

УДК 6297.7, 519.6

**Техническая механика
в ракетно-космических разработках ИТМ НАН и НКА Украины**
исследованиях:

В. В. Пилипенко

Інститут технічної механіки НАН і НКА України, Дніпропетровськ

Надійшла 15.09.97

Наведено результати комплексних досліджень і розробок Інституту технічної механіки НАН і НКА України в області ракетно-космічних систем. Окреслені напрямки подальшого розвитку технічної механіки при створенні ракет-носіїв та космічних апаратів в рамках концепції Державної космічної програми України.

В Днепропетровске находится единственный в Украине научно-исследовательский институт, который занимается решением широкого круга научных проблем, возникающих при создании ракет-носителей и космических аппаратов — Институт технической механики Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины. Институт вырос из небольшого научного подразделения — Сектора проблем технической механики, организованного в 1966 г. по инициативе Михаила Кузьмича Янгеля — главного конструктора ракетно-космических систем. В последующие годы Сектор был преобразован в филиал, а затем — в Днепропетровское отделение Института механики АН Украины (1968 г.), на базе которого при поддержке академиков Б. Е. Патона, В. Ф. Уткина, В. П. Мишина, Б. Н. Петрова, Г. И. Петрова и тогдашнего Президента АН СССР А. П. Александрова, и был в 1980 г. создан Институт технической механики. За этот период научные направления института, заложенные М. К. Янгелем и его соратниками (Н. Ф. Герасютои, В. М. Ковтуненко, И. И. Ивановым, В. И. Моссаковским), а также новые, связанные с научной деятельностью академиков АН Украины В. А. Лазаряна, В. С. Будника и дру-

гих ученых, несколько видоизменились.

В настоящее время к наиболее важным направлениям Института, ориентированным в первую очередь на решение научных проблем ракетно-космической техники, можно отнести исследования в области динамики ракетных двигателей, продолжкой устойчивости жидкостных ракет-носителей, прочности и надежности ракетных конструкций, динамики наземной транспортировки изделий ракетной техники, аэрогазо- и плазмодинамики, механики управляемого полета. В предлагаемой статье приведен обзор основных результатов выполненных работ и кратко рассмотрены перспективы их дальнейшего развития.

1. ДИНАМИКА РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ракетные двигатели. Результатом широкомасштабного и плодотворного сотрудничества между КБ «Южное» и Институтом явилась разработка научно-технических основ нового направления в динамике жидкостных ракет и жидкостных ракетных двигательных установок, связанного с учетом динамики кавитационных явлений в шнекоцентробеж-

ных насосах и использованием эффектов гидродинамической кавитации (Пилипенко и др., 1977; Пилипенко, 1989). Была разработана теория низкочастотных кавитационных автоколебаний в системах питания ЖРД и предложены новые средства их подавления, развита линейная теория продольной устойчивости жидкостных ракет, заложены основы нелинейной теории продольной устойчивости и разработаны принципиально новые способы и средства обеспечения продольной устойчивости РН, предложена новая технология кавитационной импульсной гидроабразивной обработки металлических поверхностей, в первую очередь — ракетных конструкций (Пилипенко, 1989).

Особых успехов ученые института достигли в решении таких важных проблем, как обеспечение динамической совместимости жидкостного ракетного двигателя с конструкцией корпуса ракеты (Пилипенко, Задонцев, 1976). Если эту проблему не решить своевременно, то при первых же летно-конструкторских испытаниях ракеты с работающими двигателями возникают низкочастотные колебания упругого корпуса ракеты в направлении продольной оси, которые могут достичь опасных пределов, что делает невозможной нормальную эксплуатацию ракеты-носителя. С этой проблемой неизбежно сталкивались разработчики больших жидкостных ракет-носителей во всем мире — в бывшем СССР при разработке ракет-носителей «Восток», «Протон», «Зенит», «Энергия»; в США — при разработке ракет-носителей «Титан-2», «Сатурн-5», «Спейс-Шатл»; во Франции — при разработке РН «Диамант-В», «Европа», «Ариан-4», «Ариан-5», а также в Китае и в Японии. Ученые института внесли значительный вклад как в развитие теории, так и в разработку принципиально новых средств и способов обеспечения динамической совместимости двигателя с корпусом ракеты.

Разработка теории кавитационных колебаний в системах питания ЖРД. В 1960-е годы обнаружилась новая «болезнь» жидкостных ракетных двигателей — низкочастотные автоколебания давлений и расходов, обусловленные, как было выяснено, кавитацией в высокооборотных шнекоцентробежных насосах ЖРД.

Разработка и развитие теории кавитационных колебаний в системах питания ЖРД прошла ряд этапов и включала обширные экспериментальные исследования кавитационных автоколебаний в условиях автономных испытаний натурных шнекоцентробежных насосов ЖРД (Пилипенко, 1976а, 1976б, 1977).

На первом этапе были разработаны гидродинамические линейные квазистационарные модели кавитационных колебаний для режимов без обратных токов.

Экспериментально были впервые получены области существования автоколебаний в плоскости режимных параметров насоса, исследовано влияние конструктивных параметров осевых шнековых преднасосов, а также конструктивных и режимных параметров насосной системы на частоты, амплитуды и формы кавитационных автоколебаний на режимах без обратных токов и с обратными токами на входе в насос. Было показано, что к выбору конструктивных параметров шнека следует подходить не только с точки зрения обеспечения бескавитационных условий работы центробежного колеса, но и с точки зрения обеспечения устойчивости насосной системы питания по отношению к кавитационным колебаниям. Впервые были экспериментально исследованы развитые кавитационные автоколебания на режимах с интенсивными обратными токами, когда периодически напор шнекового преднасоса двигателя уменьшался до давления насыщенных паров жидкости.

Были предложены новые конструкции осевых шнековых преднасосов, эффективно подавляющие кавитационные автоколебания в широком диапазоне изменения его режимных параметров при сохранении приемлемых антикавитационных свойств насоса.

Были разработаны новые быстродействующие датчики расхода жидкости (воды, компонентов топлива) различных типоразмеров, позволяющие производить измерения колебаний расходов жидкости на входе и выходе из насоса в низкочастотном диапазоне.

Были разработаны приближенные нелинейные модели для расчета кавитационных автоколебаний в насосной системе, установлены сильные нелинейности системы — в первую очередь зависимость объема кавитационной полости от давления и расхода на входе в насос (Пилипенко, 1979, 1980).

Следующим важным этапом разработки теории кавитационных колебаний было решение задачи кавитационного обтекания решетки пластин в неустановившемся режиме, что позволило отказаться от гипотезы квазистационарности и получить ключевое в рассматриваемой теории уравнение динамики кавитационных каверн, расположенных в межлопастных каналах шнека (позже аналогичное уравнение было получено и для режимов с обратными токами, когда кавитационные каверны образуются и в вихревой зоне перед шнековым преднасосом).

Усовершенствованная таким образом теория впервые позволила согласовать расчетные и экспериментальные границы области устойчивости систем «питающий трубопровод — насос», питающий трубопровод-двигатель в плоскости режимных параметров системы (Пилипенко, 1980).

Развитие линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН. Использование линейных динамических моделей кавитирующего шнекоцентробежного насоса ЖРД позволило согласовать расчетные динамические характеристики насоса (в частности, входной импеданс, коэффициент усиления насоса по давлению) с экспериментальными на различных режимах работы насоса. Указанные экспериментальные данные были получены впервые при частотных испытаниях натурных шнекоцентробежных насосов ЖРД различной производительности с непосредственным измерением колебаний расхода на входе в насос быстродействующим датчиком. Было установлено, что учет кавитации в насосах приводит к качественному изменению вида их динамических характеристик. Это, в свою очередь, приводит к качественным изменениям вида динамических характеристик двигателя в целом по каналу продольной устойчивости. Были разработаны методики расчета динамических характеристик ЖРД по каналу продольной устойчивости с учетом кавитации в насосах, позволившие согласовать расчетные характеристики с экспериментальными.

Это позволило развить линейную теорию продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, повысить точность и достоверность прогноза продольной устойчивости жидкостных ракет (Пилипенко, 1981а).

Впервые теоретически были проанализированы ситуации потери продольной устойчивости ракеты с газожидкостным демпфером продольных колебаний из-за сближения частоты первого тона колебаний упругого корпуса ракеты и второго тона колебаний жидкости в питающей магистрали с кавитирующим насосом, которая близка к собственной частоте колебаний жидкости на участке питающей магистрали от демпфера до входа в двигатель. Этот анализ показал, в частности, важность выбора места установки газожидкостного демпфера продольных колебаний.

Были обоснованы новые возможности обеспечения продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, не требующие установки специальных демпферов продольных колебаний, например, за счет выбора параметров и изменения конструкций шнековых преднасосов.

Разработаны основы теории и проектирования принципиально новых перспективных классов демпферов продольных колебаний жидкостных ракет — гидродинамических, включая малорасходные, и термодинамических. Такие демпферы не содержат подвижных частей, имеют лучшие по сравнению с газожидкостными демпферами характеристики, повышают эксплуатационную надежность ракет. Теоретические результаты определения статических и динамических характеристик указанных демпферов

подтверждены экспериментально.

Разработки нелинейной теории продольных колебаний жидкостной ракеты. В настоящее время в инженерной практике наибольшее распространение получил линейный анализ продольной устойчивости, который принципиально не может дать ответ о величинах амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты. В то же время именно значение возможных величин амплитуд продольных колебаний должно служить базой для принятия решений о специальных мерах по обеспечению устойчивости в случае, если амплитуда превышает безопасный уровень (Пилипенко, 1981б).

Разработка нелинейной теории продольных колебаний связана в первую очередь с изучением нелинейностей звеньев контура корпуса ракеты — ЖРДУ и их влияния на ограничения величины амплитуд (Пилипенко и др., 1983).

Анализ данных летно-конструкторских испытаний различных ракет с ЖРД показал, что при продольных колебаниях в основном только амплитуды колебаний давления на входе в двигатель соизмеримы со своими средними значениями. Это дает основание считать, что при продольных колебаниях наиболее существенными являются нелинейности ЖРД и, в первую очередь, связанные с кавитационными явлениями в насосах. Учет этих нелинейностей, а также учет конечных по величине начальных и последующих возмущений, ограниченности интервала времени работы двигателей, переменности во времени параметров ракеты дает возможность получить ответ о величинах амплитуд продольных колебаний, т. е. решить задачу о технической устойчивости ракеты (Пилипенко, 1985, 1986; Пилипенко, Кваша, 1991; Pilipenko et al., 1992).

Разработана методика определения амплитуд продольных колебаний корпуса путем численного интегрирования нелинейной нестационарной системы и показано, что сильными нелинейностями, ограничивающими амплитуду продольных колебаний, являются нелинейные зависимости объема кавитационной полости от давления и расхода на входе в насос и нелинейные зависимости напоров насоса от объема кавитационной полости.

Разработана методика определения амплитуд продольных автоколебаний в системе корпус ракеты — ЖРДУ с «замороженными» коэффициентами, основанная на гармонической линеаризации уравнения давления на входе в кавитирующий шнекоцентробежный насос. Показано, что определенные таким образом амплитуды колебаний могут служить верхней оценкой амплитуд продольных колебаний нестационарной системы.

Разработана методика расчета переходных процессов и установившихся движений в системе кор-

пус ракеты — ЖРДУ, основанная на методах усреднения, гармонического баланса и продолжения по параметру.

Следует отметить, что первоначальные разработки нелинейной теории продольных колебаний выполнены при условии, что система питания ЖРД устойчива по отношению к кавитационным колебаниям. Проблема взаимодействия упругого корпуса ракеты с неустойчивой ЖРДУ потребовала исследования взаимодействия продольных колебаний корпуса ракеты с кавитационными автоколебаниями в системе питания ЖРД; показано, что кавитационные автоколебания могут как усиливать, так и ослаблять колебания корпуса ракеты.

Разработана методика и выполнено численное моделирование запуска маршевой двигательной установки жидкостной ракеты в условиях минометного старта с учетом кавитации в шnekовых преднасосах ЖРД.

Результаты численного моделирования показали, что для нормального запуска двигателя в условиях минометного старта не требуется установка специального демпфирующего устройства в длинной питающей магистрали.

Разработанные эффективные методы линейного и нелинейного анализа продольных колебаний и принципиально новые средства подавления кавитационных автоколебаний в системах питания ЖРД и продольных колебаний корпуса РН были использованы на различных этапах создания ряда РН разработки ГКБ «Южное», в том числе на РН «Зенит» (Pilipenko et al., 1992a, b; Pilipenko, 1993; Пилипенко, Семенов, 1994; Пилипенко, Момот, 1995).

Управление сверхзвуковыми газовыми потоками в соплах ракетных двигателей. Крупная проблема ракетного двигателестроения, успешно решенная в институте как в теоретическом, так и в экспериментальном плане, связана с управлением сверхзвуковым высокотемпературным газовым потоком в сопле ракетного двигателя с целью регулирования тяги двигателя по величине и направлению, необходимых для управления ракетой в полете (Коваленко, 1992, Коваленко и др., 1993). Газодинамическое управление потоком в реактивном сопле позволяет с высокой эффективностью регулировать величину и направление вектора тяги. Уже первые результаты исследований управления сверхзвуковым потоком, путем его возмущения, проведенные в 1960-е годы, показали, что его использование позволяет расширить функциональные возможности двигателя, повысить энерго-массовые, габаритные и эксплуатационные характеристики летательных аппаратов.

Новые идеи по организации управления газовым потоком оказались плодотворными при разработке

не только органов управления вектором тяги сопла, но и при разработке принципиально новых конфигураций профиля его сверхзвуковой части. После отработки в реальных условиях ряд из них был применен на серийно выпускаемых жидкостных и твердотопливных ракетных двигателях. В частности, на ЖРД разработки КБ «Южное» 15Д12 и последующих его модификациях была установлена система управления вектором тяги, основанная на возмущении сверхзвукового потока в сопле вдувом восстановительного генераторного газа, отбираемого за турбиной турбонасосного агрегата двигателя, не имеющая аналогов в ракетном двигателестроении. Также впервые в мировой практике создания твердотопливных ракетных двигателей на РДТТ типа ЗД65 разработки КБ «Южное» была установлена безгазоводная система вдува камерного газа в сверхзвуковую часть сопла для управления по всем каналам стабилизации ракеты. В процессе отработки различных модификаций этого двигателя были предложены различные средства улучшения характеристик системы вдува, в частности:

- «мягкая» посадка клапана регулятора расхода вдуваемого газа, исключающая непроизводительное расходование топлива;
- газодинамические средства теплозащиты особо-теплонапряженных элементов регулятора расхода вдуваемого газа, повышающие надежность системы вдува в составе двигателя, работающего на топливе с повышенной эффективностью;
- импульсные устройства фиксирования управляющих усилий, исключающие ограничения по использованию системы вдува для решения задач управления нового поколения ракет.

На газореактивной двигательной установке было применено исследованное в институте кольцевое сопло, позволившее повысить удельный импульс и расширить возможности регулирования вектора тяги. Были разработаны и успешно прошли испытания в составе модельных и серийных ЖРД и РДТТ новые типы органов газодинамического управления вектором тяги посредством выдвижения в сверхзвуковой поток твердого препятствия с инжекцией через него жидкости, в частности компонентов жидких топлив, а также новые формы сверхзвуковой части сопла, спрофилированные не по линиям тока.

2. АЭРОГАЗО- И ПЛАЗМОДИНАМИКА

Процессы взаимодействия объектов ракетно-космической техники (ОРКТ) во время их полета с окружающей средой достаточно сложны и проблема их математического и физического моделирования

возникла уже на начальном этапе развития космонавтики. Работы по аэродинамическому обеспечению проектно-конструкторских разработок ОРКТ в Институте развивались по следующим научным направлениям.

Аэрогазодинамика в плотных слоях атмосферы. Теоретические исследования были направлены на разработку методологии численного решения задач сверх- и гиперзвуковой аэрогазодинамики объектов РКТ, которая объединяет вполне определенную технологию создания комплексов программ, разработку технологичных для машинной реализации алгоритмов, дающих возможность повышения эффективности численного моделирования — сокращения сроков разработки программ, уменьшения затрат времени ЭВМ, расширения ассортимента задач и т. д. Рассмотрен комплекс задач, которые решены в приближениях невязкого газа, пограничного слоя, вязкого взаимодействия, тонкого и полного вязких ударных слоев, а также задач расчета отрывных и струйных течений, задач обтекания тел запыленным газом, с учетом термохимического разрушения поверхности и других физических, физико-химических и газодинамических процессов (Тимошенко, 1987; Тимошенко, Лиманский, 1985).

Разработаны методики повышения оперативности расчета сверхзвукового обтекания спускаемых аппаратов, что позволяет сократить время проведения расчетов в три, пять и больше раз, что особенно важно для многосерийных проектных расчетов на ранней стадии проектирования.

Разработана методика и алгоритмы расчета обтекания осесимметричных тел в режиме вязкого взаимодействия и вязкого ударного слоя.

Разработано методическое и программное обеспечение расчета гиперзвукового обтекания тел в условиях термохимического разрушения теплозащитного покрытия (ТЗП) их поверхности и выяснены основные особенности влияния разрушения ТЗП на обтекание ЛА типовых форм. В отличие от известных работ, в которых термохимическое разрушение поверхности тела изучается с целью определения тепловых потоков и массы унесенного ТЗП, изучены вопросы взаимного влияния термохимического разрушения и вязкого взаимодействия и влияния этих процессов на аэродинамическое сопротивление ЛА. В частности, показано, что в зависимости от определенных обстоятельств вдув продуктов термохимического разрушения ТЗП в пограничный слой может привести как к уменьшению, так и к увеличению аэродинамического сопротивления, и выяснен механизм этого явления.

Предложены алгоритмы численного конечно-разностного расчета сверхзвукового пространственного обтекания тел потоком газа с пылевыми частицами и проведены систематические численные исследо-

вания влияния межфазного взаимодействия на силовое и тепловое воздействие запыленного потока на тела типовой формы.

Разработана методика расчета параметров в трехмерной отрывной области в торцевой части ракеты с работающим двигателем. Эта методика дает возможность учитывать влияние угла атаки ракеты и угла отклонения сопла двигателя на уровень донного давления.

Для ракет-носителей разработаны методы расчета сверхзвукового обтекания корпусов, органов управления, стабилизации и крыльев.

С помощью разработанного методического, алгоритмического и программного обеспечения получен ряд новых результатов, которые нашли применение при разработке ОРКТ различного назначения.

Динамика разреженного газа. Исследования проводятся по направлениям:

- разработка и создание численных методов, алгоритмов и программных средств для проведения исследований аэродинамических, тепловых, фотометрических характеристик и процессов массопереноса в окрестности орбитальных и спускаемых космических аппаратов методами математического моделирования;
- физическое моделирование условий полета и экспериментальные исследования особенностей взаимодействия сверхзвуковых нейтральных потоков разреженного газа с обтекаемыми поверхностями, проведение комплексных испытаний и калибровка бортовых измерительных систем и аппаратуры;
- участие в разработке, постановке и реализации натурных экспериментов по исследованию аэродинамических характеристик и параметров собственной внешней атмосферы КА.

При проведении теоретических исследований на основе совместного применения регулярных методов и методов прямого статистического моделирования разработана комплексная методика и создано программное обеспечение для расчета аэродинамических характеристик КА в свободномолекулярном и близком к нему режимах обтекания. Предложены способы уменьшения статистических погрешностей и экономии ресурсных затрат ЭВМ при численном моделировании рассмотренных процессов (Басс, 1978, 1980). Разработаны эффективные численные алгоритмы, позволяющие учитывать молекулярный состав верхней атмосферы Земли, исследована адекватность постановки граничных условий на обтекаемых поверхностях. Разработана методика учета взаимного экранирования элементов конструкции орбитальных и спускаемых КА. Проведенные исследования позволили установить необходимый компромисс между временем и точностью

вычислений соответствующих параметров (Басс, 1980; Bass, 1990, 1991).

На базе использования теории «локального взаимодействия», регулярных методов и методов Монте-Карло разработаны новые численные алгоритмы для определения аэродинамических характеристик КА сложной формы, включая и многоразовые КА, в различных режимах движения. Большая часть разработанных методик вошла в состав первого в СССР «Руководства для конструкторов по аэrodинамике и теплообмену изделий РКТ в верхних слоях атмосферы Земли», созданного в 1982 году вместе с представителями ведущих научно-исследовательских и проектных организаций (ЦНИИМАШ, ЦАГИ, НПО «Энергия», КБ «Южное», ЦКБМ и др.).

Решен комплекс задач по аэрогазодинамическому обеспечению международного проекта «Венера-Галлей». Впервые в расчетной практике исследованы газодинамические особенности гиперзвукового ($V \approx 80$ км/с) обтекания КА газопылевым потоком при одновременном воздействии солнечной радиации (Rijov et al., 1982; Басс и др., 1984, 1986). Выполненные исследования были использованы при выборе траектории полета КА в коме кометы Галлея, режимов работы систем ориентации и стабилизации, а также для обеспечения тепловой защиты и надежного функционирования комплекса научной аппаратуры.

Сформулированы физическая и математическая модели и создано программное обеспечение (модуль «Массоперенос») для решения трехмерных задач исследования процессов массопереноса, ответственных за формирование собственной внешней атмосферы КА сложной формы (Басс, Бразинский, 1988; Басс, 1986). Программный модуль «Массоперенос» включен в пакет прикладных программ «Высота-2» (Абрамовская и др., 1990), созданный в 1990 г. авторским коллективом с участием представителей ЦАГИ, ИТПМ СО РАН, ИТМ НАН Украины, НПО «Энергия», Московского авиационного института, ВЦ РАН, НПО «Молния» и внедренный во многих конструкторских и проектных организациях, которые занимаются разработкой и созданием ракетно-космической техники.

Выполнены численные, экспериментальные и натурные исследования газового компонента собственной внешней атмосферы КА «Космос-1643» и «Космос-2007», в ходе которых выявлена корреляция ее параметров с вариациями среднего состава верхней атмосферы Земли, обусловленными различием в гелиофизических условиях функционирования этих аппаратов (Басс и др., 1994).

Результаты численных, экспериментальных и натурных исследований динамики собственной внешней атмосферы были использованы при проектиро-

вании КА различного назначения для предотвращения повреждающего воздействия продуктов загрязнения на работу бортовых оптических систем и аппаратуры (Басс и др., 1987, 1994).

Возросшие требования к аэродинамическому обеспечению конструкторских разработок и эксплуатации КА стимулировали развитие и создание в институте современной экспериментальной базы. В 1988 г. при непосредственной финансовой поддержке НПО «Энергия» и КБ «Южное» была введена в эксплуатацию вакуумная аэродинамическая установка (ВАУ-2М) с системой криогенной откачки, не уступающая по своим параметрам лучшим зарубежным установкам замкнутого типа, работающим по рефрижераторному циклу. На данной установке получен ряд новых результатов по определению коэффициентов обмена импульсом и индикатрис рассеяния сверхзвуковых нейтральных потоков со скоростями 6—9 км/с на основных конструкционных материалах внешних покрытий КА, которые внедрены в НПО «Энергия», КБ «Южное», НПО им. С. А. Лавочкина, ЦСКБ и других организациях, занимающихся разработкой и созданием РКТ. Предложен способ и впервые измерены эффективные сечения рассеяния атомов аргона на атомах инертных газов в диапазоне энергий взаимодействия 7—17 эВ (Абрамовская и др., 1988), которые входят в число фундаментальных физических констант межмолекулярного взаимодействия. Получены новые численные и экспериментальные результаты решения прямых и обратных задач взаимодействия потока разреженного газа с обтекаемыми поверхностями и дана интерпретация данных о торможении КА различной формы в верхних слоях атмосферы Земли.

На основе совместного решения ИТМ НАН Украины, ЦСКБ, НТЦ «Наука» (г. Самара) и НИИ-ВЦ «Космос» (г. Москва), с помощью пассивных искусственных объектов наблюдения (ПИОН), выведенных на орбиту в составе КА «Ресурс-Ф» и отделенных от них попарно 25.05.89, 18.07.89 и 01.08.92, 02.08.92 г., был реализован уникальный космический эксперимент. Получены новые данные о поведении аэродинамических характеристик КА сферической формы и вариациях плотности атмосферы для различных условий солнечной активности (Басс, Тарасов, 1990). В результате проведенных экспериментов выданы рекомендации по уточнению баллистических коэффициентов космических объектов, которые используются средствами контроля космического пространства как эталонные отражатели. Конструкционные материалы внешних покрытий ПИОН были выбраны на основе анализа результатов экспериментов, выполненных на установке ВАУ-2М.

Существующая физическая аналогия между про-

цессами молекулярного и радиационного переноса в вакууме позволила адаптировать разработанное математическое и программное обеспечение применительно и к решению актуальных задач лучистого теплообмена, космической баллистики, спутниковой фотометрии. Выполнены комплексные исследования радиационных тепловых потоков к элементам конструкций сложной формы (Басс и др., 1987), фотометрических характеристик КА, а также исследования возмущений, действующих со стороны сил негравитационного происхождения на КА глобальных навигационных систем. Предложен точный численный алгоритм для определения теневых и полутеневых участков орбит (Басс, 1990; Басс, Татевян, 1990).

Исследования по плазмодинамике космических аппаратов охватывают широкий круг процессов, эффектов и явлений, проявляющихся в возмущенной телом окружающей среде, электризации наружных поверхностей, формировании собственной внешней атмосферы и торможении тел, взаимодействии КА с корпускулярными потоками, электромагнитными полями и излучением в широком энергетическом и частотном диапазонах.

Разработаны методы, средства и принципы моделирования и имитации среды на орбите с учетом условий и режимов движения, разработана концепция многокритериального подобия и сформулированы критериальные соотношения для различных видов электроплазмогазодинамического взаимодействия КА и их систем с ионосферой и магнитосферой. Разработан и создан плазмодинамический стенд, системы которого моделируют и имитируют условия взаимодействия КА с окружающей средой (Шувалов, 1995).

Стенд сочетает свойства плазменной газодинамической трубы и вакуумной безэховой камеры с коэффициентом безэховости ≈ 60 дБ, системы и средства которого моделируют и имитируют в замкнутом объеме в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы процессы и явления, протекающие в неограниченном пространстве при движении КА в ионосфере и магнитосфере, включая и облучение их электромагнитным излучением, генерируемым орбитальными или наземными радиолокационными станциями обнаружения и распознавания.

На стенде воспроизводятся (для низкоорбитальных КА):

- плазмодинамическое взаимодействие с окружающей средой и космическим пространством (обтекание КА сверхзвуковыми потоками плазмы, распределение потенциалов электрических и магнитных полей, заряженных частиц у поверхностей элементов конструкций);
- динамическое взаимодействие КА с окружающей средой (силовое и тепловое воздействие

потоков плазмы, излучения на материалы наружных поверхностей);

- воздействие микрометеоритов и пылевых образований на материалы элементов конструкций на орбите;
- рассеяние электромагнитных волн радиолокационного диапазона поверхностью КА и струями, инжектируемыми бортовыми ЭРД (искажение радиолокационных характеристик и фиктивное уменьшение КА за счет активных физико-химических и плазменных воздействий на окколообъектовую среду);
- деградация материалов и элементов конструкций при длительном (до 10 лет) воздействии потоков атомарного кислорода со скоростями 8–10 км/с, солнечного ультрафиолета и других факторов при комбинированном или последовательном воздействии;
- электрическая стойкость высоковольтных панелей солнечных батарей к воздействию потоков ионосферной плазмы и струй ЭРД.

Для высокоорбитальных КА на геостационарных, высокоэллиптических, высокоширотных и геополярных орbitах воспроизводятся:

- высоковольтная дифференциальная электризация, электрорадиационное воздействие космической среды на аппарат (процессы накопления, нейтрализация зарядов, зарядно-разрядные импульсы, пробои и т. п.);
- электрорадиационная стойкость, совместимость, эмиссионные свойства, электризуемость материалов внешних поверхностей конструкционных материалов;
- воздействие плазменных струй ЭРД на панели СВ, антенны, электромагнитная совместимость с бортовой аппаратурой, системами КА;
- пассивная и активная защита КА и их систем от воздействия окружающей среды.

На стенде для моделирования режимов и условий движения КА в ионосферной и магнитосферной плазме применяются сверхзвуковые потоки высокопозитивной плазмы с изменяемой степенью ионизации.

Методами численного и физического моделирования выявлены закономерности и механизм формирования и структура возмущенной зоны при плоском и осесимметричном обтекании электродинамически больших КА и их систем при $R/\lambda_d \geq 10^2$ (R — характерный размер КА, λ_d — радиус Дебая плазмы) в ионосфере (Шувалов, 1979, 1980).

Изучен комплекс параметров и выявлены закономерности магнитогазо- и термодинамического взаимодействия фрагментов химически чистых и конструкционных материалов наружных поверхностей КА с ионами сверхзвуковых потоков плазмы (Шувалов, 1983, 1984, 1987; Губин, Шувалов,

1991; Резниченко, Шувалов, 1989).

Изучены электрофизические характеристики, защитные свойства, электризационная стойкость и безопасность конструкционных материалов и покрытий материалов внешних поверхностей КА относительно плазмоэлектрорадиационного воздействия окружающей среды в магнитосфере (Shuvalov et al., 1992).

Выявлены противорадиолокационные свойства, эффекты и механизмы влияния искусственных плазменных образований и струй, инжецируемых с борта КА в ионосфере ЭРД, на процессы дифракции и рассеяния электромагнитных волн радиолокационного диапазона. Благодаря выявленным эффектам и явлениям рефракции и угловой интерференционной модуляции электромагнитных волн (Шувалов и др., 1982; Шувалов, 1995) теоретически и экспериментально обоснована эффективность уменьшения заметностей и значительного искажения радиолокационных характеристик КА.

Создан бортовой многоэлектродный инверсно-магнетронный преобразователь плотности для диагностики околообъектовой среды и контроля параметров ионосферной плазмы (Гадион и др., 1989). Разработана технология и создан автономный блок технологической аппаратуры плазмохимической очистки и восстановления прозрачности диэлектрических поверхностей и материалов объективов телекамер, оптических систем КА на орбите (патент РФ, 1994).

Создана бортовая система активной ионно-плазменной защиты КА от последствий высоковольтной дифференциальной электризации высокоорбитальных КА (Shuvalov, 1993).

Разработанные методы и средства обеспечивают нужды практики проектирования и эксплуатации КА в области плазмодинамики.

3. ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ

Для объектов ракетно-космической техники, элементами которых являются оболочки, стержни и пластины, наиболее характерны локальные нагрузления и контактные взаимодействия. Обеспечение работоспособности подобных конструкций при локальных нагрузках, контактных взаимодействиях и других видах сложного нагружения связано с решением комплекса специфических задач прочности и надежности.

Деформирование и несущая способность оболочечно-стержневых конструкций. Контактные взаимодействия, разнообразные локальные нагрузжения возникают при разных видах эксплуатации: при воздействии ударных волн различной физической природы, ударных и локальных нагрузжениях,

транспортировке, хранении, технологических операциях изготовления и т. д. При сложных программах нагружения в конструкциях возникают не обратимые деформации. Возникающие при этом задачи прочности можно отнести к наиболее сложным, поскольку наряду с нерегулярностью строения КА (сложная форма, подкрепления, отверстия и др.) для таких конструкций характерны и неоднородные распределения напряжений и деформаций. Интенсивные воздействия, а также особенности деформирования некоторых применяемых материалов (например, алюминиевых сплавов, композитов), приводят к появлению пластических деформаций. В тонкостенных конструкциях возникают большие перемещения. Известна значительная сложность расчета на прочность таких нелинейных систем. При этом важно не только определить напряженно-деформированное состояние, сравнивая напряжения и деформации с допустимыми, но и, поэтапно увеличивая нагрузку, проследить поведение конструкций вплоть до достижения предельной нагрузки, при которой конструкция перестает выдерживать нагрузку и разрушается. Это определяет несущую способность конструкции и при этом обязательно следует учитывать пластические свойства материала, ползучесть, геометрическую нелинейность.

В процессе нагружения в конструкции появляются поля несовершенств формы и остаточных напряжений (эти факторы могут появляться и при технологических операциях изготовления). Может произойти нарушение сплошности конструкций: возникновение трещин или отверстий. Появление несовершенств формы различной конфигурации (особенно нерегулярной структуры) и остаточных напряжений существенно усложняет задачи напряженно-деформированного состояния и критических состояний (устойчивость, предельные нагрузки) оболочечно-стержневых систем. Большие возможности для решения таких задач открывает метод последовательных нагружений, суть которого заключается в поэтапном нагружении и прослеживании реакции конструкции на это нагружение. Расчеты проводятся вплоть до достижения предельных нагрузок. В процессе расчета могут быть определены и критические бифуркационные нагрузки.

Большой цикл задач для конструкций ракетно-космической техники связан с контактными взаимодействиями элементов конструкций (взаимодействие элементов между собой, например, оболочки со шпангоутом, стрингером или ферменной конструкцией, с основаниями, обладающими различными свойствами, и др.).

Проведенные исследования включают:

- решение задач деформирования и несущей способности неоднородных оболочечно-стержневых

- конструкций с учетом пластичности и ползучести;
- разработку эффективных алгоритмов расчета и программного обеспечения на ЭВМ;
 - проведение значительного цикла уникальных экспериментальных исследований.

К наиболее важным теоретическим работам можно отнести:

- исследования напряженно-деформированного состояния элементов оболочечно-стержневых конструкций при различных локальных нагрузках;
- контактные задачи для оболочечно-стержневых систем, взаимодействующих с основаниями, обладающими различными свойствами;
- анализ несущей способности оболочечно-стержневых конструкций на основе модели идеально-пластического тела при локальном и комбинированном нагружении с применением методов теории предельного равновесия;
- исследования влияния сложных программ нагружения на бифуркационные и предельные нагрузки оболочечных систем (на основе теории течения с анизотропным — кинематически-трансляционным упрочнением);
- анализ устойчивости оболочечных систем в условиях ползучести, в том числе с учетом мгновенных пластических деформаций, полученных при различных программах нагружения;
- деформирование и предельные нагрузки упругопластических оболочечных систем с регулярными и нерегулярными полями несовершенств формы;
- критические нагрузки стержней, пластин и оболочек с остаточными напряжениями, полученными объектами космической техники при их изготовлении, отработке и эксплуатации;
- предельные нагрузки упругопластических оболочек, подкрепленных кольцевыми ребрами жесткости.

Теоретические исследования сопровождались постановкой экспериментов на моделях гладких и подкрепленных оболочек. Разработанные и изготовленные в институте специальные экспериментальные установки, часть которых защищена авторскими свидетельствами, являются уникальными.

Результаты проведенных исследований отражены в ряде монографий (Гудрамович, 1988; Моссаковский и др., 1987; Гудрамович и др., 1984; Гудрамович, Деменков, 1991; Гудрамович и др., 1990).

Исследование надежности объектов космической техники при их проектировании, отработке, изготовлении и эксплуатации. Разработаны комплексные методы расчета и подтверждения показателей безотказности и долговечности систем космической техники на этапах проектирования, отра-

ботки, изготовления и эксплуатации. Методическую основу разработанных методов оценки надежности составляют параметрические модели «нагрузка — прочность», в которых функции работоспособности описываются случайными процессами. Обоснованы нижняя и верхняя оценки вероятности пребывания случайных процессов в заданной области, которые позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью производить оценку вероятности безотказной работы (Переверзев, 1987; Переверзев и др., 1992). Исходными данными для расчетов служит функция распределения ординаты процесса и среднее число выбросов процесса из допустимой области. Решением вариационной задачи установлен вид спектральной плотности случайного процесса, для которой при заданных ограничениях среднее число выбросов максимально.

Предложены способы определения среднего числа выбросов по реализациям случайного процесса, не требующие знания корреляционной функции процесса. Установлены соотношения для оценки вероятности пребывания в заданной области процессов, полученных после функционального преобразования гауссовских процессов. Обоснованы соотношения для оценки вероятности пребывания в заданной области гауссовских нестационарных процессов, допускающих представление в виде суммы и произведения некоторых функций. Разработаны методики определения вероятности пребывания векторных гауссовских процессов большой размерности в многомерном параллелепипеде. Предложены методики оптимизации норм надежности по различным критериям эффективности, которые в ряде случаев позволяют снизить и массу конструкции. Разработаны методики оценки долговечности элементов конструкций при случайном нагружении по результатам испытаний на гармоническое нагружение (Переверзев, 1995). Исходными данными для расчетов долговечности служат кривая усталости при гармоническом нагружении, закон распределения ординаты случайного процесса и спектральная плотность процесса. Решением вариационной задачи установлены закон распределения ординаты процесса и вид его спектральной плотности, при которых показатели долговечности достигают экстремальных значений.

При разработке моделей долговечности используются физические представления о механизмах накопления повреждений. На основе синтеза теории случайных процессов и термофлюктуационной теории прочности развита вероятностная модель накопления повреждений, которая позволяет приблизенно вычислять характеристики долговечности при статическом нагружении (Переверзев, 1995). Параметры, входящие в зависимости для оценки долговечности, имеют четкий физический смысл, и

большинство из них может быть оценено без проведения испытаний на длительную прочность.

Предложена модель долговечности конструкционных материалов в условиях ползучести, базирующаяся на понятиях теории надежности, термодинамики необратимых процессов и повреждаемости (Пошивалов, 1992). Получены приближенные соотношения для определения среднего времени разрушения и его среднего квадратичного отклонения. Это позволяет расчетным путем оценивать значения коэффициента вариации наработки до отказа, который может быть использован при определении числа и длительности испытаний на надежность.

На основе биномиальной модели отказов разработаны методики определения числа контрольных испытаний на надежность с использованием априорной информации о значении коэффициента вариации наработки на отказ (Переверзев, 1990). Для наиболее часто применяемых законов распределения получены аналитические выражения для определения числа испытаний на надежность в зависимости от кратности резервирования, длительности испытаний и требуемых значений показателей надежности (Переверзев, 1995).

Разработаны методики назначения режимов ускоренных испытаний, которые позволяют значительно сократить число и длительность контрольных испытаний на надежность (Переверзев, 1990, 1995).

Предложен термодинамический критерий эквивалентности форсированного и эксплуатационного режимов нагружения, позволяющих сформулировать условия, при выполнении которых имеют место известные принципы линейного накопления повреждений и равных вероятностей (Переверзев, 1990, 1995).

Предложено соотношение, устанавливающее связь между интенсивностью отказов и скоростью роста энтропии, которое позволяет приближенно рассчитывать вероятность безотказной работы, если известны зависимости для скорости протекания деградационных процессов.

Создана диагностическая система, построенная на основе неразрушающих методов акустической эмиссии, не требующих использования внешнего источника возбуждения и позволяющая выявить наиболее опасные, т. е. развивающиеся, дефекты (Переверзев и др., 1993). Установлены корреляционные связи между параметрами акустической эмиссии и характеристиками структурного повреждения деформируемых материалов (сталей, цветных сплавов, неметаллов, многослойных композитов). Сформулированы критериальные параметры акустической эмиссии, позволяющие определять предельное состояние материалов. На основе множественного регрессионного анализа разработаны

математические алгоритмы прогнозирования прочности металлических и неметаллических материалов.

С целью получения улучшенных физико-механических характеристик материалов выполнен комплекс исследований по возбуждению самоорганизационных процессов в конструкционных материалах при сложном энергетическом воздействии, включающем одновременное использование силовых, тепловых, магнитных и ультразвуковых полей (Переверзев, 1995). Обнаружен эффект сверхупругости в алюминиевомагниевых сплавах (повышение предела текучести на 50 % при неизменной величине пластической деформации).

4. ДИНАМИКА УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ

Как правило, в условиях совместного функционирования работоспособность агрегатов ОРКТ ухудшается. Это связано с появлением дополнительных вибраций, изменением динамики управляемого движения, изменением окружающей среды и т. п. Поэтому для ОРКТ совершенствование методов отработки динамики управляемых систем в условиях, близких к реальным, является одной из актуальных задач. Исследования в области динамики и технической устойчивости управляемого движения ракет в институте развивались по следующим направлениям.

Прогнозирование нагруженности нелинейных механических систем переменной структуры. Разработаны эффективные методики расчета динамики и напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций, представляющих собой сложные стержневые, пластиначато- и оболочечностержневые системы, в том числе содержащие жидкость, и работающих в условиях как допускаемых, так и сверхнормативных нагрузений (Демин и др., 1995; Богомаз и др., 1991а). При этом предусмотрена возможность исследования динамики старта РН КА с открытых наземных или плавучих пусковых установок.

При исследовании нагруженности элементов РН и КА на участке старта учтены возможность изменения структуры системы и появления нелинейностей типа зазор, а также особенности взаимодействия РН с пусковой установкой. В процессе решения определяются перемещения, скорости, ускорения и усилия, возникающие в сечениях конструкций при старте, распределение указанных величин по длине системы в характерные моменты времени, а также экстремальные значения ускорений и усилий. Разработанные математические модели и программное обеспечение были использованы при отработке тех-

нологии старта РН «Зенит» и выборе циклограмм запуска двигателей.

Разработано математическое и программное обеспечение для моделирования на ПЭВМ колебаний и нагруженности жидкостной ракеты-носителя с КА при интенсивных внешних воздействиях, возникающих в процессе старта с самолета-носителя. При этом учитываются: упругость корпуса РН и элементов ее крепления в предстартовом положении, инерция вращения и деформации сдвига поперечных сечений РН, влияние жидкого топлива в упругих баках, нелинейный характер взаимодействия РН с опорными элементами и специфика нагружения РН как конструкции, изменяющей структуру в процессе перехода от закрепленного к свободному на рассматриваемом участке движения состоянию (Богомаз и др., 1995). Для учета подвижности жидкости разработаны математические модели, которые позволяют исследовать не только линейный, но и нелинейный характер колебаний жидкости со свободной поверхностью в баках, являющихся составной частью жидкостных РН и авиационно-космических ракетных комплексов (АКРК). Построена нелинейная модель динамики жидкости в горизонтально расположенным баке, которая дает возможность учесть взаимодействие жидкости с верхней частью емкости, возникающее, например, при разгоне АКРК по взлетной полосе и старте с самолета-носителя.

Разработана методика, позволяющая в результате численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих переходной режим движения при старте, определять интегральные характеристики нагруженности конструкции (перемещения, усилия, ускорения различных сечений), оценивать их максимальные значения, а также по найденным динамическим нагрузкам проводить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных несущих элементов РН и КА путем решения методом конечных элементов задачи теории упругости или пластичности.

Разработано испытательное оборудование для определения гидродинамических характеристик емкостей с жидкостью при поступательном движении и вращении тела относительно поперечной или продольной осей (Богомаз и др., 1991б). Испытательные стенды представляют собой платформы с кинематическими приводами, создающими гармонические колебания платформы, вращение емкости относительно вертикальной оси, а также обеспечивающие разгон и последующее торможение. Испытываемые модельные емкости изготавливаются, как правило, из оргстекла, что позволяет вести визуальные наблюдения и эффективно применять кинофотоизмерения.

Разработан датчик колебаний поверхности жид-

кости потенциометрического типа с линейной характеристикой в широком диапазоне амплитуд, обработка получаемой информации производится с использованием аналого-цифрового измерительного комплекса и ПЭВМ. Получен ряд практически важных результатов по демпфированию колебаний жидкости в емкостях сложной конфигурации с различными внутрибаковыми устройствами, распределению давлений на стенках емкостей при импульсных возбуждениях, частотам и декрементам колебаний жидкости во вращающихся относительно вертикальной оси емкостях, процессам успокоения датчиков расхода жидкости.

Обеспечение надежности и безопасности железнодорожной транспортировки конструкций РКТ. Разработаны методики оценки нагруженности элементов ОРКТ при ее транспортировке по железной дороге (Демин и др., 1984). На основе методов численного интегрирования определяются динамические характеристики в точках взаимодействия конструкции объекта и кузова экипажа. Созданы модели детерминированных, стационарных и нестационарных случайных возмущающих воздействий и модели, учитывающие характеристики деформируемого пути. Разработаны также методы расчета в частотной и временной областях, реализующие их алгоритмы и программные комплексы для прогнозирования вибронагруженности ОРКТ при транспортировке.

Созданные пространственные математические модели учитывают нелинейности, имеющие место в системе, в том числе «сухое трение», геометрическое и физическое взаимодействие колеса и рельса, работу автосцепного устройства, неровности рельсовой колеи (Diomin et al., 1994). Это позволяет рассматривать различные режимы движения экипажа: трогание с места, торможение, движение на выбеге, а также аварийные ситуации, вызванные сверхнормативными ударными нагрузками и сходом железнодорожного экипажа с рельсов. Возможность учета реальной геометрии взаимодействующих поверхностей и прогнозирование их износов позволяет дать рекомендации и нормировать нагрузки, определяющие безопасные режимы перевозки ОРКТ. Разработаны рекомендации по совершенствованию конструкций виброзащитных устройств с целью снижения ускорений, действующих на перевозимые объекты, внедрение которых позволяет существенно увеличить ресурс безопасных режимов перевозки.

Управление механическими системами. Задачи проектирования принципиально новых конструкций КА вызывают необходимость тщательного изучения характеристик их свободного и управляемого движения. При этом возникают задачи не только оценки ожидаемых характеристик, но также и

разработки методов и средств обеспечения заданных критериев эффективности управляемой системы (Алпатов и др., 1978; Мадатов и др., 1980). Эти в общем традиционные для динамики управляемых механических систем направления исследований имеют ряд особенностей при их применении к задачам обеспечения требуемых динамических характеристик в переходных режимах, а также режимах ориентации для больших космических аппаратов изменяемой конфигурации. Существенной особенностью конструкции таких аппаратов является наличие протяженных панелей, длинных штанг с массами на конце, кинематически изменяемых стержневых систем типа манипуляторов, больших отражающих поверхностей и т. п. Указанные конструктивные элементы заметно влияют на динамические характеристики КА не только за счет тел, вынесенных на большое расстояние от центрального тела, но и за счет возможного изменения его формы возмущающими факторами от тепловой и световой радиации Солнца, а также гравитационными возмущениями (Алпатов и др., 1990а).

Среди актуальных задач, решаемых применительно к большим космическим конструкциям, можно выделить следующие:

- оценку изменения формы аппарата при упругих деформациях протяженных элементов в переходных режимах движения КА (Чернявская, 1987а, б; Белоножко, Тарасов, 1987);
- оценку изменения формы аппарата в различных силовых и тепловых полях в установившихся режимах движения;
- оценку влияния перечисленных выше факторов на точность ориентации КА, а также точность наведения излучателей или приемников;
- разработку методов расчета изменения взаимного расположения заданных точек конструкции и систем аппарата в случаях, требующих точной союстировки этих точек (Ивлев, 1987);
- разработку методов расчета программных движений и динамических характеристик системы КА — полезный груз в различных режимах работы бортового манипулятора (Белоножко и др., 1986; Чернявская, 1987);
- определение параметров переходных и установившихся режимов движения КА в виде совокупности тел, соединенных связями, имеющими различные механические свойства (жесткие, упругие, односторонние и т. п.) (Алпатов, Делямуре, 1987; Алпатов и др., 1990б; Пироженко, 1989, 1990, 1992).

Результаты исследований по данным направлениям были использованы в проектах следующих космических систем:

- геостационарный КА с большой площадью солнечных батарей;

- КА с привязанными и отделяемыми телами для юстировки наземных средств слежения;
- МТКК с манипуляционным механизмом для выгрузки и погрузки полезных грузов на орбите;
- КА с развертываемой на орбите антенной конструкцией;
- КА с развертываемой кольцевой антенной большого диаметра.

Наряду с работами прикладного характера проводятся исследования, имеющие общетеоретическое значение для динамики управляемых КА. Прежде всего здесь следует отметить обширные исследования, посвященные подвижному управлению (Будник и др., 1989; Алпатов, 1993). В качестве одной из задач, приводящих к идеи управления такого вида, укажем следующую. С увеличением числа функций, возлагаемых на КА, растет и число систем, потребляющих энергию на реализацию этих функций. Возникает задача оптимального распределения энергии между потребителями при ограниченной мощности или ресурсе источника. Для задач такого рода в достаточно широкой постановке разработаны методы анализа и синтеза подвижного управления. Методы применены к синтезу подвижного управления КА по трем каналам с помощью одного управляющего органа.

Термомеханические деформации больших космических конструкций, обусловленные возмущающим воздействием солнечной радиации, могут приводить к значительнымискажениям формы поверхности. Для больших антенн космического базирования или других КА с протяженными элементами это обстоятельство существенно снижает показатели технических характеристик систем. Разработан высокоеффективный метод расчета термомеханических деформаций многоэлементных стержневых конструкций, позволяющий в численной форме по заданному температурному полю рассчитать соответствующее ему поле деформаций с учетом скорости распространения механических взаимодействий элементов конструкции аппарата.

Баллистическое обеспечение полетов РН и КА. Задача определения траектории, обеспечивающей наилучшее использование возможностей ракеты, является одной из основных задач ракетодинамики. Специфика задач оптимизации, возникающих при разработке баллистического обеспечения (БО) различного рода ракетно-космических систем, чрезвычайно многообразна. Современные ракеты-носители, как правило, снабжены специальной ступенью выведения (СВ). С появлением СВ возник ряд качественно новых задач оптимизации траекторий. В частности, одной из них является многоточечная задача оптимального управления со многими промежуточными граничными условиями.

Говоря об особенностях разработки современного БО пусков, необходимо также учитывать возможность коренного изменения основных баллистических характеристик в процессе разработки системы КА — РН. Поэтому вся система БО должна строиться на принципах гибкой системы, которая может быстро перестраиваться с целью оперативного учета непредвиденных изменений и дополнений, касающихся как конструктивных параметров КА, так и критериев эффективности, целей и задач конкретного проекта.

В любом случае, законы управления полетом и наведения ракет тесно связаны и должны вырабатываться одновременно на основе общего критерия качества в процессе решения краевой задачи с промежуточными граничными условиями при скачкообразных изменениях параметров ступени. Решение таких задач в принципе может быть получено методом динамического программирования (МДП). Однако отличие многоточечной задачи оптимизации от традиционной двухточечной задачи не сводится к чисто количественным показателям, но является настолько принципиальным, что потребовало привлечения в проектно-конструкторской практике развитого математического аппарата. Среди многочисленных направлений исследований в области проектирования БО все более заметное место начинают занимать исследования и практические разработки по применению алгебраических методов, ориентированных на достижение радикального сокращения (уплотнения) информации за счет выявления и использования теоретико-групповых свойств симметрии массивов численных данных, получаемых в процессе вычислений МДП. Естественным развитием этого направления является переход от семейства оптимальных траекторий, описывающих движение объекта в некоторых определенных условиях, к полугруппе (диоиду) оптимальных переходов, характеризующей движение объекта в разнообразных условиях (Горбунцов, 1980, 1983). На базе полученных результатов был выполнен комплекс работ (Горбунцов, 1990, 1992; Горбунцов, Оглих, 1993), заложивших принципиальные основы решения многоточечных задач оптимизации траекторий управляемых объектов с использованием диоидных методов и методов комбинаторной теории групп. Особое значение для практической реализации алгебраического подхода имеет то обстоятельство, что современный уровень развития вычислительной техники дает возможность решать теоретико-групповые задачи на ЭВМ. Наряду с разработкой теоретических основ повышения вычислительной эффективности с использованием алгебраических методов, получены оригинальные результаты в области применения ЭВМ для вычислений с полугруппами (Горбунцов, Зару-

бинская, 1985). В последнее время диоидный подход к проектированию дискретно-непрерывных траекторий получил признание и широко обсуждается (Горбунцов, 1995).

Приложения разработанной теории не ограничивались многоточечными траекториями и были распространены на задачи оптимизации многоэлементных механических систем с использованием метода суперэлементов (Горбунцов, 1988; Горбунцов, Кандзюба, 1992). Поскольку развитие космической техники приводит к возрастанию роли многоэлементных космических конструкций, то исследования были направлены и на разработку методов численного и качественного анализа динамики механических систем, включающих элементы с нулевыми массо-инерционными характеристиками (Жечев, Хорошилов, 1993; Zhechev, 1995), а также на исследование особенностей управления такого рода системами (Жечев, 1993; Zhechev, 1995).

Неизменно актуальной является также задача разработки методов оптимизации траекторий РН, особенно с нетрадиционными, но перспективными в будущем для конструкторского бюро «Южное» схемами полета, например, с использованием СВ, орбитальных разгонных блоков (ОРБ), осуществлением старта ракеты-носителя с самолета большой грузоподъемности и т. д. Отличительной особенностью СВ и ОРБ является существенно дискретный характер параметров их движения, связанный с многократным включением двигательной установки (ДУ). Решение задачи оптимизации управления движением в гравитационном поле сводится, как известно, к рассмотрению скользящих режимов, которые не дают однозначного решения. Однако, ограничиваясь конечным числом включений и выключений тяги ДУ, можно построить вполне определенное однозначное решение, тем более если представить параметры управления в физически наглядных величинах (Комаров, 1982, 1991, 1993).

Одной из важнейших на сегодняшний день является задача построения наземного автоматизированного комплекса управления КА (НАКУ КА). Традиционная для СССР многопунктная технология управления КА была основана на использовании сети распределенных на значительной территории командно-измерительных пунктов (КИП). Ограниченные территориальные возможности Украины, а также перспективы развития технологии управления КА приводят к однозначному выводу о том, что НАКУ КА Украины должен быть построен на базе однопунктной технологии управления. В настоящее время в ИТМ НАН Украины и КБ «Южное» накоплен значительный опыт решения задач определения орбит КА по результатам внешнетраекторных измерений по однопунктной технологии. Разработанные алгоритмы и программы ис-

пользуются в эксплуатации первого украинского спутника «Січ-1».

5. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В настоящее время в институте значительное внимание уделяется системному анализу тенденций и перспектив развития ракетно-космической техники.

В связи с переходом к рыночной экономике главной задачей ракетно-космической отрасли на ближайшие годы становится обеспечение выхода на национальный и международный рынки с предложениями в области аэрокосмических средств, технологий и услуг. В условиях ограниченного государственного финансирования решение этой задачи позволяет сохранить и развить наиболее перспективную конкурентоспособную часть научно-технического и производственного потенциала за счет привлечения внебюджетных источников финансирования и инвестиций.

Решение поставленной задачи в первую очередь связано с маркетинговыми исследованиями, проведенными по основным видам прикладной космической деятельности: ракетно-космическим транспортным средствам, космическим системам наблюдения Земли, системам спутниковой связи и передачи данных.

Рассмотрены основные положения методологии формирования космической программы с применением современных методов системного анализа, моделирования процессов и принятия решений, информационного обеспечения на основе сетевых технологий. Разработана структура и состав системы моделирования основных направлений космической деятельности — на основе сравнительного анализа проектов, тем, направлений создания отдельных подсистем. Разработана интерактивная модель обеспечения Украины данными дистанционного зондирования Земли. Разработана демонстрационная версия информационно-поисковой системы по основным характеристикам ракет-носителей.

Рассмотрены основные направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Украины в рамках межгосударственной космической программы в областях: научных исследований, передачи информации, дистанционного зондирования Земли, технологической деятельности в космосе, транспортно-космических систем, наземной инфраструктуры, научно-технической, экспериментальной и производственной базы. Разработаны предложения по сохранению научно-технического и производственного потенциала Украины.

Проводится анализ отечественного и мирового рынка услуг, обеспечивающих с применением космических систем и аппаратов, оценка и прогноз объема задач для космических систем в Украине и мире и на этой основе определяются роль и место Украины в мировой космической деятельности. Проводится анализ рынка услуг космической связи и определение тех услуг, которые могут быть предложены Украиной с использованием спутниковых систем связи. Проведен анализ предложений на мировом рынке услуг транспортно-космических систем, систем ДЗЗ, роли и места Украины на мировом рынке.

Исследованы информационные возможности и экономические показатели систем ДЗЗ с использованием авиационных и космических платформ — разработана методика макроэкономического анализа роли ДЗЗ в народном хозяйстве, проведен анализ потребностей в услугах ДЗЗ на внутреннем и международном рынках, проведен сравнительный анализ вариантов развития ДЗЗ для различных уровней финансирования с учетом оценки доходов на внутреннем и международном рынке. Проведен анализ мировых цен на продукцию ДЗЗ и обоснование украинских тарифов. Разработаны основные положения и принципы построения земельной геоинформационной системы, определена роль средств ДЗЗ в ее функционировании. Предложена концепция создания совместной системы ДЗЗ Украины и Российской Федерации.

Проведен анализ направлений космической деятельности в мире — определены основные тенденции развития мировой космонавтики (цели, задачи, основные направления деятельности, тенденции развития каждого направления), цели и задачи космической деятельности Украины (с учетом роли и места космической деятельности для страны, состояния и направлений экономического развития). Рассмотрены основные направления и формы организации космической деятельности в ведущих космических державах мира. Проведен анализ мировых тенденций развития космических систем и аппаратов — спутниковых и транспортных космических систем. Рассмотрены основные тенденции развития систем военного назначения, выявлены основные тенденции в области обеспечения контроля особы опасных объектов и прогноза ситуаций с использованием авиакосмических технологий.

Сформулированы предложения по формированию национальной космической политики Украины — в соответствии с общей целевой направленностью в политической, дипломатической, военной, социальной, экономической областях с учетом сложившейся экономической ситуации в Украине, тенденций развития мировой космонавтики, роли и места Украины в мировом космическом сообществе.

Выработаны основные положения по развитию международного сотрудничества — определены возможности, цели, задачи, направления и приоритеты международного сотрудничества, основные черты государственной политики в области международного сотрудничества, стратегические направления международного сотрудничества.

Разработаны предложения по анализу космического потенциала Украины — на основе анализа его состояния, основной кооперации, возможности проведения космической деятельности национальными средствами и в международной кооперации. Предложены основные направления структурной перестройки отрасли. Определены основные черты государственной политики в области поддержания и развития потенциала. Определены основные направления экономической политики отрасли.

Предложены основные концептуальные положения развития транспортных космических систем в Украине — исходя из главной, стратегической цели развития транспортных космических систем Украины — стабильного и эффективного обеспечения решения задач космической программы Украины в части выведения космических средств. Проведен анализ возможных обликов перспективных транспортно-космических систем с учетом конкурентной обстановки и требований рынка, разработаны предложения по формированию облика перспективных транспортно-космических систем с учетом состояния научно-технического и производственного потенциала, конкурентной обстановки и требований рынка. Проведен анализ существующих и перспективных грузопотоков для различных космических систем, определены требования к носителям.

Результаты исследований нашли отражение в проекте Национальной космической программы Украины.

6. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В институте проводится значительная работа по созданию и внедрению в ракетно-космическую технику новых технологий и приборов.

1. Разработана и внедрена технология для кавитационной импульсной гидроабразивной обработки поверхностей металлов, предназначенная для удаления заусенцев с обработанных деталей РКТ (обечайек топливных баков, рубашек камер сгорания ЖРД и др.). Внедрение технологии в отрасли позволило резко улучшить качество обрабатываемых поверхностей, ликвидировать ручной труд и в десятки раз повысить производительность труда на этой операции (А. с. 1021584).

2. Цикл исследований в области высоких плотностей энергии связан с разработкой технологии получения жаростойких покрытий на теплонапряженных поверхностях ЖРД средней и малой тяги и повышении стойкости конструкционных материалов в условиях импульсного нагружения факторами различной физической природы. Основой технологии нанесения жаростойких покрытий является конденсация металлической плазмы на защищаемой поверхности. Металлическая плазма образуется при вакуумно-дуговом испарении материала, используемого для получения жаростойкого покрытия. Оптимальные условия роста плазмоконденсатного покрытия обеспечиваются необходимой геометрией плазменных потоков, задаваемой конструкцией испарителя. Для защиты бронзовой поверхности камер сгорания от высокотемпературной эрозии в области критического сечения хорошо себя зарекомендовало многослойное покрытие, получаемое нанесением чередующихся слоев хромо-никеле-вольфрамового сплава и малолегированного хрома. С целью получения силицидно-молибденового защитного покрытия на ниобиевых камерах сгорания жидкостных двигателей малой тяги (от 0.5 до 20 кгс) разработана технология нанесения плазмоконденсатного молибдена. Двигатели с таким покрытием используются в системах ориентации третьей ступени ракеты «Циклон», КА «Океан О», и в разработках КБ «Химмаш».

3. Разработана технология гальванопластического метода формирования при изготовлении антенных насадок, облучателей, применяемых в антенно-волновых СВЧ-технике для улучшения направленности излучаемого потока электромагнитной энергии. Внедрение технологии позволило значительно повысить качество изделий и сократить по сравнению с традиционными методами в 3-4 раза материалоемкость и трудозатраты. Использованные в ГКБ «Южное» устройства применены на космическом аппарате «Океан».

4. Разработана технология изготовления высокочастотных антенн сложной формы (зеркала антенн, волноводы) способом гальванопластики (электролитического формования), которая позволила отказаться от прежних металлоемких способов изготовления деталей (точного литья, механической обработки) и перейти к безотходной технологии, уменьшить расход металла в 2, 3 и более раз, расход электроэнергии — в 6—8 раз.

5. Разработаны датчики измерения мгновенных значений расходов жидкости (индуктивный Д60; Д100), предназначенные для измерения быстроизменяющихся расходов маловязких жидкостей в трубопроводах. Внедрение датчиков измерения в ГКБ «Южное», КБ «Химмаш», НПО «Энергия» в корне изменили технологию отработки насосов

ЖРД, повысили качество и информативность испытаний в условиях как самовозбуждающихся низкочастотных кавитационных автоколебаниях, так и вынужденных колебаниях расходов жидкости на входе и выходе из насоса (Пилипенко, 1989).

6. Проводимые в Институте исследования режимов работы многофункциональных СВЧ-устройств были использованы в системах управления и связи РКТ. Разработанные физические и технологические принципы, лежащие в основе создания разнообразных функциональных СВЧ- и КВЧ-устройств-усилителей, широкодиапазонных генераторов, коммутаторов, управляющих и преобразовательных модулей, а также отдельных элементов с использованием полупроводниковых элементов с отрицательной дифференциальной проводимостью N- и S-типов, опубликованы в ряде монографий (Костылев, Шкут, 1978; Костылев и др., 1987, 1990). Прикладные исследования были направлены на разработку специальной аппаратуры для КБ «Южное». Из внедренных разработок наибольший интерес представляет селективный измеритель мощности, используемый для измерения диаграммы направленности антенн. Отличительной особенностью приемника является независимость коэффициента передачи активного элемента преобразователя от уровня входного сигнала в динамическом диапазоне 100 dB, а также то, что преобразование входного сигнала обеспечивается с большим усилием, позволяющим реализовать высокую чувствительность (10^{-12} Вт) (Яцуненко и др., 1988).

7. В настоящее время разработаны конструкции и технология изготовления бортовых малогабаритных элементов и узлов приемо-передающих модулей миллиметрового диапазона длин волн с использованием метода многослойной гальванопластики (в качестве материала несущей конструкции используется сплав железо-никель, т. е. инвар). Изготовленные таким образом элементы и узлы обладают значительно меньшими весогабаритными параметрами и повышенной надежностью, что достигается в основном за счет исключения стыковочных узлов. Например, антенна, гетеродин, циркулятор и смеситель могут быть изготовлены в едином гибридно-интегральном исполнении (Yatsunenko et al., 1995).

Институт вносит свой вклад в развитие теоретических основ ракетно-космической техники. Тематика института охватывает такие разделы классической механики, как «Механика жидкости, газа и плазмы», «Механика деформированного твердого тела», «Общая механика». Значительное внимание уделяется прикладной и вычислительной математике, системному анализу и т. д.

В заключение отмечу, что при подготовке статьи были использованы материалы, представленные ру-

ководителями научных направлений по рассматриваемой тематике. Всем им я благодарен за содействие и помощь, в особенности В. А. Задонцеву, Н. Д. Коваленко, В. С. Гудрамовичу, Е. С. Переверзеву, В. И. Тимошенко, В. П. Бассу, В. А. Шувалову, Г. И. Богомазу, А. П. Аллатову, В. В. Горбунцову, В. К. Дорошевичу, В. И. Лисиченко, Е. Ф. Прохорову.

- А. с. 1021584 СССР. Способ гидрообразной обработки деталей / В. В. Пилипенко, В. А. Дрозд, В. И. Иванов. — Опубл. 00.83, Biol. № 21.
- Абрамовская М. Г., Басс В. П., Петров О. В., Токовой С. В. Измерение полных сечений рассеяния инертных газов в диапазоне относительных энергий 77—017 эВ // Журн. прикл. мех. и техн. физики.—1988.—4.—С. 28—32.
- Абрамовская М. Г., Басс В. П., Бразинский В. И. и др. Пакет прикладных программ «Высота-2» (описание применения). — М.: ОФАП МАП, 1990.—175 с.
- Аксютенко А. Н., Акулов А. М., Басс В. П. и др. Свободномолекулярная аэрогазодинамическая установка с индукционным плазменным ускорителем // Тез. докл. IV Всесоюз. шк. по методам аэрофизических исследований. — Новосибирск, 1986.—С. 202.
- Аллатов А. П. Подвижное управление системами с сосредоточенными параметрами // Техн. механика.—1993.—Вып. 1.—С. 3—9.
- Аллатов А. П., Делямуре В. П. Модель управляемого движения системы твердых тел с неудерживающими связями // Прикл. механика.—1987.—23, № 2.—С. 106—112.
- Аллатов А. П., Драновский В. И., Салтыков Ю. Д., Хорошилов В. С. Динамика космических аппаратов с магнитными системами управления / Под ред. В. М. Ковтуненко. — М.: Машиностроение, 1978.—200 с.
- Аллатов А. П., Белоножко П. А., Пироженко А. В., Шабохин В. А. Об эволюции ротационного движения связки двух тел на орбите // Космич. исследования.—1990а.—Вып. 5.—С. 692—701.
- Аллатов А. П., Белоножко П. А., Горбунцов В. В. и др. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации. — Киев: Наук. думка, 1990б.—256 с.
- Басс В. П. Расчет обтекания тел потоком сильно разреженного газа с учетом взаимодействия с поверхностью // Изв. АН СССР. Сер. Мех. жидкости и газа.—1978.—№ 5.—С. 117—123.
- Басс В. П. Некоторые результаты взаимодействия потока разреженного газа с поверхностью ИСЗ и интерпретация данных о его торможении // Космич. исследования.—1980.—18, № 3.—С. 455—458.
- Басс В. П. Газодинамические аспекты формирования собственной атмосферы космических аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы // Наблюд. искусств. спутников Земли: Публ. науч. результатов сотрудничества Интеркосмос.—1985.—№ 24.—С. 158—179.
- Басс В. П., Бразинский В. И. Численные алгоритмы для расчета процессов массопереноса в сильно разреженном газе // Журн. выч. матем. и матем. физики.—1988.—28, № 7.—С. 1078—1093.
- Басс В. П., Бразинский В. И., Карягин В. П. и др. Расчет газовой обстановки около аппарата «Вега» во время пролета комы // Аэродинамика тепло- и массообмен в разр. газе: Тр. VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. — М., 1987.—С. 3—7.
- Басс В. П., Бразинский В. И., Карягин В. П. и др. Аэродинамические характеристики аппарата, предназначенного для ис-

- следования кометы Галлея // Прикладные вопросы аэродинамики летательных аппаратов. — Киев: Наук. думка, 1984.—С. 11—15.
- Басс В. П., Бразинский В. И., Калягин В. П. и др. Результаты численного моделирования процессов массопереноса в окрестности космического аппарата «Спектр» // Техн. механика.—1994.—Вып. 3.—С. 16—19.
- Басс В. П., Ефимов Ю. П., Петров О. В. и др. Экспериментальное исследование параметров взаимодействия гиперзвукового нейтрального потока аргона с обтекаемыми поверхностями // Взаимодействие разреженных газов с поверхностями: Тр. VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. — М., 1986.—С. 99—103.
- Басс В. П., Тарасов Ю. В. «В полете — «ПИОНЫ» // Авиация и космонавтика.—1990.—№ 5.—С. 40—41.
- Басс В. П., Татевян С. К. Возмущения орбиты спутника «Эталон» вследствие сил негравитационного происхождения // Астрон. журн.—1990.—67, № 6.—С. 1315—1325.
- Белоножко П. А., Жечев М. М., Тарасов С. В. К математическому моделированию динамики системы двух тел, связанных упругим многозвездником // Прикл. механика.—1986.—22, № 7.—С. 96—103.
- Белоножко П. А., Тарасов С. В. Математическое моделирование динамики космического аппарата с упругими элементами // Космич. наука и техника.—1987.—Вып. 2.—С. 18—22.
- Богомаз Г. И., Каледин В. О., Соболевская М. Б. Оценка нагруженности конструкции летательного аппарата, содержащего полости с жидкостью, при нестационарных режимах движения // Космич. наука и техника.—1991а.—Вып. 6.—С. 43—49.
- Богомаз Г. И., Демин Ю. В., Коновалов Н. А. и др. Определение гидродинамических характеристик баков сложной конфигурации // Космич. наука и техника.—1991б.—Вып. 6.—С. 54—58.
- Богомаз Г. И., Демин Ю. В., Соболевская М. Б. Математическое моделирование нагруженности ракеты-носителя авиационно-космического комплекса при старте // Аэрокосмическая индустрия и экология: Тез. докл. I Междунар. симп. — Киев: Киев. гос. ун-т, 1995.—С.
- Будник В. С., Алпатов А. П., Белоножко П. А., Свириденко Н. Ф. Применение принципа подвижного управления при создании космических станций // 140th Congress of the International Astronautical Federation. October 7—12, 1989, Malaqa, Spain.
- Гадион В. Н., Гужва Е. Г., Шувалов В. А. и др. Результаты исследований собственной внешней атмосферы (СВА) в окрестности орбитального комплекса «Мир» // Динамика разреженных газов: Тез. докл. X Всесоюз. конф. — М., 1989.—С. 198.
- Горбунцов В. В. Алгебраический подход к решению одного класса экстремальных комбинаторных задач // Докл. АН УССР. Сер. А.—1980.—№ 3.—С. 45—48.
- Горбунцов В. В. Теоретико-групповой подход к решению комбинаторных задач оптимизации. — Киев: Наук. думка, 1983.—192 с.
- Горбунцов В. В. Теоретико-групповой метод оптимизации многоэлементных систем // Космич. наука и техника.—1988.—Вып. 3.—С. 22—27.
- Горбунцов В. В. Классификация решений задач оптимизации дискретных стационарных процессов на основе диоидов // Перманенты: теория и приложения. — Красноярск, 1990.—С. 17—30.
- Горбунцов В. В. Расчет и оптимизация методом «элементарной ячейки» дискретных программ управления движением КЛА // Космич. наука и техника.—1992.—Вып. 6.—С. 33—40.
- Горбунцов В. В., Зарубинская А. Л. Программа оптимизации дискретного стационарного процесса полугрупповым методом. — Днепропетровск, 1985.—66 с.—(Деп. в ГосФАП 24.12.85, № 150860000934).
- Горбунцов В. В., Кандзюба С. П. Теоретико-групповые свойства метода суперэлементов и их практическое применение // Динамика и управление движением механических систем. — Киев: Наук. думка, 1992.—С. 121—132.
- Горбунцов В. В., Оглих В. В. Алгебраический подход к решению динамической задачи коммивояжера // Техн. механика.—1993.—Вып. 1.—С. 53—61.
- Григорьев Ю. В., Пилипенко В. В. Влияние динамических свойств обратных течений на входе в насос на устойчивость насосных систем и частоты колебаний // Гидрогазодинамика техн. систем. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 3—7.
- Губин В. В., Шувалов В. А. МГД-торможение и теплообмен тела в сверхзвуковом потоке частично ионизованного газа // Журн. прикл. мех. и техн. физики.—1991.—№ 1.—С. 15—19.
- Гудрамович В. С. Устойчивость упругопластических оболочек. — Киев: Наук. думка, 1988.—288 с.
- Гудрамович В. С., Деменков А. Ф. Упругопластические конструкции с несовершенствами формы и остаточными напряжениями. — Киев: Наук. думка, 1991.—174 с.
- Гудрамович В. С., Герасимов В. П., Деменков А. Ф. Предельный анализ элементов конструкций. — Киев: Наук. думка, 1990.—136 с.
- Гудрамович В. С., Герасимов В. П., Коноваленков В. С., Попшивалов В. П. Предельные состояния оболочек при сложном нагружении и ползучести материалов. — Киев: Наук. думка, 1984.—254 с.
- Демин Ю. В., Длугач Л. А., Коротенко М. Л., Маркова О. М. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей. — Киев: Наук. думка, 1984.—160 с.
- Демин Ю. В., Богомаз Г. И., Науменко Н. Е. Динамика машиностроительных и транспортных конструкций при нестационарных воздействиях. — Киев: Наук. думка, 1995.—188с.
- Жечев М. М. Оптимальное подвижное управление малыми поворотами КЛА.—Ч. I, Оптимальное управление // Автоматика и телемеханика.—1995.—№ 8.—С. 74—82, Ч. II, Оптимальный синтез // Автоматика и телемеханика, 1995, № 9.—С. 22—29.
- Жечев М. М., Хорошилов В. С. К анализу движения одного класса механических систем с разрывной неоднородностью // Прикл. механика.—1993.—29, № 3.—С. 86—89.
- Жечев М. М. Подвижное управление многозвездным механизмом с безмассовыми звеньями // Техн. механика.—1993.—№ 1.—С. 23—31.
- Ивлев О. Г. Метод анализа динамического взаимодействия управляемых поворотных элементов космического аппарата // Космич. наука и техника.—1987.—С. 14—18.
- Коваленко Н. Д. Управление сверхзвуковыми газовыми потоками в реактивных соплах. — Киев: Наук. думка, 1992.—204 с.
- Коваленко Н. Д., Стрельников Г. А., Гора Ю. В., Гребенюк Л. З. Газодинамика сверхзвуковых укороченных сопел. — Киев: Наук. думка, 1993.—224 с.
- Комаров В. Г. Об одном возможном подходе к исследованию оптимальных траекторий перехода между компланарными орбитами // Космич. исследования на Украине.—1982.—Вып. 16.—С. 70—73.
- Комаров В. Г. Оптимальные траектории перехода, состоящие из конечного числа активных и пассивных участков // Космич. наука и техника.—1991.—Вып. 6. С. 30—33.
- Комаров В. Г. Особенности оптимальных траекторий перехода при наличии бестяговых участков // Техн. механика.—1993.—Вып. 1.—С. 37—40.
- Костылев С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках. — Киев: Наук. думка, 1978.—204 с.
- Костылев С. А., Гончаров В. В., Соколовский И. И., Челядин А. В. Полупроводники с объемной отрицательной про-

- водимостью в СВЧ полях. — Киев: Наук. думка, 1987.—143 с.
- Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Явления токопереноса в тонкопленочных арсенидгаллиевых структурах. — Киев: Наук. думка, 1990.—144 с.
- Мадатов Г. Л., Шичанин В. Н., Горбунцов В. В. и др. Прикладные методы исследования управляемых механических систем. — Киев: Наук. думка, 1980.—192 с.
- Моссаковский В. И., Гудрамович В. С., Макеев Е. М. Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1987.—216 с.
- Пат. РФ № 2022053. Устройство для ионно-плазменной чистки диэлектрических поверхностей в вакууме и космическом пространстве / Григорьев Е. Г., Лавренюк С. Л., Шувалов В. А. и др. — Опубл. 30.10.93. // Открытия. Изобретения.—1993.—№ 2.—С. ??.
- Переверзев Е. С. Случайные процессы в параметрических моделях надежности. — Киев: Наук. думка, 1987.—240 с.
- Переверзев Е. С. Надежность и испытания технических систем. — Киев: Наук. думка, 1990.—328 с.
- Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долго вечноности. — Киев: Наук. думка, 1995.—358 с.
- Переверзев Е. С., Чумakov Л. Д. Параметрические модели отказов и методы оценки надежности технических систем. — Киев: Наук. думка, 1989.—184 с.
- Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф., Филей Г. П. Случайные сигналы в задачах оценки состояния технических систем. — Киев: Наук. думка, 1992.—252 с.
- Переверзев Е. С., Борщевская Д. Г., Эвина Т. Я. Прогнозирование прочности органопластика методом акустической эмиссии при статистическом нагружении // Техн. диагностика и неразрушающий контроль.—1993.—№ 1.—С. 43—45.
- Пилипенко В. В. О механизме самовозбуждения кавитационных автоколебаний в системе шнекоцентробежный насос—трубопроводы на режимах без обратных токов // Космич. исслед. на Украине.—1975.—Вып. 7.—С. 3—10.
- Пилипенко В. В. Влияние потерь энергии при входе жидкости в межлопаточные каналы осевого шнекового преднасоса на устойчивость системы питающей трубопровод—насос // Кавитац. автоколебания в насос. системах. — Киев: Наук. думка, 1976а.—Ч. I. С. 25—29.
- Пилипенко В. В. Теоретическое определение упругости и объема кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах на режимах без обратных токов // Изв. АН ССР. Энергетика и трансп.—1976.—№ 5.—С. 129—138.
- Пилипенко В. В. Энергетический подход к исследованию кавитационных автоколебаний в насосных системах // Космич. исследования на Украине.—1977.—Вып. 10.—С. 68—73.
- Пилипенко В. В. Теоретический анализ системы шнекоцентробежный насос—трубопроводы с учетом сосредоточенных упругостей на входе и выходе из насоса // Рабочие процессы в шнекоцентробежных насосах. — Киев: Наук. думка, 1979.—Вып. 10.—С. 86—92.
- Пилипенко В. В. К определению частот колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором // Динамика насосных систем. — Киев: Наук. думка, 1980.—С. 115—119.
- Пилипенко В. В. Кавитационное течение закрученного потока жидкости в круглой трубе // Математические модели рабочих процессов в гидропневмосистемах. — Киев: Наук. думка, 1981а.—С. 3—12.
- Пилипенко В. В. К определению амплитуд колебаний давления, создаваемых кавитационным генератором // Математические модели рабочих процессов в гидропневмосистемах. — Киев: Наук. думка, 1981б.—С. 18—24.
- Пилипенко В. В. Определение скорости распространения возмущений в трубопроводе при вращательно-поступательном движении жидкости с образованием кавитационной полости // Гидрогазодинамика энерг. установок. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 3—5.
- Пилипенко В. В. О возможности повышения продольной устойчивости ракет на жидком топливе // Техн. механика ракет.-косм. систем: Сб. науч. тр. — Днепропетровск: Изд-во ИТМ АН Украины, 1986.—Вып. 1.—С. 5—16.
- Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания. — Киев: Наук. думка, 1989.—316 с.
- Пилипенко В. В., Задонцев В. А. Об одном механизме автоколебаний в гидравлической системе с кавитирующей трубкой Вентури // Кавитац. автоколебания в насос. системах. — Киев: Наук. думка, 1976.—Ч. I.—С. 93—103.
- Пилипенко В. В., Кваша Ю. А. Кавитационное обтекание решетки пластин // Изв. АН ССР. Энергетика и трансп.—1991.—№ 3.—С. 139—143.
- Пилипенко В. В., Момот В. Е. Численное моделирование пространственного вязкого кавитационного течения в лопастных гидромашинах // Доп. НАН Украины. Математика, природознавство, технічні науки.—1995.—№ 4.—С. 41—44.
- Пилипенко В. В., Семенов Ю. А. Расчет статических характеристик шнекоцентробежных насосов с учетом кавитационных явлений // Изв. РАН. Энергетика.—1994.—№ 3.—С. 104—112.
- Пилипенко В. В., Чалый П. П. О моделировании продольных колебаний корпуса ракеты на огневом стенде // Техн. механика ракет.-косм. систем: Сб. науч. тр. — Днепропетровск: Изд-во ИТМ АН Украины, 1986.—Вып. 1.—С. 48—58.
- Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натализон М. С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. — М.: Машиностроение, 1977.—352 с.
- Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Григорьев Ю. Е., Белецкий А. С. О влиянии нелинейностей, обусловленных кавитационными явлениями в насосах, на ограничение амплитуд продольных колебаний // Тр. постоянно действующего юбил. науч.-техн. семинара. — Саратов: Изд-во СВВКИ-УРВ, 1983.—Вып. 15.—С. 61—63.
- Пироженко А. В. Пространственное движение двух тел с упругой неудерживающей связью // Прикл. механика.—1989.—25, № 11.—С. 100—106.
- Пироженко А. В. Уравнения возмущенного движения материальной точки на упругой связи // Прикл. механика.—1990.—26, № 5.—С. 126—129.
- Пироженко А. В. Управление движением связи двух тел в гравитационном поле изменением длины связи // Космич. исследования.—1992.—30, вып. 4.—С. 473—482.
- Пошивалов В. П. Длительная прочность и долговечность элементов конструкций. — Киев: Наук. думка, 1992.—118 с.
- Резниченко Н. П., Шувалов В. А. О передаче энергии атомарных ионов сверхзвукового потока частично диссоцииированного газа поверхности твердого тела // Журн. прикл. мех. и техн. физики.—1989.—№ 6.—С. 11—19.
- Тимошенко В. И. Сверхзвуковые течения вязкого газа. — Киев: Наук. думка, 1987.—187 с.
- Тимошенко В. И., Лиманский А. В. Технология численного решения на ЭВМ задач газовой динамики. — Киев: Наук. думка, 1985.—231 с.
- Чернявская С. С. К исследованию динамики систем тел, содержащих протяженные упругие элементы, в центральном поле сил // Космич. наука и техника.—1987а.—Вып. 2.—С. 28—31.
- Чернявская С. С. К моделированию динамики упругого манипулятора // Изв. АН ССР. Механика твердого тела.—1987б.—№ 3.—С. 41—47.
- Шичанин В. Н., Кулик А. Д. О гармонической линеаризации нелинейностей при двухчастотном входном сигнале // Изв. АН ССР. Техническая кибернетика.—1976.—№ 4.—С. 170—179.
- Шувалов В. А. Обтекание сферы потоком неравновесной разреженной плазмы // Геомагнетизм и астрономия.—1979.—19, № 6.—С. 994—1000.

- Шувалов В. А. Структура ближнего следа за цилиндром в потоке неравновесной разреженной плазмы // Геомагнетизм и аэрономия.—1980.—**20**, № 3.—С. 425—429.
- Шувалов В. А. Об аккомодации энергии газовых ионов на поверхности поликристаллов // Журн. прикл. мех. и техн. физики.—1983.—№ 6.—С. 17—25.
- Шувалов В. А. О влиянии собственного магнитного поля на структуру возмущенной зоны около тела в потоке разреженной плазмы // Журн. техн. физики.—1984.—**54**, № 6.—С. 1107—1113.
- Шувалов В. А. Об обмене энергией и импульсом ионов потока разреженной плазмы с поверхностью, покрытой тонким слоем диэлектрика // Теплофизика высоких температур.—1987.—**25**, № 4.—С. 644—648.
- Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995.—180 с.
- Шувалов В. А., Чурилов А. Е., Быстрицкий М. Г. О влиянии распределения заряженных частиц на рассеяние электромагнитных волн металлическим телом в потоке разреженной плазмы // Журн. техн. физики.—1982.—**52**, № 2.—С. 10—16.
- Яцуненко А. Г., Орехов Б. В., Суханов А. И. Измеритель мощности селективный ИНС-84 // Тр. 11-й Всесоюз. школы-семинара «Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками». — Саратов, 1988.—С. 132—133.
- Bass V. P. Some results of numerical solutions, laboratory and flight experiments in the field of rarefied gas dynamics // Rarefied Gas Dynamics: Abstr. 17th Intern. Symp. RGD, July 8—14, Aachen, Germany, 1990. — 1990.—Vol. 1.—P. 275—277.
- Bass V. P. Numerical Modelling of Mass Transfer Processes Near-Spacecrafts // First Intern. Workshop «Numerical Method in RGD», Varna, 12—16 September, 1991.
- Diomin Y. V., Kovtun E. N., Markova O. M. Self-excited vibrations of Railway Vehicle with Dry Friction Units // Vehicle System Dynamics.—1994.—**23**, N 1.—P. 71—83.
- Gorbuntsov V. V. Classification of Optimization Problems for Discrete Stationary Processes: a Semigroup Approach // Intern. Conf. «Semigroups and Their Applications, Including Semigroup Rings» in Honour of E. S. Ljapin. St.-Petersburg, Russia, 19—30 June, 1995.: Abstracts. — 1995.—P. 17—18.
- Martin A. B., Kessel R. L., Svenes K., et al. Spacecraft-plasma interactions and electromagnetic effects in Leo and polar orbits. ESTEC Contract N 7989/88 NL/PB(SC) ESA CR(P) — 3025, 1990.—Vol. 1.
- Pilipenko V. V. Providing the LPRE-Rocket Structure Dynamic Compatibility // AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conf. and Exhibit (June 28—30, 1993).—Monterey: CA, 1993.—P. 10.
- Pilipenko V. V., Semenov Yu. A., Drozd V. A. Dynamic Properties of a Cavitating Inducer-type Centrifugal Pump with Flexible Screw Fastening // The Second Russian-Sino Symp. on Astronautical Science and Technique: the Symposium dedicate to 50th Anniversary of Samara Aviation Institute Founding (June, 30—July, 4, 1992). — Samara, 1992a.—P. 51.
- Pilipenko V. V., Zadontsev V. A., Grigoriev Yu. E., Dovgot'ko N. I. POGO-stability Analysis in Frequency Domain: Effect of Cavitation in Axial Inducers // The Second Russian-Sino Symp. on Astronautical Science and Technique: the Symposium dedicate to 50th Anniversary of Samara Aviation Institute Founding (June, 30—July, 4, 1992). — Samara, 1992b.—P. 64.
- Podolinniy A. M., Izhko V. A., Zhechev M. M. et al. Single-Station Technology of Ballistics and Navigation Support for SC SICH-1 Mission Control // Proc. of Fourth Ukraine-Russia-China Symp. on Space Science and Technology 12—17 September 1996. — Kiev, 1996.—Vol. 1.—P. 516—518.
- Rijov Yu. A., Bass V. P., Kovtunenko V. M., et al. Aerodynamic Problems of Space Probes in Comet Atmosphere // Rarefied Gas Dynamic: 13 Intern. Symp. on Rarefied Gas Dynamic. — New York: Plenum Press, 1982.—Vol. 1.—P. 503—511.
- Shuvalov V. A. Efficiency of neutralization of high-volt bulk and surface charges by electric reaction propulsion systems fluxes // Abst. II-nd German — Russian conf. of electric propulsion engines and their technical applications. — Moscow, 1993.—P. 210.
- Shuvalov V. A., Gubin V. V., Priymak A. I., et al. Charging—discharging processes and electrophysical characteristics of dielectric materials of spacecraft outer surface // Abst. Inter. conf. «Problems of spacecraft-environment interactions». — Novosibirsk, 1992.—P. 44.
- Yatsunenko A. G., Privalov E. N., Prokhorov E. F. Solid-state millimeter-wave devices based on waveguide integration technology // Proc. Intern. Symp. on Recent Advances in Microwave Technology. — Kiev, 1995.—P. 155—158.
- Zhechev M. M. Dynamic Equations for Loaded Space Manipulators in Excessive Systems of Independent Generalized Coordinates // Proc. of ICIAM-95, Hamburg, Germany, June 3—7, 1995.—P. 489.

INDUSTRIAL MECHANICS IN THE SPACE ROCKET RESEARCH: DEVELOPMENTS OF THE INSTITUTE OF INDUSTRIAL MECHANICS OF THE NAS UKRAINE AND THE NATIONAL SPACE AGENCY OF UKRAINE

V. V. Pilipenko

We describe some results of collaborative engineering of space rocket systems in the Institute of Industrial Mechanics, NAS Ukraine, and the National Space Agency of Ukraine. The lines of further development of industrial mechanics in the construction of rocket carriers and spacecraft are laid down within the scope of the State Space Program of Ukraine.