

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

А. А. Ларин

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Харьков
E-mail: larinpokitilovka@mail.ru*

Украина входит в число девяти стран, способных разрабатывать и производить современную авиационную технику. Такое производство является наукоемким процессом, и далеко не последнее место среди его проблем занимают вопросы динамической прочности. В основе науки о прочности, наряду с другими дисциплинами, лежит теория механических колебаний. Она как самостоятельная прикладная наука возникла на рубеже XX века из теоретической механики. Причиной возникновения прикладной теории механических колебаний стало все возрастающее количество аварий, вызванных усталостным разрушением конструкций от резонансных колебаний.

Первыми задачами новой науки были задачи о крутильных колебаниях паровых валов и о поперечных колебаниях судовых корпусов. Корабли стали основными объектами для применения теории колебаний не случайно – кораблестроение было самой прогрессивной отраслью машиностроения того времени. Также в кораблестроении появились и первые гасители колебаний (демпферы), и гироскопические устройства. Именно кораблестроители – Г. Фрам, О. фон Шлик, А. Н. Крылов и др. были первыми учеными, применившими достижения теории механических колебаний на практике [1].

Тенденция проявления новых колебательных эффектов в самых современных машиностроительных конструкциях сохранялась и впоследствии. В начале XX века ими становятся двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и паровые турбины. Развитие ДВС стало стимулом для появления новых видов техники – тракторов, автомобилей, аэропланов, танков и др.

В 1930-е годы наступает период бурного развития авиации с поршневыми ДВС. Стремительно растут скорость и дальность полета самолетов. В связи с ростом скорости, авиаконструкторы столкнулись с явлением флаттера – автоколебаниями крыла самолета, возникающими при обтекании его потоком воздуха. Флаттер стал настоящим бедствием для авиации, затормозившим ее прогресс. Побороть его в СССР смог молодой сотрудник Центрального аэрогидродинамического института М. В. Келдыш. Он не только нашел объяснение этого явления, но и создал его достаточно простую математическую модель и соответственно простой метод расчета самолета, позволивший

авиаконструкторам практично побороть флаттер [2, с. 598–603; 3]. Позже явление срывного флаттера проявилось и в других конструкциях. Самой известной катастрофой, связанной с этим явлением стало крушение Такомского моста 7 ноября 1940 г.

Другим бедствием для авиации, имеющим аналогичную природу, стало шимми – автоколебания стойки шасси, возникающие при взлете и, особенно, при посадке самолета от взаимодействия колеса с бетонной дорожкой аэродрома. М. В. Келдыш составил уравнения движения колеса с учетом линейной зависимости кривизны следа колеса от силы сцепления с взлетно-посадочной полосой и нашел пути устранения шимми [2, с. 603–604].

Решение указанных проблем теории колебаний устранили существенные препятствия на пути развития отечественной скоростной авиации.

В основе успехов авиации лежит прогресс в области двигателестроения. Всего за десятилетие мощность поршневых авиамоторов возросла на порядок. Именно авиамоторы, как самые мощные и легкие двигатели, породили новые проблемы теории колебаний. Если в судовых силовых установках крутильные колебания не приводили к разрушению коленчатых валов, то в авиамоторах слабым местом оказались именно они. Так в мае 1929 г. на дирижабле «Граф Цеппелин» – гордости Германского воздушного флота при перелете из Европы в Америку из-за разрушения коленчатых валов вышли из строя четыре из пяти моторов, что вынудило воздушный корабль вернуться. При осмотре оказалось, что и последний двигатель также имел надлом коленчатого вала. Причиной поломок стали резонансные колебания крутильной системы валопровода, возникшие из-за изменения собственных частот, вызванного увеличением предварительного натяжения пружин муфт сцепления. Данный случай, едва не приведший к катастрофе, показал опасность крутильных колебаний валопроводов двигателей, которые могут возникнуть даже при малейших его изменениях. Поначалу аварии происходили с авиационными двигателями не только вследствие их большей нагруженности, но и благодаря тому, что коленчатые валы авиамоторов изготавливались из легированной стали, которая, наряду с большим временным сопротивлением разрыву, имеет относительно малую демпфирующую способность, что способствует возникновению колебаний [4, с. 233–236].

Учет деформирования коленчатого вала при расчетах крутильных колебаний вынудил рассматривать многомассовые модели, что, в свою очередь, вызвало создание новых методов расчетов колебаний дискретных систем [5].

С авиамоторами связаны и первые попытки применения маятниковых антивибраторов и демпферов для гашения крутильных колебаний [4, с. 260–268]. Применение упругих муфт с нелинейными характеристиками также породило новые проблемы, а именно расчет колебаний существенно нелинейных механических систем. Существовавшие методы позволяли рассматривать в

основном нелинейные системы с одной степенью свободы, а расчеты многомассовых систем вызывали большие трудности [4, с. 269–271].

Переход к использованию вместо деревянного гибкого металлического пропеллера вызвал задачу о связанных изгибно-крутильных колебаниях системы вал – воздушный винт. Именно она привела к созданию профессором Колумбийского университета (США) Морисом Био метода динамических жесткостей [6].

Таким образом, среди проблем динамической прочности ДВС на первое место вышли проблемы коленчатых валов, которые являются наиболее нагруженными и, следовательно, наиболее ответственными деталями поршневых машин. Первыми проявились именно крутильные колебания, поскольку их частоты ниже, чем у изгибных или продольных. Однако коленчатые валы испытывают не только крутильные, но и продольные, и изгибные колебания. При их расчетах необходимо учитывать податливости опор, влияние масляного слоя, сложный характер демпфирования и другие факторы. Задачи колебаний коленчатых валов в период 1930–1960-х гг. были одними из важнейших в машиностроении и способствовали развитию методов расчетов колебаний и способов борьбы с вибрациями [7, с. 284].

Украинские ученые внесли большой вклад в развитие авиамоторостроения в 1930–40-е гг. Именно исследования колебаний авиамоторов способствовали зарождению и развитию украинских научных школ в области теории колебаний.

Первыми проблемами колебаний авиамоторов стали заниматься представители киевской научной школы механики твердого деформируемого тела. Ее деятельность связана с Институтом строительной механики АН УССР (ныне Институт механики НАН Украины им. С. П. Тимошенко). Исследования динамической прочности деталей машин связаны с деятельностью директора института академика АН УССР Сергея Владимировича Серенсена. В предвоенные годы Институт строительной механики стал ведущей организацией в СССР по вопросам прочности коленчатых валов – самых нагруженных и ответственных деталей авиамоторов. Наиболее важной в этот период деятельности института была задача усовершенствования методики расчетов их изгибных колебаний. Большую работу по совершенствованию авиамоторов провели работники эвакуированного в Уфу института в годы Великой Отечественной войны [4, с. 233–236; 8].

Особо следует отметить деятельность состоящей при институте кафедры математической физики, сотрудники которой академики Н. М. Крылов и Н. Н. Боголюбов, основатели научной школы нелинейной механики, получившей мировое признание, занимались в годы войны расчетами нелинейных крутильных колебаний валопроводов авиамоторов. Методы Крылова – Боголюбова для расчетов нелинейных систем были внедрены не только на авиамоторных заводах, но и в Центральном институте авиационного моторостроения (ЦИАМ). В послевоенные годы ученик Крылова и Боголюбова Ю. А. Митропольский также

исследовал колебания валопроводов авиамоторов, а именно колебания при проходе через резонанс [9].

Большое значение имело и внедрение в практику авиамоторостроения метода электромеханического моделирования, предложенного сотрудником Института строительной механики И. М. Тетельбаумом. Этот радикальный способ упрощенного определения усилий в валах авиационных и судовых рядных двигателей основан на замене расчета осциллографированием напряжений или токов в отдельных ячейках электрической модели двигателя. В 1942 г. в ЦИАМе по проекту Тетельбаума был реализован первый в СССР расчетный стенд, представляющий модель двигателя, составленную из дросселей и конденсаторов, фотоэлектрического датчика импульсов тангенциальных усилий и измерительного устройства. На этом стенде проверялись на возможность резонансных режимов все создаваемые в годы войны авиамоторы [4, с. 300–305].

Еще одной организацией, в которой занимались в предвоенное время динамическими расчетами авиамоторов, стал Украинский научно-исследовательский авиадизельный институт [10]. Наибольший интерес с точки зрения борьбы с вибрациями представляет деятельность его сотрудника Ю. А. Гоппа. Среди многих задач он занимался расчетами нелинейных колебаний валопроводов авиамоторов и методами их гашения. Монография молодого харьковского ученого, подытожившая результаты многочисленных исследований, была первой книгой на русском языке, посвященной демпфированию колебаний [11].

С переходом авиации на газотурбинные двигатели (ГТД) возникло много новых проблем, связанных с колебаниями дисков и лопаток турбин. В их решении помог опыт, накопленный при исследовании колебаний лопаточного аппарата паровых турбин. С проблемами колебаний ГТД была связана и деятельность академика Г. С. Писаренко, основавшего в 1966 г. Институт проблем прочности АН УССР, в котором он создал отдел колебаний неконсервативных механических систем. Основным направлением исследований отдела стало влияния рассеяния энергии в материале на колебания механических систем с учетом воздействия таких факторов как температура, ударные нагрузки, различные конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности [12, с. 809–916].

С проблемами колебаний ГТД и элементов летательных аппаратов связана и деятельность харьковской школы прикладной математики и механики, существующей на инженерно-физическом факультете Харьковского политехнического института (сейчас НТУ «ХПИ») и Институте проблем машиностроения НАН Украины.

Основы научной школы были заложены в 1930-е гг. профессорами И. М. Бабаковым, Я. М. Бланком, В. И. Блохом и членом-корреспондентом АН УССР В. М. Майзелем. Окончательно же она была сформирована после Великой

Отечественной войны. В это время лидером школы, безусловно, являлся А. П. Филиппов, с 1967 г. академик АН УССР, а основным приложением научных исследований были задачи прочности в турбостроении. Впоследствии многие методы расчетов лопаточного аппарата и дисков паровых турбин были с успехом перенесены на авиационные газовые турбины.

Среди задач, рассматривавшихся учеными харьковской школы и связанных с проблемами авиационной техники, продольно-изгибно-крутильные колебания сложных механических систем, колебания вращающихся валов, в том числе нестационарные колебания валов неодинаковой жесткости в двух плоскостях, валов на упругих нелинейных опорах, совместные колебания ротора и корпуса ГТД. С проблемами авиационной техники связаны также задачи о колебаниях трехслойных пластин и пологих оболочек при упругом ударе, а также исследования их флаттера, решавшиеся под руководством профессора Е. Г. Голоскокова [13].

Кратко о достижениях харьковской школы в области теории механических колебаний можно прочитать в очерке профессора В. А. Жовдака «Колебания, динамика и надежность сложных механических систем» в книге [14, с. 189–217]. Что касается более подробного освещения вклада представителей научной школы в развитие авиационной техники, то это тема отдельного исследования.

Достижения украинских ученых в области теории механических колебаний в дальнейшем были эффективно использованы при создании ракет и космических летательных аппаратов.

Литература

1. Ларин А. А. Развитие теории колебаний механических систем в кораблестроении / А. А. Ларин // Дослідження з історії техніки Зб. наукових праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Вип. 11. – С. 29–36
2. Ишлинский А. Ю. Механика: идеи, задачи, приложения. / А. Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1985. – 624 с.
3. Борин А. А. Из истории решения проблемы флаттера / А. А. Борин // Из истории авиации и космонавтики, 1977. – Вып. 32. – С. 68–78
4. Ларин А. А. Очерки истории развития теории механических колебаний / А. А. Ларин. – Севастополь: Вебер, 2013. – 403 с.
5. Ларин А. А. Роль исследований крутильных колебаний валопроводов в развитии динамики машин / А. А. Ларин // Питання історії науки і техніки. – 2009. – № 4. – С. 2–9
6. Biot M. Coupled Oscillations of Aircraft Engine-propeller Systems, Journal of the aeronautical sciences. / M. Biot. – Vol. 7. – № 9. – P. 376 – 382. – July 1940. (Journ. of Aeron. Sciences)
7. Динамика и прочность коленчатых валов. / [Сб. статей под ред. С. В. Серенсена]. – М.–Л.: Изд-во АН СССР. – 1950. – 296 с.

8. Ларин А. А. Деятельность Института строительной механики АН УССР в области динамической прочности в 1930–1940-е гг. / А. А. Ларин // Вестник Национального технического университета «ХПИ». - История науки и техники, 2008. – Вып. 53. – С. 67–79

9. Ларин А. А. Исследования крутильных колебаний авиамоторов основателями нелинейной механики Н. М. Крыловым, Н. Н. Боголюбовым и Ю. А. Митропольским в 1940-е гг. / А. А. Ларин // Вісник Дніпропетровського університету, 2009. – № 1/2. – Серія історія і філософія науки і техніки. – вип. 17. – С. 61–68

10. Ларин А. А. О деятельности Украинского авиадвигательного института в 1930-е гг. / А. А. Ларин // Матеріали VIII наукових читань «Дніпровська орбіта – 2013». – Дніпропетровськ, 2013, с. 55–60

11. Ларин А. А. Жизненный и творческий путь профессора Юрия Аркадьевича Гоппа / А. А. Ларин // Омский научный вестник, 2013. – № 2 (120). – С. 40–44

12. Прочность материалов и конструкций / [Редкол.: В. Т. Трощенко (отв. ред.) и др.]. – К.: Академперіодика, 2006. – 1076 с.

13. Евгений Григорьевич Голоскоков (к 80-летию со дня рождения) Библиографический указатель / Сост. А. А. Ларин, С. А. Горелова. – Х: НТУ «ХПИ», 2008. – 44 с.

14. Морачковский О. К. Инфиз: очерки истории творчества / О. К. Морачковский. – Х.: Энерго Клуб Украины, 2005. – 372 с.