

В. В. ПИЛИПЕНКО, Н. И. ДОВГОТЬКО, О. В. ПИЛИПЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Приведен обзор основных результатов исследований в области динамики жидкостных ракетных двигательных установок и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, полученных коллективом сотрудников отдела динамики гидромеханических систем Института технической механики НАН Украины и НКА Украины.

Наведено огляд основних результатів досліджень в області динаміки рідинних ракетних двигунних установок та поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв, які було отримано колективом співробітників відділу динаміки гідромеханічних систем Інституту технічної механіки НАН України і НКА України.

The main results of studies in the liquid rocket propulsion system dynamics and the longitudinal (POGO) stability of liquid launch vehicles, carried out by the research team of the Hydromechanical Systems Dynamics Department of the Institute of Technical Mechanics, NASU&NSAU, are reviewed.

Введение. В 1966 г. в г. Днепропетровске по инициативе М. К. Янгеля было организовано новое академическое научное подразделение – Сектор проблем технической механики в составе Днепропетровского филиала института механики АН УССР [1, 2]. Одним из научных направлений Сектора была определена динамика жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ).

Как известно, создание жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) различного назначения невозможно без успешного решения целого ряда весьма сложных задач динамики двигателей, возникающих на том или ином этапе развития ракетного двигателестроения. К таким задачам относятся запуск и отключение двигателей, устойчивость рабочего процесса по отношению к высокочастотным и низкочастотным колебаниям, анализ аварийных исходов испытаний и др.

Исследования динамики ЖРДУ получили дальнейшее развитие в отделе динамики двигательных установок летательных аппаратов Днепропетровского отделения Института механики АН УССР (ДОИМ АН УССР). Это отделение было создано в 1968 г. на базе Сектора. Отдел динамики двигательных установок был организован в 1970 г. по инициативе д.т.н. В. В. Пилипенко и при поддержке Министерства общего машиностроения СССР после успешного внедрения на одном из его предприятий полученных под руководством и при непосредственном участии В. В. Пилипенко результатов научно-исследовательских работ по разработке средств устранения кавитационных колебаний в системах питания ЖРД. Со времени организации этого отдела в 1970 г. по настоящее время его возглавляет В. В. Пилипенко, академик НАН Украины, д.т.н., профессор. Под его руководством и при непосредственном участии в отделе развивается оригинальное научное направление исследований динамики ЖРДУ и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах ЖРД. Научно-методические разработки отдела были ориентированы на решение проблем ракетно-космической техники в «КБ «Южное» (в настоящее время ГП «КБ «Южное») и основывались на фундаментальных и прикладных исследованиях по этому важному научному направлению. Ниже приведены основные результаты проведенных исследований, которые были использованы в ГП «КБ «Южное» при создании и модернизации жидкостных РН.

© В.В. Пилипенко, Н.И. Довготько, О.В. Пилипенко, 2011

Техн. механика. – 2011. – № 4.

За циклы работ в области динамики ЖРДУ и продольной устойчивости жидкостных ракет авторам настоящей статьи в разные годы присуждалась премия НАН Украины имени М. К. Янгеля.

Разработка и развитие теории низкочастотных кавитационных автоколебаний в системах питания жидкостных ракетных двигателей. При определенных условиях кавитация в насосных агрегатах ЖРД может вызвать самовозбуждающиеся низкочастотные (от 4 до 50 Гц) автоколебания давлений и расходов компонентов топлива. Кавитационные автоколебания затрудняют, а иногда делают невозможным нормальное функционирование насосной системы питания ЖРД во время его работы в полёте жидкостной ракеты. Проблема кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД стала актуальной на рубеже 1960 – 1970 г.г. как в бывшем СССР (где она приобрела общепромышленный масштаб), так и за рубежом (США, Япония, Франция и др.). Отдельные аспекты кавитационных автоколебаний изучались в НИИТП, КБ «Южное», КБ «Химавтоматики», ЦНИИМаш, МАИ, МВТУ и в других организациях. Кроме того, в печати появлялись отдельные сведения о работах, проводимых по проблеме кавитационных автоколебаний в США, Японии.

Сотрудники отдела динамики двигательных установок летательных аппаратов внесли определяющий вклад в решение проблемы кавитационных автоколебаний. Были выполнены систематические теоретические и обширные экспериментальные исследования низкочастотных кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ, что позволило сформировать фундаментальные представления о закономерностях этого динамического процесса.

Разработка и развитие теории кавитационных колебаний в системах питания ЖРДУ включали в себя теоретические разработки и экспериментальные исследования кавитационных автоколебаний в условиях автономных испытаний натуральных шнекоцентробежных насосов ЖРД, в том числе мощных насосов окислителя маршевых двигателей первых ступеней ракет-носителей. Были решены следующие задачи.

Исследованы закономерности и предложен В. В. Пилипенко механизм самовозбуждения кавитационных автоколебаний.

Решена задача о неустановившемся кавитационном обтекании лопастей осевого шнекового преднасоса шнекоцентробежного насоса и выведены уравнения динамики кавитационных каверн в проточной части насоса.

Разработаны линейные и нелинейные гидродинамические модели кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ и предложены теоретические и расчетно-экспериментальные способы определения параметров моделей.

Сформирована методика теоретического решения проблемы обеспечения устойчивости насосной системы ЖРДУ по отношению к кавитационным колебаниям.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамических характеристик шнекоцентробежных насосов, в том числе входного импеданса и динамического коэффициента усиления насоса по давлению. Расчетным путем показано, что учет кавитации в математической модели динамики насосов приводит не только к количественным, но и к качественным изменениям динамических характеристик насосов и обуславливает заметное снижение собственных (резонансных) частот колебаний жидкости в системе

питания ЖРДУ по сравнению с акустическими частотами.

Решены линейные и нелинейные плоские задачи стационарного и нестационарного кавитационного обтекания лопастей осевых шнековых преднасосов с использованием метода комплексного потенциала, численно-аналитических методов и метода численного моделирования на основе уравнений Навье – Стокса и баротропного уравнения состояния парожидкостной смеси.

Экспериментально 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. Был сделан вывод, что к выбору конструктивных параметров шнекового преднасоса следует подходить не только с точки зрения обеспечения высоких антикавитационных качеств шнекоцентробежного насоса, но и с точки зрения обеспечения устойчивости насосной системы питания по отношению к кавитационным колебаниям.

Построены экспериментально-расчётные модели динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов на основе систематизации и обобщения результатов экспериментальных исследований кавитационных автоколебаний в условиях автономных испытаний натуральных шнекоцентробежных насосов различной производительности, в том числе насосов окислителя маршевых ЖРДУ первых ступеней РН.

На основе теории были разработаны эффективные способы и средства устранения кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ, которые были внедрены на предприятиях отрасли – в КБ «Южное» и НПО «Энергомаш».

С 1975 г. по 1990 г. сначала в ДООИМ АН УССР, а затем в созданном в 1980 году на его базе Институте технической механики АН УССР было проведено 6 Всесоюзных межведомственных совещаний по проблеме кавитационных автоколебаний. Было признано, что наиболее значимые результаты по теоретическому и экспериментальному исследованию низкочастотных кавитационных автоколебаний в системах питания ЖРД, разработке средств их устранения были получены сотрудниками отдела динамики двигательных установок летательных аппаратов (в настоящее время отдел динамики гидромеханических систем).

Таким образом, проводимые на протяжении ряда лет теоретические и экспериментальные исследования кавитационных автоколебаний в насосных системах питания позволили разработать теорию кавитационных автоколебаний в таких системах [3, 4].

Теория кавитационных автоколебаний дает возможность прогнозировать устойчивость насосной системы питания ЖРДУ по отношению к кавитационным колебаниям (а в случае потери устойчивости насосной системы – прогнозировать амплитуды, частоты и формы колебаний) и проводить количественный анализ влияния конструктивных и режимных параметров системы на кавитационные автоколебания. Её достоверность подтверждена хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных частот кавитационных колебаний, границ областей устойчивости в плоскости различных режимных параметров насосной системы (например, давление жидкости на входе в насос – расход жидкости через насос), динамических характеристик шнекоцентробежных насосов и систем питания ЖРДУ, параметров кавитационных авто-

колебаний в насосной системе. В связи с этим она используется для решения широкого круга задач динамики ЖРДУ и продольной устойчивости жидкостных РН.

Теория кавитационных автоколебаний позволила на качественно новом уровне подойти к решению задач линейной и нелинейной динамики ЖРД (расчёт частотных характеристик и процесса запуска двигателя) и ракеты в целом (анализ продольной устойчивости, оценка амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты).

Математическое моделирование процесса запуска ЖРДУ. Решена задача математического моделирования запуска ЖРД с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах в соответствии с теорией кавитационных автоколебаний в системе питания ЖРД. На основании результатов математического моделирования установлено, что учёт кавитационных явлений в насосах в математических моделях ЖРД повышает достоверность прогнозирования процесса запуска двигателя.

При разработке ракеты 15А14 головные институты отрасли ЦНИИМаш и НИИТП настаивали на установке демпфера в питающей магистрали окислителя первой ступени для обеспечения запуска двигателя в условиях минометного старта и продольной устойчивости ракеты в полете. Выполненные расчеты запуска маршевой ЖРДУ в условиях минометного старта ракеты продемонстрировали, что для нормального запуска двигателя не требуется специальное демпфирующее устройство в питающей магистрали окислителя. Расчетная оценка амплитуд продольных колебаний ракеты 15А14 без демпфера, проведенная с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах ЖРД, показала, что амплитуды продольных колебаний не превысят допустимый уровень. Последующий сравнительный анализ результатов летных испытаний ракеты без демпфера и с демпфером позволил установить, что и минометный старт ракеты (запуск маршевого двигателя первой ступени в условиях минометного старта), и устойчивость полета ракеты обеспечиваются без демпфера, что и следовало из результатов теоретического прогноза. Это позволило принять окончательное решение об исключении демпфера из штатной конструкции ракет 15А14. Тем самым были сокращены сроки создания ракеты и существенно повышена ее надежность.

Математическое моделирование переходных процессов в ЖРДУ при аварийных ситуациях. Математическое моделирование переходных процессов в ЖРДУ при аварийных ситуациях является важным направлением выяснения причин аварийных исходов огневых стендовых испытаний ЖРДУ и летных испытаний РН с ЖРДУ. Анализ результатов математического моделирования позволяет сузить круг поиска возможных причин аварий, отбросить несостоятельные версии и остановиться на наиболее вероятной из них, а в отдельных случаях (при достаточном количестве измерений) однозначно установить причину аварийного исхода.

Разработка математических моделей динамики ЖРДУ базируется на результатах многолетних исследований динамики как отдельных элементов, так и ЖРДУ в целом, проведенных в НПО «Энергомаш» (Россия), ГП «КБ «Южное» и ИТМ НАН Украины и НКА Украины. При этом важную роль играет использование в математических моделях динамики ЖРДУ нелинейных динамических моделей кавитирующих насосных агрегатов достаточной полноты описания и достоверности. Такие модели кавитирующих насосных агрегатов разработаны в отделе в рамках теории кавитационных автоколебаний в

насосных системах питания ЖРД. На основе математических моделей динамики ЖРДУ можно рассчитывать параметры установившегося режима и переходные процессы в ЖРДУ при аварийных ситуациях.

В 2005 году было выполнено математическое моделирование динамических процессов в маршевой ЖРДУ третьей ступени РН «Циклон-3» № 40Л в условиях нештатной работы маршевого двигателя третьей ступени. Получено удовлетворительное согласование результатов математического моделирования и соответствующих данных телеметрических измерений параметров ЖРДУ в полете третьей ступени РН № 40Л. Сформировано заключение о причинах, объясняющих аномальное поведение параметров движения третьей ступени и выдачу команды аварийного выключения маршевого двигателя третьей ступени. Полученные результаты были переданы в ГП «КБ «Южное» для разработки мероприятий по повышению надежности маршевой ЖРДУ третьей ступени РН «Циклон-3».

В 2007 году было выполнено математическое моделирование гидродинамических процессов в маршевом двигателе первой ступени РД171М при аварийном пуске РКН «Зенит-3SL» № SL24. На основании результатов математического моделирования, которые удовлетворительно согласовывались с данными телеметрических измерений, была подтверждена наиболее вероятная версия о причинах аварийного пуска РКН. Полученные результаты были переданы в Межгосударственную комиссию по анализу причин аварийного пуска РКН «Зенит-3SL» № SL24.

Разработка датчиков быстроизменяющихся расходов жидкости в трубопроводах. Одной из главных проблем проведения динамических испытаний узлов и агрегатов ЖРД (шнекоцентробежных насосов, регуляторов, трубопроводов, демпферов продольных колебаний и др.), является проблема измерений колебаний расходов жидкости (воды или компонента топлива), требующая специальных быстродействующих датчиков расхода.

В отделе были разработаны датчики быстроизменяющихся расходов жидкости в трубопроводах. Внедрение таких датчиков в «КБ «Южное», НПО «Энергомаш» и КБ «Химмаш» позволило улучшить технологию отработки насосов ЖРДУ, повысило качество и информативность испытаний насосов.

Разработка высокоточных быстродействующих систем автоматического регулирования давления наддува. В отделе были разработаны высокоточные быстродействующие системы автоматического регулирования давления наддува (САРДН) топливных баков верхних ступеней ракет, защищенные авторскими свидетельствами. Проведенные в ГП «КБ «Южное» стендовые испытания САРДН бака окислителя второй ступени ракеты-прототипа РН «Днепр» подтвердили заявленные высокие характеристики разработанной САРДН.

Исследования продольной устойчивости жидкостных ракетносителей. Разработчики многоступенчатых жидкостных РН в Украине, России, США, Франции и в других странах неизбежно сталкиваются с проблемой обеспечения продольной устойчивости РН. Эта проблема требует своего анализа и решения при разработке новых и модернизации существующих РН в каждом конкретном случае. Если она не решена своевременно (на этапе эскизного проектирования), то при первых же летно-конструкторских испытаниях РН могут возникнуть колебания конструкции корпуса в направлении продольной оси. Продольные колебания РН на активном участке траектории ее полета обусловлены динамической несовместимостью работающего ЖРД

с конструкцией корпуса. Они могут достичь опасных пределов и способны привести к различным аварийным ситуациям (вплоть до разрушения конструкции ракеты). Необходимость теоретического решения проблемы обеспечения продольной устойчивости РН обусловлена тем обстоятельством, что факт устойчивости (или потери устойчивости) жидкостных РН невозможно определить экспериментально в наземных условиях, он может быть установлен только при лётно-конструкторских испытаниях РН. При проведении таких натурных испытаний устранение недопустимых продольных колебаний РН или снижение амплитуд продольных колебаний до безопасного уровня требует значительных материальных и финансовых затрат. Для исключения подобных затрат необходимо проведение максимально возможного объема расчетных исследований устойчивости замкнутой динамической системы «ЖРДУ – корпус РН» по отношению к продольным колебаниям применительно к конкретной РН на всех этапах ее разработки или модернизации. При этом важную роль играет использование математических моделей низкочастотной динамики подсистем (корпуса РН, ЖРД и его питающих магистралей) достаточной полноты описания и степени достоверности.

Сотрудники отдела внесли существенный вклад в решение проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН, в развитие линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН и разработку нелинейной теории продольных колебаний жидкостных РН [5].

В линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН, как правило, рассматривается асимптотическая устойчивость линеаризованной квазистационарной системы, т.е. устойчивость невозмущенного движения системы с «замороженными» коэффициентами по отношению к малым возмущениям. В такой постановке, несмотря на известные ее недостатки, анализ продольной устойчивости в обязательном порядке проводится как у нас в стране, так и за рубежом (Россия, США, Франция, Япония).

Линейная теория продольной устойчивости жидкостных РН была разработана в отделе, прежде всего, за счет учета кавитационных явлений в насосах ЖРД в математических моделях динамики системы «ЖРДУ – корпус РН». Такого рода учет кавитационных явлений не имеет аналогов в Украине и за рубежом и позволяет выполнять достаточно достоверные теоретические прогнозы продольной устойчивости жидкостных РН. К основным научно-методическим разработкам, полученным при развитии линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН, можно отнести следующие [5].

Разработана методика прогнозирования динамических характеристик ЖРД с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах, позволяющая получать удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных динамических характеристик двигателя – входного импеданса и коэффициента усиления двигателя по давлению. Достоверное прогнозирование динамических характеристик ЖРД занимает центральное место при теоретическом анализе продольной устойчивости жидкостных РН.

Предложен метод переноса граничных условий для расчета амплитудно-фазовых частотных характеристик систем питания ЖРДУ, обобщающий известный импедансный метод на случай многомерных и распределенных внешних воздействий.

Разработана методика многокритериальной оптимизации осевых шнековых преднасосов ЖРД и демпферов продольных колебаний, позволяющая определить приемлемые запасы продольной устойчивости жидкостных РН.

Обоснованы возможности обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН без установки демпферов продольных колебаний, например за счет выбора параметров и изменения конструкций шнековых преднасосов насосов окислителя маршевых двигателей первых ступеней жидкостных РН.

Разработана методика расчета характеристик (собственных частот, форм, обобщенных масс и декрементов) собственных продольных колебаний корпуса многоступенчатых жидкостных РН с учетом диссипации энергии колебаний в элементах конструкции и жидком топливе в топливных баках [6].

Изучены закономерности динамического взаимодействия ЖРДУ и корпуса РН. Такие динамические процессы достаточно сложны для математического моделирования, однако знание их качественных и количественных характеристик необходимо для решения проблемы продольной устойчивости РН и других задач динамики жидкостных ракет. Разработана математическая модель динамики системы «ЖРДУ – корпус РН», в которой динамическое взаимодействие ЖРДУ и корпуса РН описывается с учетом влияния диссипации энергии на параметры собственных продольных колебаний корпуса РН и диссипативных связей между тонами его колебаний. В отличие от известных моделей, включающих уравнения нескольких изолированных тонов собственных продольных колебаний корпуса, параметры которых определены без учета диссипации энергии, в новой модели корпус РН схематизируется системой дискретных масс, соединенных упругими и диссипативными связями. Дана количественная оценка влияния диссипации энергии на параметры собственных продольных колебаний корпуса и показана необходимость его учета при анализе продольной устойчивости и расчете амплитуд продольных колебаний жидкостных РН [7].

Разработана методика анализа устойчивости сложных многоконтурных динамических систем «ЖРДУ – корпус РН» с потенциально неустойчивыми подсистемами, плотным спектром собственных частот колебаний и запаздываниями в уравнениях низкочастотной динамики газовых трактов ЖРД. Методика основана на расчете спектра матрицы и приближенной декомпозиции системы и, в отличие от применявшихся ранее, позволяет выполнять анализ устойчивости системы «ЖРДУ – корпус РН» по отношению к различным видам низкочастотных колебаний ЖРД и продольным колебаниям корпуса, определять параметры собственных колебаний системы, диагностировать причины ее неустойчивости и исследовать многочастотные колебания [8, 9].

С использованием метода конечных элементов и современных вычислительных средств разработана методика численного моделирования свободных продольных колебаний новых оригинальных конструкций верхних ступеней жидкостных РН со сложной пространственной конфигурацией топливных отсеков. Методика не имеет аналогов в Украине и является основой для выполнения теоретических прогнозов динамических нагрузок на конструкции верхних ступеней жидкостных РН и космических аппаратов (КА) в процессе выведения их на рабочие орбиты [10 – 14].

В мировой практике проводится только линейный анализ динамики и устойчивости системы «ЖРДУ – корпус РН» с использованием результатов предварительно проведенных дорогостоящих экспериментальных работ и при этом прогнозируется сам факт устойчивости или потери устойчивости системы. Однако линейный анализ устойчивости системы не позволяет получить никакой информации о величинах амплитуд продольных колебаний жидкостных РН и, следовательно, о динамических нагрузках (продольных

виброускорениях) на конструкции РН и КА. Следует отметить, что опасным является не факт возможной потери продольной устойчивости, а превышение амплитудами колебаний определенного допустимого уровня, который может диктоваться требованиями нормальной работы, например приборов системы управления. В конечном итоге, именно возможные величины амплитуд продольных колебаний должны служить базой для принятия решений о специальных мерах по обеспечению продольной устойчивости РН.

На протяжении ряда лет в отделе проводились исследования, направленные на получение фундаментальных представлений о закономерностях продольных колебаний жидкостных РН. Были изучены нелинейности звеньев контура «ЖРДУ – корпус РН» и исследовано их влияние на ограничение амплитуд продольных колебаний. Было установлено, что при продольных колебаниях наиболее существенными являются нелинейности ЖРД и, прежде всего, нелинейности, обусловленные кавитационными явлениями в насосных агрегатах ЖРД. Главной отличительной особенностью развиваемого в отделе на протяжении ряда лет подхода к математическому моделированию и анализу продольных колебаний жидкостных РН является использование нелинейных уравнений низкочастотной динамики кавитирующего шнекоцентробежного насоса ЖРД, полученных при разработке теории кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД. В конечном итоге была создана нелинейная теория продольных колебаний жидкостных РН [15, 16].

Выполнено математическое моделирование продольных колебаний жидкостных РН как многомерных нелинейных нестационарных систем.

Разработана методика определения амплитуд продольных колебаний РН путем численного интегрирования нелинейной нестационарной системы уравнений.

Разработаны методики приближенного определения амплитуд продольных автоколебаний в нелинейной системе «ЖРДУ – корпус РН» с «замороженными» коэффициентами, основанные на использовании методов гармонической линеаризации. Методики позволяют определять амплитуды колебаний, которые могут служить верхней оценкой амплитуд продольных колебаний нелинейной нестационарной системы «ЖРДУ – корпус РН».

Разработана методика расчета переходных процессов и установившихся движений в системе «ЖРДУ – корпус РН» с иерархией характерных времен и гладкими нелинейностями, основанная на разделении движений в «быстрой» подсистеме (ЖРДУ) и в «медленной» подсистеме (упругий корпус РН) и использовании методов усреднения, гармонического баланса и продолжения по параметру.

Разработка принципиально новых средств обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН. Традиционный подход к обеспечению продольной устойчивости жидкостных РН заключается в установке газожидкостного демпфера продольных колебаний в акустически длинную питающую магистраль маршевых ЖРД с целью разнесения резонансных частот колебаний жидкости в питающей магистрали и собственных частот колебаний корпуса РН путем существенного снижения резонансных частот колебаний жидкости. Сложность решения проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН увеличивается по мере возрастания их веса и габаритов и, следовательно, снижения собственных частот колебаний корпуса РН. В этом случае необходимы газожидкостные демпфирующие устройства весьма больших объемов. Так, например, для обеспечения продольной устойчивости

сверхтяжелой РН «Энергия» многоразовой космической системы «Энергия – Буран» потребовался газожидкостный демпфер объемом в 500 дм³. Очевидно, что при использовании таких демпфирующих устройств возникают проблемы их размещения на ракете и увеличения веса конструкции. Это обусловливает необходимость разработки принципиально новых средств устранения продольных колебаний тяжелых РН.

В связи с этим в отделе был разработан и создан гидродинамический демпфер, отличающийся конструктивной простотой, не содержащий движущихся частей, элементов автоматики и более эффективный по сравнению с традиционными газожидкостными демпферами. Была разработана математическая модель рабочих процессов в гидродинамическом демпфере, на основании которой рассчитывались основные статические и динамические характеристики демпфера в широком диапазоне изменения его конструктивных параметров и режимов работы. Указанные характеристики являются необходимыми при анализе и обеспечении продольной устойчивости жидкостных РН. Полученные теоретические результаты были экспериментально подтверждены при отработке гидродинамического демпфера на специально созданных экспериментальных установках, позволяющих проводить испытания как на модельных, так и на натурных жидкостях с использованием скоростной киносъемки протекающих процессов.

Гидродинамический демпфер прошел полный цикл экспериментальной отработки и был установлен на РН «Зенит». Результаты летно-конструкторских испытаний показали, что устойчивость ракеты по отношению к продольным колебаниям была обеспечена на всех пусках, при этом максимальные амплитуды продольных колебаний корпуса РН не превосходили 0,03 g, что более чем в 10 раз ниже допустимых.

Следующей разработкой стал термодинамический демпфер продольных колебаний жидкостных РН [17]. Были разработаны математические модели рабочих процессов в полости демпфера при равновесных и неравновесных термодинамических процессах испарения жидкости и конденсации пара [17 – 20], установлен механизм рассеяния колебательной энергии в демпфере [21] и проведен анализ влияния элементов конструкции демпфера на кинетику фазовых превращений [22]. Разработанные модели позволяют расчетным путем определять основные динамические характеристики, выбирать конструкцию и режимы работы демпфера. Теоретически обоснована возможность заметного повышения эффективности термодинамического демпфера путем введения в его конструкцию новых элементов [23, 24]. Выполнен теоретический анализ устойчивости насосной системы питания ЖРДУ при установке термодинамического демпфера в питающую магистраль на входе в насос [25].

Для проверки эффективности работы термодинамического демпфирующего устройства были созданы специальные экспериментальные установки, позволяющие опытным путем определять его динамические характеристики, основной из которых является зависимость динамической податливости демпфера от частоты вынужденных колебаний. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические выводы о высокой эффективности работы термодинамического демпфера. Было показано, что податливость термодинамического демпфера примерно в 5 раз превышает податливость гидродинамического демпфера и примерно в 17 – 20 раз превышает податливость газожидкостного демпфера тех же габаритных размеров.

Созданные и экспериментально отработанные принципиально новые ма­логабаритные демпферы продольных колебаний не содержат подвижных час­тей, элементов автоматики и имеют лучшие по сравнению с газожидкостны­ми демпферами динамические характеристики, что позволяет считать их вы­сокоэффективными средствами обеспечения продольной устойчивости жид­костных РН, существенно повышающими их эксплуатационную надежность.

Практическое использование результатов исследований. На основе развитой линейной теории продольной устойчивости жидкостных РН и раз­работанной нелинейной теории продольных колебаний жидкостных РН соз­даны эффективные методики анализа продольных колебаний, не имеющие аналогов в Украине и за рубежом. Методики были использованы для теоре­тического анализа продольной устойчивости РН различного назначения, соз­данных в «КБ «Южное» и других организациях бывшего СССР. Полученные результаты расчетов позволили принять практические меры по обеспечению продольной устойчивости этих РН.

Сотрудники отдела активно участвовали в научно-техническом сопрово­ждении создания РН «Зенит» и, прежде всего, в решении проблемы обеспе­чения продольной устойчивости РН «Зенит». Это направление деятельности отдела являлось приоритетным на всех этапах разработки этой РН. К наибо­лее важным разработкам сотрудников отдела, которые были реализованы при создании РН «Зенит», можно отнести следующие:

- теоретические прогнозы устойчивости систем питания ЖРДУ первой и второй ступеней по отношению к кавитационным колебаниям и продольной устойчивости РН на этапе эскизного проектирования;

- обоснование необходимости установки демпфера продольных колеба­ний в питающей магистрали окислителя ЖРДУ первой ступени непосредст­венно на входе в маршевый двигатель;

- принципиально новый гидродинамический демпфер продольных коле­баний, отличающийся конструктивной простотой, не содержащий движу­щихся частей, элементов автоматики и более эффективный по сравнению с традиционными газожидкостными демпферами; гидродинамический демп­фер прошел весь курс экспериментальной отработки и полностью обеспечил продольную устойчивость РН;

- разработанные наиболее эффективные конструкции осевых шнековых преднасосов, которые использованы в насосах горючего маршевого и рулево­го ракетных двигателей второй ступени РН для устранения кавитационных автоколебаний в системах питания двигателей [26];

- теоретические прогнозы продольной устойчивости второй ступени РН на этапе эскизного проектирования и разработанное на их основе техниче­ское предложение об исключении из плана отработки маршевого двигателя второй ступени дорогих экспериментальных работ по определению его ди­намических характеристик; рекомендации по обеспечению продольной ус­тойчивости второй ступени РН без установки специальных демпфирующих устройств.

Проведено математическое моделирование продольных колебаний ракет РС-20 и 11К68 – ближайших прототипов РН «Днепр» и «Циклон-3М». Впер­вые получено удовлетворительное согласование расчётных и эксперименталь­ных значений амплитуд продольных колебаний этих ракет на активном участке траектории полета во время работы ЖРДУ первой ступени. Было показано, что разработанное научно-методическое и программное обеспечение для анализа

продольных колебаний жидкостных РН позволяет выполнять достоверные прогнозы уровней динамических нагрузок (продольных виброускорений) на КА различных типов, которые выводятся на рабочие орбиты РН «Днепр» и РН «Циклон», и на их основе разрабатывать рекомендации по обеспечению допустимых значений продольных виброускорений КА [16, 27, 28].

Космический аппарат подвергается большим динамическим нагрузкам со стороны жидкостной РН во время его запуска на рабочую орбиту. Сохранность и работоспособность КА в значительной мере зависят от уровня динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на КА на активном участке траектории полета. Поэтому при создании или модернизации жидкостных РН особую актуальность приобретают работы, связанные не только с безусловным обеспечением допустимых уровней амплитуд продольных виброускорений КА на активном участке траектории полета РН во время работы ЖРДУ первой ступени, но и со снижением динамических нагрузок на КА. В отделе решена задача теоретического определения динамических нагрузок (продольных виброускорений) на КА во время старта и полета ракет-носителей жидкостных РН с установленной на них между верхней ступенью и космическим аппаратом пневматической системой виброзащиты, разработанной в ИТМ НАН Украины и НКА Украины [29]. Показано, что использование такой системы виброзащиты на ракетах-носителях «Днепр» и «Циклон-3М» обеспечивает существенное (в 3 – 5 раз) снижение уровня продольных виброускорений космических аппаратов, выводимых на рабочие орбиты. Это позволяет заметно расширить возможности этих РН по выведению КА разного назначения и повысить их конкурентоспособность на мировом рынке космических услуг.

Выполнены теоретические прогнозы продольной устойчивости ракет космического назначения (РКН) «Зенит-2SL» и «Зенит-3SL» (в рамках программы «Морской старт»), «Зенит-2SLБ» и «Зенит-3SLБ» (в рамках программы «Наземный старт»). Следует отметить, что теоретический прогноз продольной устойчивости РКН «Зенит-2SLБ» и РКН «Зенит-3SLБ» был проведен в 2003 г. в интересах Национального космического агентства Украины и по решению Совета Главных конструкторов в ГП «КБ «Южное». Разработаны практические рекомендации по обеспечению продольной устойчивости указанных РКН. Результаты теоретических прогнозов были подтверждены данными лётно-конструкторских испытаний РКН.

При научно-техническом сопровождении разработки РКН «Циклон-4» в отделе выполнялся теоретический прогноз её продольной устойчивости и динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на конструкции РКН и КА на активном участке траектории полета. Такой прогноз выполнялся с учетом изменений конструкции РКН на этапе аванпроекта, на этапе эскизного проектирования и после него. Были выданы в ГП «КБ «Южное» рекомендации по обеспечению допустимых уровней указанных динамических нагрузок.

Проведен теоретический анализ динамических свойств РН «Таурис-II», которая разрабатывается по заданию Orbital Sciences Corporation (США), и определены требования к газожидкостному демпферу продольных колебаний для обеспечения продольной устойчивости РН.

Ниже приведены примеры разработок отдела, выполненных в интересах предприятий ракетно-космической отрасли бывшего СССР, а также зарубежных фирм.

В 1981 году в сжатые сроки был выполнен теоретический анализ продольной устойчивости боевой жидкостной ракеты разработки КБ академика В. Н. Челомея. При проведении в 1981 году пусков этих ракет на максимальную дальность на последних секундах работы маршевого двигателя первой ступени возникали продольные колебания ракеты с рекордно высокими амплитудами. Продольные колебания ракеты, прежде всего, нарушали работу приборов системы управления, что, в свою очередь, приводило к невыполнению программы пусков. Острота этой чрезвычайной ситуации усугублялась тем, что эти принятые на вооружение ракеты стояли на боевом дежурстве, и все они требовали доработки, обеспечивающей как минимум кардинальное снижение уровня амплитуд продольных колебаний. Эта серьезнейшая проблема неоднократно обсуждалась на ряде заседаний высокого уровня, вплоть до Совета Обороны СССР. Сотрудники отдела выполнили теоретический анализ продольной устойчивости указанной ракеты и объяснили причину потери продольной устойчивости ракеты при проведении её пусков на максимальную дальность. Следует отметить, что результаты расчетов продемонстрировали принципиальную важность учета кавитационных явлений в насосах ЖРДУ при теоретическом анализе продольной устойчивости данной ракеты. Было показано, что демпфер продольных колебаний, который установлен на этой ракете, не только не обеспечивал продольную устойчивость, но являлся основной причиной появления рекордно высоких амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты из-за совпадения собственной частоты колебаний жидкости в питающей магистрали ракеты от демпфера до входа в двигатель с собственной частотой первого тона продольных колебаний корпуса ракеты. В соответствии с этим были выданы рекомендации по эффективному устранению продольных колебаний достаточно простым, не требующим разработки специальных мер по стабилизации ракеты, способом – отключить демпфер продольных колебаний и провести пуск ракеты без демпфера. Было принято решение об экспериментальном пуске ракеты с реализацией рекомендаций Института, но в последний момент на полигон поступила команда об его отмене. Свою роль сыграла техническая политика отрасли и, в конечном счете, на основании предложения НИИТП было принято решение об установке на ракете динамических гасителей колебаний для уменьшения амплитуд продольных колебаний до приемлемого уровня, что повлекло за собой существенные финансовые и материальные затраты.

В 1995 г. в рамках контракта ИТМ НАН Украины и НКА Украины с европейским объединением SEP (European Rocket Engine Development and Production Amalgamation) были выполнены теоретические исследования кавитационных автоколебаний в системе питания жидким кислородом ЖРД VULCAIN (разрабатываемого для ракеты-носителя ARIAN-5), которые возникли при его автономных испытаниях. С теоретических позиций была объяснена установленная экспериментально потеря устойчивости указанной системы питания и была обоснована эффективность мероприятий, направленных на подавление кавитационных автоколебаний.

В заключение авторы настоящей статьи приносят искреннюю благодарность всем сотрудникам отдела динамики гидромеханических систем ИТМ НАН Украины и НКА Украины, принимавшим участие в получении описанных выше результатов исследований динамики ЖРДУ и продольной устойчивости жидкостных РН.

1. *Пилипенко В. В.* Академик М. К. Янгель и академическая наука на Украине / *В. В. Пилипенко.* – Косм. техника. Ракет. вооружение. – Днепропетровск : Изд-во КБЮ, 1996. – С. 15 – 18.
2. *Пилипенко В. В.* Об истории создания и становления Института технической механики НАН Украины / *В. В. Пилипенко* // Прикладная механика. – 1998. – 34. – № 10. – С. 20 – 23.
3. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон.* – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.
4. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания / *В. В. Пилипенко.* – К. : Наук. думка, 1989. – 316 с.
5. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довгоцько, Ю. Е. Григорьев, И. К. Манько, О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С. 11 – 37.
6. *Николаев А. Д.* Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии / *А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4 (12) – С. 62 – 73.
7. *Хоряк Н. В.* Математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты как многосвязной упруго-диссипативной системы и динамических процессов в двигательной установке / *Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев* // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 27 – 37.
8. *Хоряк Н. В.* Декомпозиция и анализ устойчивости динамической системы “питающие магистрали – маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа” / *Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев* // Техническая механика. – 2007. – № 1. – С. 28 – 42.
9. *Хоряк Н. В.* Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД–корпус РН” по спектру матрицы : методические основы и приложение / *Н. В. Хоряк* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9 (45). – С. 87 – 91.
10. Численное моделирование свободных пространственных колебаний жидкости в емкостях сложной конфигурации / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев, Г. И. Богомаз, С. А. Сирота* // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 6. – С. 75 – 80.
11. *Блоха И. Д.* Determination of the propellant slosh parameters for rocket propulsion system of the space stage with complex spatial tanks configuration / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10 (36). – С. 42 – 44.
12. Численное моделирование свободных колебаний космических ступеней жидкостных РН со сложной пространственной конфигурацией топливных баков / *В. В. Пилипенко, О. В. Пилипенко, И. Д. Блоха, Г. И. Богомаз, А. Д. Николаев.* – Техническая механика. – 2006. – № 2. – С. 69 – 81.
13. *Блоха И. Д.* Определение параметров собственных продольных колебаний космических ступеней ракет-носителей со сложной пространственной конфигурацией отсеков / *И. Д. Блоха* // Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. – 2006. – Вып. 9. – № 8. – С. 106 – 113.
14. Продольные колебания верхней ступени и проблема продольной устойчивости жидкостной ракеты-носителя / *И. Д. Блоха, А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, А. С. Белецкий* // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 7(43). – С. 175 – 177.
15. *Pilipenko V. V.* Theoretical determination of amplitudes of longitudinal vibrations of Liquid Propellant Launch vehicles / *V. V. Pilipenko* // 49-th IAF International Astronautical congress (September 28 – October 2, 1998). – Melbourne, Australia. – IAF-98 – I.2.10.
16. Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев, В. А. Серенко, Н. В. Хоряк* // Космічна наука і технологія. – 1999. – Т.5, № 1. – С. 90 – 96.
17. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование неравновесных рабочих процессов в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 1997. – Вып. 6. – С. 33 – 39.
18. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование равновесных термодинамических процессов в кавитационной полости закрученного потока жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов. – Киев : Наук. думка, 1992. – С. 114 – 119.
19. *Пилипенко О. В.* Математическое моделирование равновесных термогидродинамических процессов двухфазного течения закрученного потока жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 30 – 37.
20. *Пилипенко О. В.* Учет неравновесных фазовых превращений в математической модели двухфазного течения жидкости в цилиндрическом трубопроводе / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2007. – № 1. – С. 3 – 9.
21. *Пилипенко О. В.* Механизм рассеяния колебательной энергии в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2000. – № 1 – С. 143 – 149.
22. *Пилипенко О. В.* Уравнение кинетики фазовых превращений в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – № 1 – С. 174 – 180.
23. *Пилипенко О. В.* Уравнение динамики двухфазной среды при различных временах релаксации жидкости, пара и элементов конструкции термодинамического демпфера / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С. 139 – 143.
24. *Пилипенко О. В.* Определение динамической податливости термодинамического демпфера при различных временах релаксации температурных полей жидкости, пара и элементов конструкции / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2002. – № 1. – С. 70 – 75.
25. *Пилипенко О. В.* Определение границы области устойчивости гидравлической системы с подключенным трубопроводом с двухфазной парожидкостной средой / *О. В. Пилипенко* // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 3 – 8.

26. Пилипенко В. В. Патент №73783 UA “Шнековідцентровий насос” / В. В. Пилипенко, Я. Н. Иванов, В. А. Задонцев, В. А. Дрозд (заявка №203021144 від 07.02.2003; рішення № 1827 від 23.05.2005). – Оpubлік. 15.09.2005, Бюл. № 9.
27. Пилипенко В. В. Теоретическое определение динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкцию жидкостной ракеты РС-20 на активном участке траектории ее полета / В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, А. Д. Николаев, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк, В. А. Серенко // Техническая механика. – 2000. – № 1. – С. 3 – 18.
28. Пилипенко В. В. Математическое моделирование продольных колебаний жидкостной ракеты при двух-частотной неустойчивости динамической системы ЖРДУ – корпус ракеты / В. В. Пилипенко, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10(57). – С. 12 – 16.
29. Пилипенко В. В. Теоретическая оценка эффективности пассивной системы виброзащиты космических аппаратов при продольных колебаниях ракеты-носителя / В. В. Пилипенко, А. Д. Николаев, Н. И. Довгоцько, О. В. Пилипенко, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк // Техническая механика. – 2001. – № 1. – С. 5 – 12.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 13.10.11,
в окончательном варианте 13.10.11