

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛОПАТОЧНЫХ МАШИНАХ

Приведен обзор основных результатов исследований в области динамики систем жидкостных ракет-носителей, газодинамики лопаточных машин и динамики гидравлических систем с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями, полученных в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины в период с 2008 г. по 2013 г.

Наведено огляд основних результатів досліджень у галузі динаміки систем рідинних ракет-носіїв, газодинаміки лопаткових машин і динаміки гідравлічних систем з кавітуючими місцевими гідравлічними опорами, отриманих в Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України в період з 2008 р. по 2013 р.

The basic results of the research in the dynamics of liquid rocket systems, the gas dynamics of vane-type engines and the dynamics of hydraulic systems with cavitating local hydraulic resistances, obtained by the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine during 2008 – 2013, are reviewed.

Математическое моделирование динамических процессов в системах жидкостных ракет-носителей

Одним из направлений исследований, проводимых в отделе динамики гидромеханических систем Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, является разработка и усовершенствование научно-методического обеспечения для прогнозирования продольной устойчивости ракет-носителей (РН) с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД).

Известно, что в результате потери продольной устойчивости жидкостной РН возникают колебания корпуса ракеты в направлении её продольной оси – продольные колебания [1, 2]. С этим явлением, характерным для жидкостных РН среднего и тяжелого класса, сталкивались разработчики ракет в бывшем СССР, США, Франции, Японии при натурных испытаниях (летно-конструкторских испытаниях) РН. Продольные колебания способны привести к различным аварийным ситуациям. Несмотря на накопленный опыт решения проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН при создании новых или модернизации существующих ракет, она и в настоящее время продолжает оставаться актуальной для разработчиков жидкостных РН.

Проведение теоретических исследований для решения проблемы обеспечения продольной устойчивости РН обусловлено тем обстоятельством, что факт устойчивости (или потери устойчивости) жидкостных РН по отношению к продольным колебаниям на активном участке полета невозможно определить экспериментально в наземных условиях (при стендовых испытаниях), он может быть установлен только при натурных испытаниях РН. Устранение продольных колебаний РН или снижение амплитуд продольных колебаний до безопасного уровня при натурных испытаниях РН требуют значительных материальных и финансовых затрат. Для исключения подобных затрат необходимо проведение теоретических исследований продольной устойчивости конкретной РН на начальных этапах ее разработки или модернизации методами математического моделирования [3 – 5]. Сотрудники от-

© В.В. Пилипенко, Н.И. Довготько, О.В. Пилипенко, 2013

дела динамики гидромеханических систем внесли существенный вклад в решение проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН [4, 5]. На протяжении ряда лет в отделе изучались закономерности продольных колебаний жидкостных РН и проводились исследования, направленные на формирование фундаментальных представлений об этом сложном явлении. Была развита линейная теория продольной устойчивости жидкостных РН, прежде всего за счет учета кавитационных явлений в насосах ЖРД в математических моделях динамики ЖРД и динамики системы «Жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН». Указанный учет выполнялся в соответствии с разработанной в отделе теорией кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРД [6, 7].

Теоретический анализ устойчивости линеаризованной квазистационарной системы «ЖРДУ – корпус РН» по отношению к продольным колебаниям проводится в странах-разработчиках жидкостных РН в обязательном порядке. При этом прогнозируется сам факт устойчивости или потери устойчивости системы. Такой анализ не может дать никакой информации о величинах амплитуд продольных колебаний жидкостных РН в случае потери продольной устойчивости РН. Следует подчеркнуть, что опасность представляет не факт возможной потери продольной устойчивости, а превышение амплитудами продольных колебаний определенного допустимого уровня, который может диктоваться требованиями нормальной работы, например, приборов системы управления. В конечном итоге, именно достоверный прогноз возможных величин амплитуд продольных колебаний должен служить базой для принятия решений о специальных мерах по обеспечению продольной устойчивости жидкостных РН.

В связи с этим в отделе было выполнено математическое моделирование продольных колебаний ряда жидкостных РН как многомерных нелинейных нестационарных систем с использованием нелинейных уравнений низкочастотной динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов ЖРД, полученных в [6, 7]. Была создана нелинейная теория продольных колебаний жидкостных РН и разработана методика определения амплитуд продольных колебаний корпуса ракеты путем численного интегрирования нелинейной нестационарной системы уравнений, описывающих динамику системы «ЖРДУ – корпус РН» [8 – 10].

На основе линейной теории продольной устойчивости и нелинейной теории продольных колебаний жидкостных РН в отделе разработано и постоянно совершенствуется научно-методическое обеспечение для прогнозирования продольной устойчивости жидкостных РН и динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкции РН и полезный груз на активном участке полета. Эта разработка не имеет аналогов в Украине и за рубежом и является ключевым этапом в решении проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН при их создании или модернизации.

Разработанное научно-методическое обеспечение было использовано для теоретического анализа продольной устойчивости жидкостных РН различного назначения, созданных на ГП «КБ «Южное» и в организациях России. Результаты расчетов позволили разработать рекомендации по обеспечению продольной устойчивости этих РН.

В период с 2008 г. по 2013 г. коллективом сотрудников отдела динамики гидромеханических систем были продолжены исследования в области дина-

мики систем жидкостных РН, в том числе продольной устойчивости жидкостных РН, и были получены следующие основные результаты.

Проведено численное исследование продольных колебаний жидкостной ракеты для случая, когда замкнутая динамическая система «ЖРДУ – корпус ракеты» неустойчива одновременно на двух частотах, близких к собственным частотам колебаний корпуса [11]. Показано, что при двухчастотной продольной неустойчивости жидкостной ракеты и кратности собственных частот продольных колебаний корпуса ракеты в системе реализуется колебательный режим со значительным (трехкратным) увеличением амплитуд продольных колебаний ракеты по сравнению со случаем одночастотной неустойчивости системы.

Изучены закономерности динамического взаимодействия маршевой ЖРДУ и корпуса РН на активном участке полета. 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 упруго-диссипативных связей между динамическими звеньями корпуса. 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 схематизируется системой дискретных масс, соединенных упругими и диссипативными связями. Дана количественная оценка влияния диссипации энергии на параметры собственных продольных колебаний корпуса, и показана необходимость учета этого влияния при анализе продольной устойчивости и расчете амплитуд продольных колебаний жидкостных РН [12].

Разработана нелинейная математическая модель продольных колебаний корпуса жидкостных РН с использованием упруго-массовой расчетной схемы корпуса. Модель описывает взаимодействие продольных колебаний конструкции корпуса трехступенчатой жидкостной РН и жидкого топлива в ее баках с учетом нелинейных зависимостей коэффициентов демпфирования колебаний топлива в топливных баках и силовых характеристик элементов конструкции РН от амплитуд колебаний. Показано, что такой учет может значительно повысить достоверность результатов численного моделирования продольных колебаний жидкостных РН.

Выполнено математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний жидкости и конструкции трубопровода в насосной системе питания ЖРДУ [13]. Определены элементы передаточной матрицы питающего трубопровода в системе с кавитирующим насосом, частотные характеристики трубопровода [14] и коэффициенты форм питающего трубопровода ЖРДУ при продольных колебаниях жидкостных РН [15]. На основе разработанной модели проведен анализ в линейной и нелинейной постановке динамического взаимодействия указанных колебательных процессов в стендовой гидравлической системе с кавитирующим шнекоцентробежным насосом и с теоретических позиций объяснена экспериментально установленная аномальная форма границ областей устойчивости данной системы. Получено удовлетво-

рительное согласование расчетных и экспериментальных значений параметров кавитационных автоколебаний в стендовой гидравлической системе.

С использованием современных компьютерных средств конечно-элементного анализа проведено математическое моделирование пространственных колебаний жидкости в цилиндрическом баке при продольных колебаниях его конструкции [16]. Показано влияние демпфирования колебаний жидкости в баке и частоты вынужденных продольных вибраций конструкции бака на амплитуды колебаний давления жидкости в баке. Определены зависимости амплитуд колебаний давления жидкости на днище бака от параметров продольных вибраций конструкции бака, с помощью которых могут быть уточнены математические модели продольных колебаний жидкостных РН.

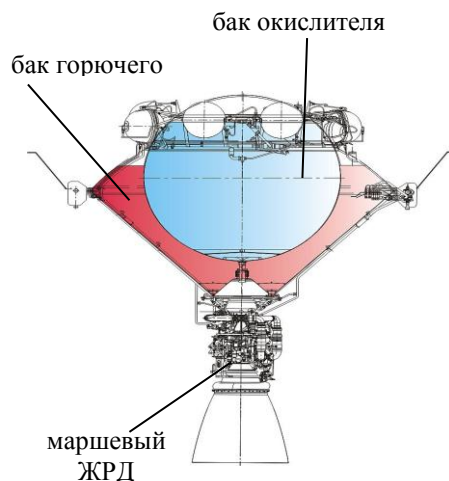


Рис. 1

Современные конструкции верхних ступеней многоступенчатых жидкостных РН создаются на основе оригинальных технических решений и представляют собой сложные пространственные тонкостенные упругие конструкции с жидким заполнением. На рис. 1 показан топливный отсек верхней ступени сложной сфероконической конфигурации. Методы и методики теоретического определения динамических характеристик таких конструкций и динамических нагрузок на них до последнего времени отсутствовали. В связи с этим особую актуальность представляют следующие две научно-методические разработки

отдела, не имеющие аналогов в Украине.

1. Научно-методическое обеспечение для определения динамических характеристик современных оригинальных конструкций верхних ступеней многоступенчатых жидкостных РН, имеющих топливные баки сложной конфигурации [17].

2. Научно-методическое обеспечение для определения параметров продольных колебаний верхних ступеней и динамических нагрузок на конструкцию ступеней на активном участке полета РН во время работы маршевой ЖРДУ первой ступени РН. Это обеспечение позволяет решать следующие задачи:

– математическое моделирование свободных продольных колебаний верхней ступени жидкостной РН со сложной пространственной конфигурацией топливных баков с использованием метода конечных элементов;

– математическое моделирование свободных продольных колебаний корпуса РН с учетом динамических характеристики ее верхней ступени;

– математическое моделирование динамических процессов в нелинейной нестационарной динамической системе «ЖРДУ первой ступени – корпус РН» с учетом характеристик собственных продольных колебаний верхней ступени;

– определение параметров вынужденных колебаний и динамических нагрузок на конструкции верхней ступени РН и космических аппаратов при продольных колебаниях жидкостных РН.

Указанные научно-методические разработки были использованы для решения различных задач динамики жидкостных РН. В частности, было выполнено математическое моделирование динамического взаимодействия ЖРДУ и конструкции верхней ступени с топливным отсеком сфероконической конфигурации. Исследованы возможности потери устойчивости верхней ступени с космическим аппаратом (КА) по отношению к продольным колебаниям во время работы ее маршевой ЖРДУ [18, 19].

Предложен обобщающий подход к математическому моделированию пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием метода конечных элементов и средств компьютерного проектирования и анализа [20]. Разработано методическое обеспечение для решения различных задач динамики объектов ракетно-космической техники, имеющих сложную пространственную конфигурацию:

- расчета динамических характеристик конструкции корпуса жидкостной РН в задаче о продольной устойчивости ракеты;
- определения параметров продольных колебаний и динамических нагрузок на конструкцию верхней ступени РН;
- определения параметров колебаний свободной поверхности жидкого топлива при оценке работоспособности средств обеспечения сплошности компонентов топлива в баках верхних ступеней.

С учетом полученных результатов исследований в отделе была разработана теория продольной устойчивости жидкостных РН и на ее основе усовершенствовано разработанное ранее научно-методическое обеспечение для прогнозирования продольной устойчивости жидкостных РН и уровней динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкции РН и КА на активном участке полета РН (во время работы ЖРДУ первой ступени). Показано, в частности, что использование усовершенствованного научно-методического обеспечения для выполнения расчетов продольных колебаний трехступенчатой жидкостной РН позволило улучшить согласование расчетных и экспериментальных интервалов по времени полета РН, в которых ракета неустойчива по отношению к продольным колебаниям, и амплитуд продольных колебаний РН на этих интервалах.

Научно-методическое обеспечение для прогнозирования продольной устойчивости жидкостных РН и уровней динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкции РН и отдельные составляющие этого обеспечения были использованы при проведении в отделе следующих работ в интересах ГП «КБ «Южное».

Выполнен теоретический анализ динамических свойств ракеты космического назначения (РКН) «Антарес» (рис. 2) на этапе ее разработки на ГП «КБ «Южное» по заказу Orbital Sciences Corporation (США), и определены требования к демпферу про-



Рис. 2

дольных колебаний для обеспечения продольной устойчивости РКН. Полученные результаты были использованы на ГП «КБ «Южное» в работах по созданию РКН «Антарес».

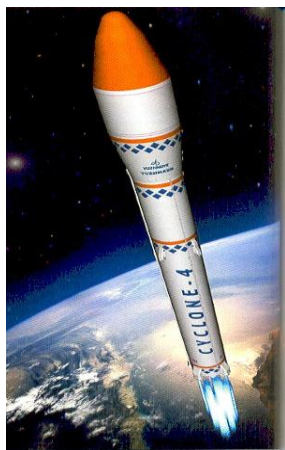


Рис. 3

Применительно к условиям пуска РКН «Циклон-4» № 1Л выполнены теоретические прогнозы продольной устойчивости РКН (рис. 3) и динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкции РКН и КА на активном участке полета ракеты (во время работы ЖРДУ первой ступени) [21]. При этом использовались результаты проведенного в отделе математического моделирования свободных продольных колебаний конструкции верхней ступени и корпуса РКН «Циклон-4» [17].

Теоретический прогноз продольной устойчивости РКН был выполнен на основе линейной математической модели низкочастотной динамики системы «ЖРДУ первой ступени – корпус РКН «Циклон-4» с «замороженными» коэффициентами, в которой корпус РН рассматривался как многосвязная диссипативная система [17]. Прогноз устойчивости динамической системы «ЖРДУ первой ступени – корпус РКН «Циклон-4» по отношению к продольным колебаниям выполнялся в соответствии с концепцией Ляпунова об устойчивости систем по первому приближению и основывался на решении проблемы собственных значений с использованием QR-алгоритма [22].

Теоретический прогноз амплитуд продольных колебаний РКН «Циклон-4» на активном участке полета РКН был выполнен с использованием разработанной нелинейной нестационарной математической модели низкочастотной динамики системы «ЖРДУ первой ступени – корпус РКН «Циклон-4».

На основании результатов теоретических прогнозов продольной устойчивости РКН «Циклон-4» с составным макетом КА и уровня продольных виброускорений КА на активном участке полета РКН было сделано следующее заключение: РКН «Циклон-4» неустойчива по отношению к продольным колебаниям, однако прогнозируемые значения продольных виброускорений РКН и КА не превышают допустимого уровня и, следовательно, не требуется принятия специальных мер по снижению уровня продольных ускорений РКН и КА для пуска РКН «Циклон-4» № 1Л [21]. Полученные результаты были использованы на ГП «КБ «Южное» в работах по подготовке к пуску РКН «Циклон-4» № 1Л.

Выполнено (в рамках совместных работ с отделом динамики и управления механическими системами) теоретическое прогнозирование колебаний жидкого топлива и конструкции верхней ступени РКН «Циклон-4» на активном и пассивном участках полета (в том числе в условиях микрогравитации) при решении задачи обеспечения сплошности компонентов топлива на входе в маршевый двигатель верхней ступени [23]. С использованием метода конечных элементов и средств компьютерного проектирования и анализа проведено численное моделирование пространственных колебаний жидкого топлива в баках верхней ступени жидкостной РН перед повторными запусками маршевого двигателя ступени. При моделировании учитывались особенности взаимодействия жидкости с упругими стенками баков в условиях

микрогравитации при малых уровнях заполнения баков, а также возмущающие ускорения от работы исполнительных органов систем управления ориентацией и стабилизацией. Показано, что на основе результатов математического моделирования колебаний верхней ступени могут быть определены следующие параметры: частоты, формы и обобщенные массы собственных колебаний компонентов топлива в баках ступени, амплитуды колебаний свободной поверхности компонентов топлива под действием возмущений от управляющих органов системы управления, а также оценено влияние колебаний конструкции ступени на работоспособность внутрибаковых устройств при многократных запусках маршевого двигателя [24].

Проведено математическое моделирование вынужденных пространственных колебаний верхних ступеней жидкостных РН с использованием метода конечных элементов. Его проведение (в рамках совместных работ с отделом динамики и управления механическими системами) было необходимо для определения характеристик сорбционных процессов в топливных баках сложной конфигурации. Показано, что полетные вибронагрузки на верхние ступени с частотами колебаний, близкими к собственным частотам пространственных колебаний системы «конструкция верхней ступени – жидкое топливо», могут существенно интенсифицировать процесс выделения растворенного газа в зонах с локальным понижением давления [25].

Математическое моделирование газодинамических процессов в лопаточных машинах

Разработка научно-методического обеспечения для комплексного решения задач аэродинамического проектирования компрессорных решеток.



Рис. 4

Проблема повышения качества аэродинамического проектирования элементов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) (рис.4) является актуальной как для Украины, так и для других стран-разработчиков авиационной техники. Это обусловлено тем, что в настоящее время, в условиях жесткой конкуренции, все более острой становится необходимость не только сохранения ранее достигнутых позиций на мировых рынках сбыта авиационной техники, но

и их дополнительного усиления.

Одним из путей решения указанной проблемы может быть использование современных эффективных научных разработок. В связи с этим в отделе разработано не имеющее аналогов в Украине научно-методическое обеспечение для решения задач аэродинамического проектирования и оптимизации лопаточных венцов (рис. 5) компрессоров ГТД в двумерной постановке.

Научно-методическое обеспечение позволяет в комплексе решать следующие задачи:

– определение исходных геометрических параметров решетки на основе решения обратной задачи газодинамики компрессорных ре-

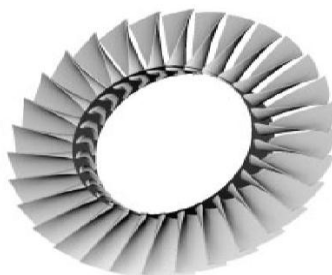


Рис. 5



Рис. 6

шеток (рис. 6) [26];

– предварительная коррекция геометрических параметров решетки с целью исключения возможности возникновения отрыва потока на профиле или его минимизации [27];

– поверочные расчеты аэродинамических характеристик решетки на основе численного интегрирования системы осредненных уравнений Навье–Стокса, замкнутой с помощью модели турбулентности SALSA [28];

– оптимизация геометрических параметров компрессорной решетки для обеспечения высоких аэродинамических характеристик [29, 30].

Ключевое значение в данном научно-методическом обеспечении имеет разработанная в отделе методика решения обратных задач газодинамики решеток профилей в плоской постановке для дозвуковых газовых течений. Основными особенностями данной методики являются следующие: использование модели течения газа Чаплыгина и применение для решения обратной задачи метода конформных отображений; удовлетворение условиям физически реализуемого обтекания решетки профилей за счет коррекции задаваемого распределения скорости по всему обводу профиля решетки; использование метода интегральных соотношений для расчета турбулентного пограничного слоя на профиле. Методика позволяет строить решетки по заданным значениям приведенной скорости и углов входа и выхода потока из решетки, определять интегральные параметры турбулентного пограничного слоя и устанавливать положение точки его отрыва на поверхностях давления и разрежения профиля, что дает возможность в первом приближении оценить уровень аэродинамического совершенства построенной решетки [31].

Применение разработанного научно-методического обеспечения при проектировании лопаточных венцов компрессоров авиационных ГТД позволяет повысить степень аэродинамического совершенства межлопаточных каналов компрессорных венцов и тем самым улучшить энергетические характеристики компрессоров авиационных ГТД, сократить сроки и затраты на проведение проектных работ. В настоящее время оно используется на ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье) при проектировании лопаточных венцов компрессоров авиационных ГТД и энергоустановок [32].

В отделе разработан подход к численному решению обратных задач газодинамики лопаточных венцов компрессоров авиационных ГТД с использованием современных информационных технологий и методов численного моделирования трансзвуковых невязких газовых течений. Этот подход играет важную роль в решении проблемы аэродинамического проектирования лопаточных венцов компрессоров. В рамках подхода разработана не имеющая аналогов в Украине методика прогнозирования аэродинамических характеристик компрессорных решеток на основе обобщения экспериментальных данных с использованием искусственной нейронной сети [33], позволяющей сократить время проектирования компрессорных венцов авиационных ГТД.

Разработка научно-методического обеспечения и проведение численных исследований рабочих процессов в многоступенчатых компрессорах авиационных газотурбинных двигателей. На рис. 7 представлен ротор многоступенчатого компрессора авиационного ГТД, а на рис. 8 показана расчетная схема

проточной части двухступенчатого вентилятора авиационного ГТД в меридиональной плоскости.

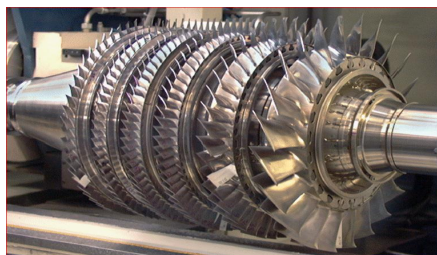


Рис. 7

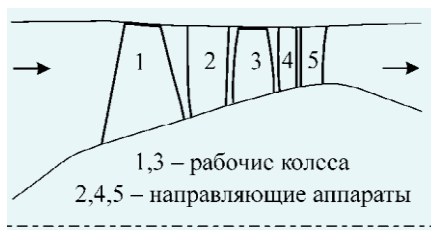


Рис. 8

Особенностями разработанного научно-методического обеспечения являются: запись уравнений математической модели течения (полных осредненных уравнений Навье–Стокса и уравнений двухпараметрической модели турбулентности) в контравариантных составляющих скорости газа; использование метода пристеночных функций при постановке граничных условий на поверхностях межлопаточных каналов компрессора; применение алгоритма коррекции скорости и давления для решения разностных аналогов основных уравнений; возможность использования двух альтернативных алгоритмов корректировки граничных условий в межвенцовых зазорах при расчете течения в многоступенчатом компрессоре.

В результате многопараметрических расчетов, выполненных на основе разработанного обеспечения, получены численные оценки влияния таких геометрических параметров компрессорных ступеней, как величина концевой зазора в рабочем колесе и угол установки входного направляющего аппарата, на энергетические характеристики ступеней.

Эффективность разработанного научно-методического обеспечения продемонстрирована на примере результатов численного моделирования пространственного турбулентного течения воздуха в вентиляторе современного двухконтурного авиационного ГТД (вентилятор включает два рабочих колеса и три направляющих аппарата). Определенные в результате серии расчетов энергетические характеристики вентилятора удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. В частности, расчетные значения адиабатического КПД и степени сжатия вентилятора в рабочем диапазоне изменения расхода воздуха через вентилятор отличаются от экспериментальных значений примерно на 2 %.

Результаты исследований ориентированы на применение на ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье) для оценки степени аэродинамического совершенства формы межлопаточных каналов многоступенчатых компрессоров на ранних этапах проектирования авиационных ГТД.

Численное моделирование нестационарных процессов в гидравлических системах с кавитирующими местными сопротивлениями

Ранее в отделе были проведены теоретические и экспериментальные исследования колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Установлены основные характерные особенности этих колебаний, физическая природа кото-

рых обусловлена периодически срывной кавитацией в местных гидравлических сопротивлениях. Как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, приведенные в [7], низко- и высокочастотные автоколебания давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями существуют в широком диапазоне изменения давления жидкости на выходе из гидросистемы. Они характеризуются большими величинами импульсов давления, которые могут превышать величину полного давления на входе в гидросистему, а частоты автоколебаний существенно зависят от геометрических параметров местных сопротивлений.

В отделе была создана теория низко- и высокочастотных колебаний давления жидкости в таких системах. В период с 2008 г. по 2013 г. развитие этой теории происходило на основе численного моделирования нестационарных процессов в гидравлических системах с кавитирующими местными сопротивлениями [34 – 36].

Разработана методика численного моделирования осесимметричного кавитационного течения вязкой жидкости в сужающе-расширяющихся каналах местных сопротивлений гидравлических систем. Математическая модель течения включает полные уравнения Навье–Стокса, а учет кавитации осуществляется на основе использования баротропного уравнения состояния парожидкостной смеси. Расчеты проводились на неструктурных расчетных сетках с треугольными элементами. Применение таких сеток представляется более предпочтительным по сравнению с использованием координатных сеток, так как проточные части местных сопротивлений имеют значительные изломы в меридиональной плоскости.

На основе указанной методики расчетным путем воспроизведен режим кавитационных автоколебаний давления на выходе из трубки Вентури в гидравлической системе “кавитирующая трубка Вентури – выходной трубопровод” [35] – см. рис. 9.

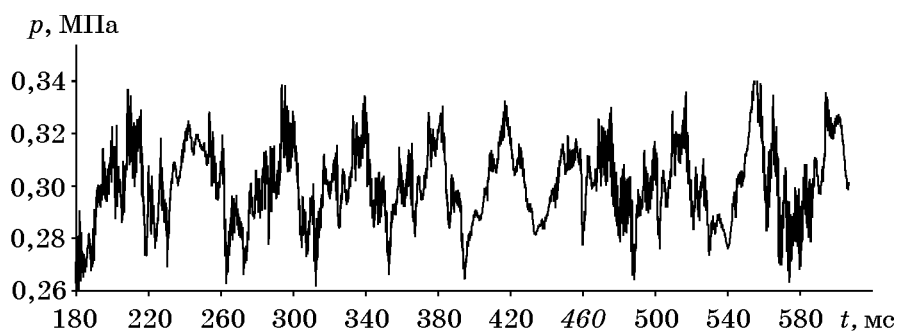


Рис. 9

Частота данных кавитационных автоколебаний, генерируемых оседлой каверной в трубке Вентури, соответствует экспериментальным данным [7].

На основе численного моделирования кавитационных колебаний в гидравлической системе за дисковой диафрагмой впервые воспроизведены основные закономерности кавитационного течения в таких системах, установленные экспериментально [7]. На рис. 10 показан режим кавитационных автоколебаний – расчетное изменение во времени давления на выходе из дисковой диафрагмы [36].

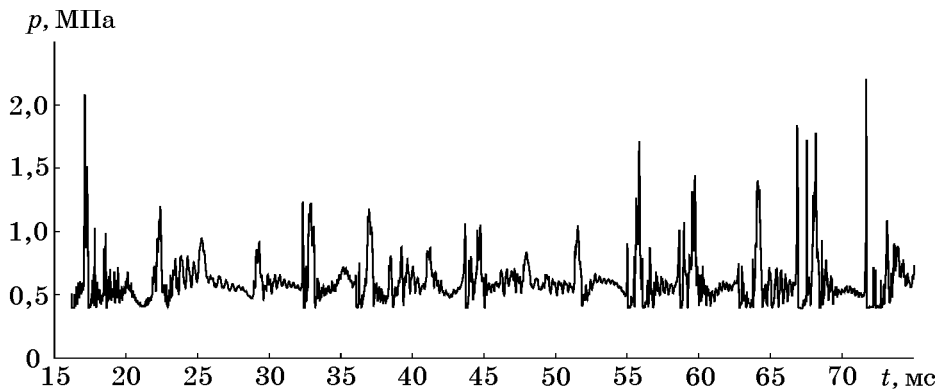


Рис. 10

Получено удовлетворительное согласование расчетных и приведенных в [7] экспериментальных значений величин размаха колеблющейся величины давления и частот кавитационных автоколебаний.

Полученные результаты позволяют расширить представления о явлении генерации низко- и высокочастотных колебаний давления жидкости в гидравлических системах с кавитирующими местными гидравлическими сопротивлениями. Они имеют важное значение в различных отраслях промышленности при создании новых и интенсификации существующих технологических процессов на основе использования пульсирующих кавитационных потоков жидкости.

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Колесников К. С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1971. – 260 с.
3. Pilipenko V. V. "Providing the LPRE – Rocket Structure Dynamic Compatibility / V. V. Pilipenko // Report on 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, June 28 – 30, 1993, Monterey, CA. – AIAA 93 – 2422.
4. Пилипенко В. В. 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.
5. Пилипенко В. В. Исследования в области динамики жидкостных ракетных двигательных установок и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей / В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, О. В. Пилипенко // Техническая механика. – 2011. – № 4. – С. 16 – 29.
6. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.
7. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания / В. В. Пилипенко. – Киев : Наук. думка, 1989. – 316 с.
8. 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.
9. Пилипенко В. В. 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.
10. 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.
11. Пилипенко В. В. Математическое моделирование продольных колебаний жидкостной ракеты при двухчастотной 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.
12. 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.
13. Пилипенко О. В. Математическое моделирование совместных продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости в гидравлической системе при установке байпасного демпфирующего трубо-

- провода / *О. В. Пилипенко, Ю. А. Жулай, С. И. Долгополов* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 1(78). – С. 21 – 25.
14. *Долгополов С. И.* Определение импедансным методом частотных характеристик прямолинейного трубопровода при совместных продольных колебаниях конструкции трубопровода и жидкости / *С. И. Долгополов* // *Техническая механика*. – 2010. – № 1. – С. 9 – 20.
 15. *Долгополов С. И.* Изменение коэффициента формы колебаний прямолинейного питающего трубопровода ЖРД при продольных колебаниях жидкостных ракет / *С. И. Долгополов* // *Техническая механика*. – 2010. – № 2 – С. 3 – 9.
 16. *Николаев А. Д.* Математическое моделирование пространственных колебаний жидкости в цилиндрическом баке при продольных вибрациях его конструкции / *А. Д. Николаев, И. Д. Башлий* // *Техническая механика*. – 2012. – № 2. – С. 14 – 22.
 17. *Николаев А. Д.* Математическое моделирование свободных продольных колебаний конструкции третьей ступени и корпуса ракеты космического назначения «Циклон-4» / *А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, И. Д. Башлий, В. А. Пирог, В. Ф. Ходоренко* // *Техническая механика*. – 2011. – № 4. – С. 37 – 44.
 18. *Николаев А. Д.* Особенности моделирования продольных колебаний верхних ступеней ракет-носителей со сложной конфигурацией топливных баков / *А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, И. Д. Башлий, С. И. Долгополов* // *Техническая механика*. – 2009. – № 3. – С. 51 – 61.
 19. *Пилипенко О. В.* Моделирование динамического взаимодействия маршевой ЖРДУ и конструкции верхней ступени РН со сложной пространственной конфигурацией топливных баков при анализе продольной устойчивости РН / *О. В. Пилипенко, А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, И. Д. Блоха, С. И. Долгополов* // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Силовые и энергетические установки аэрокосмических аппаратов: сборник научных статей. – Специальный выпуск по материалам семинара “Украинский семинар по аэрокосмической технике”, 14 – 18 сент. 2009 г. – Киев : Триакон, 2009. – № 2 (2). – С. 40 – 42.*
 20. *Башлий И. Д.* Математическое моделирование пространственных колебаний оболочечных конструкций с жидкостью с использованием современных средств компьютерного проектирования и анализа / *И. Д. Башлий, А. Д. Николаев* // *Техническая механика*. – 2013. – № 2. – С. 18 – 25.
 21. *Пилипенко В. В.* Теоретический прогноз продольных виброускорений космического аппарата при его выведении на рабочую орбиту жидкостной ракетой космического назначения «Циклон-4» / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, О. В. Пилипенко, А. Д. Николаев, В. А. Пирог, С. И. Долгополов, В. Ф. Ходоренко, Н. В. Хоряк, И. Д. Башлий* // *Техническая механика*. – 2011. – № 4. – С. 30 – 36.
 22. *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.
 23. *Пилипенко О. В.* Сплошность газонасыщенных компонентов топлива при полетных вибрациях жидкостной ракеты-носителя / *О. В. Пилипенко, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко, А. Н. Маченко, В. Н. Бичай* // *Техническая механика*. – 2009. – № 4. – С. 3 – 16.
 24. *Николаев А. Д.* Определение параметров колебаний топлива в баках космических ступеней ракет-носителей перед повторными запусками маршевого двигателя при малых уровнях заполнения / *А. Д. Николаев, И. Д. Башлий* // *Техническая механика*. – 2013. – № 3. – С. 10 – 20.
 25. *Башлий И. Д.* Влияние полетных вибраций верхних ступеней ракет-носителей на характеристики сорбционных процессов в жидком газонасыщенном топливе в баках сложной пространственной конфигурации / *И. Д. Башлий, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко* // *Техническая механика*. – 2011. – № 2. – С. 13 – 22.
 26. *Мелашич С. В.* Решение обратных краевых задач гидродинамики решеток профилей при различных граничных условиях / *С. В. Мелашич* // *Техническая механика*. – 2008. – № 1. – С. 115 – 123.
 27. *Мелашич С. В.* Решение обратных задач газодинамики компрессорных решеток с учетом турбулентного пограничного слоя на профиле / *С. В. Мелашич* // *Техническая механика*. – 2009. – № 2. – С. 87 – 94.
 28. *Пилипенко В. В.* Методика численного моделирования внутренних турбулентных течений газа / *В. В. Пилипенко, Ю. А. Кваша, С. В. Мелашич* // *Техническая механика*. – 2010. – № 4. – С. 22 – 33.
 29. *Кваша Ю. А.* О рациональном выборе расчетной сетки при аэродинамической оптимизации формы межлопаточных каналов компрессорных ступеней на основе численного моделирования турбулентных потоков / *Ю. А. Кваша, С. В. Мелашич, Е. Ю. Ямполь* // *Техническая механика*. – 2009. – № 4. – С. 57 – 67.
 30. *Мелашич С. В.* Построение и аэродинамическая оптимизация плоской компрессорной решетки с большим углом изгиба профиля / *С. В. Мелашич, В. И. Письменный, Ю. Г. Шевченко, Ю. А. Кваша* // *Техническая механика*. – 2010. – № 1. – С. 47 – 54.
 31. *Кваша Ю. А.* О совместном решении прямой и обратной задачи газодинамики компрессорных решеток / *Ю. А. Кваша, С. В. Мелашич* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 7 (54). – С. 74 – 77.
 32. *Мелашич С. В.* Проектирование направляющего аппарата последней ступени осевого компрессора на основе решения обратной и прямой задачи газодинамики / *С. В. Мелашич, Ю. Г. Калинин, В. И. Письменный* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 56 – 60.
 33. *Мелашич С. В.* Определение аэродинамических характеристик компрессорных решеток путем обобщения экспериментальных данных с применением искусственной нейронной сети / *С. В. Мелашич* // *Техническая механика*. – 2012. – № 3. – С. 14 – 22.

34. *Пилипенко В. В.* Исследование возможности повышения эффективности использования энергии потоков жидкости в гидравлических системах с кавитационными генераторами колебаний давления жидкости / *В. В. Пилипенко, И. К. Манько, Ю. А. Кваша, О. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, Л. Г. Запольский* // *Техническая механика*. – 2009. – № 4. – С. 17 – 27.
35. *Болотова Н. В.* Численное моделирование нестационарного течения в гидравлической системе с кавитирующей трубкой Вентури на неструктурной расчетной сетке / *Н. В. Болотова, Ю. А. Кваша* // *Техническая механика*. – 2011. – № 3. – С. 61 – 67.
36. *Болотова Н. В.* Численное моделирование кавитационных автоколебаний в гидравлической системе за дисковой диафрагмой / *Н. В. Болотова, Ю. А. Кваша* // *Техническая механика*. – 2013. – № 1. – С. 61 – 67.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 21.10.13,
в окончательном варианте 21.10.13