

УДК 629.764 (09)

**ВКЛАД УКРАИНСКИХ УЧЕНЫХ
В ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАКЕТ в 1960-е гг.***А. А. Ларин**Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», г. Харьков
E-mail: larinpokotilovka@mail.ru*

В 1950-е годы Украина стала крупнейшим производителем ракетной и космической техники. Это связано со строительством в Днепропетровске Южного машиностроительного завода и созданием при нем ОКБ-586 под руководством М. К. Янгеля. Кроме того, в Харькове в 1951 г. было организовано первое в СССР предприятие для серийного выпуска систем управления (СУ) для ракет и космических летательных аппаратов – ПО «Коммунар». В 1959 г. от него отделилось ОКБ-692 (КБ «Электроприборостроения» – ныне НПО «Хартрон»), предназначенное в основном для разработки СУ ракет производства Южмаша.

В 1960-е гг. производство ракетно-космической техники стало самой передовой и наукоемкой отраслью промышленности. Наряду с другими оно вызвало и новые проблемы прикладной теории механических колебаний. При разработке первых отечественных баллистических ракет вопросы прочности их корпусов решались без учета упругих колебаний. Однако расчет корпуса ракеты с помощью коэффициента перегрузки в большинстве случаев дает заниженные результаты и поэтому при создании более совершенных и мощных ракет должен быть заменен более точным динамическим расчетом.

Впервые при определении динамических характеристик полета ракеты пришлось исследовать продольные колебания корпуса с учетом его упругости в ракетах 8К71 и 8К72, в которых проявилась продольная динамическая неустойчивость. В процессе доводки ракеты 8К71 и разработки ракеты 8К72 в ОКБ-1 был осуществлен целый ряд исследований по уточнению динамической схемы ракеты с четырехблочной компоновкой. Задачами колебаний ракет в конце 1950-х гг. занимались также в НИИ-4, НИИ-88 и НИИ-885.

При расчетах ракет рассматриваются два типа колебаний:

а) траекторные колебания – колебания ракеты как абсолютного жесткого тела, при которых основное значение имеют изменения параметров траектории полета. Эти колебания определяют динамику полета ракеты, его устойчивость и управляемость;

б) упругие колебания – циклические изменения напряженно-деформированного состояния конструкции. Эти колебания не только могут

привести к возникновению опасных напряжений, вплоть до разрушающих, но и к ухудшению работы оборудования и аппаратуры.

Поскольку устойчивость движения ракеты обеспечивается раздельно по углам тангажа, рыскания и крена, то обычно рассматривают замкнутые динамические системы в каждой из трех плоскостей. При нарушении условий устойчивости в системе развиваются колебания, которые могут перейти в почти стационарный колебательный режим. Например, продольные колебания корпуса ракеты вызывают колебания давления в баках и, как следствие, – могут вызвать изменение диаметра бака и прогиба его днища. При этом жидкость в баке перемещается относительно стенок в направлении оси ракеты, отчего возникают колебания подачи топлива в камеру сгорания. В свою очередь колебания давления в камере воздействуют на топливные магистрали и корпус ракеты. Вследствие наличия нелинейностей при некоторых соотношениях параметров колебания могут перейти в стационарный автоколебательный режим с низкой частотой (50–100 Гц). Таким образом, динамические свойства регулируемого объекта (ракеты) могут повлиять на динамические свойства автомата стабилизации и на устойчивость полета.

При таком мощном источнике энергии как ЖРД, автоколебания могут привести к возникновению больших динамических нагрузок в конструкции ракеты, которые вызывают повреждения оборудования и приборов. Может произойти даже разрушение конструкции ракеты. На основании анализа динамических свойств, как отдельных частей, так и системы в целом, требуется определить такие соотношения параметров, чтобы номинальный режим работы системы был всегда устойчивым.

Для расчета собственных частот и форм продольных колебаний корпуса применяются две основные расчетные схемы:

- 1) континуальная в виде прямого неоднородного стержня с присоединенными колебательными контурами, моделирующими жидкие наполнители;
- 2) дискретная пружинно-массовая модель, состоящая из элементов с сосредоточенными параметрами.

Кроме того, в 1960-е гг. применялись балочная расчетная схема и матричный метод. При этом использовались свойства симметрии конструкции, что позволяло сократить объем вычислений [1, с. 7].

При исследовании поперечных колебаний ракеты ее корпус представляют в виде стержня с переменными по длине массой и жесткостью. Ракета подвержена действию силы тяги двигателей, управляющей силы рулей с градиентом по углу поворота и аэродинамических сил. При этом считается, что небольшие поперечные колебания не оказывают влияния на скорость и ускорение продольного движения ракеты. Кроме того, принимается, что:

- 1) аэродинамические силы не зависят от упругих поперечных колебаний корпуса;
- 2) аэродинамические силы, обусловленные движением жесткого корпуса, не вызывают упругих поперечных колебаний;
- 3) поворот вектора силы тяги вследствие упругих поперечных колебаний корпуса не влияет на движение ракеты как твердого тела.

При этих упрощениях уравнения, описывающие колебания, распадаются на две независимые группы: уравнения возмущенного движения ракеты как твердого тела и уравнения для упругих поперечных колебаний корпуса.

Каждая ступень многоступенчатой жидкостной ракеты состоит из хвостового двигательного отсека, баков для горючего и окислителя и переходного отсека. Большинство из них имеет цилиндрическую форму, а обтекатель и переходные отсеки – форму конуса. Поначалу они рассматривались как твердые тела с полостями, частично заполненными жидкостью. Позже эти составные части корпуса ракеты стали рассматривать как тонкостенные оболочки. Таким образом, бурное развитие авиационной и космической техники в 1960-е гг. вызвало значительный прогресс в теории пластин и оболочек и потребовало проведения исследований их динамики, причем зачастую в нелинейной постановке. Первыми работами, посвященными устойчивости и автоколебаниям баллистических ракет с учетом упругих свойств корпуса и подвижности жидкости в баках, были труды Д. Е. Охочимского, Б. И. Рабиновича и К. С. Колесникова [1, с. 8, 306–308].

С проблемами колебаний ракет столкнулись и украинские специалисты. В сентябре 1959 г. состоялся первый пуск ракеты Р-12 производства Южмаша с первой в СССР шахтной установки «Маяк». Пуск оказался неудачным из-за чрезмерных вибрационных и акустических нагрузок конструкции ракеты при ее движении в шахте. В ряде источников в качестве причины аварии называется недостаточная вибропрочность приборов СУ. В действительности зажатая газами в стакане шахты ракета вырвалась из нее с оторванной рулевой машинкой и вскоре упала [2, с. 17].

2 февраля 1961 г. осуществлен первый пуск ракеты Р-16, который квалифицирован как успешный, несмотря на потерю устойчивости второй ступени. Проведенное испытание вскрыло новую техническую и теоретическую проблему – структурную неустойчивость в каналах системы угловой стабилизации, обусловленную колебаниями жидких наполнителей в частично заполненных топливных баках [2, с. 25].

Теоретическое и экспериментальное исследование характера изменения продольных сил упругости в корпусе ракеты необходимо не только для получения равнопрочной конструкции ракеты, но и для обеспечения нормального отделения ее ступеней. Так, например, на некоторых ракетах Р-12 в результате неточного определения расчетных растягивающих сил упругости корпуса ракеты произошло

заклинивание шариковых замков в месте их расположения, отчего головные части этих ракет не отделялись.

К выполнению задач, связанных с вибрациями ракет, были привлечены ведущие институты АН УССР. По запросу ОКБ-586 и постановлению ЦК КПСС и Совета министров СССР № 726-348 от 2.VII.58 и № 1003-476 от 23.VIII.58 Институт механики АН УССР выполнял ряд работ, связанных с исследованием колебаний и динамической устойчивости ракет [3, л. 112]:

В январе 1959 г. – декабре 1960 г. для ОКБ-586 проводились теоретические и экспериментальные исследования прочности ракеты средней дальности Р-14 и межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) Р-16, разработанных в КБ «Южное». Руководил темой академик АН УССР Г. Н. Савин [3, л. 126].

В план научно-исследовательских работ на 1960 г. по проблеме «Научные основы прочности и пластичности» по постановлению Президиума АН УССР от 19 апреля 1960 г., протокол № 26-I, § 341 была включена тема: «Разработка методов расчета переходных процессов в несущих элементах баллистической ракеты». Сроки выполнения: январь 1960 г. – январь 1963 г., руководитель д.т.н. А. Н. Голубенцев. Цель работы – определение упругих сил, развиваемых в несущих элементах ракеты и выбор оптимальных параметров переходного процесса в целях снижения действующих усилий и веса ракеты [3, л. 112].

В рамках этой темы разрабатывались методы расчета переходных колебательных процессов, не требующих составления и решения частотного уравнения. В частности, рассматривался расчет переходного процесса МБР при отсечке двигателей и разделении ступеней. Проводились также экспериментальные исследования динамики переходных процессов МБР и экспериментальные исследования колебаний систем с упругими связями из пластических материалов, применительно к конструкциям МБР.

Выполнялась также работа и по проблеме «Теория колебаний и устойчивость оболочек» (сроки выполнения – январь 1960 г. – декабрь 1962 г., руководитель д.ф.-м.н. Н. А. Кильчевский). Цель работы – исследование в линейной и нелинейной постановке теории колебаний статической и динамической устойчивости тонких упругих оболочек. С этой целью разрабатывалась общая линейная и нелинейная теория оболочек, в частности, были составлены эластостатические и эластодинамические уравнения однородных и слоистых с начальными напряжениями оболочек. Были исследованы продольные нестационарные колебания систем гладких цилиндрических и конических оболочек, составляющих корпус изделий 8К64 (Р-16) и 8К65 (Р-14). Исследовалось также влияние подкреплений на динамические свойства ракет [3, л. 115].

К ракетно-космической тематике были подключены и сотрудники Днепропетровского филиала Института механики АН УССР. Так д.т.н. В. А. Лазарян занимался вопросами транспортировки ракет в поездах к месту

старта. С января 1960 г. по январь 1962 г. по заказу ОКБ-586 и постановлению Государственного комитета Совета Министров СССР по оборонной технике под его руководством выполнялась тема «Исследование параметров собственных колебаний ракеты при различных степенях заполненности баков и разработка метода моделирования транспортировочных испытаний в лаборатории». Целью работы было изучение основных динамических характеристик ракеты и замена транспортировочных испытаний в натуре (в поездах) испытаниями ракет в лаборатории [3, л. 127]. В. А. Лазарян исследовал собственные частоты продольных колебаний изделий 8К63 (Р-12М), 8К64 (Р-16) и 8К65 (Р-14) [1, с. 306].

В работах по ракетно-космической тематике участвовал также Институт машиноведения и автоматики АН УССР (г. Львов). Там выполнялась работа «Разработка методов динамического моделирования межконтинентальных баллистических ракет». Сроки выполнения – январь 1960 г. – декабрь 1962 г., руководитель д.ф.-м.н. М. Я. Леонов, ответственный исполнитель с.н.с. О. Н. Романив. В работу входило:

- а) составление основных уравнений совместных продольных и изгибных колебаний ракеты;
- б) уточнение постановки задачи о колебаниях ракеты на моделях (совместно с отделом моделирования Института механики АН УССР);
- в) изучение возможности создания простейших электрических моделей продольно-поперечных колебаний ракет [3, л. 131].

В дальнейшем расчетами колебаний ракет занимались в Днепропетровском университете, ОКБ-586, ОКБ-692, Институте проблем машиностроения (г. Харьков) и Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»). В частности, в 1960-е гг. в КБ Электроприборостроения впервые в СССР решена проблема устойчивости ракеты при колебаниях жидкости в топливных баках.

Днепропетровская школа нелинейной динамики возникла в 1960-е годы. Ее основателем и научным лидером был Леонид Исаакович Маневич. Некоторые классы нелинейных систем допускают точные периодические решения – нормальные колебания. В школе, основанной Л. И. Маневичем, развивается разработанный Р. Розенбергом метод нелинейных нормальных форм колебаний. Основным направлением стало получение аналитических решений в нелинейной теории колебаний, основанное на применении асимптотических методов. В 1976 г. Л. И. Маневич переехал в Москву, а метод нелинейных нормальных форм для существенно нелинейных систем получил дальнейшее развитие в работах его учеников и последователей [4]. С распадом СССР и кризисом ракетно-космической отрасли Украины многие видные представители школы Маневича покинули Днепропетровск, часть из них работает за рубежом, а профессор

Ю. В. Михлин в 1995 г. перешел на работу в НТУ «ХПИ». С его приходом там также стало развиваться аналитическое направление нелинейной теории колебаний. В коллективной монографии [5, с. 166–190, 228–246] Ю. В. Михлин и К. В. Аврамов дают анализ достижений харьковских ученых в этой области.

Практическое приложение работы днепропетровских ученых находили в задачах динамики и управления полетом ракет и космических летательных аппаратов, их динамики и прочности и других задачах, возникавших на Южном машиностроительном заводе и в КБ «Южное».

Среди ученых Днепропетровского университета следует также отметить ученика С. Н. Кожевникова Игоря Константиновича Косько (1918–1988). Его докторская диссертация [1] посвящена динамической прочности боевых баллистических ракет при продольных колебаниях. О достижениях профессора И. К. Косько и его учеников подробно рассказано в работе [6].

С задачами колебаний ракет и ракетных двигателей была также связана деятельность видного харьковского ученого профессора Василия Евдокимовича Бреславского (1920–1997). В 1949 г. он впервые в мире нашел аналитическое решение задачи о свободных изгибных колебаниях цилиндрических оболочек в общей математической постановке [7].

Литература

1. **Косько И. К.** Динамический анализ и синтез продольных нагрузок ракет: дис. ... докт. техн. наук / Игорь Константинович Косько. – Днепропетровск. – 1971. – 318 с.

2. Научно-производственное предприятие Хартрон-Аркос. Хроника дат и событий. 1958 – 2002 гг. – Харьков: Хартрон-Аркос. – 2002. – 112 с.

3. Планы научной деятельности предприятий Академии наук Украинской ССР на 1960 год по закрытой тематике (21.07.1960) 153 л. ЦГАООУ, ф. 1, оп. 24, ед. хр. 5202

4. **Mikhlin Yu. V.** International Conference "Nonlinear Phenomena in Polymer Solids and Low-Dimensional Systems". – Moscow. – Russia. – 7–10 July. – 2008. – P. 102–107

5. Академик Александр Михайлович Ляпунов: К 150-летию со дня рождения: Монография / [Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, К. В. АВРАМОВ, Е. Е. АЛЕКСАНДРОВ и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – 288 с.

6. **Сокол Г. И.** О достижениях научной школы профессора И. К. Косько / Г. И. Сокол, Е. В. Горбенко // Вісник Дніпропетровського університету. – 2009. – № 1/2. – Серія історія і філософія науки і техніки. – вип. 17. – С. 52–61

7. **Ларін А. О.** Василь Євдокимович Бреславський - видатний вчений - механік (до 90-річчя з дня народження). / А. О. Ларін // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». – Динаміка і міцність машин. – 2010. – Вип. 37. – С. 12–19