




Тема 1.

Общие сведения о науке – внешняя баллистика ракет


Баллистика ракет - прикладная наука о движении реактивных снарядов, баллистических ракет и их головных частей (ГЧ), космических ракет-носителей КА и других типов ракет.

В данном курсе рассматривается движение баллистических ракет, предназначенных для пусков на большие дальности по целям, расположенным на поверхности Земли.


Такие ракеты называют *стратегическими*.



Баллистические задачи для
этих ракет опираются на общие
принципы
математического описания и
анализа движения, но имеют
ряд специфических
особенностей.



Характерной особенностью
движения БР является наличие
достаточно длительного по времени и
протяженности участка
управляемого полета, называемого
активным участком или **участком**
выведения



На этом участке отделяющейся
БЧ придается необходимый
запас кинетической энергии и
требуемые начальные условия
свободного полета.

В результате движение БР
представляет собой
совокупность участков:

- а) *программного* (управляемого)
полета;
- б) *баллистического* (свободного)
полета.

Целенаправленность обоих видов полета основана на двух известных положениях механики, согласно которым:

движение любого материального тела (в том числе и полет ракеты), определяется начальными условиями и силами, действующими на тело в процессе движения.

Поэтому поставленную перед полетом ракеты задачу можно выполнить только:

а) либо путем придания ему определенных начальных условий,

б) либо путем создания соответствующих сил.

Эти способы активно и целенаправленно воздействуют на ракету в процессе полета.

Первый из названных путей осуществления целенаправленного полета ракеты основан *на принципе бросания*.

При его реализации ракета летит как свободно брошенное тело под действием неуправляемых внешних сил, изменяющихся естественным образом.

Такой вид полета называют еще *пассивным* или *свободным*.

Баллистическим называется полет под действием сил, управление которыми в процессе полета не предусмотрено или в принципе невозможно.

Требуемая целенаправленность достигается *путем задания соответствующих начальных условий движения.*

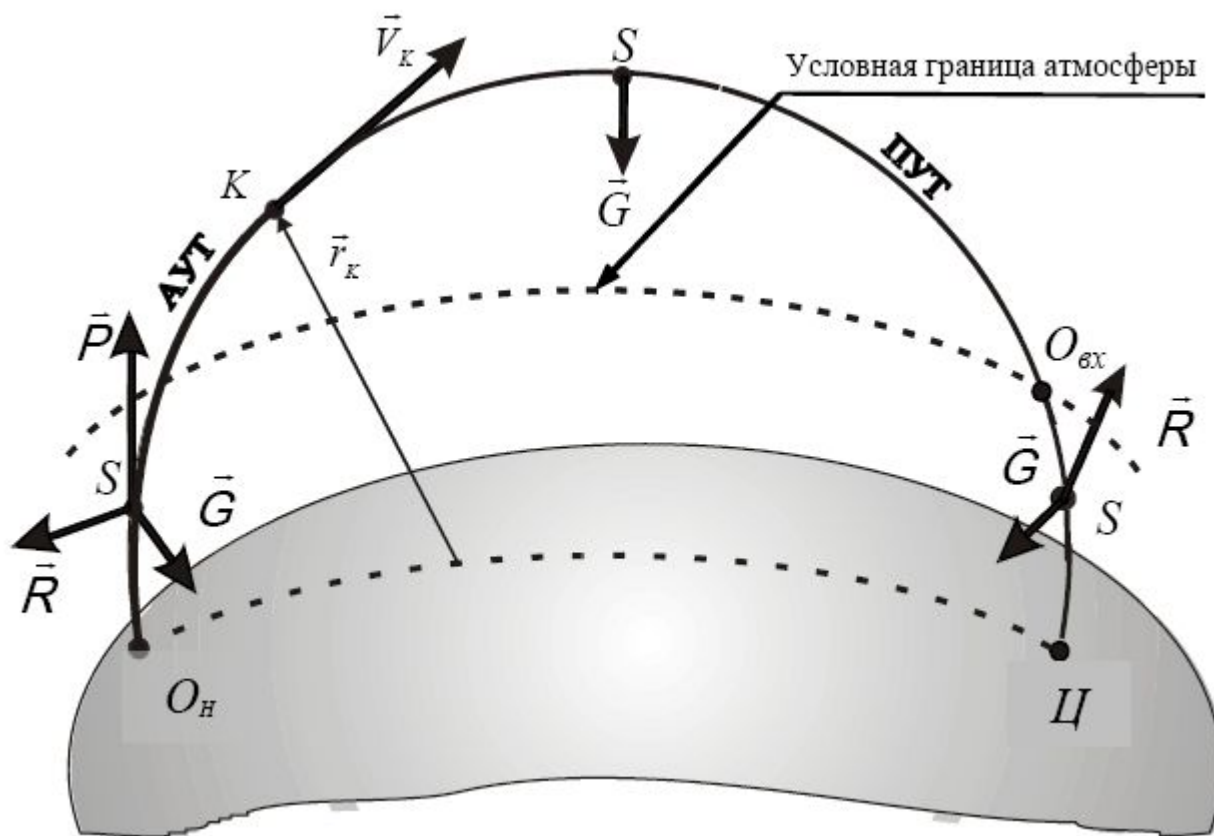
В качестве начальных условий выступают величина и направление **вектора скорости** в начальной точке.

Второй способ достижения требуемой целенаправленности полета состоит в том, что в процессе движения *часть сил, действующих на ракету* (такие силы называют управляющими), *изменяются* требуемым образом.

Это приводит к желаемому изменению траектории полета.

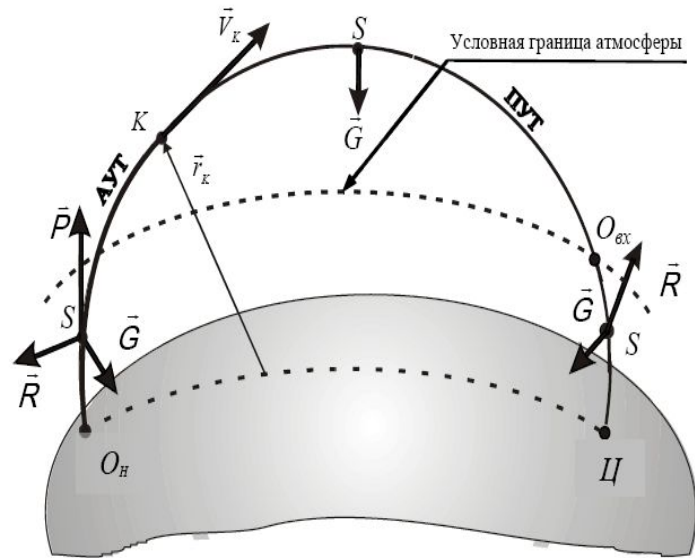
Такой вид полета называют *управляемым* или *программным*.

На баллистической ракете при ее движении от старта до цели используются оба вида полета - активный



Типовая траектория полета ракеты

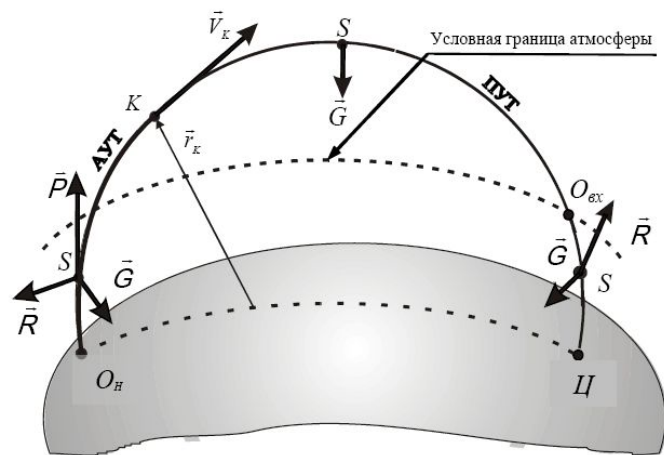
При этом под *траекторией* полета понимается *непрерывная пространственная линия*, которую описывает центр масс (ЦМ) ракеты при своем движении в пространстве.



Начинается траектория в точке старта O_H , под которой понимается положение центра масс S полностью заправленной ракеты, стоящей на стартовом устройстве.

Заканчивается траектория в точке цели или точке прицеливания $Ц$, в которую доставляется боевой заряд.

Точкой K , в которой производится выключение двигательной установки (ДУ) и отделение головной части, траектория полета БР делится на два участка - активный и пассивный.

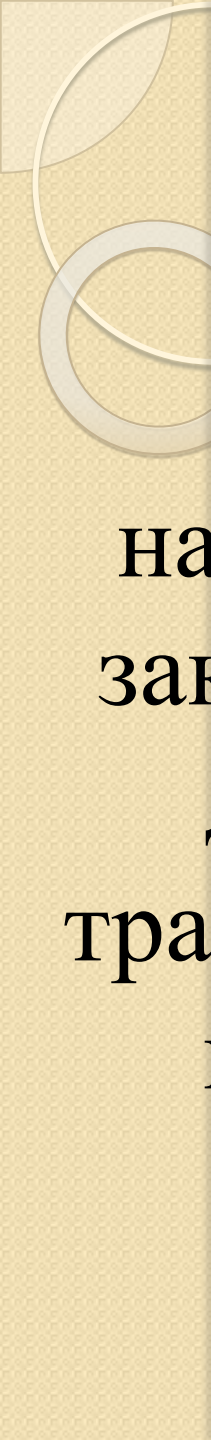


На активном участке траектории (АУТ) ракета совершает активный полет с работающей ДУ.

На этом участке на нее действуют сила тяги ДУ P , сила притяжения Земли G и суммарная аэродинамическая сила R .
С помощью системы управления (СУ), которой оснащена ракета, можно изменять силы P и R и, тем самым, придавать полету ракеты необходимую целенаправленность.

Для ракет, оснащенных многоэлементными БЧ, активный участок траектории, в свою очередь, делится на участок выведения и участок разведения элементов боевого оснащения (ЭБО).

На участке выведения движение БР происходит за счет работы ДУ маршевых ступеней и завершается отделением от ракеты-носителя ступени разведения.

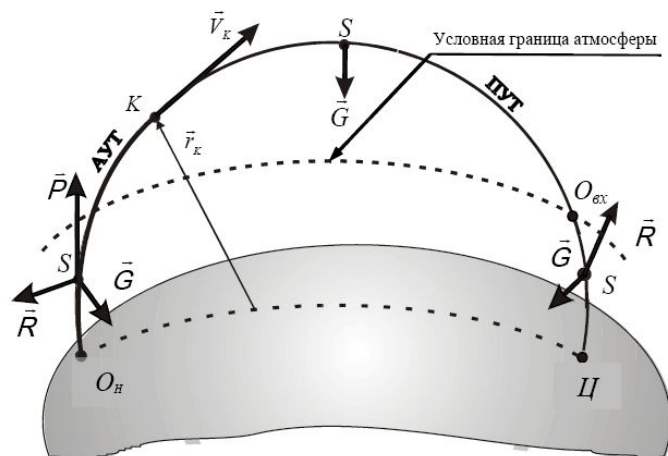


На участке разведения ЭБО
производится индивидуальное
наведение каждого боевого блока на
закрепленную точку прицеливания, а
других ЭБО – это происходит на
траектории, обеспечивающей решение
поставленных перед ними задач.

На *пассивном* участке траектории (ПУТ) боевая часть совершает **пассивный** (баллистический, неуправляемый, свободный) полет.

Точка пересечения траекторией БЧ условной границы атмосферы (точка входа в атмосферу $O_{вх}$) разделяет ПУТ на две части: внеатмосферную и атмосферную.

В баллистике ракет условной границей атмосферы принято считать высоту порядка *100 км*.

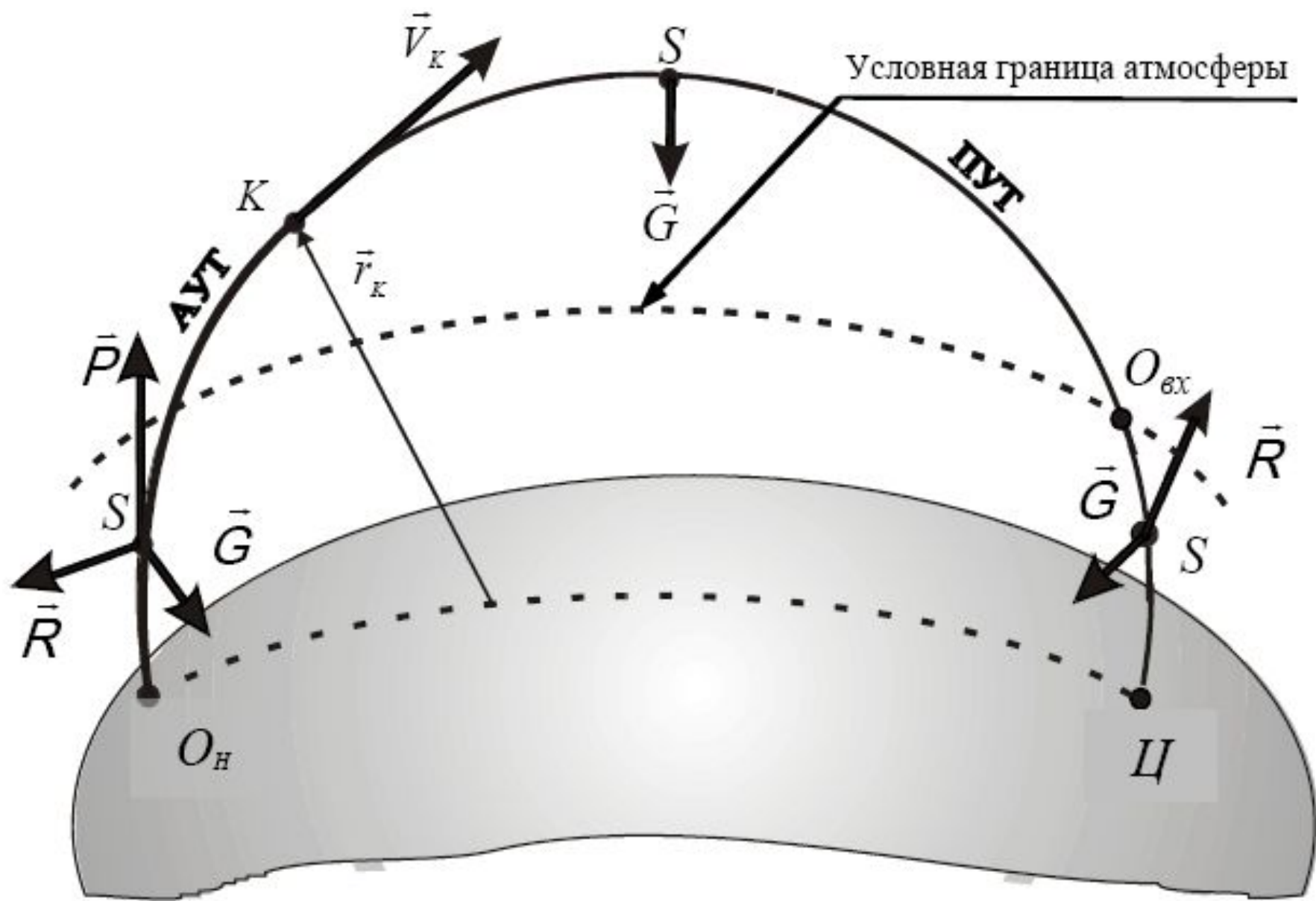


На внеатмосферной части ПУТ движение осуществляется под действием только силы притяжения Земли \mathbf{G} , а на атмосферной части - под действием сил \mathbf{G} и \mathbf{R} .

Обе эти силы, действующие на ГЧ на пассивном участке, являются *неуправляемыми*.

Необходимая

целенаправленность полету БЧ
придается заданием начальных
условий движения в точке K ,
которыми являются вектор
положения $\overset{\Delta}{r}_k$ и вектор скорости
 $\overset{\Delta}{V}_k$ в этой точке.



Итак, основная задача АУТ - это перемещение БЧ в точку K и «разгон» ее до такой скорости V_k , которая обеспечивала бы при дальнейшем пассивном полете прохождение траектории через заданную точку прицеливания.

По протяженности АУТ занимает не более 10% всей траектории, так что на большей части траектории ракета, точнее ее БЧ, совершает баллистический полет.

По этой причине ракеты такие названы *баллистическими*, а наука, занимающаяся изучением их движения, - *баллистикой ракет*.

Система управления БР является автоматической, работающей по заданной программе без участия человека.

Поэтому баллистическая ракета является беспилотным летательным аппаратом.

Таким образом, баллистическая ракета - это управляемый беспилотный ЛА, снабженный реактивной ДУ, который на большей части траектории совершает баллистический полет.



Становление и развитие науки - баллистика ракет


Полет ракет и БЧ является одним из видов механического движения.

Вполне естественно, что наибольший вклад в становление и развитие баллистики ракет внесла *теоретическая механика* с разделом механика тел переменной массы.

Главными заслугами в создании основ механики принадлежат гениальным ученым:

Г. Галилею (1564- 1642) и И. Ньютону (1643-1727).

Основы аналитических методов механики заложены и развиты *Л. Эйлером (1707-1783) и Ж. Лагранжем (1736- 1813).*



Из отечественных ученых, внесших
значительный вклад в развитие
различных областей теоретической
механики, следует назвать

Л. Эйлера,

М.В. Остроградского (1801 - 1861),

С.В. Ковалевскую (1850 - 1891),

А.Н. Крылова (1863-1945),

Н.Е. Жуковского (1847-1921).

Ракеты отличаются от большинства объектов, изучаемых механикой, тем, что являются телами переменной массы.

Поэтому - теоретическое изучение их движения стало возможным после того, как были созданы основы механики тел переменной массы.

Основоположником этого раздела теоретической механики по праву считается

И.В. Мещерский (1859- 1935).

Значительный вклад в раздел механики тел переменной массы, занимающийся именно изучением движения ракет, внес замечательный русский ученый *К.Э. Циолковский* (1857 - 1935).

Выведенная им формула, описывающая зависимость между изменением массы ракеты и ее скоростью при условии, что на ракету действует только реактивная сила, заслуженно носит его имя.

Дальнейшему развитию этого направления способствовали работы А.


А. Космодемьянского,

Ф.Р. Гантмахера,

Л.М. Левина,

Л.Г. Лойцянского,

А.И. Лурье.



Для теории полета ракет наиболее важными во всех работах этого направления являются вопросы, связанные с установлением общих теорем механики тел переменной массы и с выводом исходных уравнений движения, на которых основывается теория полета ракет на АУТ.

На участке баллистического полета вне атмосферы ракеты движутся под действием сил притяжения небесных тел точно также, как и естественные спутники планет и сами планеты.

Поэтому общие положения и методы **небесной механики** с успехом используются в теории полета ракет при изучении баллистического полета в пустоте.

Небесная механика к периоду формирования теории полета ракет уже имела большую историю своего развития.

Ее основы были заложены работами таких гениальных ученых, как

Н. Коперник (1473 - 1543),

И. Кеплер (1571 - 1630),

И. Ньютон.


Дальнейшее развитие небесная механика
получила в трудах:

*Л. Эйлера, Ж. Лагранжа,
П.С. Лапласа (1749 - 1827),
А. Пуанкаре (1854 - 1912).*

Из отечественных работ по небесной
механике следует отметить работы

*И. Шуберта (1758- 1825) и исследования
А.М. Ляпунова (1857 - 1918),*

относящиеся к обоснованию общей теории
устойчивости



Все методы и результаты
небесной механики,
относящиеся к
изучению схемы кеплеровых
движений, успешно
используются в теории полета
ракет и нашли свое место в ее
содержании.


На участке баллистического полета в атмосфере ракеты движутся под действием тех же сил, что и *обычные артиллерийские снаряды*.

Поэтому многие общие положения и методы внешней баллистики, изучающей движение артиллерийских снарядов, используются в баллистике ракет при изучении баллистического полета в атмосфере.

К моменту формирования теории полета ракет внешняя баллистика стала наукой с большой историей своего развития, большой вклад в которую внесли выдающиеся отечественные ученые-артиллеристы профессора Михайловской артиллерийской академии:

*В.А. Анкудович (1792 - 1856),
Н.В. Маиевский (1823 - 1892),
Н.А. Забудский (1853 - 1917),
В.М. Трофимов (1865- 1926) и др.*

Первыми трудами по
движению артиллерийских
снарядов являются
трактаты итальянского
математика *Никколо*
Тартальи (1499-1557).



Первая теоретически
обоснованная работа по
расчету траектории свободно
брошенного под углом к
горизонту тела опубликована
в 1638 г. итальянским ученым
Галилео Галилеем.

В ней:

- изложена параболическая теория движения снаряда,
- доказано, что траектория артиллерийского снаряда без учета сопротивления воздуха является параболой.


Эта схема движения, называемая *схемой Галилея*, широко используется для анализа движения ракеты и в современной баллистике.

Однако лишь в 1644 г. французский ученый *Марен Мерсенн* (1588 - 1648) при переводе трудов Г. Галилея впервые использовал термин «баллистика» для обозначения теории движения артиллерийских снарядов.


С ростом дальностей и начальных скоростей полета снарядов расчет траектории без учета сопротивления воздуха по параболической теории стал приводить к недопустимым ошибкам.

Общие научные основы учета сопротивления воздуха при проведении баллистических расчетов заложил *И. Ньютон*.

Он открыл закон сопротивления сплошной среды движению материальных тел, обосновал методы определения аэродинамической силы и формы тела с наименьшим аэродинамическим сопротивлением.




Однако первое решение задачи о движении снаряда с учетом сопротивления воздуха было получено *Л. Эйлером* в 1759 г.



Новый период развития артиллерии, характеризующийся переходом к нарезным орудиям и вращающимся продолговатым снарядам, потребовал решения целого ряда новых задач.

Особые заслуги в деле дальнейшего развития внешней баллистики в этот период принадлежат русским ученым-артиллеристам.



В 1836 г. профессором В.А. Анкудовичем написан первый на русском языке курс внешней баллистики, в котором подведены итоги развития баллистики сферических снарядов и методов составления таблиц стрельбы для них.

В 1868- 1869 гг. *Н.В. Маиевским* на основе систематических опытов установлен закон сопротивления воздуха продолговатым снарядам, впоследствии распространенный на интервал более высоких скоростей его учеником и преемником генералом *Н.А. Забудским*.

Исключительную роль в развитии баллистики сыграло создание *Н.В.*

Маиевским теории вращательного движения продолговатых снарядов.


В 1870 г. опубликован учебник *Н.В. Маиевского* «Курс внешней баллистики», в котором дано систематическое изложение вопросов внешней баллистики продолговатых снарядов нарезных орудий.

Н.А. Забудский, продолжая исследования Н.В. Маиевского. предложил наиболее совершенный в то время метод решения задач навесной и прицельной стрельбы. провел большие исследования вращательного движения снарядов и вывел формулу для оптимальной длины хода нарезов ствола.

СТОЛЕТИЯ.

В 1894 г. *Забудский Н.А.* первым получил аналитическое решение задачи о влиянии вращения Земли на полет снаряда в воздухе.

В 1895 г. *Забудский Н.А.* опубликовал фундаментальный труд «Внешняя баллистика», который использовался в качестве основного учебника вплоть до 30-х годов двадцатого столетия.



Среди других ученых-артиллеристов, внесших существенный вклад в развитие отечественной баллистики в первой половине XX в., следует отметить:

профессора С.Г. Петровича (1869 - 1926),

генерала В.М. Трофимова,

профессора В.В. Мечникова (1879 - 1939),

профессора Д.А. Вентцеля (1898 - 1955),

профессора Я.М. Шапиро (1902 - 1994)

и др.

Результаты, полученные названными
учеными в разработке методов
приближенного интегрирования
уравнений движения,
исследования малых отклонений
движения и других вопросов
внешней баллистики, с успехом
используются в баллистике ракет
и получили в ней свое дальнейшее
развитие.


Движение ракет на атмосферном участке программного полета подобно движению самолетов.

Они движутся под действием тех же сил, что и ракеты, и имеют аналогичные органы управления.

Поэтому многие общие положения теории полета самолетов оказываются применимыми и к полету ракет.


Это позволило при формировании и последующем развитии соответствующих разделов баллистики ракет с успехом использовать известные результаты теории полета самолетов, в таких областях, как:

- динамика самолета, снабженного автопилотом,
- устойчивость полета,
- изучение полетных свойств самолета.



Большое влияние на формирование и развитие баллистики ракет оказала и теория автоматического управления (ТАУ), поскольку ракета на участке программного полета может рассматриваться как сложная система автоматического управления.

Применение методов ТАУ к изучению движения баллистических ракет было естественным шагом в развитии некоторых разделов теории полета ракет.



Свое начало теория автоматического
управления берет с работ:

Д.К. Максвелла (1831 - 1879),

И.А. Вышнеградского (1831 -1895),

А. Стодола (1859- 1942),


Э. Рауса (1831 - 1907),

Н.Е. Жуковского (1847 - 1921),


А.М. Ляпунова (1857 - 1918).

Особо следует отметить работы *И.А. Вышнеградского*, с которых, по существу, и началась практическая теория автоматического управления, а также работы *А.М. Ляпунова*, давшие строгое математическое обоснование теории устойчивости систем.

Как классические, так и новые методы ТАУ оказали и продолжают оказывать существенное влияние на развитие теории полета ракет, в частности, на разработку методов решения таких задач, как определение: устойчивости движения, точности полета, оптимальных программ полета и процессов управления полетом.



Таким образом, рассмотренные смежные науки к 40 - 50 годам прошлого столетия, т. е. к началу бурного развития ракетной техники, заложили определенный теоретический фундамент, на базе которого и формировалась баллистика ракет как самостоятельная наука.



Вместе с тем, специфика полета баллистических ракет поставила целый ряд новых задач, связанных с разработкой и боевым применением ракет, и потребовала новых методов их решения.

Значительный вклад в решение этих
задач внесли

Ф.А. Цандер, М.К. Тихонравов,

Г.С. Нариманов, Я.М. Шапиро,

Д.А. Погорелов, Л.М. Лахтин,

Д.Е. Охоцимский, П.Е. Эльясберг,


Л.Б. Новак. М.Д. Кислик, Р.Ф. Аппазов,

С.С. Лавров, А.П. Катаргин,

В .А. Ярошевский и др.

Большое влияние на формирование баллистики ракет оказали **работы:**

- Р.Ф. Аппазов, С.С.Лавров, В.П.Мишин «Баллистика управляемых ракет дальнего действия» (Наука, 1966 г.),
- А.Ю. Ишлинский «Инерциальное управление баллистическими ракетами» (Наука. 1968 г.),
- А.А. Лебедев и Н.Ф. Герасюта «Баллистика ракет» (Машиностроение. 1970 г.) и др.



Развитие баллистики ракет
сегодня определяется
достигнутым уровнем развития
ракетной техники и
требованиями к точности
попадания БЧ в цель,
оперативности расчета
прицельных данных и
надежности доставки БЧ к цели.

Первый опыт подготовки данных на пуски баллистических ракет вполне естественно основывался на хорошо зарекомендовавших себя в артиллерии табличных методах.


С этой целью на основе работ, выполненных под руководством

К.П. Феоктистова, М.Д. Кислика,

Р.Ф. Анпазова и др., в конце 50-х годов разработаны секторные таблицы стрельбы для первых образцов межконтинентальных ракет.

Однако с появлением ракет нового поколения с более совершенными СУ и прогрессом в разработке ЭЦВМ в конце 60-х годов в практику подготовки данных и решения других задач баллистики ракет прочно вошел «машинный» метод, основанный на численном моделировании движения ракеты как на активном, так и на пассивном участках траектории.

Внедрение метода численного моделирования, с одной стороны, позволило использовать для решения практических задач более полные и, следовательно, более точные модели движения, а с другой стороны, потребовало разработки «быстродействующих» алгоритмов расчета движения ракет.




Совершенствование комплекса командных приборов (ККП) систем управления ракет, оснащение их совершенными БЦВМ и усложнение алгоритмов управления привели к снижению доли рассеивания ракет при расчете требуемого движения.

Для дальнейшего повышения точности попадания потребовалось использовать более точные модели гравитационного поля и атмосферы Земли.

На основе исследований, проведенных в ЦНИИ МО РФ профессором Ю.С. Соловьевым и его учениками, а также в ряде других организаций, разработаны модели гравитационного поля Земли, основанные на использовании системы точечных масс (СТМ).

В этих организациях также были разработаны статистические модели локальной атмосферы с различными периодами осреднения, которые были внедрены в специальное математическое обеспечение (СМО) ракетных комплексов.



Оснащение ракет разделяющимися головными частями (РГЧ) с последовательным разведением элементов привело к появлению принципиально новых задач, связанных с организацией движения РГЧ на участке разведения элементов, оцениванием досягаемости заданной совокупности целей, определением рациональной последовательности обхода заданных точек прицеливания.

Определенный вклад в решение этих задач внесли работы, выполненные в 4 ЦНИИ МО РФ под руководством *В.С. Галактионова.*

Результатом этих работ стало возникновение нового направления в баллистике, получившего название «баллистическая фильтрация».

Появление на вооружении ракет с терминальным наведением, для которых состав данных на пуск и характер их подготовки принципиально изменились, поставило новые баллистические задачи, связанные с обоснованием бортовых алгоритмов наведения и оперативных алгоритмов предстартовой подготовки ракеты к пуску.

Теоретической основой для решения
этих задач послужили работы:


Е.М. Горбатова,

Р. Бэттина,

В.Д. Могилевского,

В.Н. Бородовского,

Л.А. Майбороды и др.




Таким образом, за неполные
шестьдесят лет своего
существования содержание
баллистики ракет существенно
изменилось и продолжает
развиваться в соответствии с
разработкой перспективных
образцов ракетной техники.




Предмет и задачи баллистики ракет

Баллистика ракет как самостоятельная наука и учебная дисциплина имеет свой *предмет исследования и свои задачи*, которые отличают ее от других наук.



Баллистика изучает движение ракет и их БЧ с геометрической, кинематической и динамической сторон движения ракеты как материального тела.



Предмет баллистики ракет
включает в себя части
теоретической механики, теорий
автоматического управления,
аэродинамики, гравитометрии,
ракетных двигателей.

В *аэродинамике* берутся зависимости для расчета аэродинамических сил и МОМЕНТОВ.

В *гравиметрии* интерес будут представлять соотношения для расчета гравитационных сил.

Из *теории ракетных двигателей* будут использоваться зависимости для расчета сил и моментов, создаваемых двигателями.




В аэродинамике берутся зависимости для
расчета аэродинамических сил и
МОМЕНТОВ.

В гравиметрии интерес будут
представлять соотношения для расчета
гравитационных сил.


Из теории ракетных двигателей будут
использоваться зависимости для
расчета сил и моментов, создаваемых
двигателями.

Поскольку значительная часть траектории ракеты представляет собой траекторию неуправляемого полета, то теория полета ракет частично охватывает предметы внешней баллистики, небесной механики и других наук.

Итак, предметом баллистики ракет
следует считать движение ракет и их
БЧ и установление основных
закономерностей и свойств этого
движения при известных
зависимостях действующих на ракету
сил и моментов от характеристик
движения и работы СУ.



Баллистика ракет возникла и развивалась вместе развитием ракетной техники и направлена на решение задач разработки, опытной отработки и боевого применения ракет, их систем управления и вспомогательного оборудования.



Все множество решаемых в
баллистике ракет практических
задач можно разделить на
следующие группы

1. Разработка и обоснование тактико-технических требований к ракетному комплексу и его системам.

Это комплексная задача, решаемая различными науками.

Ведущая роль среди них принадлежит баллистике, так как в основе ее решения лежат баллистические расчеты.

В частности, именно баллистика определяет такие важнейшие показатели боевой эффективности ракетных комплексов, как досягаемость, точность попадания БЧ в цель, район разведения ЭБО, вероятность преодоления ПРО противника и др.

2. Баллистическое проектирование ракет, боевых частей, систем управления и других систем ракетного комплекса.

Под баллистическим проектированием понимают определение основных массовых, геометрических и тяговых характеристик ракеты, а также основных характеристик ее системы управления, при которых обеспечиваются заданные тактико-технические характеристики ракетного комплекса.


3. Оценка спроектированного образца ракеты.

Эта задача решается при принятии разработанного РК на вооружение и заключается в оценивании основных летно-технических характеристик ракеты и определении их соответствия заданным требованиям.

В основном это задача летных испытаний опытных образцов и решается она методами экспериментальной баллистики.


4. Разработка правил эксплуатации и боевого применения ракет.

При решении задач этой группы разрабатываются вопросы прицеливания ракет, алгоритмы наведения ракеты на заданную точку прицеливания, вопросы подготовки данных для настройки системы управления, коррекции траекторий полета и др.



Перечисленные группы
практических задач
сформулированы в самом общем
виде.

Каждая из этих групп задач
включает в себя целый ряд
частных, самостоятельных и более
конкретных задач.



**В качестве примера можно
указать следующие задачи:**

- определение зависимости летных характеристик ракеты, в первую очередь, дальности ее полета, от конструктивных параметров с целью, например, выбора их оптимального сочетания;
- определение траектории полета и основных параметров движения ракеты с известными конструктивными характеристиками и характеристиками системы управления при заданных прицельных данных;

- определение прицельных данных при заданных координатах точек старта и цели;

- анализ возмущающих факторов, действующих на ракету в полете, и расчет траекторий возмущенного полета;

- определение и анализ характеристик рассеивания точек падения БЧ;

- определение и анализ устойчивости движения ракет и их БЧ при действии различных возмущающих факторов;

- выбор номинальной траектории полета, обеспечивающей наилучшее использование энергетических возможностей ракеты и др.

Решение всех практических задач баллистики базируется на теоретическом определении движения ракет и боевых частей.

Поэтому баллистика ракет создает определенную теоретическую базу для разработки ракет и БЧ, их систем управления, специального математического обеспечения летных испытаний и боевого применения ракет.