УДК 621.454.2:532.528:629.76.017.2:62-752+533.697:621.51+532.528:518.12

О. В. ПИЛИПЕНКО, Н. И. ДОВГОТЬКО

РЕШЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины
ул.Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: skh@ukr.net

Метою даної статті є огляд основних результатів вирішення сучасних завдань динаміки рідинних ракетних двигунів (РРД), поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв (РН), динаміки віброзахисних систем, газодинаміки лопаткових машин і динаміки гідравлічних систем з кавітуючими місцевими гідравлічними опорами. Представлено такі результати вирішення зазначених завдань. Проведено математичне моделювання спільних поздовжніх і поздовжньо-згинальних коливань конструкції живильних трубопроводів і рідини в гідравлічних системах з кавітуючими насосами РРД. Виконано математичне моделювання процесу запуску маршового РРД з допалюванням генераторного газу. Проведено числове дослідження впливу демпфірування коливань окремих динамічних ланок корпусу рідинної РН на поздовжню стійкість і амплітуди поздовжніх коливань РН. Розроблено методику теоретичних прогнозів динамічних навантажень на конструкції верхніх ступенів рідинних РН і космічних апаратів (КА) в процесі виведення їх на робочі орбіти. Виконано теоретичний прогноз повздовжньої стійкості нових рідинних ракет космічного призначення тандемної і пакетної схеми компонування на етапі їх ескізного проектування. Запропоновано нову пневматичну систему захисту КА «Січ-2М» від поздовжніх вібраційних навантажень при його виведенні на робочі орбіти. Розроблено конструкцію віброзахисної системи для операторів транспортних засобів різного призначення для захисту від ударних і знакозмінних навантажень. Розвинено сучасні методи аеродинамічного удосконалення форми міжлопаткових каналів компресорів авіаційних газотурбінних двигунів. Виконано числове моделювання нестаціонарної течії рідини в гідравлічній системі з кавітуючою дисковою діафрагмою. Вирішено актуальні проблеми подрібнення твердих речовин в рідкому середовищі на основі розробки і створення експериментальної кавітаційно-імпульсної установки для отримання тонкодисперсних середовищ і досліджень гідродинаміки нових технічних пристроїв з кавітуючими елементами.

Целью данной статьи является обзор основных результатов решения современных задач динамики жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН), динамики виброзащитных систем, газодинамики лопаточных машин и динамики гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Представлены следующие результаты решения указанных задач. Проведено математическое моделирование совместных продольных и продольно-изгибных колебаний конструкции питающих трубопроводов и жидкости в гидравлических системах с кавитирующими насосами ЖРД. Выполнено математическое моделирование процесса запуска маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа. Проведено численное исследование влияния демпфирования колебаний отдельных динамических звеньев корпуса жидкостной РН на продольную устойчивость и амплитуды продольных колебаний РН. Разработана методика теоретических прогнозов динамических нагрузок на конструкции верхних ступеней жидкостных РН и космических аппаратов (КА) в процессе выведения их на рабочие орбиты. Выполнен теоретический прогноз продольной устойчивости новых жидкостных ракет космического назначения тандемной и пакетной схемы компоновки на этапе их эскизного проектирования. Предложена новая пневматическая система защиты КА «Сич-2М» от продольных вибрационных нагрузок при его выводе на рабочие орбиты. Разработана конструкция виброзащитной системы для операторов транспортных средств различного назначения для защиты от ударных и знакопеременных нагрузок. Развиты современные методы аэродинамического совершенствования формы межлопаточных каналов компрессоров авиационных газотурбинных двигателей. Выполнено численное моделирование нестационарного течения жидкости в гидравлической системе с кавитирующей дисковой диафрагмой. Решены актуальные проблемы измельчения твердых веществ в жидкой среде на основе разработки и создания экспериментальной кавитационно-импульсной установки для получения тонкодисперсных сред и исследований гидродинамики новых технических устройств с кавитирующими элементами.

This paper overviews the main results of the solution of current problems in the dynamics of liquid-propellant rocket engines (LPREs), liquid-propellant launch vehicle (LV) pogo stability, the dynamics if vibration protection systems, blade machine gas-dynamics, and the dynamics of hydraulic systems with cavitating restrictors. These results are as follows. Coupled longitudinal and longitudinal bending oscillations of the feed lines and the liquid in hydraulic systems with cavitating LPRE pumps were simulated mathematically. The start of a sustainer LPRE with generator gas afterburning was simulated mathematically. The effect of damping the oscillations of individual dynamic links of the liquid-propellant LV body on the LV pogo stability and longitudinal oscillation amplitude was studied numerically. A technique was developed for the theoretical prediction of dynamic loads on liquid-propellant LV upper stages and spacecraft during the orbital injection. The pogo stability of new liquid-propellant space rockets of tandem and pack configuration was predicted theoretically at the draft design stage. A new pneumatic system was proposed for the Sich-2 spacecraft to protect it against longitudinal vibration loads during the orbital injection. A vibration protection system was designed to protect operators of vehicles of differ-

© О. В. Пилипенко, Н. И. Довготько, 2018

ent purposes from impact and alternating loads. Up-to-date methods were developed for aerodynamic shape refinement of aircraft gas-turbine engine compressor blade channels. Unsteady liquid flow in a hydraulic system with a cavitating plate orifice was simulated numerically. Topical problems of solids grinding in a liquid medium were solved on the basis of the development and making of an experimental cavitation pulse plant for the production of fine-dispersed media and investigations into the hydrodynamics of new industrial devices with cavitating components.

Ключевые слова: *жидкостная ракетная двигательная установка, жидкостной ракетный двигатель, динамика, устойчивость, виброзащтная система, газодинамика лопаточных машин, математическое моделирование.*

Динамика жидкостных ракетных двигателей. Фундаментальные и прикладные исследования динамики жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ) и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) с учетом кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах [1] являются важными научными направлениями в отделе динамики гидромеханических и виброзащитных систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ).

С целью получения достоверных результатов теоретических исследований динамики ЖРДУ проведено уточнение экспериментально-расчетной гидродинамической модели кавитационных колебаний в насосной системе питания ЖРДУ, прежде всего, за счет привлечения новых экспериментальных данных. Для определения коэффициентов модели использованы результаты динамических испытаний 22-х шнекоцентробежных насосов, что позволило существенно расширить область применимости экспериментально-расчетной модели.

Предложен полуэмпирический способ определения коэффициента инерционного сопротивления жидкости, обусловленного обратными течениями на входе в кавитирующий шнекоцентробежный насос ЖРДУ [2].

Выполнено математическое моделирование совместных продольных колебаний конструкции питающих трубопроводов и колебаний жидкости в гидравлических системах с кавитирующими насосами ЖРДУ. На основе дифференциальных уравнений для систем с распределенными параметрами разработаны линейная и нелинейная математические модели совместных продольных колебаний конструкции прямолинейного трубопровода (с сильфоном) и жидкости. В соответствии с этими моделями влияние колебаний жидкости на колебания конструкции трубопровода осуществляется за счет изменения давления жидкости, которое приводит к появлению в стенке трубопровода окружных напряжений и согласно эффекту Пуассона – осевых напряжений. Воздействие колебаний конструкции на колебания жидкости происходит за счет осевого сокращения или удлинения конструкции трубопровода. Разработанные математические модели позволяют проводить исследование устойчивости гидравлических систем с кавитирующими насосами ЖРДУ по отношению к кавитационным колебаниям и определять параметры кавитационных автоколебаний [3, 4]. Выполнен теоретический анализ совместных продольных колебаний конструкции питающего трубопровода и жидкости для стендовой гидравлической системы с кавитирующим шнекоцентробежным насосом ЖРДУ. На основании результатов расчетов дано объяснение аномальной формы экспериментальной области неустойчивой работы насоса. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспери-

ментальных результатов. Разработана методика определения частотных характеристик трубопроводов ЖРДУ при совместных продольно-изгибных колебаниях конструкции прямолинейных участков трубопровода и колебаний жидкости, основанная на использовании известного импедансного метода исследования динамических систем.

Численное исследование устойчивости низкочастотных процессов в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД) (см. рис. 1) и определение причин колебаний в двигателе является неотъемлемой частью работ при разработке ЖРД. Возможность реализации различных механизмов потери устойчивости рабочего процесса в ЖРДУ требует разработки достаточно подробной математической модели низкочастотной динамики ЖРД. При моделировании низкочастотных процессов в ЖРД с дожиганием генераторного газа необходимо учитывать кавитационные явления в насосах, обратные связи между колебательными процессами в газогенераторе и насосах, неизотермичность процессов в газогенераторе и газоводах, временные задержки газообразования, динамические процессы в регуляторе расхода. В силу этих причин анализ устойчивости низкочастотных процессов в ЖРД сводится к численному исследованию устойчивости многоконтурной динамической системы «питающие магистрали – ЖРД» с потенциально неустойчивыми подсистемами. С учетом сформулированных выше требований выполнено математическое моделирование низкочастотной динамики перспективного маршевого ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа. На основе современных представлений о динамике ЖРД разработаны математические модели следующих динамических процессов в элементах маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа, разрабатываемого в Государственном предприятии ГП «КБ «Южное»:

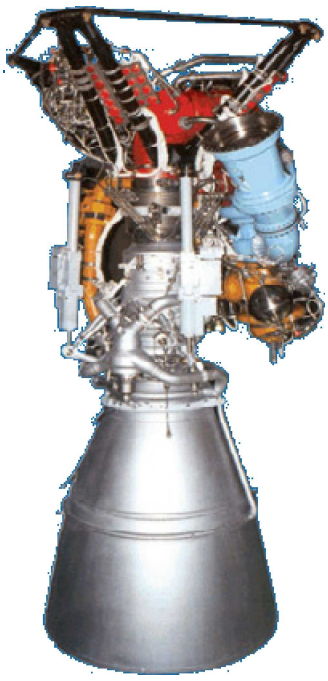


Рис. 1

– нестационарного течения жидкости в магистралях окислителя и горючего;

– нестационарного теплообмена в системе питания двигателя жидким кислородом;

– динамических процессов в насосах окислителя и горючего с учетом кавитации в насосах в соответствии с созданной в отделе теорией низкочастотных кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ;

– процесса вдува газообразного кислорода в поток жидкого кислорода за бустерным насосом окислителя;

– низкочастотных динамических процессов в элементах газового тракта (газогенераторе, газоводе и камере сгорания) с учетом запаздываний в уравнениях динамики этих элементов;

– динамических процессов в регуляторе расхода.

Для анализа устойчивости низкочастотных процессов и диагностирования причин низкочастотных колебаний в рассматриваемом ЖРД использован подход, основанный на расчете спектра собственных значений оператора (матрицы) линейной динамической системы «питающие магистрали – ЖРД» и декомпозиции этой системы на изолированные подсистемы «питающая магистраль окислителя – насосы окислителя», «питающая магистраль горючего – насосы горючего», «турбонасосный агрегат (ТНА) – газогенератор», «двигатель – регулятор расхода». Установлено, что исследуемая динамическая система «питающие магистрали – ЖРД» является устойчивой. Определены ее собственные частоты и декременты колебаний. Для каждой собственной частоты системы из низкочастотной части спектра определена природа колебаний. Показано, что учет кавитационных явлений в насосах ЖРД привел к существенному уменьшению собственных частот и декрементов колебаний жидкости в линиях питания окислителем и горючим. Установлено, что рассматриваемый двигатель имеет большой запас устойчивости по отношению к регуляторным колебаниям. Показано, что динамическая система «питающие магистрали – ЖРД» чувствительна к значению времени пребывания газа в газогенераторе несмотря на то, что колебания, порождаемые динамическими процессами в подсистеме «ТНА – газогенератор», характеризовались относительно большим затуханием. При увеличении значения времени пребывания газа в газогенераторе в 1,7 раза система становилась неустойчивой. Результаты проведенных исследований будут использованы при отработке перспективного маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа [5].

Проведено математическое моделирование запуска перспективного маршевого ЖРД. Показано, что кавитационные явления в бустерных и основных насосах окислителя и горючего рассматриваемого двигателя оказывают заметное влияние на переходные процессы при его запуске. Это влияние становится особенно существенным при сочетании максимальных температур компонентов топлива и минимальных давлений на входе в насосы. Так, при минимальном давлении и максимальной температуре на входе в бустерный насос окислителя падение давления за бустерным насосом окислителя продолжительностью (0,08 – 0,12) с вызвало существенное падение давления в газогенераторе и камере сгорания, частоты вращения вала ТНА и других параметров двигателя, но не привело к кавитационному срыву основного насоса окислителя [6]. Установлено, что вдув газообразного кислорода в поток жидкого кислорода за бустерным насосом окислителя и, еще в большей степени, учет запаздываний в уравнениях низкочастотной динамики газогенератора и газоводе оказывает заметное влияние на переходные процессы в двигателе при его запуске. Показано, что при моделировании низкочастотных динамических процессов в ЖРД с дожиганием генераторного газа можно пренебречь запаздываниями в уравнениях динамики камеры сгорания. Учет запаздываний в уравнениях динамики газогенератора и газовода осуществлялся путем приближенной замены уравнений звеньев запаздывания обыкновенными дифференциальными уравнениями. Для выполнения такой замены предложено использовать аппроксимацию звена запаздывания цепочкой колебательных звеньев. Для малых запаздываний (например, времени газообразования) звено запаздывания заменялось апериодическим звеном на

основе аппроксимации передаточной функции звена запаздывания рядом Тейлора 1-го порядка [7]. Полученные результаты будут использованы в ГП «КБ «Южное» при дальнейшей разработке перспективного маршевого ЖРД.

Разработана методика для определения параметров движения границы раздела газовой и жидкой среды в полостях топливных баков современных верхних (космических) ступеней жидкостных ракет-носителей в условиях микрогравитации (в период между запуском и выключением маршевых двигателей верхних ступеней) с учетом конструктивных особенностей внутрибаковых устройств обеспечения сплошности жидких компонентов топлива. Разработанная методика протестирована с привлечением экспериментальных данных, полученных для модельного бака в «бросковой башне». Использование этой разработки позволит на этапе проектирования маршевой ЖРДУ оценить эффективность внутрибаковых устройств для исключения проникновения газа наддува на вход в двигатель в недопустимых для его запуска количествах [8, 9].

Продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей космических аппаратов. Проблема обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН на активном участке полета является одной из основных научно-технических проблем ракетно-космической техники, которые возникают при создании новых и модернизации существующих РН как в Украине, так и за рубежом [10 – 12]. Ее решение во многом определяет надежность функционирования жидкостных РН и их систем. Ученые отдела занимают ведущие позиции в Украине и за рубежом в научных исследованиях, направленных на решение различных проблем динамики жидкостных РН и их подсистем, в том числе, проблемы обеспечения продольной устойчивости многоступенчатых жидкостных РН. Разработаны и постоянно совершенствуются теория и методики анализа продольной устойчивости жидкостных РН и динамических нагрузок на конструкции РН и космических аппаратов (КА) на активном участке полета. Важнейшей составляющей в этих разработках является учет кавитации в насосах ЖРДУ на базе созданной теории низкочастотных кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ [13, 14]. Такого рода разработки не имеют аналогов в мировой практике и являются ключевыми в теоретических исследованиях, направленных на решение проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН. Они использовались для прогноза продольной устойчивости жидкостных РН различного назначения – «Циклон», «Циклон-3», «Циклон-4», «Днепр», «Зенит», «Зенит-2», «Зенит-2М», «Зенит-2SL», «Зенит-3SL», «Зенит-3SLБ», «Антарес». Полученные результаты позволили принять практические меры по обеспечению продольной устойчивости этих РН. Результаты прогнозов были подтверждены данными летно-конструкторских испытаний ракет.

Ниже представлены основные результаты решения задач продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, полученные в период с 2013 г. по 2017 г. Разработана методика численного моделирования взаимодействия пространственных колебаний корпуса многоступенчатой жидкостной РН с низкочастотными процессами в ее маршевой двигательной установке на активном участке полета. Она позволяет определить параметры пространственных колебаний корпуса ракеты-носителя, рассчитать динамические нагрузки на элементы ее конструкции и исследовать устойчивость перспективных РН

(в том числе, РН «пакетной» схемы компоновки) по отношению к продольным и поперечным колебаниям.

Предложен подход к численному исследованию влияния демпфирования колебаний отдельных динамических звеньев корпуса жидкостной РН на продольную устойчивость и амплитуды продольных колебаний РН. Исследование влияния демпфирования колебаний на продольную устойчивость проводится на основе математической модели низкочастотной динамики системы «ЖРДУ – корпус РН», в которой корпус схематизирован разветвленной цепочкой осцилляторов с вязким трением, а его продольные колебания описываются как колебания многосвязной диссипативной системы. Анализ устойчивости выполняется в соответствии с концепцией Ляпунова об устойчивости по первому приближению. На основе расчета корней характеристического уравнения системы «ЖРДУ – корпус РН» с «замороженными» коэффициентами (спектра матрицы системы) определяются параметры ее собственных колебаний при разном по величине демпфировании динамических звеньев корпуса; выявляются звенья, оказывающие существенное влияние на продольную устойчивость РН; определяются доминирующие тона и параметры собственных продольных колебаний корпуса РН; оценивается возможность устранения или «смягчения» продольной неустойчивости путем увеличения демпфирования колебаний отдельных динамических звеньев корпуса РН. Задача определения амплитуд продольных колебаний жидкостных РН решается на основе нелинейной математической модели нестационарной системы «ЖРДУ – корпус РН» (с переменными коэффициентами). Предложенный подход использован при анализе продольной устойчивости трехступенчатой жидкостной РН. Определены доминирующие гармоники продольных колебаний РН и основные факторы, влияющие на их затухание [15]. Показано, что при повышенном демпфировании колебаний жидкого топлива в баке окислителя и горючего первой ступени устраняется продольная неустойчивость рассматриваемой РН по отношению ко второму тону колебаний ее корпуса и «смягчается» неустойчивость по отношению к первому тону [15 – 18]. На рис. 2 приведены огибающие амплитуд колебаний продольной перегрузки КА в нелинейной системе «ЖРДУ – корпус РН» с переменными коэффициентами: 1 – при исходных значениях декрементов колебаний топлива в баках; 2 – при увеличенном значении декремента 1-го тона колебаний топлива в баке окислителя первой ступени. Из рис. 2 видно, что увеличение демпфирования продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени в два раза привело к существенному уменьшению амплитуд колебаний продольных перегрузок и областей неустойчивости системы «ЖРДУ первой ступени – корпус РН» [16].

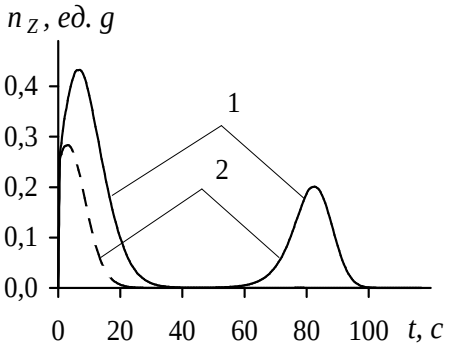


Рис. 2

Современные топливные баки верхних (космических) ступеней жидкостных РН имеют сложную пространственную конфигурацию и могут содержать комбинированные сопряженные топливные баки для двух компонентов топлива (см. рис. 3).

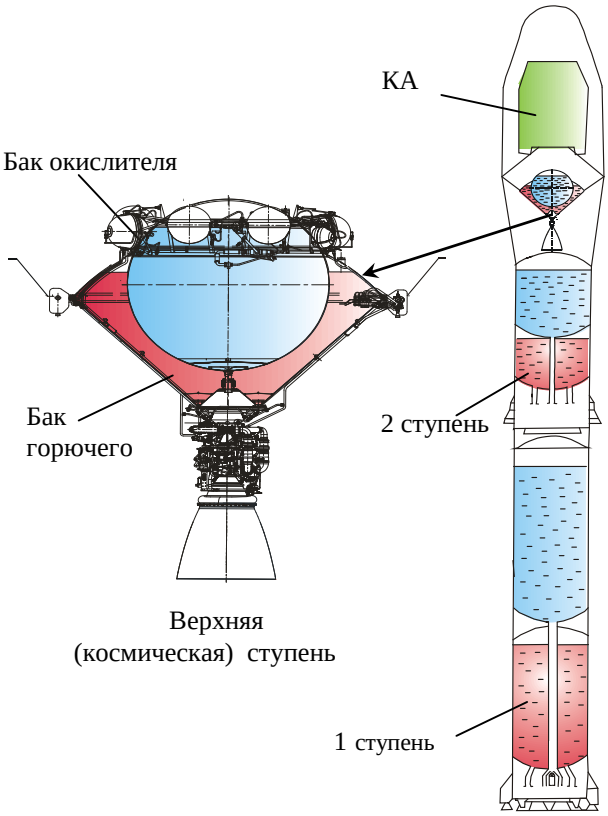


Рис. 3

Численное определение напряженно-деформированного состояния таких конструкций не может быть выполнено в полной мере методами, которые применялись ранее для традиционных конструкций топливных баков. Поэтому определение напряженно-деформированного состояния конструкций верхних ступеней жидкостных РН при их продольной неустойчивости является актуальной задачей. С использованием метода конечных элементов и современных вычислительных средств разработана методика для определения напряженно-деформированного состояния оболочечных элементов конструкции топливного отсека ступени, в которой сферический бак окислителя погружен в конический бак горючего. Рассчитаны зависимости амплитуд колебаний давления жидкости на днищах баков верхней ступени от частоты продольного возбуждения конструкции ступени с учетом динамического взаимодействия сопряженных баков и демпфирования колебаний жидкости. Получены количественные оценки влияния особенностей конструкции сфероконического топливного отсека разрабатываемой верхней ступени РН (сопряжение поверхностей оболочечных конструкций его баков, наличие в баках дополнительных цилиндрических вставок) на напряженно-деформированное состояние конструкции ступени [21, 22]. Эта методика не имеет аналогов в Украине и является основой для выполнения теоретических прогнозов динамических нагрузок на конструкции верхних ступеней жидкостных РН и КА в процессе выведения их на рабочие орбиты [23].

Сформировано научно-методическое обеспечение и выполнен теоретический прогноз продольной устойчивости новых жидкостных ракет космического назначения на этапе их эскизного проектирования: ракет легкого класса тандемной схемы компоновки «KSLV-II» и «Маяк - Л3.0» и ракеты тяжелого класса пакетной схемы компоновки «Маяк - Т3.0». На рис. 4 показаны

Рис. 4

ракеты тандемной и пакетной схемы компоновки. Определены основные параметры системы демпфирования продольных колебаний для обеспечения продольной устойчивости ракет на активном участке полета. Разработаны и направлены в ГП «КБ «Южное» практические рекомендации для решения проблемы обеспечения продольной устойчивости этих ракет.

При научно-техническом сопровождении создания новой двухступенчатой ракеты-носителя космического назначения (РКН) в компоновке «тандем» «Циклон-4М» (рис. 5) в отделе с конца 2017 г. ведутся следующие работы:

Рис. 5

– моделирование запуска ЖРДУ первой ступени (которая содержит четыре двигательных блока РД870) с учетом кавитации в насосах и динамики магистралей питания первой ступени РН;

– анализ продольной устойчивости ракеты «Циклон-4М» при работе ЖРДУ первой ступени;

– выбор рациональных параметров демпфера системы питания ЖРДУ первой ступени.

Динамика виброзащитных систем. Космический аппарат подвергается большим динамическим нагрузкам 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 полета. Поэтому при создании или модернизации жидкостных РН актуальными являются работы, связанные не только с безусловным обеспечением допустимых уровней амплитуд продольных виброускорений КА на активном участке полета РН во время работы ЖРДУ первой ступени, но и со снижением динамических нагрузок на КА. Предложена новая пневматическая система защиты КА «Сич-2М» от продольных вибрационных нагрузок при его выводе на рабочие орбиты. Данная пассивная система виброзащиты относится к типу автономных систем и не связана с системой управления РН. Выполнено математическое моделирование низкочастотной динамики системы виброзащиты с КА. Показано, что установка виброзащитной системы между верхней ступенью РН и КА обеспечивает снижение уровня продольных вибрационных нагрузок на КА «Сич-2М» в частотном диапазоне от 5 Гц до 100 Гц в два раза и более, что полностью удовлетворяет требованиям Технического задания.

Разработана конструкция виброзащитной системы для кресла операторов транспортных средств различного назначения для защиты от ударных и знакопеременных нагрузок, возникающих при движении. Изготовлены опытные

образцы таких кресел, проведены их статические и динамические испытания. Установлено, что разработанная виброзащитная система по своим статическим и динамическим характеристикам (квазинулевая жесткость на рабочем участке статической характеристики, собственная частота колебаний защищаемого объекта) превосходит мировые аналоги виброзащитных систем известных фирм SEARS (США), GRAMMER (Германия), ISRINGHAUSEN (Германия), COROSA (Чехия) и др. На рис. 6 представлены амплитудно-частотные характеристики систем виброзащиты разработки ИТМ НАНУ и ГКАУ, пассивной, полуактивной (VRS) и активной (E-VRS) фирмы Sears (США). Видно, что система виброзащиты разработки ИТМ НАНУ и ГКАУ обладает лучшими динамическими характеристиками. На рис. 7 показано кресло разработки ИТМ НАНУ и ГКАУ с системой виброзащиты и возможные варианты его использования.

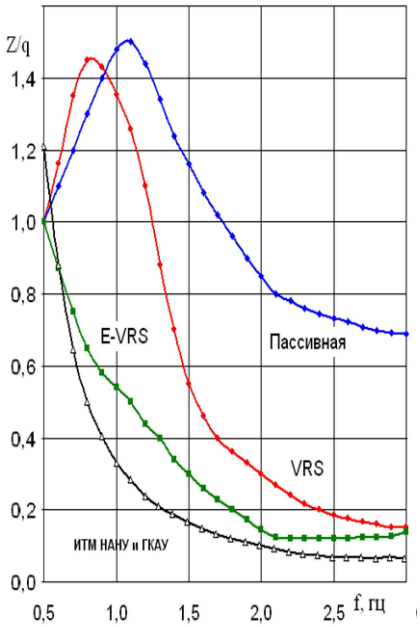
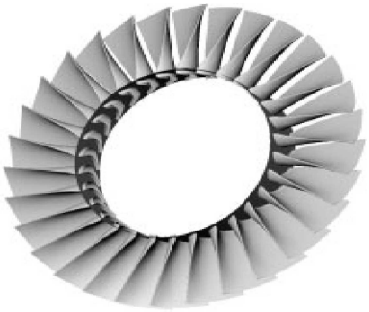


Рис. 6

Рис. 7

Газодинамика лопаточных машин. Проблема повышения качества аэродинамического проектирования элементов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) (рис. 8) продолжает оставаться актуальной как для Украины, так и для других стран – разработчиков авиационной техники.

Ротор осевого компрессора



Лопаточный венец осевого компрессора

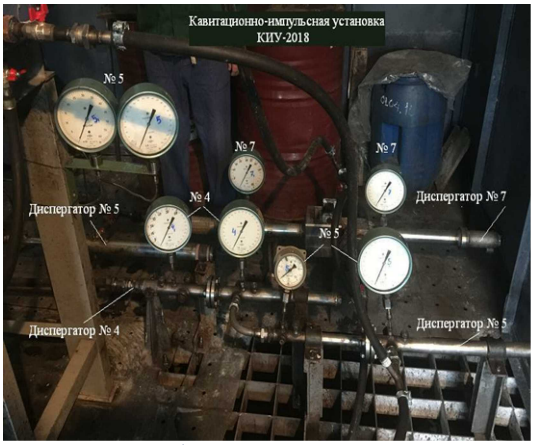
Рис. 8

Разработано научно-методическое обеспечение для численного решения обратных задач газодинамики лопаточных венцов компрессоров авиационных ГТД с использованием современных методов численного моделирования трансзвуковых невязких газовых течений. Эта разработка имеет ключевое значение в решении актуальной для государств – разработчиков авиационных двигателей проблемы аэродинамического проектирования лопаточных венцов компрессоров. Разработан метод решения обратных задач газодинамики осевых рабочих колес компрессорных ступеней газотурбинных двигателей как задачи аэродинамической оптимизации формы межлопаточных каналов ступеней. Метод основывается на численном моделировании пространственных турбулентных течений газа и использовании генетических алгоритмов поиска экстремума целевой функции. Он позволяет определить геометрические параметры лопаточного венца по заданным параметрам течения и оптимизировать его форму с целью повышения аэродинамических характеристик компрессорной ступени ГТД. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния лопатки компрессорного венца с использованием платформы численного моделирования OpenFOAM. Развиты методы аэродинамического совершенствования формы межлопаточных каналов компрессоров авиационных ГТД на основе численного моделирования пространственных турбулентных потоков газа [24 – 33]. Выполнена аэродинамическая оптимизация лопаток компрессорных венцов авиационных ГТД для ряда практически важных случаев, а именно: для рабочего колеса сверхзвуковой компрессорной ступени; рабочего колеса вентилятора двухконтурного авиационного ГТД; выходного направляющего аппарата вентилятора авиационного ГТД. Результаты разработок использовались и в дальнейшем могут быть использованы в ГП «Ивченко – Прогресс» при оптимизации лопаточных венцов компрессоров авиационных газотурбинных двигателей на этапе их проектирования.

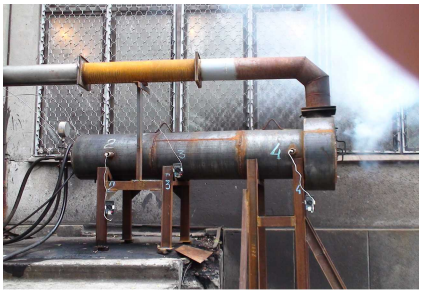
Динамика гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Проведено численное моделирование нестационарного течения жидкости в гидравлической системе с кавитирующей дисковой диафрагмой на основе математической модели, включающей полные уравнения Навье–Стокса и баротропное уравнение состояния парожидкостной смеси. Расчетным путем воспроизведены режимы кавитационных автоколебаний в указанной гидравлической системе. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений частот

и амплитуд кавитационных автоколебаний. Результаты численного моделирования позволяют расширить существующие представления о явлении генерации высокочастотных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Они имеют также практическое значение при создании новых и интенсификации разработанных технологических процессов в различных отраслях промышленности на основе использования пульсирующих кавитационных потоков жидкости [34].

Важным научным направлением работ, выполняемых в отделе, является решение проблемы измельчения твердых веществ в жидкой среде на основе исследований гидродинамики новых технических устройств с кавитирующими элементами. Разработана и создана экспериментальная кавитационно-импульсная установка для получения тонкодисперсных сред (см. рис. 9), которая предназначена, в первую очередь, для приготовления водоугольного топлива путем измельчения угля (главного энергоресурса Украины) и угольных шламоконцентратов (отходы обогатительной фабрики).



Общий вид каитационно-импульсной установки



Горелочное устройство

Фотографии процесса горения водоугольного топлива

Начало горения топлива

4 мин. от начала горения

8 мин. от начала горения

Рис. 9

Усовершенствованы технические устройства, реализующие процесс кавитационно-импульсного измельчения твердых веществ и обеспечивающие его эффективность. Для эффективного факельного сжигания водоугольного топлива разработано, изготовлено и экспериментально отработано специальное горелочное устройство для теплового котла Е-1/9-1М мощностью 0,9 МВт (наиболее распространенный в коммунальной теплоэнергетике Украины), вклю-

чающее оригинальную конструкцию форсунки распыла водоугольного топлива, систему подачи первичного воздуха и регулируемую систему подачи вторичного воздуха с предварительным подогревом до 700°С. Натурные испытания горелочного устройства в режиме длительного факельного горения показали высокую его эффективность в части полноты сгорания водоугольного топлива, полученного как на основе угля, так и на основе шламоконцентрата [35].

Выполненные работы были направлены на создание экологически чистой технологии подготовки и сжигания водоугольной смеси – важной энергосберегающей технологии, внедрение которой будет способствовать уменьшению зависимости Украины от внешних поставок энергоносителей. Технология позволит значительно уменьшить энергозатраты при изготовлении тонкодисперсных сред по сравнению с другими способами измельчения. Полученные научно-технические решения, разработанные технологии и созданные кавитационно импульсные установки могут быть использованы во многих отраслях промышленности Украины, где необходимо применение тонкодисперсных сред. Наряду с угледобывающей промышленностью, к таким отраслям относятся пищевая отрасль, лакокрасочное производство, порошковая металлургия и др.

Выводы. Представлены основные результаты решения современных задач динамики жидкостных ракетных двигателей, продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей, динамики виброзащитных систем, газодинамики лопаточных машин и динамики гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями, измельчения твердых веществ в жидкой среде на основе разработки и создания экспериментальной кавитационно-импульсной установки для получения тонкодисперсных сред и исследований гидродинамики новых технических устройств с кавитирующими элементами.

1. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Довготько Н. И., Григорьев Ю. Е., Манько И. К., Пилипенко О. В.* Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей. Техническая механика. 2001. № 2. С.11–37.
2. *Долгополов С. И.* Полуэмпирический способ определения коэффициента инерционного сопротивления жидкости, обусловленного обратными течениями на входе в шнекоцентробежный насос. Техническая механика. 2014. № 2. С. 36–42.
3. *Долгополов С. И.* Определение параметров кавитационных автоколебаний в гидравлической системе при совместных продольных колебаниях конструкции трубопровода и жидкости. Техническая механика. 2014. № 3. С. 79–86
4. *Долгополов С. И.* Влияние нелинейных характеристик сильфона на параметры кавитационных колебаний при совместных продольных колебаниях конструкции трубопровода и жидкости. Техническая механика. 2015. № 3. С. 30–38.
5. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Хоряк Н. В., Николаев А. Д., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н.* Математическое моделирование и анализ устойчивости низкочастотных процессов в маршевом ЖРД с дожиганием генераторного газа. Вестник двигателестроения. 2017. № 2. С. 34–42.
6. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н., Николаев А. Д., Хоряк Н. В.* Особенности математического моделирования низкочастотной динамики маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа при его запуске. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23, № 5. С. 3–12.
7. *Хоряк Н. В., Долгополов С. И.* Особенности математического моделирования динамики газовых трактов в задаче об устойчивости низкочастотных процессов в жидкостных ракетных двигателях. Техническая механика. 2017. № 3. С. 30–44.
8. *Николаев А. Д.* Определение параметров колебаний топлива в баках космических ступеней ракет-носителей перед повторными запусками маршевого двигателя при малых уровнях заполнения. Техническая механика. 2013. № 3. С. 10–20.
9. *Николаев А. Д., Башлий И. Д., Свириденко Н. Ф., Хоряк Н. В.* Определение параметров движения границы раздела сред «газ – жидкость» в топливных баках космических ступеней на пассивных участках полета ракет-носителей. Техническая механика. 2017. № 4. С. 26–40.
10. Колесников К. С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем. М.: Машиностроение, 1971. 260 с.

11. *Натанзон М. С.* Продольные автоколебания жидкостной ракеты. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
12. *Pilipenko V. V.* Providing the LPRE – Rocket Structure Dynamic Compatibility. 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit: Report (Monterey, June 28-30, 1993). Monterey,1993. AIAA 93-2422.
13. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение, 1977. 352 с.
14. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания. Киев: Наук.думка, 1989. 316 с.
15. *Хоряк Н. В.* Влияние диссипации энергии колебаний жидкого топлива в баках и конструкционного демпфирования жидкостной ракеты-носителя на ее продольную устойчивостью. Техническая механика. 2013. № 3. С. 21–33.
16. *Хоряк Н. В., Николаев А. Д., Долгополов С. И.* Влияние демпфирования колебаний жидкого топлива в баках на амплитуды продольных колебаний жидкостной ракеты. Авиационная техника и технология. 2014. №. 7/114. С. 34–40.
17. *Николаев А. Д., Хоряк Н. В., Серенко В. А. , Клименко Д. В., Ходоренко В. Ф., Башлий И. Д.* Учет диссипативных сил при математическом моделировании продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты. Техническая механика. 2016. № 2. С. 16–31
18. *Науменко Н. Е., Соболевская М. Б., Сирота С. А., Николаев А. Д., Башлий И. Д.* Нелинейные колебания свободной поверхности жидкости в горизонтально расположенном цилиндрическом баке. Техническая механика. 2015. № 4. С. 92–102.
19. *Хоряк Н. В.* Определение параметров динамического гасителя продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты-носителя. Техническая механика. 2014. № 3. С. 58–70.
20. *Хоряк Н. В., Николаев А. Д., Долгополов С. И.* Теоретическая оценка эффективности динамического гасителя продольных колебаний жидкостной ракеты-носителя. Авиационная техника и технология. 2015. № 9/126. С. 26–31.
21. *Башлий И. Д., Николаев А. Д.* Математическое моделирование пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием современных средств компьютерного проектирования и анализа. Техническая механика. 2013. № 2. С. 18–25.
22. *Башлий И. Д.* Определение напряженно-деформированного состояния конструкции топливного отсека космической ступени при продольных колебаниях жидкостной ракеты-носителя. Техническая механика. 2014. № 1. С. 26–36.
23. *Николаев А. Д., Хоряк Н. В., Башлий И. Д., Пирог В. А., Ходоренко В. Ф.* Математическое моделирование пространственных колебаний верхней ступени жидкостной ракеты-носителя с маршевым двигателем в карданном подвесе. Техническая механика. 2014. № 2. С. 24–35.
24. *Мелашич С. В.* Интеллектуальная система аэродинамического проектирования и оптимизации компрессорных венцов газотурбинных двигателей. Техническая механика. 2013. № 2. С. 72–79.
25. *Рублевский Е. Ю., Плакущий Д. А., Письменный В. И., Кваша Ю. А.* Численное исследование двухступенчатого вентилятора. Вестник двигателестроения. 2013. № 2. С. 169–176.
26. *Мелашич С. В., Болотова Н. В.* Параметрическое описание лопаток компрессорных венцов авиационных газотурбинных двигателей. Техническая механика. 2013. № 3. С. 42–49.
27. *Мелашич С. В.* Применение искусственной нейронной сети для решения обратной задачи газодинамики компрессорных решеток. Техническая механика. 2014. № 1. С. 46–51.
28. *Мелашич С. В., Кваша Ю. А.* Численное моделирование трансзвукового турбулентного течения в рабочем колесе осевого компрессора. Техническая механика. 2014. № 3. С. 15–22.
29. *Мелашич С. В.* Решение обратных задач газодинамики плоских компрессорных решеток на основе численного моделирования турбулентных течений. Техническая механика. 2015. № 2. С. 65–72.
30. *Мелашич С. В.* Обоснование целесообразности применения стохастических методов при решении задач аэродинамической оптимизации формы компрессорных венцов газотурбинных двигателей. Техническая механика. 2015. № 3. С. 39–45.
31. *Мелашич С. В.* Расчет напряженно-деформированного состояния лопатки компрессорного венца с использованием платформы численного моделирования OpenFOAM. Техническая механика. 2017. № 2. С. 51–60.
32. *Кваша Ю. А., Зиневич Н. А.* Аэродинамическая оптимизация формы лопаток спрямляющего аппарата компрессорной ступени. Техническая механика. 2016. № 3. С.35–42.
33. *Кваша Ю. А., Зиневич Н. А.* Аэродинамическая оптимизация формы лопаток направляющего аппарата сверхзвуковой компрессорной ступени. Техническая механика. 2017. № 4. С. 18–25.
34. *Болотова Н. В., Кваша Ю. А.* Численное моделирование кавитационных автоколебаний в гидравлической системе за дисковой диафрагмой. Техническая механика. 2013. № 1. С. 61–67.
35. *Пилипенко О. В.* Разработка горелочных устройств для эффективного факельного сжигания водоугольного топлива. Техническая механика. 2015. № 4. С. 23–33.

Получено 08.08.2018
в окончательном варианте 28.09.2018