

### 11-й МІЖНАРОДНИЙ СИМПОЗИУМ «МАЛІ СУПУТНИКИ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗЕМЛІ»

Атмосферний озон відіграє важливу роль в регіональних та глобальних змінах клімату, приземний озон згубної наземних та супутникових вимірюваннях розрахунок поглинання проводиться на основі експоненціального закону Бугера — Ламберта — Бера.

11-й міжнародний симпозиум «Small Satellites for Earth Observation» проводився з 24 по 28 квітня 2017 року в м. Берлін під егідою Міжнародної академії астронавтики (ІАА).

Велика кількість вчених, інженерів, керівників, які взяли участь у симпозиумі, присвяченому дистанційному зондуванню Землі (ДЗЗ) із космосу, свідчить про значний інтерес до використання малих супутників, як для місій ДЗЗ, так і спеціальних місій, для випробувань нових технологій.

Міжнародний симпозиум «Small Satellites for Earth Observation», що проводиться раз на два роки, покликаний збирати спеціалістів у вказаній галузі для обговорення поточних наукових досліджень та розробок у сфері дослідження Землі із космосу за допомогою малих супутників. Тенденція розвитку малих супутників у світі є перспективною, тому що дозволяє проводити космічні експерименти доволі швидко, недорого і забезпечує більшу можливість доступу до космічних програм.

У цьому році відбувся вже 11-й симпозиум, приймаючою стороною якого виступив Національний аерокосмічний дослідницький центр Німеччини (DLR) та Технічний університет (м. Берлін).

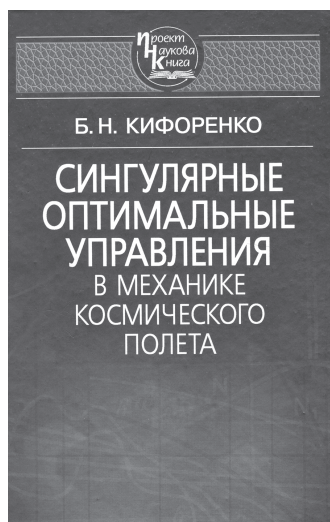
На цьогорічний симпозиум зібралися представники більш ніж 20 країн світу. Під час проведення симпозиуму представлено близько 100 усних та стендових доповідей у наступних секціях: місії, що плануються та виконуються; зв'язок; супутники типу CubeSat; нові типи платформ; силові системи супутників; програмне забезпечення. Окрема секція — конференція для студентів — дала змогу представити свої роботи студентам академічних інститутів, зокрема, слід відзначити Міжнародний університет космічних досліджень (International Space University, <http://www.isunet.edu>), в якому можуть проводити дослідження студенти з усього світу.

Впродовж роботи симпозиуму учасникам можна було познайомитись з виставкою розробок наукових і комерційних організацій. Зокрема, широко були представлені платформи типу CubeSat та системи для їх функціонування: датчики положення, системи стабілізації, бортові комп'ютери, системи передачі інформації тощо.

Представники Головної астрономічної обсерваторії НАН України та ДП «Конструкторське бюро «Південне» представили доповіді на теми розробки комплексу наукової апаратури космічного проекту «Аерозоль-УА» та супутникової платформи YuzhSat, що розробляється для вказаного проекту. Більш детальну інформацію про симпозиум можна знайти за посиланням: <https://www.dlr.de/iaa.symp/>.

Наступний симпозиум запланований на 2019 рік.

*І. І. СИНЯВСЬКИЙ*



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 распутии 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.

**БЕЙКЕР Роберт М. Л.** — доктор філософії, член Американської асоціації сприяння розвитку науки, провідний експерт з досліджень високочастотних гравітаційних хвиль (HFGW), голова трьох міжнародних конференцій з досліджень високочастотних гравітаційних хвиль, засновник веб-сайта з досліджень гравітаційних хвиль [www.GravWave.com](http://www.GravWave.com), співпрацює з корпорацією Consultancy Transport Sciences, працює старшим консультантом корпорації «Транспортні науки» і наукового товариства «Гравітаційні хвилі». Лауреат премії Університету Каліфорнії з фізики і премії Дірка Брауера за видатний внесок у астродинаміку та орбітальну механіку.

Напрямок науки — високочастотні гравітаційні хвилі, астродинаміка, орбітальна механіка.

**БРИЛЬ Андрій Іванович** — провідний науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, оптичне зондування атмосфери.

**БАВИЛОВА Ірина Борисівна** — завідувач відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, доцент. Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, космічні дослідження, історія науки, астроінформатика.

**ВАСИЛЕНКО Анатолій Андрійович** — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, астрофізика високих енергій.

**ДАНИЛЕВСЬКИЙ Василь Олексійович** — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, астрономія.

**КАБАШНИКОВ Віталій Павлович** — головний науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, Мінськ, Білорусь, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, обладнання для досліджень параметрів атмосфери.

**КАЗАНЦЕВ Анатолій Михайлович** — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — еволюція малих тіл Сонячної системи.

**КАЗАНЦЕВА Лілія Вікторівна** — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — еволюція малих тіл Сонячної системи.

**МЕТЕЛЬСЬКА Наталія Сергіївна** — старший науковий співробітник Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, моделювання параметрів атмосфери.

**МІЛІНЕВСЬКИЙ Геннадій Петрович** — завідувач науково-дослідної лабораторії кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, головний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, співробітник Міжнародного центру науки майбутнього Цзилінського університету (Чанчунь, Китай), доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери та навколосемного космічного простору.

**НОРКО Анна Володимирівна** — інженер Інституту фізики Національної академії наук Білорусі.

Напрямок науки — фізика атмосфери, моделювання параметрів атмосфери.

**РОМАНЕЦЬ Олена** — Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, кандидат історичних наук.

Напрямок науки — історія фізики.

**САВЧУК Варфоломей** — професор кафедри квантової макрофізики факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, доктор історичних наук, кандидат біологічних наук. Академік Академії наук вищої школи України (1998), Заслужений працівник освіти України.

Напрямок науки — історія науки, освіти і техніки.

**СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович** — виконувач обов'язків завідувача відділу оптики атмосфери та приладобудування Головної астрономічної обсерваторії НАН України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — оптика атмосфери, приладобудування.

**ТКАЧЕНКО Олександр Іванович** — старший науковий співробітник Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — навігація та керування рухомими об'єктами.

**ФЕДОРЕНКО Юрій Петрович** — старший науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедицинської електроніки та комп'ютерних систем, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — розробка і розвиток радіофізичних методів діагностики іоносфери, дослідження іоносферних збурень.

**ЧАЙКОВСЬКИЙ Анатолій Павлович** — завідувач Центру «Оптичне дистанційне зондування» Інституту фізики Національної академії наук Білорусі, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, оптичне зондування атмосфери.

**ЯЦКІВ Ярослав Степанович** — директор Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, член Президії Національної академії наук України, академік Національної академії наук України, президент Української астрономічної асоціації, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрономія, геодинаміка, космічні дослідження.