минимума отклонений передаточного отношения от постоянного значения за период зацепления одной пары зубьев.

В той же статье П.Л. Чебышёв пишет, что "... в теории, обыкновенно предполагают данную форму зуба на одном колесе и по ней ищут форму зуба другого колеса", и ставит задачу: "... необходимо иметь такой общий способ черчения (т.е. синтеза - *авторы*) их, при котором легко получалась бы форма зубьев на обоих колёсах, наиболее соответствующая тем или иным требованиям практики". Это, вероятно, одна из первых постановок задачи оптимизационного синтеза поверхностей зубьев.

Немецкий учёный Франц Рёло (1829-1905) показал, что для получения детали определенной формы требуется придать орудию форму огибающей требуемой поверхности детали [6].

**2. Зубчатые передачи и зарождение станочной зубообработки.** Зубчатые передачи, как было показано выше, человечество применяет уже несколько тысяч лет: еще в Древнем Египте их использовали в системах орошения. Вначале зубчатые колёса были деревянными, со вставными зубьями из твёрдых пород деревьев – их применяли до начала XX века, в частности, на водяных мельницах. С древних времен применялись зубчатые колеса из медных сплавов, а в последующем чугунные и стальные. При этом зубчатые колеса обычно отливали, иногда проковывали, а зубья на них порой подпиливали или подшлифовывали.

С середины XIX века начинается создание сложных металлообрабатывающих и зубообрабатывающих станков. Этот процесс шел параллельно с образованием ныне всемирно известных станкостроительных компаний [7].

Reishauer Corporation была основана в 1788 году, но наиболее важный период, определивший все ее дальнейшее развитие, относится к середине XIX века, когда компанию возглавлял Якоб Фридрих Рейсхауэр (1812-1862). Он совместно со своим тестем И.Г. Бодмером разработал станок для изготовления резьбонарезных инструментов, токарно-винторезный станок. Швейцарский инженер Иоганн Георг Бодмер (1786-1864) был гениальным изобретателем зуборезного инструмента, благодаря чему он мог проектировать и изготавливать прямозубые цилиндрические передачи с передаточным отношением до 145, а также косозубые цилиндрические и конические колеса.

Компания The Gleason Works ведет свое начало с 1865 года, когда уроженец Ирландии Вильям Глисон (1836-1922) организовал механический цех. Первой инновацией компании The Gleason Works, внедренной в промышленность, стало изобретение в 1874 году строгального станка для производства прямозубых конических колес.

Британская компания David Brown была основана в 1860 году Дэвидом Брауном (1843-1903). Бизнес начинался с производства форм для отливки зубчатых колес, а позднее расширился литьем самих зубчатых колес. С 1898 года компания начала заниматься производством зубчатых колес резанием, а с 1915 года – эвольвентных червячных передач.

Швейцарская фирма Maag Gear AG, мировой лидер в производстве редукторов, была основана в 1913 году швейцарским инженером-изобретателем Максом Маагом (1883-1960). Еще в 1908 году М. Мааг разработал геометрию нестандартных эвольвентных прямозубых и

косозубых колес. Это позволяло конструкторам избегать подрезания зубьев и увеличивать толщину зубьев только за счет изменения установки инструмента относительно обрабатываемого колеса.

Американская фирма Fellows Gear Shaper Company производство прямозубых цилиндрических колес зубодолблением начала в 1896 году. Метод зубодолбления, основанный на моделировании зацепления двух зубчатых колес при их вращении вокруг параллельных осей, изобрел и внедрил в промышленность американский изобретатель Эдвин Р. Феллоуз (1865-1945). В 1897 году был спроектирован и изготовлен станок для шлифования эвольвентных профилей зуборезных долбяков, используемых для зубодолбления прямозубых, косозубых и специальных колес.

**3. Зарождение и развитие теории зубчатых зацеплений.** В зарождении и развитии теории зацеплений, как науки, просматривается определённая цикличность: вначале в обществе возникают новые частные задачи; они со временем решаются, накапливаются, систематизируются. Затем наступает момент, когда "количество переходит в качество": происходит осознание накопленных знаний, формулируются теоретические положения и закладываются основы для развития науки и практики на следующем этапе. Опираясь на теоретические основы, создаются новые и совершенствуются старые конструкции и технологии. Потом всё повторяется на новом витке развития промышленности: новые задачи, их решение, осознание, формулировка новых теоретических положений. В теории зацеплений таких циклов, на наш взгляд, наблюдается три: два завершившихся и третий, продолжающийся в настоящее время.

*Первый цикл – создание основ теории зацеплений* – начался в глубокой древности, интенсифицировался в XVIII веке трудами Л. Эйлера и Л. Камуса, наполнился в XIX веке работами Т. Оливье, Р. Виллиса и других. Завершение первого цикла к 1890 году условно можно связать с защитой и изданием в 1886 году магистерской диссертации Х.И. Гохмана (1851-1915), в которой дано аналитическое решение главной задачи теории зацеплений – нахождение сопряженной поверхности и определение её свойств.

*Второй цикл – создание классической теории зацеплений* – длился чуть более 80 лет и завершился к середине 70-х годов XX века. Можно считать, что итог второго цикла был подведен в 1968 году в монографии Ф.Л. Литвина [8] и на II симпозиуме по зубчатым передачам в Ленинграде в 1973 году [9].

*Третий цикл – формирование основ обновлённой теории зацеплений и методов синтеза передач, ориентированных на современные компьютерные технологии.* В настоящее время этот цикл ещё не завершился, хотя накоплено и решено много новых задач, а также выявлен ряд актуальных нерешенных проблем и задач.

Рассмотрим особенности трёх названных циклов создания и развития теории зубчатых зацеплений.

**3.1. Создание основ теории зубчатых зацеплений.** Теория зацеплений, как и большинство научных дисциплин, имеет три точки опоры:

- объект исследования и базовые понятия данной научной дисциплины;
- методы и способы работы с базовыми понятиями;
- основные законы природы и данной науки, которые устанавливают связи между базовыми понятиями. Эти законы нередко выявляют при исследованиях – в виде теорем, математических формул, логических и вычислительных моделей и т.п.

Объектами исследования теории зацеплений являются:

- высшие кинематические пары в плоских и пространственных зубчатых и кулачковых механизмах (рабочие зацепления);
- режущие инструменты и процессы формообразования при зубообработке (технологические зацепления).

В теории зацеплений базовые понятия и способы работы с ними, в основном, заимствованы из математики (линия, поверхность, кривизна и другие) и механики (центроиды, скорости, ускорения, силы и т.п.).

Основные законы и связи между базовыми понятиями теории зацеплений были выявлены математиками и механиками еще в XVIII-XIX веках (Л. Эйлер, Л. Камус, Ф. Савари, Э. Бобилье, Р. Виллис, Т. Оливье, Х.И. Гохман).

Член Российской АН Леонард Эйлер (1707-1783) выявил уникальные свойства эвольвент круга и предложил использовать их в передачах. Отметим, что в настоящее время более 80% всех передач в мире являются эвольвентными. Французский астроном Феликс Савари (1797-1841), продолжая работы Эйлера, выявил связь между радиусами кривизны профилей зубьев в плоских зацеплениях с радиусами кривизны centroид, известную ныне, как уравнение Эйлера-Савари. Это уникальное уравнение широко используется и в настоящее время. На основе уравнения Эйлера-Савари французский математик Этьенн Бобилье (1798-1840) предложил геометрическое построение для нахождения центров кривизны профилей.

Первыми научный подход к изучению зубчатых передач применили Р. Виллис и Т. Оливье.

Английский механик и инженер Роберт Виллис (1800-1875) доказал основную теорему плоских зацеплений – теорему Виллиса [10], которая в современной трактовке звучит так: "*Общая нормаль к профилям, проведенная в точке их касания, проходит через полюс зацепления*". Виллис построил специальный инструмент – одонтограф – для определения геометрии и вычерчивания вида зубьев и зубчатых колес разного диаметра и числа зубьев.

Французский математик и механик Теодор Оливье (1793-1858) сформулировал два способа образования сопряженных зацеплений, не потерявших своей общности и значения до настоящего времени.

*Первый способ Оливье.* Производящая поверхность  $\Sigma_0$  (например, рейка или плоское производящее колесо) формирует методом огибаия две поверхности:  $\Sigma_1$  на шестерне и  $\Sigma_2$  на колесе. Эти поверхности располагаются с разных сторон от производящей поверхности  $\Sigma_0$  (например,  $\Sigma_1$  расположена сверху от  $\Sigma_0$ , а  $\Sigma_2$  – снизу от  $\Sigma_0$ ). Поверхности  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  будут сопряженными: с линейным касанием (что имеет место в цилиндрических и конических передачах); или с точечным касанием (например, в винтовой передаче). По этому способу образуют большинство передач с параллельными и пересекающимися осями, т.е. цилиндрические, конические и цилиндро-конические. В передачах с перекрещивающимися осями первый способ Оливье используют редко, т.к. он даёт ярко выраженный точечный контакт зубьев, что снижает нагрузочную способность зацепления.

*Второй способ Оливье.* Поверхность одного из зубчатых колёс – например,  $\Sigma_1$  на шестерне – задаётся почти произвольно, а поверхность на втором зубчатом колесе – например,  $\Sigma_2$  на колесе – находится, как огибающая к однопараметрическому семейству поверхностей  $\Sigma_1$ . Касание  $\Sigma_1$  с  $\Sigma_2$  будет в общем случае линейным. По этому способу образуют, в основном, передачи с перекрещивающимися осями, в том числе червячные.

В XIX веке значительное распространение получили циклоидальные зацепления. Основой для проектирования таких передач стала работа французского математика Луиса Камю (Charles Etienne Louis Camus) (1699-1768), больше известного в России под именем Камус. Теорема Камуса гласит, что в качестве сопряженных зубьев можно брать траектории одной и той же точки вспомогательной centroиды, перекатываемой по centroидам зацепляющихся зубчатых колес.

Работой, как бы подытожившей этап создания основ теории зубчатых зацеплений, явилась диссертация Хаима Иегудовича Гохмана [11], изданная в 1886 году. В ней разработаны основы аналитической теории плоских и пространственных зацеплений. Созданный Гохманом новый метод нахождения огибающих поверхностей и линий контакта огибающей с огибаемой позволил определять первоначально линии контакта взаимноогибаемых поверхностей в любой из систем координат, связанной с любым звеном рабочего или технологического зацепления. Тем самым упрощается нахождение огибающей поверхности в сравнении с классическими методами механики и дифференциальной геометрии.

Итогом первого цикла развития теории зубчатых зацеплений стало появление к концу XIX века основ аналитической теории зацеплений, включающих:

- базовые понятия и методы классической механики, аналитической и дифференциальной геометрии;
- два принципа образования сопряженных зацеплений, предложенные Оливье;
- уравнения Эйлера-Савари и построение Бобилье, отражающие связь между кривизнами centroид и сопряженных профилей в плоских зацеплениях;
- разработанный Гохманом метод нахождения огибающих профилей и поверхностей, а также точек и линий контакта взаимоогibaемых линий и поверхностей в плоских и пространственных рабочих и технологических зацеплениях.

**3.2. Создание классической теории зубчатых зацеплений.** Разработанные к концу XIX века основы аналитической теории зацеплений явились базисом для решения практических задач, которые ставила перед наукой бурно развивающаяся промышленность.

Конец XIX - начало XX века оказалось весьма продуктивным на изобретения новых видов передач, станков, инструмента, рабочих и станочных зацеплений. Условно эти изобретения можно разделить на два направления: станки и инструмент для образования передач, основанных на зацеплении сопряженных поверхностей, и станки и инструмент для образования передач с несопряженными поверхностями зубьев.

*Первое направление основано на принципах Оливье.*

В период с 1890 по 1920 годы были изобретены и внедрены следующие технологии изготовления зубчатых передач и станки для их производства, основанные на методе обкатки:

- станки для обработки конических колес, в том числе, с круговыми зубьями (Дж.Э. Глисон);
- станки для шлифования эвольвентных профилей зуборезных долбяков (Э. Феллоуз);
- станки для нарезания прямозубых и косозубых цилиндрических колес червячными фрезами (Р.Г. Пфаутер);
- технологии изготовления глобоидной червячной передачи (С.И. Кон и Ф.В. Лоренц);
- эвольвентная червячная передача, основанная на применении винтовой эвольвентной поверхности в качестве поверхности витков червяка (Ф. Дж Босток и П. Браун).

Эти и многие другие изобретения поставили перед теоретиками задачу обобщения теории образования передач на основе зацепления сопряженных поверхностей. Решающая роль в дополнении и развитии принципов Оливье принадлежит российским ученым: А.Ф. Николаеву (1901-1957), Я.С. Давыдову (1914-2003) и М.Л. Ерихову (1937-2002). Они для образования сопряженных поверхностей использовали некоторую вспомогательную (производящую) поверхность. Особо следует отметить М.Л. Новикова (1915-1957), который предложил иной в своей основе принцип образования сопряженных зацеплений путем перемещения по определенному закону точки контакта двух профилей вдоль линии зацепления синтезируемой передачи.

Все эти принципы базируются на теории огибающих, которая именно в этот период получила весьма лаконичное научно-методическое завершение в работах Я.С. Давыдова, В.А. Шишкова и Ф.Л. Литвина. Ими практически одновременно и независимо друг от друга был предложен кинематический метод нахождения огибающих, в котором использовано уравнение зацепления в виде  $\mathbf{V}\mathbf{N}=0$  [8]. При этом В.А. Шишков [12] ввёл новое понятие – скорость внедрения  $V_n$ , равную скалярному произведению  $V_n = \mathbf{V}_{12} \cdot \mathbf{n}$ , и оказавшуюся эффективным средством при исследовании работы зубообрабатывающих инструментов, работающих по методу обкатки. Именно кинематический метод стал основой для синтеза и анализа зубчатых зацеплений во второй половине XX века.

*Основателем второго направления можно считать талантливого изобретателя и инженера фирмы The Gleason Works Эрнста Вильдгабера (1893-1979). В 1927 году им был предложен метод образования гипоидных зубчатых передач, а в 1930-х годах запатентован метод Revacycle – самый производительный на тот период метод образования прямозубых*

конических колес [13]. Методы образования указанных передач не базируются на принципах Оливье. Э. Вильдгабер ввел передачи с несопряженными поверхностями зубьев - передачи с "приближенным зацеплением". Такие передачи принципиально не могут передавать вращение с постоянным передаточным отношением, однако степень отклонения передаточного отношения от константы может быть сведена к минимуму путем целенаправленного подбора значений технологических параметров процессов зубообработки. Таким образом, Вильдгабер, отказавшись от обкатки при формообразовании, показал, что имеются возможности создания весьма производительных процессов зубообработки передач с несопряженными поверхностями зубьев, и тем самым положил начало теоретическому исследованию таких передач.

Разработка теории приближенных зацеплений активно началась после окончания 2-й Мировой Войны одновременно в США и Советском Союзе. Итогом стал сформулированный независимо друг от друга в работах М.Л. Бакстера [14] и Ф.Л. Литвина [8] основной принцип образования несопряженных поверхностей, в соответствии с которым график отклонения углового положения ведомого колеса от его положения при зацеплении строго сопряженных поверхностей представляет собой функцию, похожую на параболу с направленными вниз ветвями.

В то же время стало понятным, что для решения задач синтеза и анализа зубчатых зацеплений, построенных на несопряженных поверхностях, требуется разработка новых математических методов и моделей. Первые математические модели исследования зубчатых зацеплений и реализующие их компьютерные программы появились практически одновременно в США и СССР.

В США под руководством главного инженер-исследователя компании The Gleason Works Меривезера Л. Бакстера (1914-1994) был создан пакет программ TSA для синтеза и анализа гипоидных зубчатых передач [14].

В Советском Союзе в 60-е годы прошлого века с появлением ЭВМ началась разработка методов синтеза приближенных зубчатых зацеплений. Сначала в Московском станкоинструментальном институте (Станкин) под руководством Г.И. Шевелевой (1929-2005) был разработан пакет программ для синтеза и анализа конических прямозубых передач Revacycle [9, с.30-36], которые включали алгоритм численного расчета обрабатываемой поверхности как обволакивающей без использования теории огибающих [15].

Аналогичные пакеты программ появляются в Саратове (СКБ ЗС) под руководством М.Г. Сегалю (1931-2000) и в Ленинграде (ЛИТМО) под руководством Ф.Л. Литвина. Работы по созданию универсальных программ для исследования пространственных зацеплений на ЭВМ проводятся в Тюмени [9, с.36-43].

Во второй половине XX века СССР стал признанным лидером по уровню и объёму теоретических разработок, посвященных исследованию геометрии зубчатых передач и зубообрабатывающих инструментов. После окончания мировой войны в течение 25-30 лет наблюдался бум теоретических работ по созданию новых методов анализа и синтеза рабочих и технологических зацеплений. Усилиями ведущих ученых страны (Н.И. Колчин, Ф.Л. Литвин, В.А. Шишков, М.Л. Новиков, Л.В. Коростелёв, Г.И. Шевелёва, И.И. Дусев, Я.С. Давыдов, М.Л. Ерихов и другие) был создан новый раздел науки о механизмах – теория зацеплений.

Основные заслуги в создании к середине 1970-х годов классической теории зацеплений принадлежат советской науке. Перечислим наиболее важные результаты, полученные усилиями отечественных ученых и составившие основу современной теории зацеплений.

1. Дополнены и развиты принципы Оливье образования сопряженных зацеплений: А.Ф. Николаев [16], М.Л. Новиков [17], Я.С. Давыдов [18], М.Л. Ерихов [19].

2. Разработаны новые и усовершенствованы известные методы анализа геометрии зацеплений: дифференциальные (Н.И. Колчин, год основной публикации – 1957 [20]); винтовые (А.Ф. Николаев, 1950 [21]; К.М. Писманик, 1950 [22]; Н.И. Колчин, 1963 [23]; В.С. Люкшин, 1968 [24]); кинематические (Я.С. Давыдов, 1950 [25]; В.А. Шишков, 1951 [12];

Н.Н. Крылов, 1953 [26]; Ф.Л. Литвин, 1960 [27]; М.Л. Ерихов, 1972 [19]); матричные (Ф.Л. Литвин, 1968 [19]); степенных рядов (Г.И. Шевелева, 1969 [28]); недифференциальные (Г.И. Шевелева, 1969 [15]); тензорные (И.И. Дусев, 1970 [29]).

3. Созданы методики решения всех основных задач синтеза и анализа зубчатых передач:

- нахождение огибающей однопараметрического и двухпараметрического семейства поверхностей (Х.И. Кетов, Н.И. Колчин, Ф.Л. Литвин, Н.Н. Крылов, Е.Г. Гинзбург, М.Л. Ерихов), а также огибающей многопараметрического семейства поверхностей и линий в пространственных зацеплениях (И.Л. Бродский, Д.Т. Бабичев);

- нахождение обволакивающей семейства поверхностей (Г.И. Шевелева);

- выявление особенностей формообразования, таких как подрезание, интерференция, срезы и др. (М.Г. Сегаль, И.И. Дусев, Г.И. Шевелева, В.И. Гольдфарб, Б.А. Черный);

- синтез геометрии зацеплений (локальный – Ф.Л. Литвин, М.Л. Ерихов, Л.В. Коростелев, С.А. Лагутин, В.Н. Рубцов, Б.П. Тимофеев и нелокальный – К.И. Гуляев, Б.А. Черный, М.Г. Сегаль);

- вычисление кривизн в зацеплениях (Н.И. Колчин, Ф.Л. Литвин, В.М. Васильев, И.И. Дусев, Е.Г. Гинзбург, Л.В. Коростелев, М.Л. Ерихов, А.М. Павлов, М.Г. Сегаль);

- вычисление других геометро-кинематических характеристик касания зубьев (А.К. Георгиев, В.И. Гольдфарб, С.А. Лагутин, М.Ф. Ленский);

- решение обратной задачи теории зубчатых зацеплений, анализ зубчатого зацепления (К.И. Гуляев, Ф.Л. Литвин, М.Г. Сегаль, Б.П. Тимофеев, Г.И. Шевелева);

- влияние погрешностей изготовления и монтажа на качество зацепления, синтез зубчатых зацеплений нечувствительных к погрешностям (М.Л. Ерихов, Н.Г. Линдтроп, Л.В. Коростелев, Н.Н. Крылов, Л.Я. Либушкин, Г.И. Шевелева).

На основе теоретических разработок и по созданным методикам проведены многочисленные исследования конкретных передач. Назовём наиболее важные практические задачи, решенные в этот период.

1. Открыты принципиально новые виды передач: косозубые цилиндрические передачи, в которых в качестве профилей поперечных сечений выбраны дуги окружностей с небольшой разницей радиусов - передачи Новикова – Вильдгабера [17] и передачи с замкнутыми линиями контакта, в которых нагрузка между зубьями передается через смазку, заклиненную в замкнутой полости между активными поверхностями, возникшей из-за замкнутости линии контакта (Л.В. Коростелев, С.А. Лагутин [30]).

2. Почти с исчерпывающей полнотой решены и доведены до инженерной практики геометрические задачи синтеза эвольвентных цилиндрических передач: геометрический расчет (В.А. Гавриленко, 1969 [31]); выбор оптимальных коэффициентов смещения с помощью блокирующих контуров (М.Б. Громан, 1957 [32]) по атласам, составленным и изданным под руководством И.А. Болотовского, 1967 [33].

3. Исследованы и внедрены новые виды зацеплений. При этом решены разнообразные задачи анализа и синтеза следующих широко распространённых типов передач:

- конических (Н.И. Колчин и В.В. Болдырев, 1937; Я.С. Давыдов, 1950; В.И. Безруков, 1963; В.М. Денисов, 1963; Г.И. Шевелёва, 1966; Н.Ф. Кабатов и Г.А. Лопато, 1966; М.Г. Сегаль, 1971; К.И. Гуляев, 1974; В.Н. Сызранцев, 1975);

- гипоидных (Г.И. Апухтин, 1952; Ф.Л. Литвин, 1962; К.М. Писманик, 1964; И.И. Дусев и В.М. Васильев, 1968; М.Г. Сегаль, 1971);

- цилиндрических передач с зацеплением М.Л. Новикова (М.Л. Новиков, 1956; Р.В. Федякин и В.А. Чесноков, 1958; В.Н. Кудрявцев, 1959; Е.Г. Росливер, 1964; Н.И. Колчин, 1968; В.Н. Севрюк, 1972 и другие);

- прямозубых конических передач Revacycle (Г.И. Шевелева, 1966);

- новых по конструкции передач червячного типа: тороидных (Я.И. Дикер; 1948); глобоидных (П.С. Зак, 1962), червячных (Ф.Л. Литвин, 1962; И.С. Кривенко, 1967;

Л.В. Коростелев и С.А. Лагутин, 1973), спироидных (Н.С. Голубков, 1959; А.К. Георгиев и В.И. Гольдфарб 1972).

Исследовались и внедрялись и менее распространённые виды передач:

- гиперболоидные (К.М. Писманик, 1950);
- цилиндро-конические (Л.Я. Либуркин, 1968);
- волновые (Е.Г. Гинзбург, 1969);
- цилиндрические с арочными и спиральными зубьями (М.Л. Ерихов и В.Н. Сызранцев, 1975).

4. Разработаны методики анализа и синтеза передач с некруглыми колесами [34], организовано их производство.

5. Опубликовано большое число работ, в том числе, ряд классических для теории зацеплений книг: Я.И. Дикера (1935), Н.И. Колчина (1937-1952), Ф.Л. Литвина (1952-1968), Я.С. Давыдова (1950), В.А. Гавриленко (1949-1969), М.Л. Новикова (1958), В.А. Залгаллера (1975), Л.Д. Часовникова (1969), И.А. Болотовского с соавторами (1962-1967), В.Н. Кудрявцева (1949-1971), В.Н. Кедринского (1960-1967), К.М. Писманика (1964-1967), П.С. Зака (1962), Н.Ф. Кабатова и Г.А. Лопато (1966), В.А. Шишкова (1951) и многих других. Из названных работ выделяется монография Ф.Л. Литвина [8], изданная в 1968 году, и остающаяся до настоящего времени настольной книгой специалистов по теории зацеплений.

Значительный уровень взаимопроникновения теории зубчатых зацеплений и математики характеризует небольшая по объёму книга В.А. Залгаллера "Теория огибающих" [35], которую отличает глубина, математическая строгость и полнота изложения материала.

Заметим, что высокую оценку уровня работ второго цикла подтверждает присуждение в 1958 году М.Л. Новикову Ленинской премии – высшей премии СССР за выдающиеся достижения в профессиональной сфере деятельности.

Подтверждение того, что именно советские ученые внесли решающий вклад в становление теории зацеплений как науки, и того, что в Советском Союзе было подготовлено большое число специалистов высшей квалификации по теории зубчатых зацеплений, являются следующие факты:

- монография Ф.Л. Литвина "Теория зубчатых зацеплений", написанная в конце 60-х годов, до сих пор остаётся главной настольной книгой специалистов по зуборезному делу, а самого Литвина не только в странах СНГ, но и в дальнем зарубежье считают создателем современной теории зацеплений;

- названная монография, переработанная и дополненная, неоднократно переиздавалась за рубежом на английском языке, написанная в соавторстве с новыми зарубежными учениками Файдора Львовича [36];

- ряд квалифицированных специалистов по теории зацеплений (кстати, не самых известных в своё время в СССР и странах СНГ), иммигрировав в западные страны, пишут и издают на английском языке достаточно серьезные книги по теории зацеплений и геометрии передач (С.П. Радзевич, А.Л. Капелевич, С.В. Лунин).

Подводя итог второго цикла, приведем слова С.А. Лагутина, которые наиболее точно отражают суть этого яркого периода [37]: это был период "бури и натиска в развитии теории зацеплений, когда в России в этой области работала целая плеяда блестящих исследователей во главе с Н.И. Колчиным и Ф.Л. Литвиным. Сотрудничая и соревнуясь друг с другом, они за считанные годы выстроили на стыке дифференциальной геометрии и механики машин изумительной красоты здание новой науки".

### **3.3. Формирование основ компьютерно-ориентированной теории зацеплений.**

Главное предназначение такой теории – стать основой для методов компьютерного анализа, синтеза, проектирования и изготовления зубчатых деталей для передач зацеплением.

К середине 70 годов теория зацеплений, как наука, достигла периода зрелости: основные и первоочередные теоретические задачи анализа и синтеза зацеплений были решены. Число новаторских теоретических работ пошло на убыль. Исследования становятся

ближе к производству, и теория зацеплений выступает, прежде всего, в роли инструмента для решения конкретных инженерных задач.

Теория зубчатых зацеплений, как и станкостроительная промышленность, с середины 70-х годов XX века развивались параллельно по двум направлениям: "общемировому" и "российскому".

Общемировое развитие теории зубчатых зацеплений проходило на фоне революции, которую, начиная с 80-х годов, переживала станкостроительная промышленность.

В развитых странах начинают появляться сначала станки-полуавтоматы с жесткими связями, частично управляемые компьютером, а затем и полные автоматы – многокоординатные станки с ЧПУ (типа CNC).

В это время появляются, например, станки для обработки конических колес с круговыми зубьями Phoenix (Gleason) и WNC30 (Klingelberg). Создание таких станков проходило параллельно с разработкой новых математических моделей формообразования деталей на многокоординатных станках и проверки работоспособности деталей еще до их получения в металле. Именно в это время были разработаны программные комплексы LTCA (Gleason) и Kimos (Klingelberg), с помощью которых можно было решать задачи синтеза и анализа конических передач с круговыми зубьями [38].

*"Общемировое"* направление в развитии теории зубчатых зацеплений, осуществлялось примерно в одном направлении и с использованием похожих подходов во всех развитых странах. При этом для решения задач анализа и синтеза передач использовались:

- методы классической теории зацеплений (при компьютерном проектировании геометрии передач любого вида);

- недифференциальные методы анализа процессов формообразования с использованием, как универсальных пакетов прикладных программ, так и специально создаваемых;

- методы граничных и конечных элементов (при анализе контактного взаимодействия рабочих поверхностей зубьев);

- методы конечных элементов и интегральных уравнений (при анализе напряженно-деформированного состояния зубьев);

- численные методы оптимизации (при синтезе геометрии рабочих и переходных поверхностей зубьев);

- расширенный перечень качественных показателей работы зацеплений, в том числе, новых: расчетной толщины масляной плёнки; критериев горячего и холодного заедания; критериев, оценивающих условия для образования масляного клина; показателей виброактивности зацепления и других.

Проектирование передач рассматривалось как комплексная проблема, требующая согласованного решения группы взаимосвязанных задач:

- выбор схемы конструкции передачи;

- синтез допустимой геометрии;

- оптимизация геометрии;

- конструктивная компоновка и оценка её качественных показателей;

- выявление и устранение слабых мест;

- проектирование техпроцессов изготовления, выбор или синтез инструментов, последующие оптимизации и т.п.

В России, Украине и Белоруссии развиваемую теорию зубчатых зацеплений называют "Теория реальных зацеплений", за рубежом – Integrated Gear Design (IGD) или "Интегрированное проектирование зубчатых передач".

*"Российское"* направление в развитии теории зубчатых зацеплений имеет ряд особенностей и связан со следующими объективными обстоятельствами.

Во-первых, в промышленности СССР в конце 70-х годов появились первые явные признаки застойных явлений. Во-вторых, сократилось число аспирантов, т.к. вузы в основном решили проблему преподавательских кадров, возникшую в начале 60-х годов из-за

резкого увеличения числа студентов, обучающихся на инженерных специальностях. И, наконец, Россия теряет первую тройку основных теоретиков в области теории зацеплений: вынужден иммигрировать в США Ф.Л. Литвин; погибает в автокатастрофе Л.В. Коростелев; отходит от активной научной работы и в последующем уезжает в США Я.С. Давыдов.

И, тем не менее, за 15-20 лет, предшествующих развалу СССР в 1991 году, теория зацеплений и геометрия передач в Советском Союзе продолжала развиваться. В это время формируются новые центры, занимающиеся различными вопросами теории зубчатых зацеплений. Перечислим наиболее интересные, с нашей точки зрения, темы исследования конца прошлого века:

- вопросы прочности, решение контактной задачи теории зубчатых зацеплений (Э.Л. Айрапетов, В.Н. Сызранцев, Г.И. Шевелева);
- исследование зубчатых передач на изгиб, расчет изгибных напряжений (Г.И. Шевелева, В.И. Медведев);
- недифференциальные методы определения контактирующих поверхностей и их особенностей (Г.И. Шевелева, В.И. Гольдфарб, А.Э. Волков);
- вопросы проектирования, синтеза, анализа и изготовления спироидных передач (А.К. Георгиев, В.И. Гольдфарб);
- вопросы проектирования, синтеза, анализа и изготовления червячных передач (С.А. Лагутин, А.И. Сандлер);
- исследование конических и гипоидных передач с круговыми зубьями (М.Г. Сегаль, Г.И. Шевелева, В.Н. Сызранцев);
- исследование зубчатых передач с промежуточными телами (А.Е. Беляев);
- исследование цилиндрико-конических зубчатых передач (Б.А. Лопатин);
- разработка методов синтеза зубчатых передач (М.Г. Сегаль, С.А. Лагутин, Г.И. Шевелева, В.И. Медведев, В.Н. Сызранцев);
- формирование теоретических основ для разработки универсальных программ анализа пространственных рабочих и технологических зацеплений и создание таких программ (Д.Т. Бабичев).

В результате этих исследований в Советском Союзе были разработаны программные комплексы, нацеленные на решение задач синтеза и анализа, прежде всего, конических передач с круговыми зубьями. К наиболее известным относятся ПК "Волга5", выполненный под руководством М.Г. Сегалья [39], и ПК "Эксперт", созданный под руководством Г.И. Шевелевой [40].

Об уровне этих разработок говорит тот факт, что М.Г. Сегаль был в 90-е годы главным разработчиком ПК "Kimos" фирмы Klingelberg.

Следует также отметить, что в 90-е годы в Саратове (М.Г. Сегаль, Л.И. Шейко [41]) проводилась работа по выбору оптимальных схем многокоординатных станков с ЧПУ для обработки зубчатых колес. Эти разработки также были использованы фирмой Klingelberg.

Исследования – и, прежде всего, теоретические – продолжились и после развала СССР: в России, Украине и Белоруссии.

Развитие теории зубчатых зацеплений отличались в это время высоким уровнем теоретических исследований, основанных на введении новых геометрических, геометро-кинематических и иных понятий, и разработке на их основе новых математических моделей, методик и алгоритмов анализа и синтеза рабочих и технологических зацеплений. Такие работы выполнены, в основном, как инициативные высококвалифицированными специалистами-теоретиками в области теории и геометрии рабочих и технологических зацеплений. Это, как правило, не молодые преподаватели вузов, практически лишившиеся производственных связей после стагнации машиностроения при развале СССР.

Заметим, что выделить наиболее значимые направления исследований современной теории зубчатых зацеплений очень сложно. Как сказал поэт "большое видится на расстоянии". Поэтому ограничимся перечислением наиболее интересных, на наш взгляд, теоретических работ по развитию теории зацеплений, уделив большее внимание

Российскому направлению исследований. При этом мы почти не рассматриваем работы по геометрии передач – их слишком много. Заметим, что достаточно полное представление о теоретических работах этого периода можно получить из сборников трудов симпозиумов и конференций, проведённых: в Кургане (КМИ), в Ижевске (ИжГТУ) и в Севастополе (ХПИ, г. Харьков). Тем более что в публикациях содержатся ссылки на основные работы авторов докладов. В качестве основных направлений в развитии теории зацеплений и наиболее важных теоретических результатов после 70-х годов можно назвать следующие.

1. Введение и использование новых понятий таких как:

- пространство зацепления (С.А. Лагутин [42]);
- обволакивающая поверхность (Г.И. Шевелева [40]);
- веер, клин и пучок нормалей; ускорение внедрения (Д.Т. Бабичев [43]).

2. Развитие методов анализа особенностей процессов формообразования. Предложен новый метод поиска сингулярности в плоских зацеплениях (С.А. Лагутин), основанный на положении [44]: *точка возврата на профиле шестерни возникает в той точке линии зацепления, в которой нормаль к этой линии пересекает ось вращения шестерни*. Метод был распространён на пространственные зацепления (А.Э. Волков [45]).

3. Развитие методов синтеза:

- опираясь на новое понятие "пространство зацепления" и его свойства; этот подход использован при синтезе как конических передач с круговыми зубьями (С.А. Лагутин [46]), так и цилиндрических (Д.Т. Бабичев [47]);

- используя в качестве целевой функции новые критерии нагрузочной способности – допустимые контактные давления (В.И. Медведев [48]), удельную работу рабочих поверхностей зубьев (Д.Т. Бабичев [49]) и другие;

- для конических передач с малым межосевым углом (С.А. Лагутин [50]), (В.И. Медведев [51]);

- синтез зубчатых передач, учитывающих имеющиеся на производстве технологические ограничения (В.И. Медведев [52], В.Н. Сызранцев [53]);

- используя и развивая метод синтеза передач в обобщающих параметрах, предложенный первоначально Э.Б. Вулгаковым для эвольвентных передач; метод модифицирован В.Л. Дорофеевым – для тех же эвольвентных, а О.Н. Цукановым и Б.А. Лопатиным – для неэвольвентных передач (в том числе цилиндрических) [54];

- применяя вариационные методы синтеза, когда определяется уравнение оптимальной поверхности зуба и определяются его коэффициенты. Такой подход впервые применил, судя по всему, Алан Лебек [55] в США; его использовали в Украине [56] и развивают в России, где этим методом синтезированы равнопрочные передачи (по критерию контактной прочности по Герцу) [47, 57], и разработана методика синтеза конической передачи с круговыми зубьями по критерию минимальности контактных давлений и изгибных напряжений при условии сохранения габаритных размеров передачи, что актуально для авиации, где критичен вес конструкции [58];

- с целью повышения изгибной прочности круговых зубьев конических колес за счет оптимизации формы обрабатываемого инструмента [59];

- повышая нагрузочную способность быстроходных тяжело нагруженных цилиндрических эвольвентных передач. Отметим, что заметный вклад в развитие синтеза авиационных передач в последние десятилетия внесли [60] Э.Б. Вулгаков, В.Л. Дорофеев и А.Л. Капелевич.

4. Развитие методов анализа нагруженных зубчатых передач, учитывающих многопарность контакта:

- в конических передачах с круговыми зубьями [61];

- в спироидных передачах [62].

5. Достигнут значительный прогресс в методах анализа, синтеза, проектирования и изготовления передач червячного типа. Это, в основном, заслуги двух групп исследователей, работающих под руководством В.И. Гольдфарба и С.А. Лагутина.

Разработаны методики минимизации погрешностей зацепления и органических погрешностей червячных фрез, появляющиеся при затыловании и переточке фрез (С.А. Лагутин, А.И. Сандлер). Отработаны методики синтеза и производства передач с локализованным контактом: червячных (С.А. Лагутин, А.И. Сандлер [63]) и спироидных (В.И. Гольдфарб, Е.С. Трубачев [64]).

На основе исследования пространства зацеплений неортогональных передач: спироидных (Е.С. Трубачев [65]) и червячных (В.Ю. Пузанов), сконструированы передачи с повышенной нагрузочной способностью. Проектирование спироидных передач ведётся с использованием САПР «SPDIAL+», разработанной группой под руководством В.И. Гольдфарба. Создаётся конфигуратор редукторных систем для оптимизационного структурного синтеза их конструкции (О.В. Малина и другие). Спроектированы унифицированные червячные фрезы, нарезающие колёса для передач с локализованным контактом. Стало возможным однозаходной фрезой нарезать колёса, зацепляющиеся с многозаходным червяком (В.И. Гольдфарб и его ученики).

В институте механики ИжГТУ группой под руководством В.И. Гольдфарба по существу, заложены основы новой для России подотрасли машиностроения – редукторостроение для запорной и регулирующей трубопроводной арматуры:

- проводятся на высоком научном уровне теоретические исследования спироидных и червячных передач;

- применяется современный процесс проектирования: синтез идеального зацепления, синтез локализованного контакта, моделирование напряженно деформированного состояния, анализ реального зацепления под нагрузкой, прогнозирование состояния передачи;

- разработаны уже три поколения типоразмерных рядов четвертьоборотных и многооборотных спироидных редукторов; организовано их серийное производство с современным контролем качества и приемочными испытаниями.

6. Применение нетрадиционных видов передач и зацеплений: цилиндро-конических передач (Б.А. Лопатин [66]), передач с промежуточными телами качения (А.Е. Беляев [67]); гидро- и пневмомашин с некруглыми зубчатыми колёсами (Ан-и-Кан [68]); прецессирующих передач (И.А. Бостан [69], В.Н. Сызранцев, Б.А. Лопатин) и других [70].

7. Развитие кинематических методов анализа рабочих и технологических зацеплений. Заметим, что современное проектирование – проектирование компьютерное. Это предъявляет повышенные требования к теории зацеплений как основной математической базе такого проектирования. Приходится констатировать, что классическая теория зацеплений не во всём отвечает этим высоким требованиям. Так, по словам проф. М.Г. Сегалю, последние годы жизни работавшего в фирме Klingelberg, руководитель этой фирмы запретил использовать в создаваемых программах дифференциальные методы – основу классической теории зацеплений. Причина запрета – неадекватность результатов компьютерного моделирования реальным процессам формообразования. В России в этом направлении работают сейчас две группы исследователей: в Москве (А.Э. Волков, В.И. Медведев) и в Тюмени (Д.Т. Бабичев).

Д.Т. Бабичевым разработан единый кинематический метод анализа процессов формообразования [71], базирующийся на “триаде”: изломы + многопараметрические огибающие + новые представления о криволинейных координатах. Благодаря этому выяснена и устранена причина неадекватности методов классической теории зацеплений реальным процессам формообразования. Разработанный кинематический метод позволяет находить все поверхности, получаемые на изделии при зубообработке: формируемые гладкими поверхностями и изломами тел, в том числе: при подводе-отводе инструмента и в зонах вторичного резания. Этот кинематический метод обладает надёжностью недифференциальных, но превосходит их по быстродействию на два порядка, что подтверждено при его частичном использовании в САПР «SPDIAL+», а также позволяет определять кривизны в зацеплении.

8. Разработка системы задания реальных ИИП (исходных инструментальных поверхностей) и построение для них математических моделей [72]. Реальная ИИП – это собранный воедино набор всех формообразующих элементов инструмента (кусков поверхностей, режущих и граничных кромок и углов), для которого введены единые криволинейные координаты.

9. Используя понятие "ускорение внедрения", созданы новые методики решения целого ряда задач: вычисления радиусов кривизны в зацеплениях, определения зон резания и толщин слоёв, срезаемых режущими кромками инструментов и других (Д.Т. Бабичев [49]).

Например, опираясь на понятие "ускорение внедрения", получена новая базовая формула для вычисления приведенной кривизны в любых нормальных сечениях в точке касания двух движущихся тел, контактирующих по линии:

$$\frac{1}{R_{np}} = -\frac{\omega_{nep}^2}{a_B},$$

где  $\omega_{nep}$  – угловая скорость перекатывания тел в плоскости сечения, в котором вычисляется кривизна;  $a_B$  – ускорение внедрения. Фундаментальность полученной формулы состоит в том, что: 1) по своей общности она соизмерима с известными в дифференциальной геометрии кинематическими формулами Родрига и Френе, но предназначена для другого класса поверхностей – тех, что порождаются лишь в процессе формообразования методами огибания; 2) кривизна в любом нормальном сечении всех поверхностей, формируемых методами огибания, определяется всего двумя скалярными параметрами, и один из них (ускорением внедрения) не зависит от направления сечения.

Установлено также, что по знаку ускорения внедрения можно однозначно судить о характере касания тел. Например, при  $a_B > 0$  огибающая формируется внутри тела производящего элемента. Ускорение внедрения позволяет при решении задачи профилирования "попутно" определить радиусы кривизны и величину огранки по всей поверхности, формируемой огибанием при ленточной и чешуйчатой форме шероховатости.

Таким образом, за последние десятилетия создан существенный запас теоретических наработок для завершения 3-го цикла – создания компьютерно-ориентированной теории зацеплений:

- в теории зацеплений введено и активно используется много новых понятий;
- на их основе развиты и продолжают совершенствоваться методы анализа и синтеза передач и станочных зацеплений, ориентированные на компьютерные технологии;
- выполненные теоретические работы позволяют создавать надёжные компьютерные программы для моделирования процессов формообразования, основываясь на дифференциальных (кинематических) и недифференциальных методах;
- проводятся интенсивные исследования по совершенствованию методов оптимизационного синтеза зацеплений и по развитию методологий компьютерного проектирования и конструирования редукторов.

**4. Ожидаемые направления развития теории зубчатых зацеплений.** Перечислим основные задачи, стоящие перед учеными в теории зацеплений, которые, на наш взгляд, являются наиболее важными.

Задача 1. Создание теории оптимизационного синтеза конструкций и параметров высших кинематических пар, передающих движение и усилие при заданном и при оптимальном соотношении нормальных сил и сил трения. В настоящее время имеется и развивается теория высших пар лишь, как чисто геометрическая наука.

Задача 2. Разработка методов синтеза оптимальной геометрии зубьев, ориентированной на современные, а не традиционные технологии обработки. В этом случае конструктор должен будет решать вариационную задачу с ограничениями, обеспечивающую максимально возможную нагрузочную способность передачи по заданным критериям работоспособности.

Задача 3. Развитие методов анализа процесса пересопряжения заданных поверхностей зубьев с учетом величины нагрузки, деформации зубьев, погрешностей изготовления

элементов передачи, погрешностей взаимного положения зацепляющихся звеньев, динамики процесса пересопряжения.

Задача 4. Создание единого взаимосвязанного комплекса пакетов прикладных программ, с помощью которых конструкторы и производители зубчатых передач смогут вести оптимизационное проектирование, конструирование, подготовку производства разнообразных передач зацеплением.

Из перечисленных задач следуют и возможные направления развития теории зацеплений на предстоящие десятилетия.

**Заключение.** Во второй половине XIX века количество и сложность технических изобретений разнообразных машин и механизмов, использующих зубчатые передачи, достигло критической массы, и ученые примерно к 1890 году создали научные основы теории зацеплений, а приблизительно к середине 1970-х годов сформировалась современная теория зацеплений.

В настоящее время в развитии теории зацеплений продолжается период, ориентированный на компьютерные технологии.

По нашему мнению перспективы развития теории зацеплений, как составной части теории механизмов и машин, выше, чем, например, у раздела "рычажные механизмы". Во-первых, потому, что зубчатые передачи имеют большее распространение в машинах по сравнению с рычажными механизмами. Во-вторых, теория зацеплений не только теория высших кинематических пар – она ещё и основа теории формообразования и профилирования инструментов, а также проектирования техпроцессов зубообработки.

### Список литературы

1. Дильс Г.А. Античная техника. – М.-Л.: ОНТИ - Гос. техн.-теор. изд-во, 1934. – 215 с.
2. Витрувий. Десять книг об архитектуре. – М.: «Архитектура-С», 2006. – 328 с.
3. Пипуныров В.Н. История часов с древнейших времен до наших дней. – М.: Наука, 1982. – 496 с.
4. Академик И.И. Артоболевский: Сборник / Сост. А.М. Лепихов. – М.: Знание, 1983. – 176 с.
5. Чебышёв П.Л. Избранные труды. Изд-во АН СССР. – М.: 1955. – 926 с.
6. Рёло Ф. Теоретическая кинематика. 1875.
7. Портретная галерея выдающихся инженеров и ученых в области зубчатых передач. – Сборник докладов научно-технической конференции с международным участием "Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения", Ижевск, 2008, с.378-395.
8. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
9. Механика машин, вып. 45. – М.: Наука, 1974.
10. Willis, R. Principles of Mechanism, Cambridge, London. 1841.
11. Гохман Х.И. Теория зацеплений, обобщенная и развитая путем анализа, Дисс. ... магистра механики, Одесса, 1886. – 232 с.
12. Шишков В.А. Образование поверхностей резанием по методу обкатки. – М.: Машгиз, 1951. – 150 с.
13. Вильдгабер Э. Основы зацепления конических и гипоидных передач. – М.: Машгиз, 1948. – 236 с.
14. Baxter, M.L. Basic Geometry and Tooth Contact of Hypoid Gears "Industrial Mathematics", vol. 11, 1961. – P. 19-42.
15. Шевелева Г.И. Алгоритм численного расчета обрабатываемой поверхности // Станки и инструмент, № 8, 1969. – С.17-20.
16. Николаев А.Ф. Диаграмма винта и ее применение к определению сопряженных линейчатых поверхностей с линейным касанием // Труды семинара по ТММ, вып. 37, 1950. – С.52-106.

17. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М.: Изд. ВВИА им. Жуковского, 1958. – 186 с.
18. Давыдов Я.С. Об одном обобщении метода Оливье для образования сопряженных поверхностей в зубчатых передачах // Сб. «Теория передач в машинах». М.: Машгиз, 1963. – С. 19-25.
19. Ерихов М.Л. Метод последовательного огибания // Механика машин, 1972, вып. 31-32. – С. 12-20.
20. Колчин Н.И. Аналитические основы дифференциального метода исследования зубчатых зацеплений // Труды семинара по ТММ АН СССР, вып. 64, 1957.
21. Николаев А.Ф. Диаграмма винта и ее применение к определению сопряженных линейчатых поверхностей с линейным касанием // Труды семинара по ТММ, вып. 37, 1950. – С.52-106.
22. Писманик К.М. Об оси зацепления червячных передач // Труды семинара по ТММ, 1950, вып. 39.
23. Колчин Н.И. Метод винтового комплекса в теории пространственных зацеплений. Сб. «Теория передач в машинах». – М.: Машгиз, 1963. – С. 7-18.
24. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов. – М.: Машиностроение. 1968. – 371 с.
25. Давыдов Я.С. Неэвольвентное зацепление. – М.: Машгиз, 1950. – 189 с.
26. Крылов Н.Н. Глобоидальное зацепление при произвольном угле скрещивания осей // Труды семинара по ТММ, вып. 50, АН СССР, 1953.
27. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Физматгиз, 1960. – 444 с.
28. Шевелева Г.И. Метод степенных рядов в теории зубчатых зацеплений с точечным контактом // Машиноведение, № 4, 1969. – С.58-65.
29. Дусев И.И., Васильев В.М. Аналитическая теория пространственных зацеплений и ее применение к исследованию гипоидных передач. – Новочеркасск: Изд. НПИ, 1968. – 148 с.
30. Коростелев Л.В., Лагутин С.А. Синтез зубчатых передач с замкнутой линией контакта // Машиноведение, № 6, 1969. – С. 44-50.
31. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. – М.: Машиностроение, 1969. – 431 с.
32. Громан М.Б. Графики для подбора коррекции прямозубых зубчатых передач и указания по их применению // Вестник машиностроения, № 7, 1957. – с. 32–38.
33. Болотовская Т.П., Болотовский И.А., Бочаров Г.С., Ефименко А.Б. и др. Справочник по корригированию зубчатых колес, ч.2. // М.: Машиностроение, 1967. – 576 с.
34. Литвин Ф.Л. Некруглые зубчатые колеса. – М.-Л.: Машгиз, 1956. – 312 с.
35. Залгаллер В.А. Теория огибающих. – М.: Наука, 1975. – 104 с.
36. Litvin F.L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. – Cambridge: Univer. press, 2004. – 800 p.
37. Лагутин С.А. Профессор Л.В. Коростелев // Передачи и трансмиссии, № 2, 1997. – С. 34-37.
38. Stadtfeld, H.J., Handbook of Bevel and Hypoid Gears. Calculation - Manufacturing - Optimization. – 1<sup>st</sup> Edition, Rochester Institute of Technology, NY, 1993. – 251 p.
39. Сегаль М.Г., Ковалев В.Г., Ромалис М.М. Анализ качества зацепления и расчет наладочных параметров для профилирования прямых зубьев конических колес // Известия ВУЗов. Машиностроение, № 10, 1990.
40. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Мосстанкин, 1999. – 494 с.
41. Сегаль М.Г., Шейко Л.И. Классификация компоновок многокоординатных станков для обработки конических колес с криволинейными зубьями // Станки и инструмент, № 7, 1998. – С.8-11.

42. Лагутин С.А. Пространство зацепления и его элементы // *Машиноведение*, № 4, 1987. – С. 69-75.
43. Бабичев Д.Т. О базовых геометрических примитивах теории зубчатых зацеплений // *Теория и практика зубчатых передач. Труды межд. конф.*, Ижевск, 1996. – С. 469-474.
44. Litvin, F.L., De Donno, M., Lian, Q. and Lagutin, S.A. Alternative Approach for Determination of Singularities and Envelopes to a Family of Parametric Surfaces. // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 1998, No 167. – pp. 153-165.
45. Волков А.Э. Методика выявления подрезания круговых зубьев конических и гипоидных колес // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, № 4, 2000. – С.66-74.
46. Lagutin S.A. Synthesis of Spatial Gearings by Aid of Meshing Space // *Proc. of International Conference «Power Transmissions-03»*, Vol.1, Varna, Bulgaria, 2003, pp. 343-346.
47. Бабичев Д.Т., Сторчак М.Г., Бабичев Д.А. Геометрический синтез и компьютерное исследование равнопрочных цилиндрических прямозубых передач // *Теория и практика зубчатых передач // Сб. трудов Международ. симпоз.*, Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. – С. 309-315.
48. Медведев В.И., Шевелева Г.И. Синтез спирально-конических зубчатых передач по условиям контактной прочности зубьев // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2002, № 4. – С.75.
49. Бабичев Д.Т. Развитие теории зацеплений и формообразования поверхностей на основе новых геометро-кинематических представлений: дисс. ... докт. техн. наук. – Тюмень, 2005. – 421 с.
50. Akimov V.V., Lagutin S.A., Volkov A.E. New Approach to the Local Synthesis of Spiral Bevel Gears // *Proceedings of the 10th Int. ASME Power Transmission And Gearing Conference*, September 4-7, 2007, Las Vegas, Nevada, USA, p.13-17.
51. Волков А.Э., Медведев В.И., Жучков И.В., Семячкова Е.Г. Технологический синтез конических передач с круговыми зубьями с малым межосевым углом // *Вестник МГТУ "Станкин"*, № 1 (18), том 1, 2012. – С. 98-102.
52. Волков А.Э., Медведев В.И., Жучков И.В. Расчет наладок для обработки круговых зубьев конических передач при наличии технологических ограничений с использованием модифицированного движения обката // *Вестник МГТУ «Станкин»*, № 2, 2010. – С.20-28.
53. Сызранцев В.Н., Ратманов Э.В., Котликова В.Я. Оценка возможности изготовления конических и гипоидных пар в условиях жестких технологических ограничений // *Техника машиностроения*, № 2, 2001. – С.52-56.
54. Лопатин Б.А., Цуканов О.Н. Способы формирования рабочих поверхностей зубчатых передач с малым межосевым углом // *Передачи и трансмиссии*, № 2, 1997. – С. 38-49.
55. Lebek, A.O., Radzimovsky E.I. The synthesis of profile shapes and spur gears of high load capacity // *Trans. ASME*, 1970, V 92, #3, p. 543-551.
56. Шишов В.П., Носко П.Л., Филь П.В. Теоретические основы синтеза передач зацеплением. – Луганск: СТУ им. Даля, 2006. – 408 с.
57. Babichev D. and Storchak M. Synthesis of cylindrical gears with optimum rolling fatigue strength. *Production Engineering. Research and Development*, v.9, N.1. – Springer, 2015, p. 87-97.
58. Медведев В.И., Матвеевков Д.С. О построении оптимальных поверхностей круговых зубьев конических пар // *Вестник МГТУ «Станкин»*, № 1, 2009. – С. 59-64.
59. Медведев В.И. Расчет изгибных напряжений в круговых зубьях конических колес // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, №4, 2003. – С. 32-40.
60. Вулгаков Э.Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.

61. Medvedev V.I., Volkov A.E., Volosova M.A., Zubelevich O.E. Mathematical model and algorithm for contact stress analysis of gears with multi-pair contact // Mechanism and Machine Theory 86 (2015) 156-171.
62. Goldfarb V.I., Trubachov E.S., Kuznetsov A.S. Load Distribution in Statically Loaded Spiroid Gear, Proceedings on the 2nd International Conference "Power transmissions 2006", Novi Sad, Serbia & Montenegro, 2006, pp. 369-376.
63. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Верховский А.В. Производство червячных передач / под общ. ред. С.А. Лагутина. - М.: Машиностроение, 2008. – 272 с.
64. Гольдфарб В.И., Трубачев Е.С. Об осях зацепления в спироидной передаче // Пространство зацеплений. Сборник докладов научного семинара Учебно-научного центра зубчатых передач и редукторостроения, Ижевск – Электросталь, 2001. – С. 71-76.
65. Трубачев Е.С. Метод расчета параметров станочного зацепления с геликоидальной производящей поверхностью // Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач, Сборник докладов международного научного семинара, Ижевск, 2001. – С. 163-169.
66. Лопатин Б.А. Разработка теоретических основ проектирования, изготовления и испытания цилиндрико-конических зубчатых передач с малыми межосевыми углами: Автореф. дис... докт. техн.наук. – Челябинск, 1999. – 46 с.
67. Беляев А.Е. Механические передачи с шариковыми промежуточными телами. – Томск, Изд. ЦНТИ, 1992. – 231 с.
68. Ан И-Кан., Беляев А.Е. Синтез планетарных передач применительно к роторным гидромашинам // Новоуральск: НИИ МИФИ, 2001. – 90 с.
69. Бостан И.А. Прецессионные передачи с многопарным зацеплением / Под ред. С.А. Шувалова // Кишинев: Штпинца, 1991. – 342 с.
70. Кислов С.Ю., Тескер Е.И., Тимофеев Б.П. Прецессирующие конические передачи внутреннего зацепления // Теория и практика зубчатых передач. Труды международной конференции, Ижевск, 1996. – С.387-392.
71. Бабичев Д.Т. Основы альтернативной теории формообразования, базирующейся на новых геометрических понятиях // Международная конференция "Техника проводов 03": докл. I-58, – Болгария, София, 2003. – С.270-275.
72. Бабичев Д.Т. О применении многопараметрических огибаний при компьютерном моделировании процессов формообразования в рабочих и технологических зацеплениях // Теория и практика зубчатых передач: Ижевск, 2004.– С.302-315.