



УДК 517.977.5, 629.78

**Кифоренко Б. Н. Сингулярные оптимальные управления в механике космического полета.** — Киев: Наукова думка, 2017. — 196 с.

В монографии изложена история разработки методов исследования вырожденных вариационных задач с акцентом на механику космического полета. Описано современное состояние и обсуждены нерешенные проблемы теории сингулярных оптимальных управлений. Основное внимание уделено исследованию движения ракет в атмосфере. Показаны пути повышения эффективности ракетных двигателей. Результаты расчетов для конкретных маневров могут служить источником информации для принятия решений при конструировании перспективной ракетно-космической техники.

Для специалистов, занимающихся исследованием задач управления, а также магистрантов и аспирантов факультетов прикладной математики вузов.

**Рецензенты:** академик НАН Украины *В. М. Кунцевич*,  
академик НАН Украины *М. О. Перестюк*  
ISBN 978-966-00-1535-7

## ПРЕДИСЛОВИЕ

(Этюды оптимизатора)

Дорогой коллега, предлагаемая книга — плод многолетних раздумий автора над вопросами, возникавшими при использовании математической теории оптимальных процессов для решения конкретных задач.

1. Долгое время я не решался вынести на широкое обсуждение свои сомнения и находки, представить удачные, как мне казалось, результаты и поделиться вопросами, так и оставшимися без ответа. Что же побуждает меня теперь все-таки сделать этот шаг? Это чувство долга перед Провидением за три необыкновенных подарка судьбы.

Первый — тематика задач, которыми довелось мне заниматься все эти годы, — оптимизация ракет и космических аппаратов с позиций механики полета. Именно проблемы этой отрасли знания и техники в определяющей степени стимулировали развитие современной теории оптимальных процессов. Историки науки наверняка отметят эту теорию как наиболее ценное из приобретений человечества в эпоху мировой ракетно-ядерной войны второй половины двадцатого столетия, когда политики запугивали противника ядерными взрывами на собственных испыта-

тельных полигонах и демонстрировали точность доставки этих «подарков», проводя невероятно дорогие космические исследования. Мне посчастливилось работать почти всю жизнь над реализацией мечтаний, разбуженных еще в детстве Ж. Верном и К. Э. Циолковским, и оказаться участником развития одного из интереснейших разделов современной науки. «Не было бы счастья, да несчастье помогло» — противостояние, побудившее исследовать космос задолго до решения более насущных планетарных задач.

Второй, но, безусловно, главный по влиянию на мою судьбу подарок — мои учителя: доцент Михаил Григорьевич Старостин и профессор Всеволод Иосифович Путята, сумевшие убедить стоявшего на распутье студента Киевского университета в том, что исследовательская работа — это и есть то, чем стоит заниматься в жизни. Основное влияние на формирование моих интересов к механике космического полета оказал заведующий 20-м отделением Центрального аэрогидродинамического института им. Н. Е. Жуковского, профессор МФТИ Георгий Львович Гродзовский. Он привлек меня к решению первой серьезной задачи механики космического полета, ввел в сообщество ученых, работавших в этой отрасли, и долгие годы влиял на выбор направлений моих исследований.

Третий подарок Провидения — это, хотя и не широкий, но очень дорогой для меня круг коллег, с которыми довелось неоднократно обсуждать разные проблемы, в частности вопросы, размышления над которыми составили содержание этой книги. Хочу перечислить их не по степеням и званиям, а в порядке моей личной хронологии встреч: А. Н. Гузь, Ю. И. Шмаков, С. И. Кифоренко, В. В. Кузьменко, З. В. Пасечник, Н. А. Перестюк, В. Т. Злацкий, В. В. Токарев, Ю. Н. Иванов, Р. Н. Овсянников, А. И. Кухтенко, В. Б. Ларин, Б. Н. Пшеничный, В. М. Ковтуненко, Ж. П. Марек, К. Маршал, Т. М. Энеев, В. В. Балашов, В. А. Егоров, В. В. Белецкий, В. Г. Дёмин, Ф. Л. Черноусько, Г. К. Даулетов, Е. А. Хасенов, В. Ф. Кротов, Л. И. Гусев, Г. К. Григорьев, Г. А. Багнюк, В. С. Брусов, В. М. Кунцевич, Ф. М. Кириллова, Р. Ф. Габасов, Ю. М. Горский, И. Ю. Васильев, А. М. Харитонов, С. В. Василенко, В. Д. Юдицкий, Н. Н. Моисеев, Д. В. Лебедев, М. М. Лычак, В. В. Волосов, Я. И. Зелик, Г. М. Зражевский. Сюда же отнесу свою переписку с А. Миеле и Г. Келли и интенсивный недельный поистине марафонский обмен мнениями с сотрудниками Advanced Space Analysis Office при посещении НАСА (центр им. Льюиса в Кливленде, шт. Огайо).

Очень жаль, если те особенности разработки и использования оптимизационных подходов, с которыми мне довелось иметь дело, останутся разбросанными в разрозненных публикациях или вообще не представленными на более надежном носителе информации, чем личная память автора и его собеседников, некоторые из которых, увы, уже нет с нами. Надеюсь, что преломившийся в моем сознании опыт, опыт поколения оптимизаторов второй половины прошлого века, будет интересен и для моих коллег, и для молодежи, вступающей в жизнь в очень сложную эпоху всеохватывающей и подчас бездумной экспансии формализованных описаний и количественных методов.

В сущности, предлагаемая книга — о том, какие задачи удавалось, а какие невозможно было решить методами оптимизации. И как попытаться переформулировать вторые, чтобы сделать их разрешимыми. А то, что это иллюстрируется примерами исключительно из истории механики космического полета, для читателя, интересующегося методологическими аспектами науки, надеюсь, не столь уж и важно. Ведь еще Г. Гегель утверждал, что изучение истории философии — не пустое коллекционирование фактов и анекдотов, не рассмотрение совокупности взглядов, а постижение сути философии.

Всем сказанным я пытаюсь оправдать перед тобой, читатель (и перед собой — в первую очередь!), стремление изложить представленное в этой книге. Сомнения в целесообразности этого шага по-прежнему не оставляют меня. Г. Л. Гродзовский, увидев слово «попытка» в черновике автореферата моей кандидатской

диссертации, возмутился: «Вместо того, чтобы делать попытки, полезнее для общества торговать пивом!». Да, мне никогда не хватало его решительности. Но пригласить тебя, читатель, поразмышлять над прератностями моделирования и оптимизации все-таки рискну. И если что-либо из затронутого в книге тебе не безразлично, буду рад расширить круг собеседников и обсудить в любой форме возможные замечания и пожелания.

2. Основная проблема, которую я намерен обсуждать, — это выбор разумной меры соответствия объекта исследования его математической модели. Поскольку стремление сделать описание возможно более подробным неизбежно приводит к усложнению используемого при этом математического аппарата, необходимость лавирования между Сциллой неадекватности и Харибдой нелинейности, неаналитичности и проклятия размерности требует от исследователя не малого искусства. В отличие от науки возможности искусства безграничны, но не формализуемы. Однако сформулировать некий опытный принцип разрешения дилеммы: адекватность — простота формализованного описания — я все же попытаюсь, надеюсь вызвать дискуссию заинтересованных читателей.

3. Перечислю кратко обсуждаемые в книге проблемы механики полета. В первой главе приведен краткий очерк истории формирования современного математического описания ракет и космических аппаратов (КА) как объектов управления. Во второй, третьей и четвертой главах рассмотрены проблемы оптимизации ракет, движущихся в атмосфере. На примере классической задачи Годдарда — Циолковского уточняются условия оптимальности сингулярного управления величиной тяги и зависимость эффективности ее дросселирования от степени совершенства конструкции движителя и аэродинамики корпуса ракеты. Оказывается, что житейская мудрость «Тише едешь — дальше будешь» реализуется при движении тела переменной массы в среде с сопротивлением просто-таки буквально, в то время как тезис «Сила есть — ума не надо» абсолютно неприменим в столь тонком деле, как конструирование ракет.

Оптимальная даже в задаче Годдарда — Циолковского степень дросселирования тяги может быть настолько значительной, что становится неправомерным использование классического представления о прямой пропорциональности величины тяги и секундного массового расхода рабочего тела. В четвертой главе предложена более адекватная модель ракетного двигателя как объекта управления — и изящное классическое решение, обусловившее разработку современной теории особых оптимальных управлений, рушится, как картонный домик. Возникший взамен фантом оптимального скользящего режима для ра-

кетного двигателя есть «дитя незаконнорожденное», поскольку противоречит одной из основополагающих гипотез теории оптимального управления. Выход из теоретического тупика и возможные практические последствия обсуждаются в четвертой главе. Там же рассмотрены особенности управления движением аппаратов, не только преодолевающих аэродинамическое сопротивление, но и использующих аэродинамическую или аэростатическую подъемную силу, включая задачу доставки образцов грунта с поверхности планеты Венера.

В пятой главе рассмотрена классическая задача оптимизации многоступенчатых ракет в новой постановке — и выясняется, стоит ли рубить сук, на котором сидишь. Если идея сброса отработанных топливных баков достаточно тривиальна, то имеет ли смысл сбрасывать секции движителя, явно теряя при этом в ускорении? Полученный ответ не только удовлетворяет естественное любопытство, но и подсказывает способ улучшения уже привычной компоновки схем пакетных разгонных ступеней ракет и возможности экономии топлива уже существующих ракет.

В шестой главе обсуждается основная дилемма математического моделирования: адекватность-простота формализованного описания. Предложенный прием используется при построении математической модели жидкостного ракетного двигателя, работающего на двухкомпонентной топливной смеси, электрического ракетного двигателя с солнечным источником энергии, ядерного ракетного двигателя большой тяги и двухрежимного ядерного ракетного двигателя. Для всех указанных типов двигателей доказано, что управления величиной тяги, удовлетворяющие необходимым условиям оптимальности, принадлежат дуге границы множества допустимых управлений от точки максимальной тяги до точки максимальной скорости реактивной струи. Это утверждение инвариантно относительно целей и оценки качества управления в конкретных задачах.

Естественным, на мой взгляд, следствием долголетних мытарств автора на пройденном пути, сухим остатком неоднократных всплесков активности и погружений в омуты безысходности явилась в целом оптимистическая оценка возможности использования оптимизационной

идеологии не только как способа совершенствования технических объектов, но и как источника идей расширения инструментария формализованного описания процессов управления в живой природе, к которой технические объекты, как созданные человеком, имеют прямое отношение.

Так кого же, склонившегося над этими страницами с карандашом в руке, видит в своем воображении автор? Я жду внимания от тех специалистов-механиков, кому интересна логика развития представления о ракете как объекте управления, формализованного в виде последовательно усложняющейся системы математических моделей. Готовлюсь дискутировать с интересующимися эффективностью и ограниченностью возможностей оптимизации как инструмента действительного улучшения функционирования управляемых объектов любой природы, приемлемой моделью которых является динамическая система, описываемая обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Материалы, вошедшие в книгу, в течение ряда лет включались в специальные курсы для студентов и аспирантов механико-математического факультета Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. Если для некоторых читателей стиль изложения покажется слишком подробным, то это сделано не для увеличения объема, а с учетом интересов преподавателей, которые желали бы включить какие-либо задачи в свои лекции для иллюстрации искусства моделирования и возможностей оптимизации при решении практических задач.

Особенно хотелось бы пообщаться и выслушать критические замечания читателей, которым (вслед за Н. Н. Моисеевым) покажется наиболее интересной последняя, методологическая, часть приложений и, в частности, дискуссионная возможность использования предложенного в ней принципа Анохина — Парето при описании объектов живой природы.

Если эта книга попадет в руки делающего первые шаги в науке и мне удастся пробудить в молодой душе интерес к научным исследованиям как способу жизнедеятельности, я буду считать свой долг перед Провидением исполненным и десятилетия увлечения оптимизацией ракет и космических аппаратов не потраченными зря.