

**ОСНОВАТЕЛЬ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ДИНАМИКИ
КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЁТА И МЕХАТРОНИКИ**
К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Д.Е. ОХОЦИМСКОГО

© 2021 г. Ю. Ф. Голубев

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

E-mail: golubev@keldysh.ru

Поступила в редакцию 21.03.2021 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 20.04.2021 г.

В феврале 2021 г. научная общественность отметила 100-летие со дня рождения академика РАН Дмитрия Евгеньевича Охочимского (1921–2005) – выдающегося советского и российского механика и математика, создателя научной школы в области динамики космического полёта, автора фундаментальных трудов по теории движения ракет, астродинамике и прикладной небесной механике, робототехнике и мехатронике. В отделе “Механика космического полёта и управление движением” ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, которым он руководил более 50 лет, были выполнены пионерские работы по научному обоснованию и баллистико-навигационному обеспечению полётов первых искусственных спутников Земли и советских космических аппаратов к Луне, Венере и Марсу. Исследования Д.Е. Охочимского, связанные с движением ракет, космических аппаратов, робототехнических систем, создали прочный фундамент для успешного развития отечественной космической науки и мехатроники. Полученные им фундаментальные результаты в теории оптимального управления послужили основой для создания устойчиво работающих прямых методов оптимизации.

Ключевые слова: небесная механика, астродинамика, мехатроника, оптимальное управление.

DOI: 10.31857/S0869587321080065

Становление Д.Е. Охочимского как учёного проходило в 40-е годы XX в. В то время Германия уже достигла значительных успехов в создании крылатой ракеты “Фау-1”, в 1944 г. запущенной в сторону Лондона, и баллистической ракеты “Фау-2”, в 1944 г. впервые в мире совершившей суборбитальный полёт на высоте 188 км и регулярно бомбившей столицу Соединённого Королевства. Попытки оптимизировать технические решения при создании новой техники сталкивались с необходимостью исследования задач оптимального управления, для решения которых не хватало теоретической базы.

Чтобы поставить точку в войне с Японией, 6 и 9 августа 1945 г. американцы сбросили на японские города Хиросиму и Нагасаки две атомные бомбы, показав миру своё военное превосходство. У СССР атомной бомбы ещё не было. Стра-

на располагала определённым заделом в ракетостроении и знаменитыми миномётами “Катюша”. Несмотря на послевоенную разруху, требовалось в кратчайшие сроки создать достойные средства противодействия возможной военной агрессии. Д.Е. Охочимский стал одним из выдающихся советских учёных, обеспечивших создание ракетно-ядерного щита СССР. Его творческий путь был тесно переплетён с судьбой страны и новыми неотложными научными задачами, которые встали перед учёными в послевоенные годы.

Учёба и работа в МИАНе. Дмитрий Евгеньевич родился в Москве в 1921 г. в семье служащих. В 1939 г. поступил на механико-математический факультет Московского государственного университета. В 1941 г., как только началась Великая Отечественная война, факультет временно закрыли, и Охочимского вместе с другими студентами привлекли к строительству оборонительных сооружений. Осенью 1941 г. его призвали в Красную Армию, но в 1942 г. демобилизовали по при-

ГОЛУБЕВ Юрий Филиппович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.



Дмитрий Евгеньевич Охочимский (1921–2005)

чине высокой степени близорукости. Год он работал токарем на одном из московских военных заводов.

Весной 1943 г. возобновились полноценные занятия в МГУ, и Охочимский продолжил обучение. На механико-математическом факультете в те годы работал профессор Аркадий Александрович Космодемьянский, который читал спецкурс и вёл семинар “Динамика точки переменной массы”. В 1941 г. он выполнил цикл работ, имевших непосредственное отношение к первым образцам пороховых ракет, в частности, к снарядам легендарных “Катюш”. Преподавал Космодемьянский с большим энтузиазмом и свою увлечённость передавал студентам. Лейтмотивом занятий были полёты в космос. Тогда, в условиях послевоенной разрухи, космос казался далёкой перспективой, лишь единицы вели теоретические исследования в этом направлении.

Охочимский увлёкся вопросами оптимизации движения ракет. Его научным руководителем стал академик АН СССР Сергей Алексеевич Христианович, который к тому времени успешно завершил работы по увеличению кучности снарядов “Катюши”, за что получил Сталинскую премию. Благодаря его находкам снаряды в полёте дополнительно издавали громкий зловещий вой, что вызывало панику у противника. Дмитрий Ев-

геньевич начал с изучения высоты и дальности полёта ракет. На семинарах И.М. Гельфанда занимался вариационным исчислением. Теория оптимального управления (задача проектирования системы) ещё не была сформулирована, но Охочимский, используя методы вариационного исчисления, сумел решить весьма непростые задачи, чем обратил на себя внимание Мстислава Всеволодовича Келдыша, в то время члена-корреспондента АН СССР.

В 1946 г. по инициативе физиков-ядерщиков М.В. Келдыша, который тогда работал начальником отдела в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ), совмещая эту должность с обязанностями заведующего отделом механики в Математическом институте им. В.А. Стеклова АН СССР (МИАН), подключили к расчётам атомного оружия и созданию средств его доставки. Великолепно выполненные студенческие работы Д.Е. Охочимского вписывались в данную проблематику и оказались как нельзя кстати. Мстислав Всеволодович предложил ему, тогда ещё студенту, поработать в Математическом институте секретарём научного семинара.

После окончания в 1946 г. университета, обобщив результаты своих исследований в статье “К теории движения ракет” [1], Дмитрий Евгеньевич поступил на работу в ЦАГИ и одновременно – в аспирантуру МИАНа, где занимался вопросами проектирования и оптимизации траекторий крылатых ракет. Ему удалось на основе формализма множителей Лагранжа получить регулярный метод вычисления первой вариации функционала для вырожденных и невырожденных задач оптимального управления, на многие годы предвосхитивший появление знаменитого принципа максимума Л.С. Понтрягина. В 1949 г. Охочимский успешно защитил диссертацию на степень кандидата физико-математических наук и был зачислен в отдел механики МИАНа на должность младшего научного сотрудника. Защита диссертации состоялась в НИИ-88, одним из подразделений которого было ОКБ-1, возглавляемое С.П. Королёвым. Тогда и произошла первая личная встреча Охочимского с Сергеем Павловичем.

В том же году в 170 км от Семипалатинска учёные успешно испытали первую в СССР атомную бомбу РДС-1. Строго говоря, это была не совсем бомба, а ядерно-взрывное устройство, ядерный заряд. Но появление атомного оружия было уже не за горами. М.В. Келдыш, лично присутствовавший на испытании, сделал вывод о необходимости создания адекватной математической модели атомного взрыва. Объём работ возрастал. По поручению М.В. Келдыша Д.Е. Охочимский сформировал в отделе механики небольшую группу учёных, состоявшую в основном из знако-

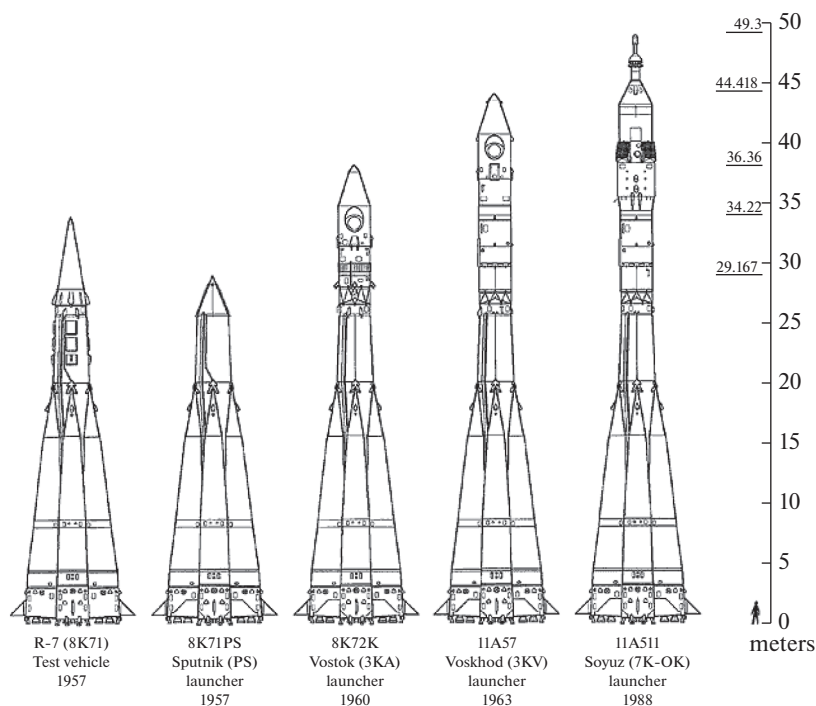


Рис. 1. Советские космические корабли на основе ракеты Р-7

мым ему по семинару А.А. Космодемьянского энтузиастов ракетного движения — С.С. Камынина, Т.М. Энеева, В.А. Егорова, В.А. Сарычева. Группа занялась теоретическими исследованиями динамики и оптимизации полёта составных крылатых ракет [2], вопросами управления, идентификации траекторий полёта и теплозащиты.

Вскоре выяснилось, что крылатые ракеты обладают недостаточным для потребностей глобальной обороны радиусом действия. Нужны баллистические ракеты с радиусом действия около 8000 км. Рассматривались разные их конструкции. Д.Е. Охочимский и С.С. Камынин по просьбе С.П. Королёва начали с анализа баллистических характеристик предложенного М.К. Тихонравовым пакета одинаковых ракет с переливом или без перелива топлива в центральную ракету. Михаил Клавдиевич вместе с Королёвым когда-то входил в Группу изучения реактивного движения — ГИРД, был задействован в разработке “Катюш”, принимал участие в создании первых в СССР жидкостных ракетных двигателей и был энтузиастом полётов в космос. В то время он занимал должность заместителя начальника НИИ-4, сформированного в 1946 г. при Министерстве вооружённых сил СССР с целью проведения научно-исследовательских и экспериментальных работ в области реактивного вооружения. В процессе работы над предложением Тихонравова в группе Охочимского родилась и была обоснована расчётами идея другой схемы — с боковыми ракетами

меньших размеров и меньшего запаса топлива [3]. Королёв и его сотрудники посчитали именно эту схему наиболее перспективной и положили её в основу конструкции знаменитой ракеты Р-7, которая показала свою надёжность и затем широко применялась не только для обороны страны, но и для первых полётов в космос (рис. 1). Напомним, что в 40-х годах XX в. ещё не было ЭВМ и все необходимые научные расчёты выполнялись вручную на арифмометрах “Мерседес”. В 1952 г. Дмитрия Евгеньевича перевели на должность старшего научного сотрудника МИАНа, самую высокую в научной иерархии тех времён.

Работа в ОПМ МИАН СССР. В 1953 г. для интенсификации теоретических исследований по ракетно-ядерной тематике решением Правительства СССР было создано на правах института Отделение прикладной математики (ОПМ) МИАН СССР. Возглавивший его академик М.В. Келдыш пригласил в ОПМ выдающихся советских учёных в области прикладной математики и математической физики — А.Н. Тихонова, А.А. Самарского, И.М. Гельфанда, Я.Б. Зельдовича, С.В. Яблонского и К.И. Бабенко. Здесь же работали А.Н. Мямлин, который участвовал в создании первой советской серийной ЭВМ “Стрела-1”, в 1953 г. поставленной в Отделение благодаря стараниям Мстислава Всеволодовича, М.Р. Шура-Бура — соавтор первого советского учебника по программированию. Группа Охочимского вошла в ОПМ в полном составе. На её базе был создан отдел № 5. Пригла-

шённые Дмитрием Евгеньевичем Р.К. Казакова, В.В. Белецкий, А.К. Платонов, М.Л. Лидов и Э.Л. Аким составили творческую основу коллектива. Численность отдела, который вскоре получил название “Механика космического полёта и управление движением”, увеличивалась по мере растущего фронта работ. Сотрудники Охоцимского занимались выбором оптимальных конструктивных схем составных ракет с межконтинентальной дальностью полёта, расчётом траекторий и определением фактических параметров полёта по результатам обработки траекторных измерений с наземных измерительных пунктов, методами исследования движения и стабилизацией спутника около его центра масс.

Применение самой мощной по тем временам ЭВМ позволило существенно расширить круг решаемых задач. В частности, появилась возможность выполнить полноценные исследования точечного взрыва в атмосфере с учётом противодействия [4]. В 1945 г. Л.Д. Ландау получил предельную форму профиля ударной волны на далёких расстояниях от места взрыва. В 1946 г. Л.И. Седов решил автомобильную задачу о сильном взрыве без учёта противодействия, что было правдоподобно лишь для первых долей секунды после взрыва. Вместе с тем основные драматические события после взрыва развиваются в интервале между указанными асимптотиками. Требовалось оперативно заполнить образовавшийся пробел в знаниях. Келдыш, ставший свидетелем эксперимента в Семипалатинске, мог экспертно оценить качество решения этой задачи. Но тогда не было вычислительных возможностей, в 1953 г. они появились. Мстислав Всеволодович предложил Охоцимскому заняться этой проблемой. Методом специально подобранных сеток Дмитрий Евгеньевич с коллегами получил полную картину точечного взрыва. Экспериментальные данные по сопряжению асимптотик для однородной атмосферы хорошо совпадали с автомобильным решением на ранней стадии развития взрыва. В работе [4] были численно выявлены основные подробности процесса, в частности, объяснено возникновение отрицательных фаз давления и скорости распространения волны вблизи центра взрыва, постепенное стремление давления ударной волны к давлению внешней среды, образование фаз сжатия и разрежения за фронтом волны. Отмечена также низкая скорость стремления профиля волны к его предельной форме. На тот момент это был самый быстрый способ вычисления.

Многоступенчатые жидкостные ракеты-носители имеют опасную тенденцию возрастания амплитуд колебания корпуса ракеты. Это обусловлено тем, что при колебаниях центральный и боковые блоки ракеты оказывают друг на друга взаимное влияние, что расширяет множество ти-

пов их возможных движений. Невозмущённый режим работы ракеты предполагает отсутствие колебаний. Потребовались теоретические исследования, чтобы решить эту проблему. Задачу динамического взаимодействия движущегося тела и идеальной жидкости, не полностью заполняющей его полости, впервые независимо поставили Г.С. Нариманов и Д.Е. Охоцимский. Григорий Сергеевич, работавший начальником отдела НИИ-4, получил для малых колебаний жидкости уравнения возмущённого движения твёрдого тела с полостью, частично заполненной жидкостью, при заданной системе внешних сил. Дмитрий Евгеньевич исследовал безвихревое движение жидкости при удовлетворении условия постоянного давления на свободной поверхности и при сообщении твёрдому телу некоторого движения вблизи исходного положения. Он разработал эффективный метод учёта подвижности жидкости в баках ракеты в условиях полёта при наличии свободной поверхности и рассмотрел конкретный случай гармонических (не малых) колебаний тела с полостью цилиндрической формы [5]. При этом получил простые формулы для расчёта давления жидкости на стенки и дно бака, прочно вошедшие в практику проектирования ракет. Кроме того, изобрёл гаситель колебаний топлива в баках.

20 мая 1954 г. вышло постановление Правительства СССР о разработке двухступенчатой межконтинентальной ракеты Р-7. От создания баллистической ракеты до запуска первого ИСЗ оставалось сделать небольшой шаг. М.В. Келдыш, С.П. Королёв и М.К. Тихонравов проявляли настойчивость, двигаясь в этом направлении, несмотря на непонимание, а иногда и открытое противодействие со стороны военно-промышленного комплекса СССР, сосредоточенного исключительно на вопросах обороны и не видевшего тогда практической пользы от искусственных спутников Земли. 26 мая 1954 г. Королёв направил министру оборонной промышленности Д.Ф. Устинову докладную записку о возможности и целесообразности вывода на орбиту ИСЗ на базе ракеты Р-7. Обоснование для неё подготовили Келдыш и Тихонравов. Ещё в середине февраля 1954 г. Мстислав Всеволодович собрал специальное совещание, посвящённое проблеме запуска искусственного спутника Земли, на которое пригласил С.П. Королёва, П.Л. Капицу и других ведущих учёных страны. На совещании присутствовали молодые специалисты Д.Е. Охоцимский, Т.М. Энеев, В.А. Егоров, В.А. Сарычев из ОПМ, М.К. Тихонравов, Г.Ю. Максимов и И.М. Яцунский из НИИ-4. Обсуждались вопросы, связанные с конструктивными особенностями спутника и проблемой его стабилизации, постановкой научных экспериментов в космосе. Именно тогда у Охоцимского возникла идея кон-

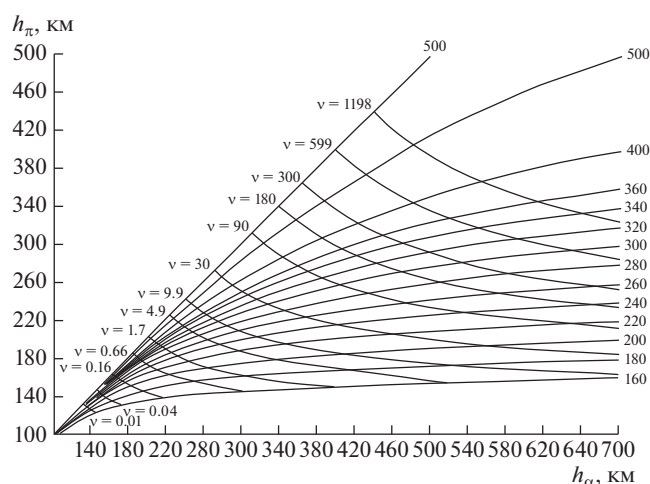


Рис. 2. К определению времени существования спутника

струкции пассивного стабилизатора спутника при его движении вокруг центра масс.

Эскизный проект первого ИСЗ был одобрен Советом министров СССР 20 ноября 1954 г. К тому времени задача определения оптимальных условий выведения ИСЗ на орбиту уже была решена [6]. Д.Е. Охоцимский предложил регулярный метод оптимизации, основанный на обобщении метода множителей Лагранжа. Была разработана методика расчёта оптимального управления составной ракетой в неоднородной атмосфере, учтена неоднородность поля тяготения Земли. Полученные в работе формулы для расчёта управления и сегодня применяются в теории и практике ракетостроения. Метод оптимизации Охоцимского основан на вычислении первой вариации функционала и потому имеет заметные преимущества по сравнению с известным принципом максимума Понтрягина.

Тогда же Дмитрий Евгеньевич с соавторами выполнил расчёт времени существования ИСЗ на орбите с учётом действия на него сопротивления атмосферы Земли [7]. Решение этой задачи, над которой безуспешно трудились многие исследователи, было получено в виде изящной и удобной диаграммы (рис. 2), по её осям откладывается апогей и перигей орбиты спутника, а параметр v пропорционален числу витков орбиты. Зная коэффициент пропорциональности, можно мгновенно оценить время существования спутника. Диаграмма оказалась полезной в проектных расчётах.

Спутник был выведен на орбиту 4 октября 1957 г. ракетой-носителем Р-7. Запуск первого искусственного небесного тела имел огромный резонанс в мире. Все хотели его наблюдать. Сразу выяснилось, что для наблюдений необходимы хотя

бы грубые целеуказания. Но для надёжного определения орбиты измерений радиолокационных станций, расположенных на территории СССР, оказалось недостаточно. Тогда было принято решение собирать наблюдения от астрономов-любителей со всего мира и концентрировать их в НИИ-4. Поскольку ЭВМ “Стрела-7” поступила в НИИ-4 только в 1956 г. и на её освоение требовалось время, обработку наблюдений первого ИСЗ осуществляли с помощью подручных средств и остроумной методики, предложенной П.Е. Эльясбергом. Интерес к наблюдению был настолько велик, а разнородных измерений оказалось так много, что команда Павла Ефимовича тонула в объёме ручных вычислений. Понаблюдав за этим, Келдыш поручил Охоцимскому автоматизировать обработку траекторных измерений ИСЗ с помощью ЭВМ “Стрела-1”, эксплуатировавшейся в ОПМ с 1953 г. Дмитрий Евгеньевич получил хорошую практику обработки траекторных измерений ещё во время работы в отделе механики МИАН, когда приходилось по измерениям радиолокационных средств идентифицировать полёты крылатых ракет. Тогда он пытался построить оптимальный для радиолокационных измерений фильтр, который, правда, оказался похожим на принцип максимума правдоподобия Гаусса. При этом у Охоцимского появился опыт сочетания разнородных измерений с помощью единой методики. Таким образом, используя готовую теоретическую базу, Дмитрий Евгеньевич сформировал для автоматизации обработки траекторных измерений ударную группу в составе Т.М. Энеева, А.К. Платонова и Р.К. Казаковой (позднее к ним присоединился Э.Л. Аким) и быстро развернул широкий фронт работ в нужном направлении [8].

После запуска первого ИСЗ, когда стало ясно, что страна имеет надёжную ракету-носитель, возникла необходимость создания долгосрочной космической программы СССР, главным теоретиком которой официально стал М.В. Келдыш. В задачу отдела Д.Е. Охоцимского входили подготовка баллистико-навигационного обоснования программы и оперативное информационное сопровождение полётов. Дмитрий Евгеньевич, к тому времени получивший учёную степень доктора физико-математических наук, персонально отвечал за выполнение этих работ.

В отделе начали исследовать ближайшие и отдалённые перспективы освоения космоса. Возник вопрос: можно ли применить трёхступенчатую ракету “Восток” с приемлемым полезным грузом для полётов к Венере или Марсу с территории СССР? Д.Е. Охоцимский, Т.М. Энеев и В.Г. Ершов исследовали множество вариантов прямого запуска ракеты и установили, что ни один из них не подходит из-за малости допустимой полезной нагрузки. Тогда у исследователей

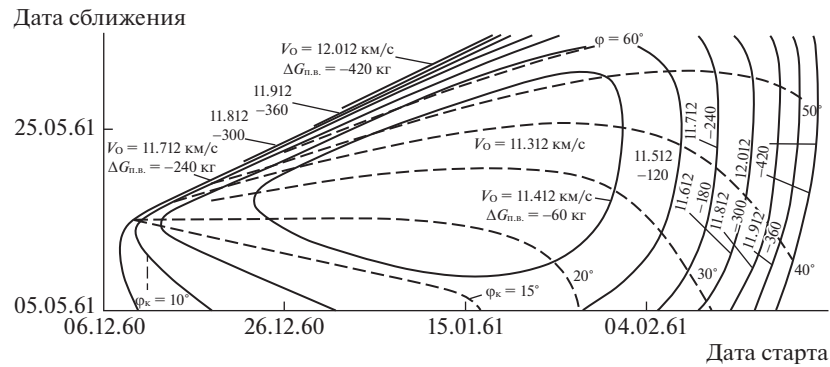


Рис. 3. Диаграмма допустимой полезной нагрузки

возникло революционное предложение осуществлять не прямой запуск ракеты с Земли, а сначала вывести аппарат на промежуточную орбиту ИСЗ и с неё начинать космическое путешествие (знаменитый вариант “Звёздочка”). Расчё-

ты показали, что это предложение сразу даёт выигрыш до 500 кг полезной нагрузки и решает проблему дальних космических полётов. Однако за вариант “Звёздочка” надо было заплатить добавлением четвёртой ступени, выводящей аппарат на предварительную орбиту ИСЗ. На рисунке 3 представлена диаграмма полезной нагрузки для полёта к Марсу.

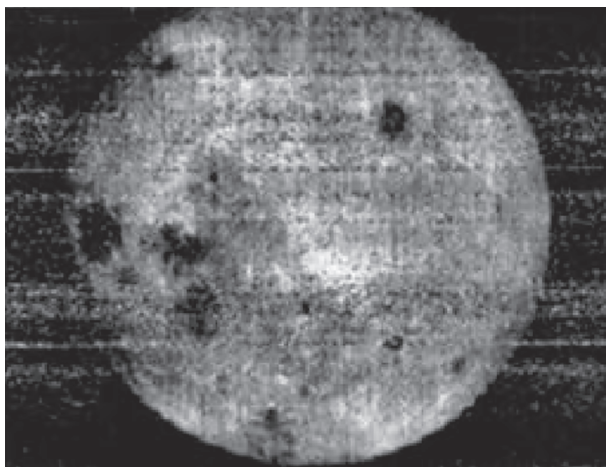
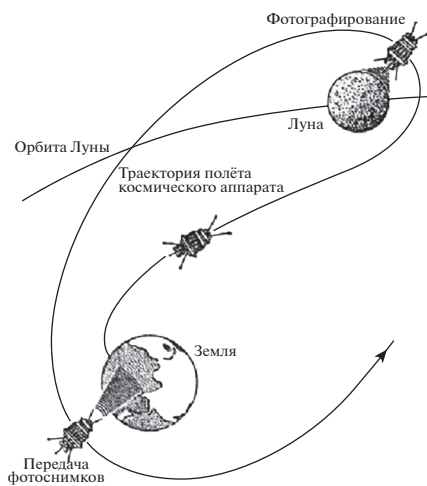
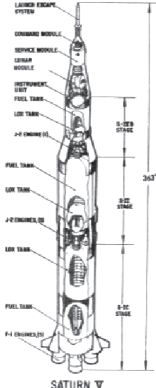
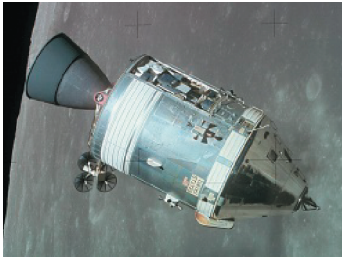


Рис. 4. Траектория полёта космического аппарата и первая фотография обратной стороны Луны

Таким образом, было установлено [9], что ракету “Восток” можно использовать для полётов в дальний космос. Вариант “Звёздочка” позволяет существенно улучшить характеристики полётов к Марсу, Венере и Луне и делает такие экспедиции осуществимыми. Команда Д.Е. Охочимского внесла в обоснование этого решения главный вклад.

По горячим следам возник проект фотографирования обратной стороны Луны. Дело в том, что время одного оборота Луны вокруг Земли в точности равно времени одного её оборота вокруг собственной оси. Поэтому Луна всегда обращена к Земле одной и той же стороной. Узнать, как выглядит её обратная сторона, мечтали учёные всего мира. Теперь появилась реальная возможность осуществить эту мечту. Казалось бы, всё просто. Нужно запустить ракету так, чтобы она облетела вокруг Луны, сфотографировала её обратную сторону, а потом подлетела к Земле и передала по линии связи фотографию. Но на этом пути появились сложности. Принимающая аппаратура находится на территории СССР, а Луна и Земля движутся по своим орбитам, к тому же Земля ещё вращается вокруг собственной оси. Сам процесс передачи фотографии занимает некоторое время. Надо было найти такую траекторию полёта, чтобы в ходе передачи фотографий космический аппарат достаточно долго находился над территорией СССР. Задача оказалась не из простых, но Д.Е. Охочимский, М.Л. Лидов, А.К. Платонов и З.П. Власова нашли решение [10]. Просчитанная ими траектория была удивительной (рис. 4). Космический аппарат должен был поднырнуть под

Таблица 1. Основные этапы реализации лунных программ США и Советского Союза

Лунная программа США “Аполлон” 1961–1975 гг.	Лунная программа СССР 1961–1974 гг.
<p>Состав корабля: командный (North American Rockwell) и лунный (Grumman) модули; носитель – Сатурн-5 (47 т полезной нагрузки), НАСА. В 1966–1968 гг. было выполнено 5 беспилотных полётов. 16 июля 1969 г. стартовал “Аполлон-11” с тремя космонавтами на борту. 20 июля в 20 ч 17 мин 42 с по Гринвичу лунный модуль прилунился в Море Спокойствия. Командир экипажа Нил Армстронг спустился на поверхность Луны 21 июля 1969 г. в 02 ч 56 мин 20 с</p> <div style="display: flex; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">Лунный модуль</p>	<p>Пилотируемый облёт Луны (комплекс УР500К/“Протон” – Л1/“Зонд”); создание 15 кораблей 7К-Л1 (стартовало 14). В 1967 г. предусматривалось два пилотируемых полёта. Осуществлены “Космос-146”, “Космос-154”, “Зонд-4” – “Зонд-8”. На борту “Зонда-5” было две черепахи. Высадка на Луну (комплекс Н1–Л3) планировалась в третьем квартале 1968 г. Состав: лунный орбитальный корабль “Союз-7К-ЛОК”, лунный посадочный корабль ЛК и сверхтяжёлая ракета-носитель Н1. Экипаж: два космонавта. Всего произведено четыре пуска ракеты Н-1, завершившиеся аварией (последний – 23 ноября 1972 г.). В мае 1974 г. программа была закрыта</p>

плоскость эклиптики, в которой Земля вращается вокруг Солнца, а далее после подлёта к Луне силы гравитации Луны должны были “выдернуть” его на другую сторону плоскости эклиптики. По сути, это был первый сознательно выполненный гравитационный манёвр. Полёт автоматической станции “Луна-3” триумфально прошёл 7 октября 1959 г., и фотографию обратной стороны Луны удалось успешно доставить по назначению (см. рис. 4).

Следующей насущной и казавшейся неразрешимой проблемой был запуск первого космонавта на околоземную орбиту с безопасным возвращением на Землю. Наибольшие сомнения вызывал участок спуска с орбиты, в процессе которого могли возникать большие перегрузки, при этом следовало иметь в виду, что за бортом космического аппарата температура достигала 5 тыс. °С. Если траектория короткая, то космонавт погибнет от перегрузки, а если длинная, то тепловая волна успеет добраться до космонавта, и он сгорит. Под руководством Охотимского сотрудники тщательно выполнили подробные расчёты, в результате которых удалось найти семейство траекторий, обеспечивавших безопасный спуск в атмосфере, а также доказать возможность использования теплозащиты, применяемой для крылатых ракет [8]. Дорога для человека в космос была открыта. Знаменитый полёт Ю.А. Гагарина, состоявшийся 12 апреля 1961 г., закончился благополучно.

После этого события руководство США решило сосредоточиться на проблеме высадки на Луну экипажа космонавтов. В 1961 г. президент США Джон Кеннеди объявил о начале лунной программы, направленной на достижение этой цели. Предстояло создать сверхтяжёлую ракету “Сатурн”, командный и лунный модули корабля, сформировать команду из трёх человек, на которую возлагалась часть задач ручного управления. В 1961–1975 гг. американцы работали исключительно над этим космическим проектом. В таблице 1 для сравнения представлены основные этапы реализации американской и советской лунных программ.

Для нас основная трудность лунной программы состояла в том, что Советский Союз на тот момент не располагал сверхтяжёлой ракетой-носителем для вывода корабля на орбиту. К её созданию подключились ОКБ-52, которое возглавлял В.Н. Челомей, где разрабатывалась будущая ракета “Протон”, и ОКБ-1, где под руководством С.П. Королёва готовили к старту ракету Н-1 с тридцатью торцевыми двигателями.

Пока шла эта работа, страна реализовывала другие космические проекты. Так, в 1962 г. с помощью ракеты-носителя “Молния” семейства Р-7 в полёт отправилась межпланетная станция “Марс-1”. При её проектировании широко использовались исследовательские материалы, обобщённые в работе [9] (рис. 5). Сотрудники

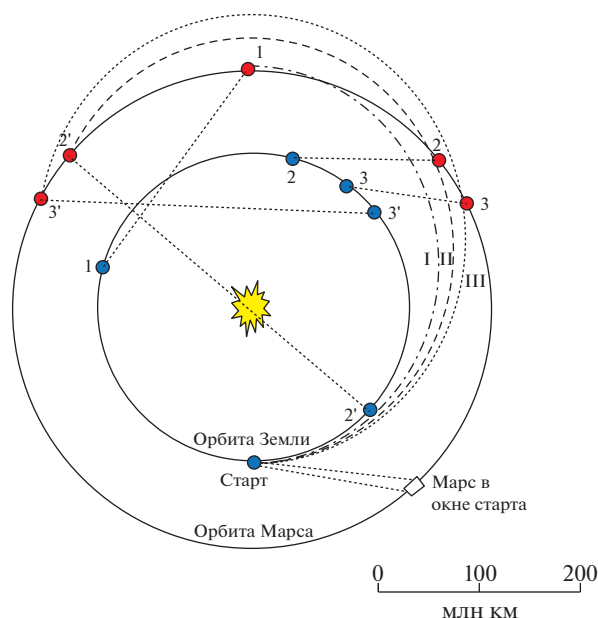


Рис. 5. Схема полёта межпланетной станции “Марс-1”

Охотимского занимались баллистико-навигационным сопровождением полёта.

31 января 1966 г. состоялся запуск межпланетной станции “Луна-9”, которая спустя несколько дней осуществила первую автоматическую посадку на Луну и передала на Землю три круговые панорамы её поверхности (рис. 6). В работе над проектом возникло много новых задач, что потребовало тщательного численного анализа. Отдел Охотимского в очередной раз оказался на высоте. Наконец, 3 апреля 1966 г. автоматическая станция “Луна-10” впервые в мире вышла на окололунную орбиту. До этого ни американцам, ни нам не удавалось создать спутник Луны. Аппараты падали по причине неоднородности и слабой изученности поля тяготения Луны. Вывод станции на заданную орбиту стал важнейшим элементом лунной экспедиции — только так можно было обеспечить возврат космонавтов на Землю. Учёные США придумали весьма приближённую аппроксимацию поля тяготения так называемыми масконами (концентрациями массы). Но она была локальной и ненадёжной. Когда в отделе Охотимского в результате анализа большого числа полётов разработали точную модель поля тяготения Луны, то возник вопрос целесообразности её опубликования в условиях лунной гонки. Но Келдыш настоял на скорейшем обнародовании найденного решения [11], посчитав, что в сложившихся обстоятельствах научный приоритет может быть важнее. Публикация [11] оказала ощутимую методическую помощь в реализации американского проекта “Аполлон”. Успешный запуск первого искусственного спутника Луны

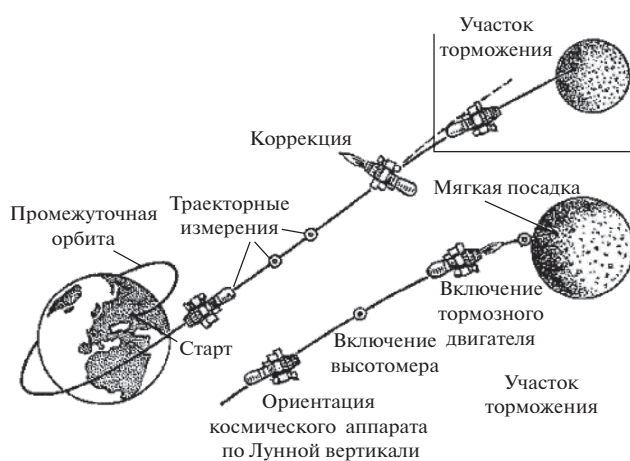


Рис. 6. Схема автоматической посадки на Луну

ознаменовал новый этап в изучении Солнечной системы.

В 1966 г., когда работы над лунным спутником были в самом разгаре, состоялось важное событие в жизни института. Постановлением Правительства ОПМ получил статус самостоятельного научного учреждения и был переименован в Институт прикладной математики (ИПМ) АН СССР.

Аппарат “Зонд-5”, запущенный в 1968 г., стал вторым космическим кораблём, совершившим полёт вокруг Луны, и первым, благополучно вернувшимся на Землю (рис. 7). Во время полёта отработывался вход аппарата в атмосферу при посадке со стороны Южного полюса. Мало кто знает, что на “Зонде-5” были пассажиры: две черепахи, которые успешно выдержали испытания.

Следующий грандиозный шаг в освоении околосолнечного пространства — полёты к Венере (рис. 8) [9] космических аппаратов “Венера-4” — “Венера-16”, которые принесли много ценной научной информации о строении этой загадочной планеты.

Одновременно в отделе Охотимского шли первые работы по системам стабилизации ИСЗ относительно центра масс. Поддерживать требуемую ориентацию спутника в пространстве необходимо для успешного выполнения программных задач. При этом желательно сделать систему стабилизации пассивной, не расходующей на свою работу драгоценные ресурсы ИСЗ. Первым такую гравитационную систему стабилизации предложил Охотимский [12]. Она представляла собой две штанги, присоединённые к корпусу ИСЗ шарниром с трением (рис. 9). Под действием трения колебания спутника приходили в спокойное состояние около положения равновесия, которое можно было заранее рассчитать и установить там необходимые приборы. Существуют и другие ва-

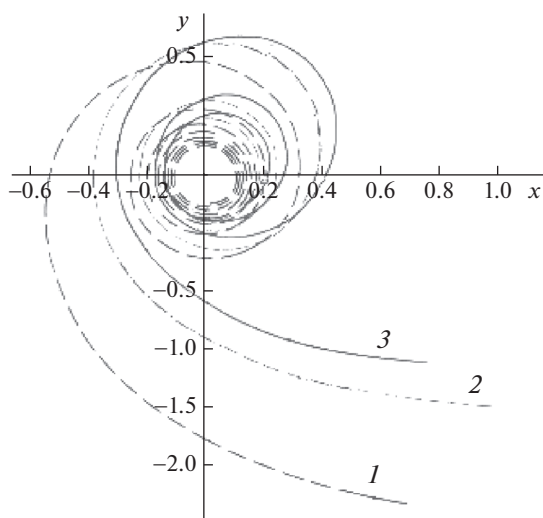


Рис. 10. Разгон космического аппарата с малой тягой
 1 – решение, соответствующее постоянному касательному ускорению; 2 – оптимальный разгон от круговой орбиты; 3 – оптимальный разгон от притягивающего центра

струментальных и исполнительных погрешностей. Задача оказалась нелинейной. В ходе полёта плотность атмосферы могла раза в 1.5–2 отклоняться от номинальной. Стандартные методы аналогового управления в линейной окрестности некоторой опорной траектории не годились, так как они удовлетворительно работали лишь в узком диапазоне начальных условий, что неоправданно завышало требования по точности на этапе подлёта к Земле. Учитывая возможности БЦВМ, следовало разработать цифровой алгоритм управления, успешно работающий в широком диапазоне разброса начальных условий, получаемого при подлёте к Земле. Для выполнения сложной и нестандартной задачи Охоцимский создал группу, усилиями которой её удалось решить [14]. Впервые в мире был разработан метод, впоследствии получивший название прогноза-коррекции, который предусматривал автономное решение навигационной задачи, адаптацию к возмущениям атмосферы, учёт запаздывания информации и ограничения, возникающие из-за особенностей БЦВМ. Обеспечиваемая точность посадки составляла 1.5–2 км [15].

Преподавательская деятельность в МГУ. В 1959 г. Н.Г. Четаев пригласил Д.Е. Охоцимского занять должность профессора на кафедре теоретической механики механико-математического факультета МГУ. Дмитрий Евгеньевич согласился и создал замечательный спецкурс “Динамика космических полётов”, который посещали не только студенты и аспиранты, но также преподаватели и сотрудники других организаций, особенно связан-

ных с созданием ракет. Этот спецкурс по сей день читают на механико-математическом факультете МГУ ученики Охоцимского.

В 1960 г. Дмитрия Евгеньевича избрали членом-корреспондентом АН СССР, в 1961 г. он получил звание профессора, в 1962 г. после кончины Н.Г. Четаева стал заведующим кафедрой теоретической механики механико-математического факультета МГУ. С этого момента направленность кафедры изменилась, а её работа стала более динамичной. К традиционным изысканиям по аналитической динамике добавились актуальные исследования по динамике космических полётов. К преподавательской деятельности были привлечены молодые сотрудники ОПМ МИАН В.В. Белецкий, В.А. Егоров, М.Л. Лидов, Т.М. Энеев и представители других космических организаций В.Г. Дёмин и П.Е. Эльясберг. Студенты, порой до 10 человек, проходили в ОПМ преддипломную практику. Некоторые из них оставались там работать.

Исследования в области создания интеллектуальных роботов. Начиная с 1970-х годов Д.Е. Охоцимский вместе с сотрудниками Института прикладной математики АН СССР, Института механики МГУ и студентами кафедры теоретической механики механико-математического факультета МГУ развернул широкий фронт научных исследований по созданию интеллектуальных роботов. Эта работа шла настолько интенсивно, что по предложению Дмитрия Евгеньевича в 2000 г. кафедру теоретической механики переименовали в кафедру теоретической механики и мехатроники. М.В. Келдыш поддержал новое направление научных работ ИПМ. Первые исследования были ориентированы на создание шестиногих шагающих машин, способных перемещаться в условиях бездорожья, в труднодоступной местности, перешагивать через препятствия, не нанося ущерба окружающей среде. Такие шагоходы перспективны и как транспортные средства при освоении планет. Студенты изучали кинематику походок млекопитающих и насекомых, в частности больших южноамериканских тараканов, занимались постановкой экспериментов. В отделе Охоцимского был создан сектор во главе с А.К. Платоновым, куда входили Г.К. Боровин, И.И. Карпов, Е.И. Кугушев, В.Е. Павловский и В.С. Ярошевский. Под руководством Дмитрия Евгеньевича сотрудники этого сектора выполнили комплексное математическое моделирование статически устойчивых походок шестиногих машин в условиях пересечённой местности (рис. 11, а, б, в, г). Исследования проводились с помощью графического дисплея ЭВМ SDS-910, созданной в 1963 г. американской кампанией Scientific Data Systems на силиконовых транзисторах. Машину купили на компьютерной выставке, при этом необходимое программное обеспечение владельца не пе-

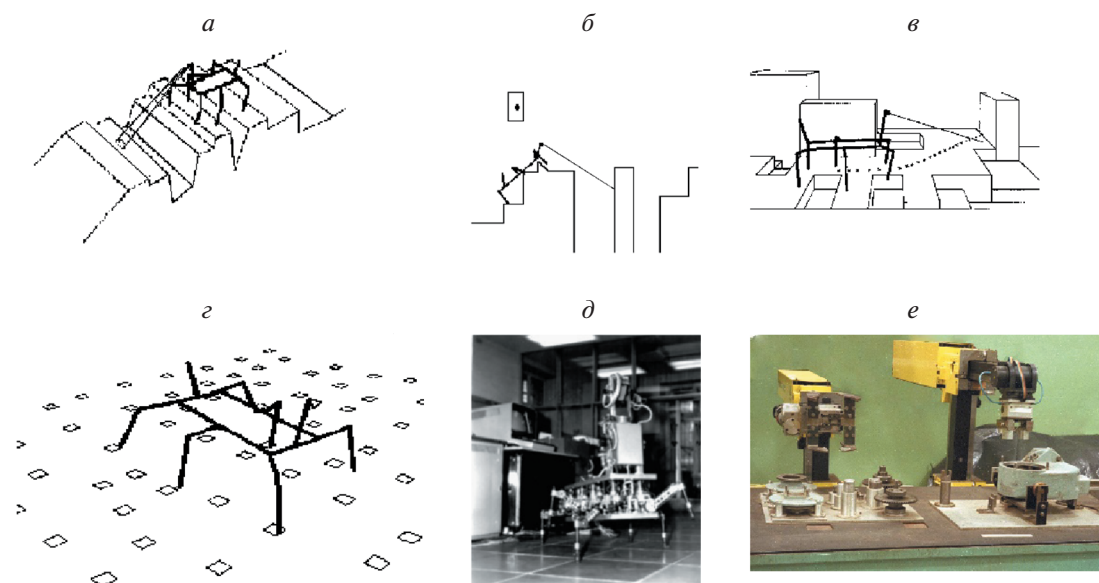


Рис. 11. Исследования по интеллектуальной робототехнике

редали по политическим мотивам. К разработке программного продукта подключились отечественные специалисты. Необходимое ПО появилось в конце 1960-х годов благодаря сотрудникам ИПМ при участии Ю.М. Баяковского, Ю.М. Лазутина и В.С. Штаркмана. Речь шла о первых в СССР работах по компьютерной графике. Специалисты создали набор подпрограмм, позволяющих снимать кинофильмы, и установили камеру для кадровой фиксации изображений, выводимых на экран дисплея. С помощью этой системы в ИПМ в интерактивном режиме выполнялись пионерские работы по организации движения шагающего робота с дальномером на пересечённой местности, а также моделирование гравитационного взаимодействия галактик [16]. По сути, уже тогда моделировались системы с элементами искусственного интеллекта.

В 1977 г. упомянутыми сотрудниками отдела Охоцимского и Ленинградского механического завода Г.В. Губановым, В.А. Веселовым и В.Г. Кузнецовым был создан действующий макет шестиногого шагающего робота (рис. 11, д), который отличался способностью к сложной интеллектуальной деятельности. Робот был снабжён миникомпьютером и лазерным дальномером, мог ориентироваться в лабораторной среде, преодолевать препятствия, сравнимые по высоте с нижней платформой корпуса [17]. Это были уникальные для того времени разработки, которые шли параллельно с исследованиями в Университете штата Огайо (США) под руководством профессора Роберта МакГи. Охоцимский и МакГи встретились однажды на международной конференции и договорились о дружеском робототехническом со-

ревновании. Под влиянием Д.Е. Охоцимского к состязанию подключилась группа сотрудников профессора Е.А. Девянина из Института механики МГУ. Первые российские и первый американский шестиногие роботы были созданы практически одновременно – соревнование закончилось вничью. Теоретические обобщения указанного цикла исследований нашли отражение в спецкурсе “Управление движением автоматического шагающего аппарата”, прочитанном профессором Ю.Ф. Голубевым для студентов кафедры теоретической механики механико-математического факультета МГУ [18]. Эти разработки положили начало исследованиям, которые развиваются по сей день.

В начале 1980-х годов Д.Е. Охоцимский приступил к созданию промышленных роботов третьего поколения с элементами искусственного интеллекта, для чего сформировал межотдельскую группу в составе А.К. Платонова, Ю.П. Смольянова, С.И. Гримайло, С.С. Камынина и Е.И. Кугушева. Впоследствии по мере развития работ к основному составу подключились В.А. Карташев, И.Р. Белусов, С.М. Соколов, В.В. Сазонов и другие сотрудники. Первая задача состояла в том, чтобы научиться осуществлять автоматическую (без вмешательства человека) сборку изделий машиностроения двумя взаимодействующими друг с другом промышленными манипуляторами. В институт для опытов передали манипуляторы, и работа началась [19]. Были созданы и опробованы в действии лабораторные комплексы для сборки масляного шестерёночного насоса, промышленного зубчатого редуктора, многолопастного вентилятора для пылесоса. На рисунке 11, е показан

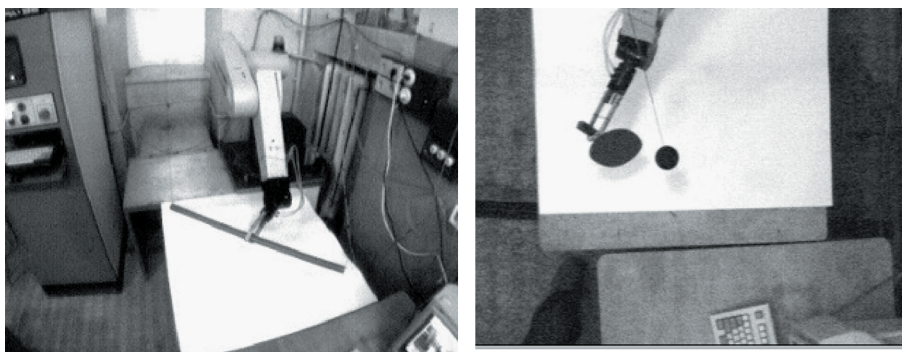


Рис. 12. Взаимодействие манипулятора с движущимися объектами

фрагмент автоматической сборки зубчатого редуктора. Состоялись межведомственные испытания. Однако из-за начавшейся перестройки и последующего развала СССР до внедрения дело так и не дошло [20].

В конце 1990-х годов Д.Е. Охоцимский, И.Р. Белоусов, А.А. Богуславский, С.Н. Емельянов, А.К. Платонов, В.В. Сазонов и С.М. Соколов выполнили выдающийся цикл работ по взаимодействию робота с движущимися объектами. Был собран стенд, состоящий из горизонтального стержня, подвешенного на двух нитях, манипулятора, видеокамеры, дающей обзор сцены сверху, и, конечно, компьютера. Трудность состояла в том, что манипулятору предстояло взять движущийся стержень, следовательно, система управления должна была работать в реальном времени (рис. 12, а) [21]. Этот барьер был преодолен.

Тем же коллективом удалось решить до сих пор не превзойденную по красоте задачу взаимодействия робота-манипулятора со сферическими маятниками. На нитке к потолку подвешивался шарик. Робот должен был ударить ракеткой по движущемуся шару. После найденного решения задачу усложнили: независимо подвешенные два шарика приводили в движение произвольным образом; робот должен был ударить ракеткой по одному из них так, чтобы один шар попадал в другой. Затем появилась новая цель: попасть вторым шариком в стакан, стоящий на подставке [22]. Демонстрация опытов неизменно вызывала восхищение аудитории (рис. 12, б). Не всякий человек такое сумеет сделать!

Дальнейшее развитие исследований в этой области состояло в том, чтобы научиться управлять манипулятором удаленно, через Интернет. Для этого требовалась полная информация о фазовом состоянии системы. Передать по Интернету столь большой объем информации без значительных временных задержек тогда было невозможно. Выход был найден благодаря созданию удаленного виртуального дублира объекта управления, который и порождал все необходимые данные, а по

Интернету передавалась только самая необходимая информация о текущем состоянии системы и управляющих сигналах. В проведенных экспериментах виртуальный дублир располагался в разных местах, а именно в удаленном районе Москвы, затем в Нанте, Тулузе (Франция) и Сеуле (Южная Корея), на расстоянии более 10 тыс. км от ИПМ. Поставленная задача была аналогична задаче управления космическим манипулятором.

Начиная с 1998 г., много творческих и организационных усилий Д.Е. Охоцимский потратил на организацию и проведение на базе МГУ имени М.В. Ломоносова первых в России молодежных студенческих фестивалей мобильных роботов.

Труды Д.Е. Охоцимского получили высокую оценку в нашей стране и за рубежом. В 1951 г. Дмитрий Евгеньевич был отмечен академической премией имени С.А. Чаплыгина, присуждавшейся за лучшую оригинальную работу по теоретическим исследованиям в области механики, в 1961 г. удостоен звания Героя Социалистического Труда, в 1970 г. получил Государственную премию СССР. В 1960 г. его избрали членом-корреспондентом АН СССР, в 1991 г. — действительным членом РАН. В 1995 г. он стал заслуженным профессором МГУ, в 2000 г. — иностранным членом Сербской академии наук и искусств. В 2001 г. его наградили Золотой медалью имени М.В. Келдыша РАН, а Международный астрономический союз назвал именем “Охоцимский” малую планету № 8061. В 2003 г. Дмитрий Евгеньевич был удостоен Благодарности Президента России.

Д.Е. Охоцимский оставил заметный след в науке как основатель научной школы в области динамики космического полета. Коллектив, которым он руководил, по широте тематики исследований и квалификации сотрудников (в 1990-х годах в его отделе работали два академика РАН, член-корреспондент РАН и почти два десятка

докторов и кандидатов наук), научной отдаче превосходил иные институты. Дмитрий Евгеньевич всегда будет служить примером настоящего учёного и блестящего организатора научных исследований, беззаветно преданного науке, использующего научно-технический прогресс на благо человечества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Охоцимский Д.Е.* К теории движения ракет // Прикладная математика и механика. 1946. № 2. С. 251–272.
2. *Келдыш М.В., Егоров В.А., Камынин С.С. и др.* Теоретические исследования динамики полёта составных крылатых ракет дальнего действия // М.В. Келдыш. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. С. 147–196.
3. *Келдыш М.В., Камынин С.С., Охоцимский Д.Е.* Баллистические возможности составных ракет // М.В. Келдыш. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. С. 39–140.
4. *Охоцимский Д.Е., Кондрашева И.Л., Власова З.П., Казакова Р.К.* Расчёт точечного взрыва с учётом противодействия. Труды Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 3–66.
5. *Охоцимский Д.Е.* К теории движения тела с полостями, частично заполненными жидкостью // Прикладная математика и механика. 1956. № 1. С. 3–20.
6. *Охоцимский Д.Е., Энеев Т.М.* Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. 1957. № 1а. С. 5–32.
7. *Охоцимский Д.Е., Энеев Т.М., Таратынова Г.П.* Определение времени существования искусственного спутника Земли и исследование вековых возмущений его орбиты // Успехи физических наук. 1957. № 1а. С. 33–50.
8. Прикладная небесная механика и управление движением. Сборник статей, посвящённый 90-летию со дня рождения Д.Е. Охоцимского / Сост. Т.М. Энеев, М.Ю. Овчинников, А.Р. Голиков. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2010.
9. *Охоцимский Д.Е., Энеев Т.М., Ершов В.Г.* Теоретические исследования по динамике полёта к Марсу и Венере // М.В. Келдыш. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. С. 243–261.
10. *Власова З.П., Лидов М.Л., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К.* Исследование траекторий облёта Луны и анализ условий фотографирования и передачи информации // М.В. Келдыш. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика. М.: Наука, 1988. С. 261–309.
11. *Аким Э.Л.* Определение поля тяготения Луны по движению искусственного спутника Луны “Луна-10” // Доклады АН СССР. 1966. Вып. 4. С. 799–802.
12. *Охоцимский Д.Е., Сарычев В.А.* Система гравитационной стабилизации // Искусственные спутники Земли. 1963. Вып. 16. С. 5–9.
13. *Ефимов Г.Б., Охоцимский Д.Е.* Об оптимальном разгоне в центральном поле // Космические исследования. 1965. № 6. С. 811–835.
14. Наш Д.Е. К 100-летию со дня рождения Дмитрия Евгеньевича Охоцимского / Сост. Ю.Ф. Голубев, М.Ю. Овчинников, В.В. Сазонов. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2020.
15. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г.* Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975.
16. *Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И.* Моделирование на ЦВМ движения шагающего аппарата // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1972. № 3. С. 47–59.
17. *Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Донцов В.Е. и др.* Лабораторный макет интегрального шагающего робота // Труды VII Всесоюзного совещания по проблемам управления. Минск, ноябрь 1977 г.
18. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф.* Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984.
19. *Охоцимский Д.Е., Камынин С.С., Гримайло С.И. и др.* Реализация сборочных операций на роботе “Прагма А-3000” // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. 1985. № 82. С. 1–47.
20. *Охоцимский Д.Е., Камынин С.С., Карташев В.А., Кукушев Е.И.* Автоматическая многооперационная сборка с помощью промышленных роботов // Роботизация сборочных процессов. М.: Наука, 1985.
21. *Белоусов И.Р., Охоцимский Д.Е., Сазонов В.В. и др.* Захват подвижного объекта роботом-манипулятором // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 1998. № 4. С. 102–116.
22. *Белоусов И.Р., Охоцимский Д.Е., Сазонов В.В. и др.* Взаимодействие робота-манипулятора со сферическими маятниками // Известия РАН. Механика твёрдого тела. № 1. 2001. С. 194–204.