

лей на общеизвестных РН «Зенит», «Циклон» и европейской ракете-носителе «Вега».

Библиографические ссылки

1. Мелуа А. И. Ракетная и космическая техника // Библиограф. междунар. энциклопедия / А. И. Мелуа, М. А. Тихонравов. – М.; СПб. – «Гуманистика», 2003 – 268 с.

2. Назаренко В. Ф. «Безотказный двигатель» / В. Ф. Назаренко., В. Г. Перверзев // Газета «Конструктор» – № 3 (853) от 22.02.2011 г.

Надійшла до редколегії 30.11.2013.

УДК 001 (09)+62 (09)

Е. В. Горбенко

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ КОЛЕБАНИЙ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ УЧЕНЫМИ ДНЕПРОПЕТРОВЩИНЫ

Обобщены результаты и проведен анализ работ ученых Днепропетровского региона по исследованию низкочастотных и высокочастотных колебаний в жидкостных ракетных двигателях. Рассмотрены монографии, диссертации, статьи, которые исследовали вопросы динамики двигательных установок.

Ключевые слова: жидкостной ракетный двигатель, двигательная установка, низкочастотные и высокочастотные колебания.

Узагальнено результати та проведено аналіз робіт учених Дніпропетровського регіону з дослідження низькочастотних і високочастотних коливань в рідинних ракетних двигунах. Розглянуто монографії, дисертації, статті, які досліджували питання динаміки двигунах.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, рушійна установка, низькочастотні і високочастотні коливання.

Describes the results of the work of scientists Dnepropetrovsk region to study low-frequency and high-frequency oscillations in liquid propellant rocket engines. Considered monographs, dissertations and articles that examined the problems of dynamics of propulsion.

Key words: liquid propellant rocket engines, low-frequency and high-frequency oscillations.

Введение. В создании первых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) прослеживается характерное стремление к максимально полному использованию энергии химического топлива и получению максимального удельного импульса. Схема ЖРД, разработанная К. Э. Циолковским в 1903, доказала возможность использования ЖРД для межпланетных полётов. Предложенные им принципы конструктивного решения ЖРД были дополнены Ю. В. Кондратюком и сохранились в современных двигателях. Первые ЖРД были разработаны и испытаны амери-

канским учёным Р. Годдардом в 1923 и немецким учёным Г. Обертом в 1929. Над созданием ЖРД за рубежом также работали французский учёный Р. Эно-Пельтри, немецкие учёные Э. Зенгер, Г. Вальтер и другие.

Постановка проблемы

В процессе отработки ЖРД выяснилось, что при их работе возникают опасные высокочастотные и низкочастотные колебания, которые часто приводят к разрушению камеры сгорания. Историческая и техническая литература свидетельствует о фактах многочисленных и многочасовых отработок двигателей, которые затем были приняты к эксплуатации [11].

Историография проблемы и источники

Над созданием и усовершенствованием ЖРД занимались советские ученые. Это Главные конструктора КБ двигательных установок (КБ-4) Конструкторского бюро «Южное» (КБЮ) д-р техн. наук, Герой Социалистического Труда, Лауреат Ленинской и имени М. К. Янгеля премий Иван Иванович Иванов, д-р техн. наук, профессор, Лауреат Ленинской премии, Заслуженный деятель науки и техники Украины Александр Викторович Климов, лауреат Государственной премии СССР, полный кавалер ордена «За заслуги», академик Международной академии астронавтики, заслуженный работник промышленности, кандидат технических наук Шнякин Владимир Николаевич. Существенный вклад в разработку двигательных установок (ДУ) с ЖРД внес д-р техн. наук, академик АН СССР, дважды Герой Социалистического труда, Лауреат Ленинской и Государственной премий, Генеральный конструктор Валентин Петрович Глушко.

Целью настоящей работы является комплексное рассмотрение вклада ученых Днепропетровщины в решение сложных проблем по гашению низкочастотных и высокочастотных колебаний в ДУ с ЖРД.

Основная часть

В первые годы становления ракетно-космической техники (РКТ) (работы Государственного института по реактивному двигателю (ГИРД)) была поставлена цель создать двигатель, который в принципе обеспечил бы старт и полет ракеты. Поэтому в начале становления РКТ о колебаниях речи не шло.

С проблемой гашения вредных колебаний в ЖРД ракетостроители столкнулись, когда начали разрабатывать двигательные установки (ДУ) больших мощностей. В СССР одни из первых отечественных ЖРД были созданы пионером ракетной техники, основоположником отечественного двигателестроения, академиком Валентином Петровичем Глушко. Именно в период разработки и отработки ракет Р-1, Р-2, Р-5 и Р-5М впервые возникла проблема высокочастотных колебаний ракетных двигателе. «...Как раз в период разработки новых мощных жидкостных ракетных двигателей проявились явления высокочастотных колебаний давления, приводящих к стремительному разрушению конструкции. Причем проявлялись они в основном в больших однокамерных «кислородных» двигателях. Тогда перешли к двигателям с четырьмя камерами сгорания» [7, с. 483].

Неоценимо огромный вклад в исследование процессов кавитации в ДУ и демпфирования колебаний внес член-корреспондент АН УССР, академик, д-р техн. наук Виктор Васильевич Пилипенко. Будучи студентом ФТФ, В. В. Пилипенко (рис. 1) заинтересовало направление «Двигателестроение», тогда и родились первые шаги в дальнейшем изучении данной тематики. Профессор работал в КБ-4 КБЮ.



**Рис. 1. Академик НАН Украины,
д-р техн. наук,
проф. В. В. Пилипенко**

После года работы В. В. Пилипенко взялся за решение проблемы, связанной с гидроударами в ракетном двигателе КБ-4 при его отключении. Двигатель имел пироклапан, с помощью которого осуществлялась подача топлива. После прекращения подачи горючего двигатель очень быстро отключался, что вызывало его разрушение. Нужно было определить величину гидроудара, от чего она зависит, какое демпфирующее устройство можно использовать. Так, профессор В. В. Пилипенко

разработал импедансный метод расчета переходных режимов гидравлических систем [4].

В 1961 г. В. В. Пилипенко защитил кандидатскую диссертацию, а в 1964 г. возглавил сектор динамики жидкостных ракетных двигателей в КБЮ. В секторе проводились многочисленное моделирование и экспериментальная отработка динамических процессов в ДУ. Сотрудники сектора принимали участие в создании ряда образцов ракетно-космической техники.

По инициативе академика М. К. Янгеля в апреле 1966 г. в Днепропетровске было организовано новое академическое подразделение – Сектор проблем технической механики в составе Днепропетровского филиала Института механики АН УССР. Следующим этапом стало преобразование в апреле 1968 года Сектора в Днепропетровское отделение Института механики АН УССР. Руководителем Отделения был назначен академик АН УССР Всеволод Арутюнович Лазарян, в то время член-корреспондент АН УССР [13].

В феврале 1970 года в отделении был создан научный отдел динамики двигательных установок под руководством доктора технических наук Виктора Васильевича Пилипенко. В мае 1980 года на базе Отделения был создан Институт технической механики (ИТМ) АН УССР, который возглавил академик НАН Украины Виктор Васильевич Пилипенко, в то время член-корреспондент АН УССР, доктор технических наук, профессор. С 2003 года институтом руководит член-корреспондент НАН Украины Олег Викторович Пилипенко.

В Днепропетровске в КБЮ и в ИТМ широко велись специфические научные исследования в области влияния кавитации на работу двигательной установки ЖРД. Суть процесса состоит в том, что скрытая кавитация, несмотря на существование в проточной части кавитационных кавери определенных размеров, не оказывает заметного влияния на статические выходные параметры насоса, но приводит к изменению динамических характеристик системы, понижению собственных частот колебаний жидкости в питающем трубопроводе и, наконец, при определенных условиях вызывает самовозбуждение колебаний давления и расхода в системе. Поскольку природа этих колебаний обусловлена кавитационными явлениями в насосах, они и получили название кавитационных.

В работах ИТМ внимание уделялось теоретическому и экспериментальному изучению колебаний, создаваемых кавитационным генератором. Определены динамические характеристики шнекоцентробежного насоса. Выявлено, что при

очень больших амплитудах форма колебаний входного давления приобретает вид следующих друг за другом гидроударов. Это свидетельствует о том, что периодически происходит полное схлопывание кавитационных каверн в насосе.

Была создана специальная установка для имитации вынужденных разрывных кавитационных колебаний [14]. По окончании экспериментов было отмечено, что все полученные экспериментальные факты влияния различных параметров на режим разрывных кавитационных автоколебаний находятся в качественном согласовании с результатами приведенного теоретического анализа.

В 60-х годах перед профессором В. В. Пилипенко стала проблема перехода от решения задач распространения гармонических колебаний к решению задач о переходных режимах в сложных гидравлических системах. На данном этапе очень важным было задать нужный сектор частот, при которых этот переходной процесс реализовался бы. Необходимо было найти соответствующие собственные и резонансные частоты.

Велась большая работа по отработке двигателей на стендах. Хорошо запускались двигатели без дожигания генераторного газа, т.е. по открытой схеме, с постоянной времени 0,3–0,4 секунды. Однако сектор во главе с В. В. Пилипенко перешел на отработку двигателей с дожиганием генераторного газа, постоянная времени турбонасосного агрегата которого составляла 0,03–0,04 секунды. Эти двигатели моментально выходили на режим, и если окислитель и горючие не одновременно поступали в камеру сгорания, то двигатель также моментально ломался и не запускался [4].

Условия испытания двигателей на стенде абсолютно отличались от условий работы двигателя на ракете. Баки располагались на значительном расстоянии, и при подаче команды на запуск наблюдались значительные потери давления на выходе. Если при этом двигатель попадал в зону неустойчивости, то он мгновенно разрушался. Так в секторе изначально исследовали физику процесса, после математически выводили решение на бумаге, а потом воплощали в жизнь.

В 1980 г. В. В. Пилипенко добился создания Института технической механики. В это время начинается новый проект в КБЮ, связанный с созданием минометного старта. Этот проект столкнулся со многими трудностями. В частности, когда выбрасывается ракета из контейнера с помощью порохового аккумулятора давления, на высоте 15–20 м должен осуществляться запуск двигателей. При этом при выходе ракеты из контейнера возникают продольное растягивание-сжатие корпуса ракеты и колебания на входе в двигатель. Нужно было выяснить, какие колебания могут возникнуть на входе в двигателе при минометном старте. Для этого сотрудники ИТМ разработали нелинейную математическую модель ДУ, которая учитывала динамику магистралей, колебания давления на днище бака и другие характеристики. Были проведены расчеты, которые показали, что в этой проблеме не нужно использовать демпфер, потому его вклад в снижение амплитуды колебаний незначителен. Тогда главный конструктор Владимир Федорович Уткин принял решение запускать первые две ракеты с демпфером, а третью без него. Результаты оказались одинаковыми, в последующем демпферы в ракетах при минометном старте не использовали [4].

Результаты работы профессора В. В. Пилипенко отображены во многих научных работах, трех монографиях, в авторских свидетельствах и 4 патентах.

Важную проблему в пневмогидравлических системах (ПГС) ракеты представляют динамические ошибки агрегатов автоматики. Данные ошибки возникают как следствие вибраций конструкции ракеты, автоколебаний отдельных агре-

гатов, автоколебаний ПГС в составе ракеты. Задачу минимизации динамических ошибок агрегатов, то есть задачу обеспечения их динамической точности, решал канд. техн. наук А. Т. Онищенко.

В 1958 г. в КБЮ было организовано конструкторского бюро жидкостных ракетных двигателей, которое в дальнейшем было реорганизовано в КБ-4.

Основные направления в решении проблемы гашения колебаний в ЖРД изложены в [2]. К ним можно отнести:

- неустойчивость рабочего режима ЖРД;
- качественный механизм возбуждения колебаний давления в камере сгорания;
- процесс выгорания топлива в камере сгорания;
- физическая картина возбуждения низкочастотных колебаний;
- высокочастотные колебания и акустика камеры сгорания;
- высокочастотные продольные колебания;
- неустойчивость, вызываемая совместными колебаниями ракеты и двигателя.



В отличие от самостоятельных КБ, разрабатывающих двигатели для ракет различных предприятий, главной задачей КБ-4 является разработка двигателей и двигательных установок на жидких и твердых топливах для комплексов Государственного предприятия «КБ «Южное» [7].

**Рис. 2. Член-корреспондент НАНУ, д-р. техн. наук, Герой Социалистического Труда
И. И. Иванов**

Работа в тесном контакте с разработчиками ракет позволяет глубоко понимать нужды проектантов и откликаться на их предложения нестандартными схемами и конструктивными решениями. Такое взаимодействие приводило к получению на разработанных двигателях высоких энергомассовых характеристик на уровне лучших отечественных и зарубежных образцов.

Первым Главным конструктором КБ-4 стал И. И. Иванов (рис. 2).

За годы существования КБ двигательных установок было разработано более 35 двигателей и двигательных установок на жидких топливах [7]. Большая их часть (18 двигателей), пройдя полный цикл отработки, устанавливалась на ракетах, созданных Государственным предприятием «КБ «Южное». Это – маршевые двигатели для верхних ступеней ракет, созданных ГП «КБ «Южное», рулевые двигатели для первых и вторых ступеней ракет, в том числе РН «Циклон» и «Зенит», космические двигатели, в частности двигатели лунного модуля РН Н-1 и другие двигатели специального назначения. В разработанных двигателях использовались высококипящие компоненты топлива АК-2 + керосин, АТ + НДМГ, монотопливо и экологически чистая пара кислород + керосин [7].

Специалистами КБ двигательных установок был накоплен уникальный опыт отработки и изготовления двигателей, по конструктивным и технологическим решениям. В частности, это маршевые двигатели верхних ступеней РН, РД854 и РД861 со сверхзвуковыми соплами трубчатой конструкции; маршевые

двигатели вторых ступеней РН, РД857 и РД862, работающие на высококипящих компонентах топлива с дожиганием восстановительного газа, где применен способ управления вектором тяги путем вдува генераторного газа в сверхзвуковую часть сопла; двигатель лунного посадочного модуля РД858 с турбонасосной системой подачи компонентов топлива; двигатель РД8 второй ступени РН «Зенит» - первый рулевой двигатель с дожиганием генераторного газа; уникальный двигатель РД866 с комбинированной системой подачи компонентов топлива, который обеспечивает любое количество включений в невесомости. Был отработан двигатель РД120 с форсированной тягой до 93тс совместно с НПО «Энергомаш», рулевой двигатель РД8 для РН «Зенит» с двукратным запуском. На базе существующего двигателя третьей ступени РН «Циклон-3» КБ двигательных установок разработан двигатель РД861К тягой 8тс с многократными включениями [7].

В КБ двигательных установок разработаны и отработаны двигатели серии РД85 (рис. 3). Двигатель РД 857 предназначен для создания тяги и управления по-

летом вторых ступеней по всем каналам стабилизации. Это однокамерный двигатель однократного включения с турбонасосной системой подачи самовоспламеняющихся компонентов топлива, выполнен по схеме с дожиганием восстановительного генераторного газа. Рабочее тело турбины турбонасосного агрегата (ТНА) – восстановительный газ, вырабатываемый в газогенераторе.

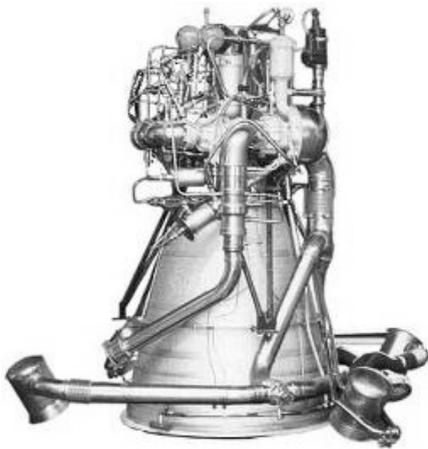


Рис. 3. Двигательная установка КБ-4 ГКБ «Южное»

Раскрутка ротора ТНА при запуске осуществляется пороховым стартером, работающим на пусковую турбину [7, с. 101].

Отработанная система регулирования двигателя включает дроссель, который обеспечивает расход окислителя по командам системы регулирования кажущейся скорости РКС, регулятор соотношения расходов, который поддерживает постоянными соотношением расходов через двигатель на всех режимах работы и изменяет его по командам системы управления расходом топлива (СУРТ), стабилизатор давления, поддерживающий постоянным соотношением расходов компонентов в газогенераторе [7, с. 114]. Регулятор соотношения расходов включает в себя расходомерные трубки, серводроссель и двухмембранный золотник. Двигатель с дожиганием генераторного газа характеризуется высокой энергетикой, обеспеченной высокими давлениями на выходе из насосов, действующими на конструкцию агрегатов. Для восстановительного газогенератора этого двигателя на стадии отработки характерной была высокочастотная неустойчивость, которая приводила к большим виброперегрузкам на элементах регулятора.

Эти факторы, а также отсутствие опыта проектирования и отработки подобных агрегатов стали причиной большого количества дефектов при автономных и огневых испытаниях. Причем основные дефекты были отмечены на золотнике. Сварная конструкция золотника оказалась неработоспособной из-за деформации. Разрушение золотника в двух случаях произошло из-за взаимодействия окислителя со спиртом, оставшимся в полостях окислителя золотника по-

сле автономных испытаний, а в одном случае произошла поломка наконечника, через который расходная полость горючего соединялась с трубопроводом подвода. Этот дефект был вызван недостаточной усталостной прочностью наконечника при воздействии на него виброперегрузок, генерируемых высокочастотной неустойчивостью генератора [7].

Н. В. Горемыкин вспоминает о проблемной работе в отделе стендовых испытаний ЖРД: «Это было начало 60-х — резкий скачок в производстве боевых ракет, в том числе дальнего действия, межконтинентальных, тех, которыми Никита Сергеевич грозился «показать кузькину мать» всему западному миру.

Наш завод играл в этом деле ведущую роль. В то время двигатель перед постановкой на ракету должен был пройти контрольное огневое испытание на стенде (КТИ). Работы у нас было «выше крыши».

... пришло время, когда я стал начальником группы по обработке высокочастотных параметров. Эти параметры (пульсации давления в камере сгорания и в ее форсуночных полостях, вибрации оболочки камеры сгорания) появились, когда очень остро встала проблема высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в маршевых двигателях ракет дальнего действия. Это явление возникло непредсказуемо, двигатель при этом превращался в «черепки», а вся хрущевская концепция «ракетно-ядерного щита» - в фикцию, поскольку даже нормально прошедшее КТИ двигателя не гарантировало его от взрыва при последующей эксплуатации.

При испытаниях на стенде стали регистрировать на магнитную ленту высокочастотные параметры, потом их обрабатывали на циклическом спектроанализаторе, а наша группа это все расшифровывала. Получалось огромное количество непонятной цифри и никто не знал, что с ними дальше делать. Никаких методик на этот счет не было, вся отраслевая наука оказалась бессильной разобраться в механизме и причинах возникновения высокочастотной неустойчивости, а тем более предложить хоть какие-нибудь меры по ее устранению... А двигатели продолжали взрываться, обстановка все более накалялась, проводимые «наукой» всевозможные эксперименты ничего не давали, т.к. под ними не было теоретической базы и не имелось достоверного механизма оценки их результатов, потому что фактические проявления неустойчивости происходило с непредсказуемой повторяемостью, иногда через 1-2, иногда через сотню испытаний, а как пользоваться для этого в/ч параметрами, никто не знал.

Был получен приказ из министерства об организации на испытательной станции аналитического отдела... Этот отдел, названный «специализированный отдел стендовых испытаний», был укомплектован способными молодыми инженерами, в основном, выпускниками физтеха ДГУ разных лет выпуска, среди них Ф. Г. Сарычев, В. И. Якимчук, Н. А. Бургай, В. А. Богомаз, А. А. Селин, Н. Г. Журавлев, всего более 20 человек. Были среди нас и весьма способные выпускники других вузов, такие как А. П. Алехин, А. И. Квитка, П. А. Цветков, Б. М. Кобызев и много других. Вскоре после организации наш отдел превратился в дружный, сплоченный, весьма работоспособный коллектив. Хотя изначально отдел создавался под проблему высокочастотной неустойчивости...

Наш отдел тесно сотрудничал с КБ-4. Основным направлением деятельности отдела была проблема высокочастотной неустойчивости рабочих процессов ЖРД. Начало практическому решению этой проблемы было положено работой сводной (от разных предприятий) группы специалистов под руководством начальника отдела надежности НИИХимМаш Я. Д. Поволоцкого. От нас в этой

группе работали я и Ф. Г. Сарычев. Полгода работы завершились созданием инженерной методики расчета показателей склонности данного экземпляра двигателя к высокочастотной неустойчивости на стационарном режиме по результатам измерения в/ч параметров при стендовом испытании. И хотя работа эта была сугубо коллективной, не могу умолчать о том, что ключевые моменты этой методики, без которых ее вообще не было бы, были придуманы именно мной. Это превалирующая информативность амплитуд колебаний на доминирующих в спектре частот, что позволило исключить из рассмотрения более 90% спектральной информации (цифири), это степень постоянства в процессе испытания одной из доминирующих частот, названная регулярностью, и, наконец, «класс устойчивости», численный показатель близости данного экземпляра двигателя к пределу, за которым с большой вероятностью наступает высокочастотная неустойчивость.

Эта методика позволила давать каждому экземпляру двигателя численную оценку вероятности его устойчивой работы и уверенно оценивать эффективность конструктивных мероприятий. Основными из них были: комплектация форсуночной головки форсунками разных классов для нарушения «плоскостности фронта горения и антипульсационные перегородки, препятствующие распространению тангенциальных пульсаций давления в камере сгорания». Эти и некоторые другие мероприятия, позволили практически решить наиболее неприятную проблему ракетостроения в Советском Союзе, и я очень горжусь тем, что внес в это существенный вклад.

Нашим отделом была разработана методика оценки высокочастотной устойчивости на запуске, в чем основную роль сыграл сотрудник отдела В. И. Якимчук.

Достойно сожаления, что ни тогда, ни в дальнейшем, отцам нашей ракетной техники не хватило мудрости увидеть коренную причину высокочастотной неустойчивости, которая, по моему мнению, состоит в чрезвычайной энергонапряженности рабочих процессов. На американских двигателях с низким давлением в камере эта проблема, по-видимому, и не возникала» [3, с. 109-115].

В 1952 году на физико-техническом факультете (ФТФ) Днепропетровского государственного университета (ДГУ) была организована кафедра двигателестроения, первым заведующим которой был профессор Ю. М. Гризодуб, который к этому моменту уже написал и защитил докторскую диссертацию по изучению колебаний в ДУ. На кафедре решались вопросы по динамике жидкостных ракетных двигателей. Первой работой, заложившей основы динамики ЖРД как учебной дисциплины, стала кандидатская диссертация И.И. Морозова [12, с. 38].

В 1960 году выпускниками кафедры двигателестроения стали академик В. В. Пилипенко, Н. Г. Петренко, А. Г. Григорьев, проф. Л. В. Пронь, д-р техн. наук В. А. Задонцев. В Конструкторском бюро «Южное» была разработана методика расчета процесса запуска ЖРД и проведен первый в СССР расчёт запуска. Стали возможны теоретические исследования переходных процессов, выбор оптимальной циклограммы запуска, сократилось количество испытаний, которые необходимо было проводить для отработки надежного запуска двигателя. Методика расчета учитывала функциональную схему процесса, запуска инерционности основных агрегатов: ТНА, гидравлических магистралей, камеры сгорания, характеристики регулирующих устройств.

Сотрудникам кафедры двигателестроения принадлежат первые в СССР научные теоретические исследования и статьи, посвященные разработке методи-

ки расчета переходных процессов при аварийных ситуациях (проф. Л. В. Пронь, 1966 г.), приближению условий испытаний на стенде к летным (акад. В. В. Пилипенко, проф. Л. В. Пронь, д-р техн. наук В. А. Задонцев) 1965 год [12, с. 39].

В 1969 году сотрудниками кафедры двигателестроения проф. В. А. Махиным, акад. В. Ф. Присняковым, доц. Н. П. Беликом была издана монография «Динамика ЖРД» [10]. Впервые в открытой печати всесторонне рассмотрены вопросы динамики основных агрегатов ЖРД, методика расчёта импульса последействия тяги, вопросы автоматического регулирования, колебательных процессов в трубопроводах ДУ, вопросы динамики гидравлических систем ЖРД и испытательных стендов, неустойчивости рабочего процесса.

В процессе подготовки монографии [1] были использованы работы сотрудников кафедры по динамике ЖРД: И. И. Морозова, Н. Г. Петренко, акад. В. В. Пилипенко, проф. В. А. Махина, проф. Л. В. Пронь, д-ра техн. наук В. А. Задонцева, акад. В. Ф. Приснякова, доц. Н. П. Белика. В 1983 г. книга была переиздана [12, с. 40].

В 1973 году сотрудниками кафедры профессорами В. А. Махиным и Л. В. Пронь издана первая в СССР монография — «Теоретические основы экспериментальной отработки ЖРД», в которой наряду с вопросами экспериментальной отработки ускоренных испытаний, планирования отработки и анализа их результатов рассмотрены вопросы выяснения причин аварийных исходов испытаний ЖРД, методики расчёта переходных процессов при аварийных ситуациях. Проведено исследование аварийных ситуаций в ЖРД.

Наряду с исследованиями динамики ЖРД, уже в 1959 г. И. И. Морозовым прочитан курс «Пороховые двигатели», в котором затрагивались вопросы динамики РДТТ. Определённый вклад в становление этого курса внесли доц. В. Т. Яковлев, проф. С. П. Фомин [12, с. 41].

В 1983 году акад. В. Ф. Присняков издал книгу «Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и систем питания». В монографии по РДТТ профессором В. Ф. Присняковым рассмотрены вопросы динамики основных элементов РДТТ, их динамические характеристики, регулирование РДТТ, неустойчивые режимы работы и переходные процессы (запуск, останов) [13].

На кафедре двигателестроения были написаны кандидатские диссертации по исследованию колебаний в двигательных установках (канд. техн. наук А. С. Глебов, канд. техн. наук В. Н. Гоцуленко) [5; 6]. Научная работа сотрудников кафедры двигателестроения позволила получить новые данные в исследовании вопросов динамики двигательных установок.

Глубокие исследования возникновения термоакустических колебаний в газожидкостных потоках и в сложных трубопроводах провели ученые ДГУ проф. Н. М. Беляев, доц. Н. П. Белик, с.н.с., к.т.н. А. В. Польшин [1].

Выводы

Обобщены результаты и проведен анализ работ ученых Днепропетровского региона по проблеме колебаний в ДУ с ЖРД. Описаны направления, по которым ученые вели исследования.

Приведены воспоминания конструкторов КБЮ и ЮМЗ о работах над усовершенствованием конструкций ЖРД, в которых была решена проблема возникших в них колебаний.

Приведен историко-хронологический анализ работ ученых и конструкторов по актуальной в теории колебаний тематике: низко- и высокочастотным колебаниям в ЖРД.

Библиографические ссылки

1. **Беляев Н. М.** Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок / Н. М. Беляев, Н. П. Белик, А. В. Польшин. – К. : Высш.школа, 1985. – 160 с.
2. **Васильев А. П.** Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов // Под ред. В. М. Кудрявцева. – 3-е изд. – К. : Высш.шк., 1983. – 703 с.
3. **Веренев В. В.** Профессия с грифом «секретно» / В. В. Веренев, Ю. И. Мошненко, С. С. Кондрашова, И. Г. Ханин. – Днепропетр. ун-т, 2001 – 536 с.
4. Флагман космічної освіти, або «Секретний» підрозділ – 2: До 60-річчя фізико-технічного факультету Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара [вітання, нариси, спогади] / Ред. кол. : М. В. Поляков (голова) [та ін.] – Д. : Пороги, 2011. – 306 с.
5. **Глебов А. С.** Исследование влияния волновых процессов в опливодопадающих системах на работу ЖРД : дис. на соиск. ученой степени к-та техн. наук / А. С. Глебов. – Д., 1957. – 161с.
6. **Гоцуленко В. Н.** Некоторые вопросы устойчивости турбомашин в системе подачи компонентов ЖРД : дис. на соиск. ученой степени к-та техн. наук / В. Н. Гоцуленко –Д., 1968. – 143с.
7. **Задонцев В. А.** Герой социалистического труда Иван Иванович Иванов (1918-1999) – первый Главный конструктор двигательного КБ–4 ОКБ–586 КБ «Южное» / XVIII Междунар. конгресс двигателестроителей, 14 – 19 сент. 2013г., Харьков – Рыбачье – Украина: программа – С. 9.
8. **Качур П. И.** Валентин Глушко. Конструктор ракетных двигателей и космических систем / П. И. Качур, А. В. Глушко // Серия: Знаменитые конструкторы России. XX век. – СПб.: Политехника, 2008. – 760 с.
9. **Кукушкин В. И.** Легкая ракета-носитель. Техническое предложение / В. И. Кукушкин, А. С. Левенко // Под ред. Д-ра техн. наук. проф. В. И. Кукушкина. – Д. : ООО ИИ «ТУ», 2013. – 320 с.
10. **Махин В. А.** Динамика ЖРД / В. А. Махин, В. Ф. Присняков, Н. П. Белик. – М. : Машиностроение, 1969. – 384 с.
11. **Санін Ф. П.** Ровиток ракетно-космічної техніки в Україні / Ф. П. Санін, Э. О. Джур, Л. Д. Кучма, В. В. Хуторний. – Д. : Изд-во Днепропетр. ун-та, 2001. – 400 с.
12. **Пронь Л. В.** Разработка основ динамики ракетных двигателей на кафедре двигателестроения / Л. В. Пронь // Вісн. ДНУ, Сер. Ракетно-космічна техніка. – Д., 2001. – Вип. 5. – С. 38-48.
13. **Присняков В. Ф.** Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и систем питания / В. Ф. Присняков. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.
14. 40 лет в рядах создателей ракетно-космических технологий: В 2 кн. / Под общей ред. В. В. Шелухина // Кн. 1: Дерзновение, талант и подвиг коллектива. – Д. : Арт-пресс, 2003. – 256 с.
15. **Пилипенко В. В.** Кавитационные автоколебания / В. В. Пилипенко. – К. : Наук. думка, 1989. – 316 с.

Автори благодарят доктора технических наук Владимира Антоновича Задонцева за оказанную помощь в иллюстративном материале.