

ТИМУР МАГОМЕТОВИЧ ЭНЕЕВ (к 95-летию со дня рождения)

БОРОВИН Геннадий Константинович,

доктор физико-математических наук

ГОЛУБЕВ Юрий Филиппович,

доктор физико-математических наук

ЕФИМОВ Георгий Борисович,

кандидат физико-математических наук

КОЗЛОВ Николай Николаевич,

доктор физико-математических наук

ТУЧИН АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ,

доктор физико-математических наук

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

DOI: 10.7868/S0044394820040076

Тимур Магометович Энеев родился 23 сентября 1924 г. в городе Грозный, скончался 8 сентября 2019 г. в Москве, не дожив две недели до своего 95-летнего юбилея.

Жизненный путь Тимура Магометовича, судьба его семьи – образец гармоничного сочетания традиций и талантов народов нашей страны. Его отец, Магомет Алиевич Энеев, балкарец, родился в горах Балкарии, вблизи Эльбруса. Он был блестяще образован: свободно владел несколькими языками, европейскими и восточными, получил духовное образование в Стамбуле. Себя всегда называл народным учителем. Вдохновился идеями равенства, принял активное участие в революционном движении на Кавказе, был среди организаторов Горской республики, объединившей народы Северного Кавказа, имел среди них большой авторитет. Это был человек



Член-корреспондент
АН СССР Тимур Магометович
Энеев. 1984 г.

высокой культуры, гуманитарной и мусульманской, в годы революции стал видным деятелем культурного и государственного строительства народов Северного Кавказа. Трагически погиб в 1928 г. Его жена, Евгения Петровна, поехала в Москву, где в одной из приемных ее случайно встретил А.И. Микоян, хорошо знавший М.А. Энеева по Кавказу. Он помог устроиться ей в Москве. Евгения Петровна вырастила сына и дочь, передала им память об отце¹.

В школе Тимур Энеев увлекается астрономией, идеей полета в космос, участие в освоении космоса становится мечтой всей его жизни. Началась война, он рвется на фронт, но не попадает из-за возраста. В эвакуации,

¹ Бегиева-Кучемезова Р. Свет звезды и свечи. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2015. 192 с. (<https://keldysh.ru/e-biblio/eneev/>)

на военном заводе, его правая рука попала в станок и, после начавшейся гангрены, была ампутирована. «Так мне была сохранена жизнь», – говорил он позже: при его темпераменте он на фронте не уцелел бы.

В 1943 г. Т.М. Энеев поступил на механико-математический факультет МГУ и стал принимать участие в работе семинара А.А. Космодемьянского «Механика тел с переменной массой», на котором изучалась механика ракетного полета. Он создает кружок механики космического полета (вместе с В.А. Егоровым), работающий до сих пор.

Тимур Магомедович в 1948 г. окончил механико-математический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. С 1950 г. работал младшим научным сотрудником в Отделе механики Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР (МИАН), который вошел в созданное в 1953 г. М.В. Келдышем Отделение прикладной математики АН СССР (ныне Институт прикладной математики (ИПМ) им. М.В. Келдыша РАН). Основные научные вехи: в 1953–1967 гг. – младший и старший научный сотрудник ОПМ МИАН, с 1967 г. – заведующий сектором, главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, доктор физико-математических наук (1959), член-корреспондент АН СССР (1968), академик РАН (1992). Основные направления научной деятельности Т.М. Энеева – динамика полета и управление движением ракет и космических аппаратов (КА), моделирование динамики сложных дискретных систем в задачах космологии и биологии.

Вся деятельность Тимура Магомедовича на протяжении свыше 65 лет была связана с ИПМ и его пятым отделом, в котором, параллельно с ОКБ-1 (ныне – РКК «Энергия» им. С.П. Королева) и другими организациями, рассчитывались траектории первых полетов ИСЗ, полетов к Луне, разрабатыва-



Студент механико-математического факультета МГУ Тимур Энеев. На заднем плане здание МГУ и памятник М.В. Ломоносову. Конец 1940-х годов

лась динамика космических полетов. Т.М. Энеев внес выдающийся вклад в создание основ теоретической и прикладной космонавтики.

Т.М. Энеев обладал удивительным даром в критический момент исследования какой-либо проблемы или разработки проекта «выдать» идею или даже способ ее решения. Подтверждением этому может служить краткий список его основных научных достижений:

- постановка и решение задачи оптимизации активного участка ракетной траектории;
- исследование вековых возмущений орбит ИСЗ;
- определение времени существования спутника, испытывающего аэродинамическое торможение;
- постановка и практическое решение задачи определения параметров



Полет Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 г.: старт ракеты-носителя «Восток», космонавт в скафандре перед стартом, траектория полета и спускаемый аппарат корабля «Восток» в музее РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. Коллаж

движения КА по данным траекторных измерений;

- исследование динамики неуправляемого спуска КА сферической формы в атмосфере Земли, имевшее решающее значение при выборе конструкции космического корабля «Восток» для полета первого космонавта Ю.А. Гагарина;

- разработка эффективного способа выведения КА на траекторию перелета к планетам с орбиты низколетящего ИСЗ, применяемого доныне;

- разработка метода транспортирующей траектории для расчетов межпланетных космических полетов с двигателями малой тяги;

- разработка теории автономной навигации;

- исследование проблемы полетов к малым телам Солнечной системы, в том числе с использованием двигателей малой тяги;

- создание нового метода исследования динамики больших сложных систем и применение в задачах астрофизики, космогонии и биологии.

За этими строками таится яркая, порой полная драматизма история работы мысли Тимура Магомедовича, обеспечившая многие достижения отечественной космонавтики. Ниже лишь некоторые подробности.

Задача об оптимальном управлении ориентацией оси ракеты.

В 1940-х годах в МИАН под руководством М.В. Келдыша

начались исследования по созданию методов расчета баллистики полета и определения наилучших режимов управления полетом жидкостными ракетами. Важную роль в развитии отечественной ракетодинамики сыграли проведенные Т.М. Энеевым, Д.Е. Охочимским² и их коллегами исследования оптимальных режимов управления ракетами. Некоторая их часть, посвященная поиску оптимальной траектории выведения будущего первого искусственного спутника Земли³, была опубликована в сентябре 1957 г., накануне запуска первого искусственного спутника Земли. Часть других, не менее важных работ, осталась в отчетах ОПМ

² Дмитрий Евгеньевич Охочимский (1921–2005) – академик РАН, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, ученый в области математики и механики, создатель научной школы в области динамики космического полета, автор фундаментальных трудов в области прикладной небесной механики, робототехники и мехатроники; с 1949 г. работал в МИАН (ИПМ) в отделе М.В. Келдыша. В 1946 г. опубликовал статью «К теории движения ракет», посвященную оптимизации полета ракеты (Прикладная математика и механика, 1946, Т. 10. Вып. 2. С. 251–272).

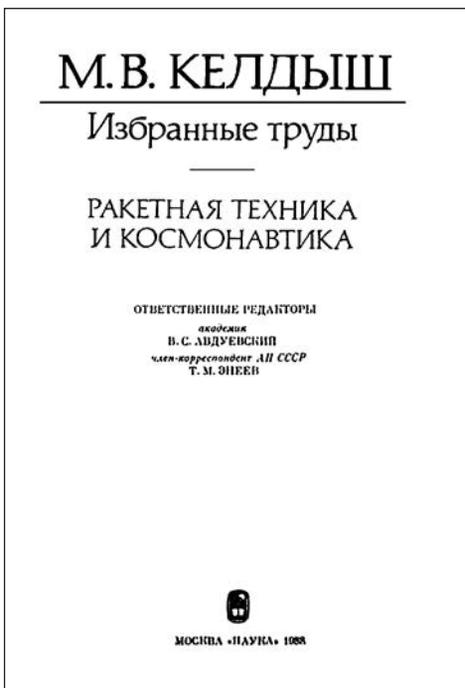
³ Охочимский Д.Е., Энеев Т.М. Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. 1957. Т. 63. Вып. 1а. С. 5–32.

МИАН СССР или была издана в томе избранных трудов М.В. Келдыша⁴.

Известно, что траекторные задачи ракетодинамики относятся к классу вырожденных задач вариационного исчисления. Это связано с тем, что искомые функции управления полетом ракет (углы направления действия тяги ракетного двигателя, режимы расхода топлива и др.) физически не содержат членов, зависящих от траектории, и в выражениях оптимизируемого функционала отсутствуют производные искомых функций. А это приводит к вырождению дифференциальных уравнений Эйлера, описывающих решение классической вариационной задачи. Вместо дифференциального уравнения возникают некоторые конечные зависимости параметров задачи без производных. Отсутствие дифференциального уравнения приводит к отсутствию свободных постоянных в выражениях искомой траектории, и в результате не удается удовлетворить требуемым краевым условиям движения.

В 1951 г. Т.М. Энеевым была исследована общая задача о выборе оптимального программного управления положением оси составной ракеты, решение которой легло впоследствии в основу практически всех расчетов по выбору программного управления при выведении спутника на орбиту ИСЗ. Используя закон управления по тангажу (угловое движение КА относительно горизонтальной поперечной оси инерции), полученный при решении этой задачи, А.К. Платонов и Т.М. Энеев в 1955–1956 гг. провели серию расчетов

⁴Келдыш М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988; см также: Прикладная механика и управление движением: сб. статей / М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с. (<http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky>).



Титул монографии М.В. Келдыша «Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика». М.: Наука, 1988 г.

по выбору оптимального программного управления ракетой по тангажу при выведении искусственного спутника Земли на орбиту. На основании проведенных расчетов было показано, что на безатмосферном участке выведения спутника (на основной части траектории выведения) оптимальная программа управления по тангажу может быть представлена линейной функцией по времени. Это было впоследствии использовано при расчете практически всех возможных программ управления выведением спутника.

Тимур Магомедович варьировал направление тяги ракеты так, чтобы получить на заданной высоте максимальную горизонтальную скорость. Заметим, что стандартная постановка задач ракетодинамики того времени была связана с поиском траекторий выведения ракет



Полет ракеты-носителя «Спутник» с первым ИСЗ. Рисунок

на максимальную высоту с горизонтальной скоростью в конце участка работы ракетного двигателя. Ученый удачно применил принцип дополнительности условных задач вариационного исчисления, сведя задачу к более простому исследованию вариаций скорости при изопериметрическом (интегральном) условии высоты. При этом также искались оптимальные начальный угол тяги, горизонтальная протяженность полета и, возможно, время полета. Задача решалась в плоской постановке в условиях плоско-параллельного (для коротких траекторий разгона) или центрального поля сил тяжести. Основным результатом является линейная или дробно-линейная зависимость от времени тангенса оптимального угла тангажа ракеты в процессе разгона.

В 1956 г. Т.М. Энеев и Д.Е. Охоцимский, опираясь на методы вариационного исчисления для вырожденного случая, исследовали задачу о выборе оптимального режима расхода топлива при выведении ракеты-носителя на орбиту ИСЗ.

Эволюция орбиты ИСЗ в верхних слоях атмосферы и оценки времени его жизни. Перед запуском первого ИСЗ были опасения, что аэродинамическое торможение на его невысокой орбите может привести к тому, что спутник упадет на Землю, даже не совершив и одного оборота. Попытки получить точное значение «времени жизни» спутника с помощью тогдашней БЭСМ оказались трудно реализуемыми ввиду значительного диапазона значений действующих сил и достижимой точности вычислений, ограниченной (при представлении чисел с плавающей запятой) 33-мя двоичными разрядами мантииссы БЭСМ.

Эллиптический характер возможной орбиты первого советского ИСЗ приводил к слабым импульсным тормозным эффектам при его сближении с Землей в районе перигея орбиты. Эти слабые ускорения торможения были малым параметром, значительно увеличивая время интегрирования, что приводило к росту ошибок округления. Кроме этого, при аддитивном добавлении ускорений от аэродинамических сил к действующим гравитационным ускорениям первые либо оказывались за

Параметры орбиты ИСЗ (искусственного спутника Земли)

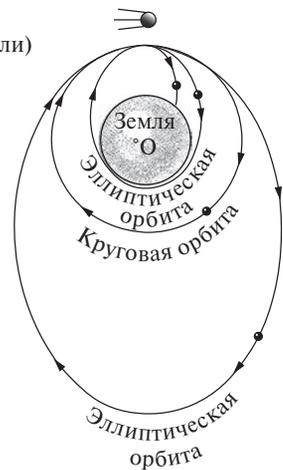
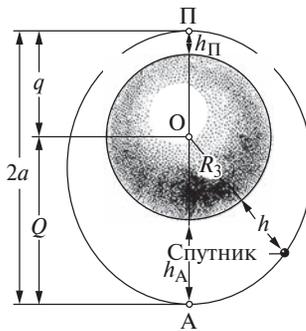
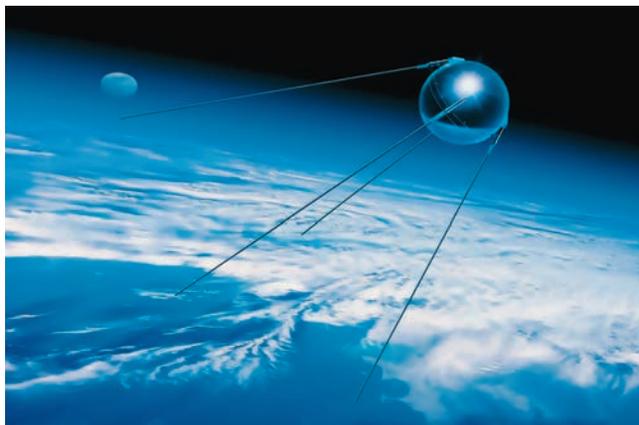


Схема эллиптической орбиты первого советского ИСЗ

разрядной сеткой машины, либо теряли почти все свои значащие разряды. Нужно было придумать нечто новое в области численных расчетов на ЭВМ – найти способ численного интегрирования системы уравнений колебательного движения, в которой изменение ключевых слагаемых правых частей вдоль колебания было менее точности представления действительных чисел.

Эта задача была решена Д.Е. Охотимским, Т.М. Энеевым и Г.П. Таратыновой. При обсуждении проблемы Тимур Магомедович предложил идею, которую Дмитрий Евгеньевич сразу оценил. Т.М. Энеев предложил алгоритм, который и был реализован Г.П. Таратыновой как основной метод численных расчетов не только времени жизни спутников (опубликован в специальном номере журнала «Успехи физических наук», 1957, т. 63, вып. 1а), но и вообще длительных орбитальных движений с малыми возмущениями⁵. Решение проблемы заключалось в том, что при исследовании эволюции амплитуды колебательного движения в ряде случаев можно пренебречь точным знанием закона изменения его фазы и для построения дифференциального уравнения, описывающего эту эволюцию, воспользоваться методом усреднения, выполняя усреднение численно. Эта идея была реализована в виде двухциклового метода. Внешний цикл состоял в численном интегрировании методом невысокого порядка с большим шагом усредненных уравнений движения спутника в оскулирующих элементах. Внутренний цикл состоял в вычис-



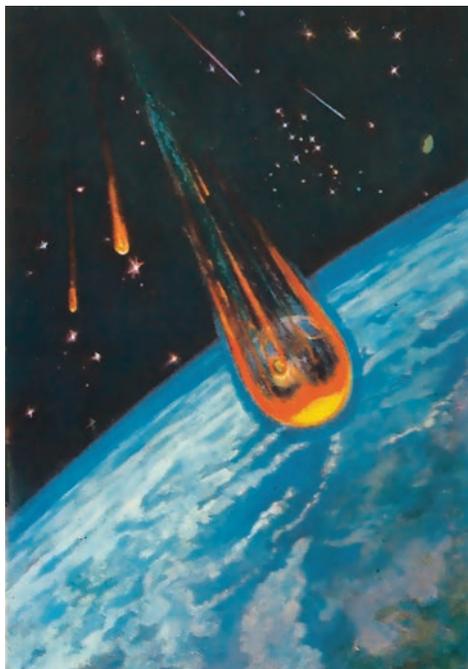
Первый ИСЗ на околоземной орбите. Рисунок

лении правых частей этих уравнений в подшаговых точках и в каждой такой точке сводился к интегрированию исходных уравнений на одном обороте спутника методом высокого порядка.

Проведенные по этой методике расчеты позволили построить в безразмерных параметрах графики времени жизни для различных орбит спутников Земли. Анализ полученного решения показал, что увеличение времени жизни спутника можно достигнуть путем подъема высоты апогея его орбиты, увеличивая скорость в конце разгона и не изменяя программу выведения. Это было использовано при запуске 4 октября 1957 г. первого советского ИСЗ (ЗиВ, 2007, № 5), в подготовке которого активно участвовали Д.Е. Охотимский и Т.М. Энеев.

Исследование возможностей баллистического спуска КА с орбиты ИСЗ для безопасного возвращения космонавта на Землю. В 1953 г., за три года до запуска первого спутника и за 7 лет до полета Ю.А. Гагарина, Т.М. Энеев решил разобраться с вопросом: «Возможно ли спустить с орбиты искусственного спутника Земли космонавта? Не сгорит ли он, и не раздавит ли его перегрузка при торможении

⁵ Таратынова Г.П. Сб. «Искусственные спутники Земли», 1960. Вып. 4.



А.А. Леонов, А.К. Соколов «Возвращение».
Картина 1969 г.

в атмосфере?». Этот вопрос в то время был предметом обсуждения, но какие-либо надежные соображения и серьезные оценки ответа на эти вопросы отсутствовали. Большинство специалистов считали, что безопасный спуск обеспечит лишь крылатый аппарат. Движение с подъемной силой было привлекательно по многим причинам (заведомо можно было найти решение, оно было более знакомо и т.п.). Но Тимур Магометович взялся за более сложную задачу оценки возможности использования баллистического спуска, как технически более простого в реализации. Стояла также проблема выбора формы спускаемого аппарата. В результате исследований было решено просчитать самой простой спускаемый аппарат – сферической формы. Именно в этот момент, по-видимому, и родился «шарик Гагарина» (в будущем – спускаемый аппарат космического корабля

«Восток»; ЗиВ, 2001, № 2; 2011, № 2). Проблема расчета аэродинамических сил для сферического тела на сверхзвуковых скоростях во всем диапазоне высот траектории спуска в то время еще не была разработана. Имелись некоторые данные о движении со скоростями в пределах ЗМ (число Маха – это истинная скорость в потоке вещества, то есть скорость, с которой воздух обтекает тело, деленная на скорость звука в атмосфере) на высотах около 20 км. Здесь же речь шла о значительно больших скоростях движения на высотах, начиная от самых верхних слоев атмосферы. Для надежного определения максимальных перегрузок торможения Тимур Магометович выбрал значения в самых худших предположениях.

Следующей задачей была необходимость построить модель тепловых явлений при входе спускаемого аппарата космического корабля в атмосферу Земли. Здесь следовало учесть три процесса: нагрева спускаемого аппарата вследствие трения об атмосферу, теплопередачи внутрь спускаемого аппарата с учетом теплоизоляционных свойств различных материалов и горения оболочки «шарика» и уноса части тепла элементами ее плавления. Если температуры нагрева можно было с запасом просчитать, исходя из изменения энергии спускаемого аппарата в процессе торможения, то параметры теплопередачи внутрь «шарика» и уноса раскаленного вещества требовали специальных расчетов. В результате Т.М. Энеев, после теоретического исследования, предложил использовать баллистический спуск корабля с орбиты ИСЗ на Землю как средство безопасного возвращения космонавта из орбитального полета. Ученый установил, что максимальная перегрузка при таком спуске не превосходит десятикратной величины, причем перегрузки выше пятикратной длятся не более

одной минуты. Оценивалась также величина нагрева корпуса спускаемого аппарата вследствие теплопередачи от газа к стенке в турбулентном пограничном слое обтекающего «шарик» высокоскоростного потока воздуха. Результаты, полученные Т.М. Энеевым, были настолько смелыми, что М.В. Келдыш в них сомневался, пока их не перепроверили смежники. Эти исследования имели решающее значение при выборе конструкции аппарата для первого полета человека в космос, и он был реализован Ю.А. Гагариним.

Разработка методов определения траектории КА по данным измерений.

С запуском первого ИСЗ возникла задача определения параметров его орбиты по данным траекторных измерений. Теория определения орбит небесных тел по данным наблюдений была уже разработана в астрономии, однако астрономические методы оказались малопригодными для определения орбит искусственных небесных тел. Потребовалась их существенная переработка и развитие новых методов, учитывающих специфику траекторий КА и использующих возможности современных средств наблюдений и вычислительной техники. Работы по созданию методов определения орбит искусственных небесных тел проводились в ИПМ АН СССР под руководством Т.М. Энеева. В результате он решил задачу определения параметров траектории КА и прогнозирования его движения по данным траекторных измерений заданного состава и известной точности, проведенных в заданные моменты времени при известных значениях астрономических постоянных и эфемерид небесных тел. С использованием статистического подхода была разработана вычислительная схема решения этой задачи, построены математические модели движения ИСЗ и КА, совершающего перелет к Луне или к планете, разработаны математические модели процесса радиотехнических



*А.К. Платонов, Т.М. Энеев, Д.Е. Охоцимский.
ИПМ, 1960-е годы*

измерений траектории и ряд других. Разработанные им методы обеспечили надежное и эффективное слежение за полетом первых ИСЗ и заложили основы создания автоматизированных комплексов управления полетами КА разного назначения – автоматических ИСЗ и КА, пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций, межпланетных станций для полетов к Луне и планетам. Один из таких комплексов был создан в 1965 г. по инициативе М.В. Келдыша и С.П. Королёва в Баллистическом центре ИПМ АН СССР, который возглавил ученик Тимура Магомедовича – Эфраим Лазаревич Аким (ЗиВ, 2011, № 1)⁶.

М.В. Келдыш попросил Д.Е. Охоцимского и Т.М. Энеева попробовать ор-

⁶ Аким Э.Л. (1929–2010) – член корреспондент РАН, лауреат Ленинской премии, ученый в области космической баллистики, навигации космических аппаратов и планетологии, автор более 240 научных трудов, с 1953 г. работал в МИАН (ИПМ), с 1994 г. – заместитель директора по научной работе.



Т.М. Энеев и Э.Л. Аким. 1960-е годы

ганизовать обработку оптических наблюдений спутника с целью определения его орбиты на полученной тогда ОПМ ЭВМ «Стрела». Полная драматизма история этой первой в нашей стране машинной обработки траекторных наблюдений описана в статье⁷. Опыт этой обработки (с учетом опыта параллельных работ ОПМ в области баллистических ракет) практически лег в основу методик, используемых во всех современных отечественных баллистических центрах. В настоящее время многое из того опыта звучит как очевидное, но тогда это было не так. В этом достижение Тимура Магомедовича, о котором нельзя не упомянуть.

Вспоминает А.К. Платонов⁸: «Как оказалось, может быть, главная вычис-

⁷ Платонов А.К., Казакова Р.К. Первая машинная обработка траекторных измерений спутника Земли. Вестник РАН. Т. 72. № 9. С. 816–836.

⁸ Платонов Александр Константинович (1931–2017) – доктор физико-математических наук, лауреат Ленинской премии, ученый-механик, с 1957 г. работал в ИПМ, член Ученого Совета Института, заведующий сектором № 3 отдела № 5, профессор базовой кафедры МФТИ в ИПМ. Член бюро Научного совета РАН по робототехнике и автоматизированному производству.

лительная проблема в задачах определения траекторий возникает благодаря большой размерности пространства определяемых параметров. В этом первом опыте обработки оптических наблюдений первого и второго спутников в качестве искомым параметров были выбраны 18 коэффициентов, возникающих при квадратической аппроксимации зависимости от времени 6 оскулирующих элементов орбиты. Задача решалась методом наименьших квадратов. Зависимость измерений, выполненных при наблюдениях спутника, от искомым параметров – весьма нелинейная, поэтому их значения приходилось находить итеративно методом Гаусса–Ньютона, решая на каждой итерации систему так называемых нормальных уравнений, шаг за шагом приближаясь к точке минимума функционала в пространстве определяемых параметров. И конечно (теперь-то это понятно), в пространстве такой размерности сразу же возникла проблема «оврагов»! Все попытки спуститься к искомому решению после двух-трех достаточно хороших уменьшений функционала заканчивались, и мы переходили на медленный, практически незаметный почти пологий спуск, болтаясь у дна «оврага». При таком характере сходимости дожидаться конца процесса было практически невозможно! К чести Тимура Магомедовича он достаточно быстро объяснил причину этого явления – «овраг»! Но что было делать? Отказ от определения квадратичных уходов оскулирующих элементов, то есть – уменьшение размерности пространства определяемых параметров с 18 до 12, не изменил ситуацию. Тогда мы стали менять алгоритм решения и перепробовали массу (около десяти) разных методов логического управления сходимостью, но все было безрезультатно. Найти решение не удавалось. С грустным серд-

цем участники работы разошлись на очередное празднование 7 ноября, но уже 8 ноября 1957 г. Тимур Магометович радостно сообщил, что он, по-видимому, решил проблему «оврагов». Т.М. Энееву пришла в голову блестящая идея «метода параболического спуска». Этот метод, ставший теперь классическим, и обеспечивший возможность машинной обработки измерений в каждом из баллистических центров, поражает своей красотой. Итак, Т.М. Энеев в нужный момент придумал способ борьбы с «оврагами». Позже выяснилось, что ранее – в 1948 г., Л.В. Канторович⁹ также предложил очень похожее описание развития метода Ньютона, но без привязки к способу наименьших квадратов. Так родился метод, обеспечивший надежное решение задач машинной обработки траекторных измерений, теперь широко используемый. Позднее (в 1972 г.) американец А. Брайсон на Конгрессе по теоретической механике рассказал об аналогичном методе, открытом им».

Создание метода определения точек приземления спускаемого КА. После запуска первого ИСЗ начались работы по созданию орбитального КА для полета человека. Был решен большой комплекс задач, связанных с выводением орбитального обитаемого аппарата, безопасным пребыванием его на орбите, динамикой движения

⁹Леонид Витальевич Канторович (1912–1986) – академик АН СССР, ученый-математик и экономист, один из создателей линейного программирования, лауреат Нобелевской премии по экономике 1975 г.



Космонавт Г.М. Гречко, Т.М. Энеев и Р.К. Казакова. 2000-е годы

относительно его центра масс и другими задачами. Т.М. Энеевым с коллегами была разработана методика оценки рассеивания точек приземления спускаемого аппарата (СА) на местности. С ее помощью был проведен анализ точности его приземления в заданном районе. Был выполнен целый ряд других исследований по динамике и управлению полетом пилотируемого космического корабля, например, исследования по выбору оптимальных условий схода с орбиты, обеспечивавших использование простых и надежных солнечных датчиков ориентации и т.д. Исследования по динамике явились важной частью комплекса работ, обеспечивших первый космический полет человека вокруг Земли.

Вклад Т.М. Энеева в теорию и практику полетов к планетам. Важный вклад внес Т.М. Энеев в теорию и практику полетов к планетам Солнечной системы. При проектировании полетов к Луне, Марсу и Венере выявились противоречия между условиями энергетической оптимальности межпланетной орбиты перелета

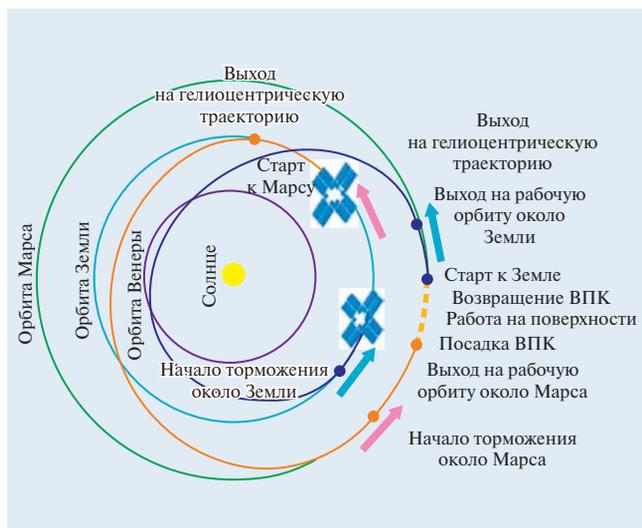


Схема траекторий полетов автоматических межпланетных станций к Венере и Марсу

и условиями старта ракеты-носителя с территории СССР. Энеев предложил использовать для разгона межпланетных станций активные участки, разделенные паузой на незамкнутой промежуточной орбите ИСЗ. При этом пауза должна подбираться таким образом, чтобы повторное включение двигателей и окончательный разгон КА происходили в низких широтах Земли. Использование такого способа выведения, ставшего впоследствии универсальным и получившего название «Звездочка», существенно облегчило решение ряда баллистических проблем межпланетных перелетов, расширив оптимальные навигационные интервалы возможных дат старта и улучшив условия слежения за КА.

Разработка схемы управления межпланетным полетом КА. Под руководством Т.М. Энеева была разработана схема операций максимально точного управления межпланетным полетом КА при минимальном расходе рабочего тела. При проектировании

полетов к Марсу и Венере задача состояла в разработке принципов точного наведения КА на планету-цель (в том числе и для траекторий с ее облетом). Из-за ошибок в кинематических параметрах в конце участка выведения ракеты-носителя промах вблизи планеты-цели мог достигать сотен тысяч километров. В связи с этим возникла необходимость активного управления полетом КА на всей траектории от

Земли до планеты-цели. Схема управления полетом КА содержала две главные операции, выполняемые последовательно в ходе полета несколько раз: определение фактической траектории полета КА путем обработки данных траекторных измерений и определении корректирующего импульса, управляющего нужным образом траекторию.

В практике космических полетов траекторные измерения представлены радиоизмерениями наклонной дальности и радиальной скорости, использующими эффект Доплера. Т.М. Энеев с сотрудниками предложил завязать траекторию, привлекая знание закона движения КА относительно земного пункта наблюдения путем обработки наклонной дальности и (или) радиальной скорости, измеренных на достаточно длительном промежутке времени хотя бы с одного измерительного пункта. Оказалось, что при достаточно точных и длительных измерениях можно с высокой точностью определять траекторию движения КА при любых его удалениях от Земли. Режим измерений при полете к дальним планетам Солнечной системы стал формироваться из двух

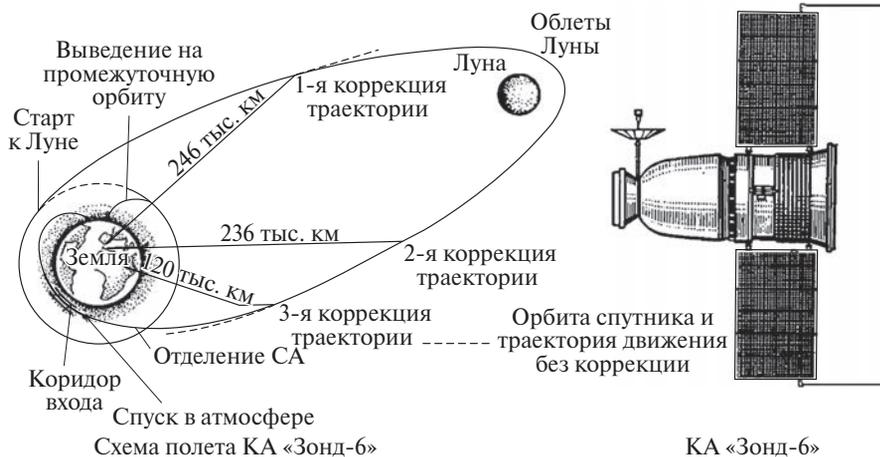


Схема траектории полета к Луне 10–17 ноября 1968 г. беспилотного космического корабля «Зонд-6 – прототипа лунного корабля «Союз 7К-Л1», по программе облета Луны экипажем из двух человек

основных компонент – режима измерений на околоземном участке полета с высоким темпом измерений с нескольких пунктов и режима межпланетного участка с медленным темпом измерений и крупными массивами данных на длительных временных интервалах. Появился и третий компонент – режим измерений на участке вблизи планеты-цели, который также имел свои особенности.

Т.М. Энеев разработал теорию автономной навигации КА на орбите. Для пилотируемого варианта беспилотного космического корабля «Зонд» была разработана система автономной навигации «Альфа» с использованием оптических измерений с помощью секстанта и отечественной БЦВМ «Салют-1». Навигационная система «Альфа» использовалась в 1968–1970 гг. в полетах с облетом Луны КА «Зонд-5» – «Зонд-8» (ЗиВ, 2019, № 5).

Исследования эволюции протопланетных систем и процесса образования планет Солнечной системы. В 1970-х годах Т.М. Энеев совмест-

но с Н.Н. Козловым предложил модель формирования Солнечной системы¹⁰. Была исследована эволюция протопланетных систем и модели процесса аккумуляции применительно к объяснению образования планет. Новая модель образования Солнечной системы, аккумуляции планет из большого числа частиц, первоначально движущихся по околокруговым орбитам, позволила объяснить ряд эффектов при образовании планет и систем их спутников, в том числе закон Тициуса–Боде для планетных расстояний от Солнца и собственное вращение планет, механизм которого безуспешно привлекал усилия многих классиков.

Разработка методов и расчет траекторий межпланетных полетов КА с малой тягой. В начале 1960-х годов

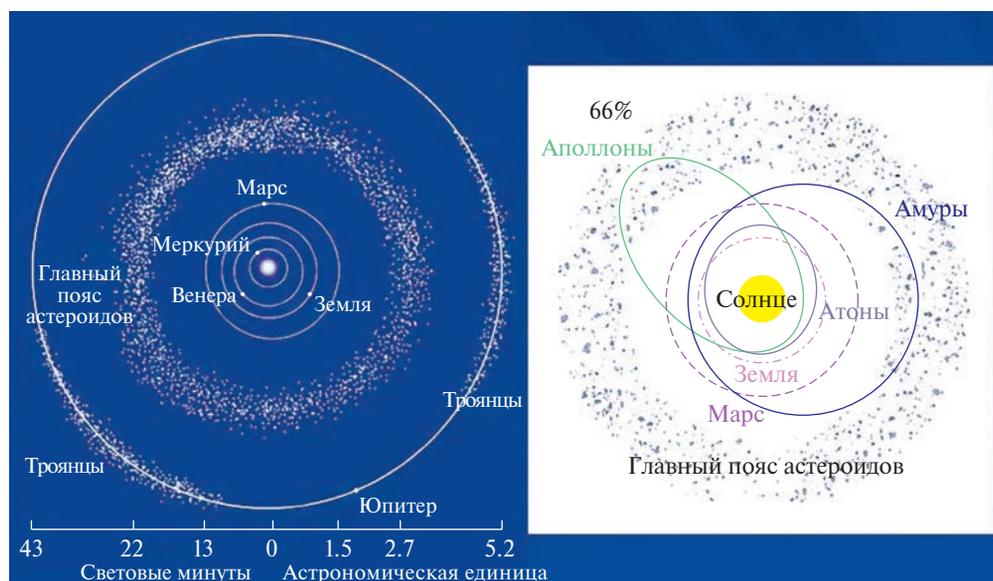
¹⁰ Энеев Т.М., Козлов Н.Н. Модель аккумуляционного процесса формирования планетных систем. I. Численные эксперименты. *Астрономический вестник*. 1981, Т. 15, № 2, С. 80–94. II. Вращение планет и связь с теорией гравитационной неустойчивости. *Астрономический вестник*. 1981, Т. 15, № 3, С. 131–141.

Т.М. Энеев предложил метод «транспортирующей траектории» для первых расчетов межпланетных космических полетов с двигателями малой тяги (МТ), плазменными и ионными. В 1990-е годы Тимур Магомедович поставил задачу о доставке образца грунта с малых тел Солнечной системы для «получения сведений, позволяющих понять происхождение Солнечной системы». Это могло бы дать новую информацию для представлений о веществе Земли. Важно, чтобы образцы относились к «реликтовому» веществу, сохранившему минеральный, химический и изотопный состав со времен формирования Солнечной системы. Образцы реликтового вещества из определенных поясов Солнечной системы могут содержать малые тела – астероиды Главного пояса и спутники планет, например, спутник Марса Фобос (ЗиВ, 2009, № 4). С начала 1980-х годов, когда полеты с двигателями малой тяги стали обретать реальные черты, Т.М. Энеев возглавил исследования траекторий полетов КА с малой тягой

с учетом реально существующих технических средств (двигателей и энергетических установок, солнечных батарей или ядерных космических установок). Были исследованы траектории полетов с двигателями малой тяги, плазменными к астероидам и возможностью забора с них грунта и доставки его к Земле.

Проблема астероидной опасности и миграции малых тел в окрестность Земли. К приложениям результатов моделирования формирования Солнечной системы относится и проблема астероидной безопасности Земли. В 1979 г. Т.М. Энеевым было предсказано существование астероидного пояса за Нептуном и высказано предположение, что Плутон является одним из тел этого пояса. При наблюдении этих тел, на пределе погрешности одно из них удалось обнаружить, но не удалось подтвердить это наблюдение. С тех пор открыто большое число астероидов пояса за Нептуном. Исследования по миграции малых тел в Солнечной системе Т.М. Энеева совместно с С.И. Ипато

Схемы орбит астероидов, сближающихся с Землей



вым выявили возможный механизм «раскачки» орбит тел в этом поясе и миграции их в окрестность орбиты Земли вследствие возмущений от больших планет. Таким образом, было высказано предположение, что значительная часть астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ; ЗиВ, 2011, № 3), является мигрантами из удаленной области пояса Койпера. Тимур Магомедович сформулировал задачу возможного обнаружения популяции тел, представляющих опасность для Земли, и предложил схему их выявления с помощью средств космического базирования. В связи с проблемой «астероидной опасности» Т.М. Энеевым была предложена схема создания «оптического барьера» с помощью космических телескопов, размещенных на орбите Земли для обнаружения АСЗ и оценки их опасности.

Создание нового метода исследования больших сложных систем и его применение. В 1970-е годы Т.М. Энеевым (совместно с Н.Н. Козловым) был разработан новый метод моделирования динамики больших дискретных систем. Новый метод расчета динамики сложных дискретных систем отличается экономией числа операций при вычислениях $\approx N^{3/2}$, а не N^3 , как обычно в этих методах (N – число частиц, десятки и сотни тысяч). Экономность метода достигается отбором групп взаимодействующих частиц из общего их числа – для каждой области взаимодействия, на каждом его шаге. По просьбе астрофизиков метод применили в задаче эволюции галактик при их гравитационном взаимодействии. При моделировании в облаке из тысячи частиц, движущихся по почти круговым орбитам вокруг его ядра, при пролете другой галактики образовывались спиральные ветви. Они не лежат в исходной плоскости движения частиц, что невозможно при других ме-

ханизмах их образования. На материале расчетов был снят фильм (с экрана дисплея), имевший большой успех у ученых и у широкого зрителя: он стал заставкой телепередачи «Очевидное – невероятное».

Кроме применения метода к задаче астрофизики и модели формирования Солнечной системы, одним из приложений был анализ процессов структурообразования больших биологических молекул с помощью математического моделирования – и как отдельного явления, и как процесса зарождения структуры в целом. В модели, при образовании вторичной структуры (петель и стеблей), ее варианты выбираются по локальной оптимальности свободной энергии молекулы. Степень предсказания структуры оказывается на 20% лучше, чем при косвенных биохимических методах¹¹. Продолжая и развивая эти исследования, Энеев с коллегами исследовали свойства генетического кода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научных работ Т.М. Энеева были отмечены многими наградами. Тимур Магомедович – лауреат Ленинской и Демидовской премий, награжден Орденом Ленина и другими орденами. Он был удостоен премии Ф.А. Цандера и золотой медали имени М.В. Келдыша Российской академии наук, его имя присвоено малой планете Солнечной системы № 5711.

Т.М. Энеев не только выдающийся ученый, мыслитель, но и гражданин нашего Отечества. Он активно откликнулся на проблемы становления науки, космонавтики, развития образо-

¹¹ Козлов Н.Н., Кугушев Е.И., Энеев Т.М. Компьютерный анализ процессов структурообразования нуклеиновых кислот. Математическое моделирование. 2013, Т. 25, № 4, с. 126–134.



Академик Т.М. Энеев.
2000-е годы



Дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт
Г.М. Гречко и Т.М. Энеев. 2000-е годы

вания и других вопросов, волнующих современное общество. Так, трудно переоценить его вклад в борьбу против проекта поворота северных рек на юг.

Тимур Магометович с юных лет был страстным энтузиастом космонавтики. Основал на мехмате МГУ кружок, семинар, существующий до сих пор. Увлечение это не редкое, не новое. В России оно имело место еще в конце XIX – начале XX века и прошло через весь XX век, известно под именем «русский космизм» – философское и культурное течение русского общества. Главное в нем – знание, что жизнь природы и человечества тесно связаны с космосом, Вселенной. Круг этого течения был широк: ученые – В.И. Вернадский, К.Э. Циолковский, А.Л. Чижевский, философы – В.С. Соловьёв, Н.А. Бердяев, из людей искусства А. Блок, В. Брюсов, Н. Рерих, А. Скрыбин. Мысли и взгляды их созвучны были поискам в русском обществе рубежа XIX – XX веков, «вере» в науку, в результаты ее огромных успехов в мире и в России и другим духовным и общественным течениям.

Т.М. Энеева и его друзей в ИПМ можно отнести, вслед С.П. Королёву, к кругу «русских космистов» – энтузиастов космоса и его освоения. В молодости – «по Циолковскому»: в надежде (утопии), что контакт с космосом объединит человечество. Позже восприятия мечты у него стали углубляться, его мировоззрение – двигаться в направлении позиций Н.Ф. Фёдорова, к христианству¹². Об этом пути, пройденном Тимуром Магометовичем вместе с супругой Людмилой Фёдоровной, историком, рассказано их дочерью Натальей в книге Р. Бегиева-Кучемезова «Свет звезды и свечи»: «С конца 1960-х годов родители, находясь в светской среде, стали все больше говорить о Боге. Любимым чтением стал Достоевский: “Бесы” – аналогия с нигилистическим диссидентством,

¹²Тимур Магометович не был одинок в эволюции своих взглядов: среди его коллег можно назвать, например, академика АН СССР Б.В. Раушенбаха, профессора В.Г. Дёмина, члена-корреспондента АН СССР В.В. Белецкого, профессора М.Л. Лидова.

и “Братья Карамазовы” – образы старца Зосимы и Алеши Карамазова. Любимой пластинкой папы в это время стала запись “всенощного бдения” с Ф.И. Шаляпиным... Мне представляется ценным, что родители пришли к вере самостоятельно, каждый своим путем, но в согласии друг с другом – выбор сердца, согласно с выводом разума. Сыграли роль и папины занятия космогонией».

В духовную область Тимур Магомедович входил, как и во все, за что брался, основательно. Стал соруководителем семинара «Наука и религия» в Православном Свято-Тихоновском гуманитарном университете, в 1990-е годы помогал этому вузу «встать на ноги». Во время тяжелой болезни он не жаловался, удивляя своим мужеством и терпением.



Т.М. Энеев с дочерью Натальей. 2000-е годы

Научные методы, развитые Т.М. Энеевым, составляют золотой фонд отечественной космодинамики и активно используются при планировании и осуществлении самых смелых российских проектов по исследованию космического пространства.