

УДК 62.134.5 (09)

**СПІВПРАЦЯ ХАРКІВСЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО ІНСТИТУТУ  
З ТУРБОАТОМОМ У ГАЛУЗІ ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН**

**Ларін А.О.**, канд. техн. наук, доц., **Меньшиков С.О.**  
(НТУ «Харківський політехнічний інститут»)

*Статтю присвячено спільній роботі кафедри «Динаміка і міцність машин» Харківського політехнічного інституту з Харківським турбінним заводом над проблемами турбобудування.*

Турбобудування є однією з основних складових енергомашинобудування. У свою чергу, енергетика це основна галузь народного господарства, від рівня розвитку якої визначається і рівень розвитку всієї економіки країни. У роки Великої Вітчизняної війни окупанти зруйнували всі промислові підприємства України. З усіх галузей промисловості найбільшої шкоди було завдано турбобудуванню. На звільненій від фашистів території енергетичне господарство було повністю зруйновано. Для відновлення електростанцій терміново потрібні були не тільки запасні частини, а й нові турбіни і генератори. Не чекаючи закінчення війни, уряд УРСР приймає заходи по відновленню народного господарства, і в першу чергу енергетики.

Незважаючи на брак кваліфікованих робітників і інженерних кадрів, вже в 1944 р. у Харкові на Харківському турбогенераторному заводі (ХТГЗ) почалась активна робота з відновлення технологічних циклів виробництва. Це мало колосальне значення для відновлення енергетики всієї краї-

ни. Для міста Харкова на ХТГЗ було відновлено і укомплектовано чотири турбіни загальною потужністю 68 тис. кВт; дві турбіни потужністю 22 тис.



кВт для Києва, а також змонтовані турбіни для Севастополя, Калуги і Штерівської ГРЕС. Видатним досягненням колективу заводу в 1945 році був випуск за завданням Державного Комітету Оборони для Зуївської електростанції турбін

потужністю 50 і 100 тис. кВт. Стотисячна турбіна була виготовлена за короткий термін – 8 місяців. В середині 1946 року на Зуївській електростанції в Донбасі була здана в експлуатацію ще одна виготовлена колективом заводу турбіна потужністю 100 тис. кВт. У світі було лише кілька таких велетенських турбін. Але найголовніше полягало в тому, що ця турбіна була виготовлена швидше менш потужних турбін, що випускалися раніше.

З 1948 року турбобудівники переходили на виробництво турбін високого тиску потужністю 50 в 100 тис. кВт. Нові конструкції машин по своїй економічності і надійності були на рівні сучасного турбобудування і зу-



мовлювали лінію технічного розвитку заводу на найближчі 10-12 років. Уже в першому півріччі 1948 р. на ХТГЗ була випущена турбіна високого тиску ВР-25 потужністю 25 тис. кВт, а у вересні турбіна АК-50 (50 тис. кВт) [1, арк. 206].

Для наукового забезпечення відновлення і розвитку турбобудування в системі Академії наук УРСР були створені цільові наукові організації. Серед них Лабораторія проблем швидкохідних машин і механізмів, яка почала свою діяльність як самостійна науково-дослідна установа з 1 жовтня 1944 р. у Києві. Керував Лабораторією академік Г. Ф. Проскура.

У 1948 р. Лабораторію проблем швидкохідних машин і механізмів переводять до Харкова, об'єднавши з нею Харківську філію Інституту теплоенергетики АН УРСР. За новим штатним розкладом до складу Лабораторії увійшов відділ динаміки і міцності деталей турбомашин [2, арк. 1].

Переїзд Лабораторії до Харкова активізував її співпрацю з ведучим турбобудівним заводом СРСР – ХТГЗ [3, арк. 45]. У її складі був організований сектор динаміки частин машин і механізмів, який очолив А. П. Філіппов, обраний в 1945 р. членом-кореспондентом АН УРСР [4]. З переїздом Лабораторії до Харкова також почалася і її співпраця з Харківським механіко-машинобудівним інститутом (зараз НТУ «ХП»). З 28 вересня 1948 керівник відділу динаміки і міцності деталей турбомашин А. П. Філіппов за сумісництвом стає завідувачем кафедрою динаміки і міцності машин. З приходом Анатолія Петровича наукова тематика кафедри в основному стала спрямовуватися на вивчення проблем турбобудування.

Великий внесок у дослідження динамічних процесів роторів турбоге-

нератора вніс А. В. Дабагян [5]. Докторську дисертацію на тему «Некоторые колебательные процессы в роторах турбо- и гидрогенераторных установок при несимметричных и асинхронных режимах работы генератора», Арег Вагаршакович підготував у 1959 р. і захистив у січні 1961 р. [6]. До цього вивчення перехідних і сталих процесів розглядалося окремо в первинному двигуні (турбіні), в електричній машині (генераторі) і, нарешті, в високовольному ланцюзі. При цьому міцнісні розрахунки механічних елементів, у тому числі і пов'язані з настанням резонансних режимів, виконувалися за наближеною схемою і не зв'язувалися з електричними режимами. Однак аварії лопаток турбін можуть бути викликані електричними процесами в генераторі або в електричному ланцюзі. Тому Дабагян в своїй роботі розглядає енергетичну установку як єдиний перетворювач різних видів енергії. Ним була розроблена наближена методика розрахунку коливань ротора і встановленого на ньому лопаткового апарату при різних електричних режимах: несиметричне навантаження, асинхронний хід, миттєве скидання [6, арк. 267-268].

Перехід в турбобудуванні до більш високих робочих температур, тиску і окружних швидкостей зажадав всебічного розвитку теоретичних та експериментальних досліджень вібраційних явищ в дисках і лопатках турбомашин. Прагнення створити конструкції можливо меншої матеріаломісткості призвело до створення турбомашин з рівномісними вузлами і деталями. В результаті частотні характеристики окремих конструктивних елементів виявилися одного порядку. Це, в свою чергу, призвело до сильного взаємозв'язку коливань. Зокрема, однією з важливих і цікавих проблем

динамічної міцності роторів турбомашин стала проблема спільних коливань робочих лопаток і дисків.

Саме цій проблемі була присвячена кандидатська дисертація С. І. Богомолова. У своїй роботі він розглянув згинні коливання диска постійної товщини спільно з лопатками, центр кручення і центр ваги поперечного перерізу яких збігаються [7]. Богомолов наводить рішення диференціального рівняння форм коливань диска конічної форми методом розкладання в ряд, в якому, правда, для більшої точності рішення доводилося обчислювати якомога більше членів. На підставі проведених досліджень автор зробив ряд важливих висновків.

Почавши з часткової задачі, Сергій Іванович продовжив дослідження в цьому напрямку, і в 1969 р. захистив докторську дисертацію на тему: «Колебания дисков турбомашин» [8]. Провівши цикл експериментальних досліджень на спеціальних модельних дисках, він показав, що досить повне теоретичне уявлення про динамічні властивості системи диск-лопатки можна отримати тільки на основі спільного рішення диференціальних рівнянь, що описують згинні коливання дисків і згинально-крутильні коливання робочих лопаток. Такий підхід дозволяє визначити динамічні властивості облопачених дисків в широкому діапазоні частот і виявити особливості взаємодії робочих лопаток і диска при спільних коливаннях.

Крім того, в роботі виконано великий обсяг експериментальних і теоретичних досліджень динамічних властивостей круглих пластин і дисків турбомашин в умовах нерівномірного осесиметричного нагріву. З цією метою був створений комплекс експериментальних установок для дослідження динамічних характеристик круглих

пластин, робочих лопаток, дисків турбомашин, зокрема розроблена конструкція і створена потужна установка для дослідження коливань дисків що не обертаються і робочих лопаток при високих температурах. В результаті були визначені закономірності динамічних властивостей дисків при високих температурах. Показано, що частоти згинальних коливань дисків залежать, головним чином, від величини теплоперепаду, яка визначається різницею температур периферійної і центральної частин диска [9].

Основною трудностю досліджень спільних коливань дисків і лопаток було те, що конструктивні особливості робочих коліс турбомашин не дозволяли застосувати існуючі методи чисельного рішення диференціальних рівнянь навіть за допомогою ЕОМ. Тому колективом співробітників кафедри ДММ ХПІ в складі С. І. Богомолова та його учнів А. М. Журавльової та О. К. Сливи був розроблений єдиний підхід до вирішення задач про коливання складних механічних систем, заснований на матричному методі дослідження коливань, що дозволяв найкращим способом використати обмежені ресурси ЕОМ того часу.

У роботі О. К. Сливи розроблений загальний метод побудови дискретних моделей природно закручених стрижнів та круглих пластин, і на цій основі проведено дослідження згинально-крутильних коливань як окремих лопаток, так і їх пакетів. Розглянуто різні способи розміщення заміняючих мас дискретних моделей [10].

У кандидатській дисертації А. М. Журавльової [11] розроблено метод дослідження спільних коливань конструктивних елементів ротора барабанно-дискового типу, що представляє собою систему тонких облопа-

ченних дисків, зв'язаних в пакет конічною або циліндричною оболонкою обертання. Проблема виникла у зв'язку з тим, що жорсткість оболонок порівнянна з жорсткістю тонких і гнучких дисків. Для дослідження використовувався матричний метод, при цьому матричне рівняння коливань підкріплюючих оболонок виходило за допомогою основних диференціальних рівнянь вигину оболонок в рамках теорії Кірхгофа-Лява [11, арк. 46-65]. Програма, реалізована на ЕОМ М-20, передбачала можливість дослідження динамічних характеристик дисків, у яких може варіюватися положення підкріплюючих оболонок, а також характер граничних умов на внутрішньому контурі диска і торцях підкріплюючих оболонок.

Другим у роботі був метод розрахунку спільних коливань системи «пружні опори – вал – диски – робочі лопатки» і критичних швидкостей багато-опорних роторів на піддатливих пружних опорах з урахуванням пружно-інерційних властивостей гнучких прецесуючих облопачених дисків.

Пізніше С. І. Богомолвим і А. М. Журавльовою були написані дві монографії, присвячені коливанням складних механічних систем, які описують коливання в парових і газових турбінах [12; 13].

Ще одним співробітником кафедри ДММ, який займався проблемами ко-коливання елементів турбін, був І. Б. Карінцев. У своїй кандидатській дисертації (1965) він досліджував коливання валів на коротких опорах рідинного тертя при турбулентному режимі. У дисертації вирішена гідродинамічна задача турбулентного змащення для коротких опор рідинного тертя. Завдання вперше вирішене для граничних умов, відповідних щіль-

ним ущільненням гідромашин. Сукупність отриманих в роботі результатів дозволяє більш повно представити природу явищ що протікають і дають можливість вибирати параметри ущільнень, що забезпечують хороші антивібраційні якості роторів. Цілий ряд отриманих результатів був використаний при проектуванні нових високо-напірних живильних насосів [14].

У довоєнний період вали турбін будувалися в основному жорсткими з невеликим перевищенням (~ 15 %) числа оборотів над критичними. Усунення небезпеки від коливань вигину для таких роторів вимагає, головним чином, хорошого балансування. Однак прагнення полегшити конструкцію призвело до застосування в парових турбінах "гнучких" роторів, робочі обороти яких вище перших критичних швидкостей і турбіна під час пуску або зупинки проходить резонанс. Але амплітуди коливань при цьому менші, ніж на усталеному резонансному режимі, так як вони не встигають розвинутися. Відтак, простий розрахунок вимушених резонансних коливань дасть завищене значення амплітуд. Тому актуальним завданням для таких систем є вивчення нестационарних коливань, тобто перехідного процесу. Ці питання були детально розглянуті академіком АН УРСР А. П. Філіпповим і його учнем Є. Г. Голоскоковим. Результати досліджень були ними описані в кількох монографіях. Детальніше про ці роботи можна дізнатися в статті [15].

С. І. Богомолв закінчив ХПІ в грудні 1951 року за фахом динаміка та міцність машин. Його дипломна робота на тему «Исследование системы регулирования турбины ВР-25-1 методом нелинейной механики» була продиктована вимогами практики, а тема запропонована Харківським тур-

богенераторним заводом (ХТГЗ) ім. С. М. Кірова. Як зазначалося у відгуку на роботу Сергія Івановича керівника – доцента А. В. Дабагяна, аналіз системи регулювання цієї турбіни проводився на заводі методом лінеаризації системи рівнянь, що описують процес регулювання [16, арк. 20]. Однак розвиток паротурбобудування, особливо турбін з високими і надвисокими параметрами пари, турбін спеціального призначення зажадав створення більш досконалих і надійних систем автоматичного регулювання. Актуальним стало питання про урахування нелінійностей в системі автоматичного регулювання та їх впливу на динамічну стійкість останньої.

У своїй роботі дипломник Богомолів досліджував стійкість нелінійної системи автоматичного регулювання, зокрема, провів пошук автоколебальних режимів в контурі регулювання протитиску. Справа в тому, що в системах регулювання протитиску предввімкнених турбін часто зустрічалися неполадки. Ним також було зроблено аналіз перехідних процесів в системі регулювання за допомогою електроінтегратора. При вирішенні цього питання Богомолів користувався методом визначення критеріїв стійкості професора А. І. Лур'є, розробленим на базі теорії стійкості руху О. М. Ляпунова.

У рецензії керівника відділу регулювання ЦОКБ при ХТГЗ А. Фрідмана на дипломну роботу С. І. Богомоліва кафедри ДММ було висловлено побажання – розвивати цей напрямок досліджень і надалі [16, арк. 14-18].

Саме потребами турбобудування продиктована і тема кандидатської дисертації А. В. Бурлакова, присвячена дослідженню напружено-

деформованого стану елементів паропроводу в умовах повзучості матеріалу [17]. Анатолій Васильович згодом став відомим вченим у галузі теорії пружності, пластичності і повзучості, доктором технічних наук, професором кафедри динаміки і міцності машин ХПІ. У докторській дисертації Анатолій Васильович продовжив вивчення даної проблеми, розглянувши повзучість ізотропних і анізотропних оболонок з урахуванням ефекту концентрації напружень біля отворів. Система нелінійних диференціальних рівнянь, запропонована А. В. Бурлаковим в цій роботі, дозволяє досліджувати несталу і сталу повзучість широкого класу практично найбільш важливих оболонок. Вони є загальними для вирішення як осесиметричних, так і неосесиметричної задач [18].

Турбіна працює в умовах високих температур, а її ротор обертається з великими оборотами. У зв'язку з цим найважливішою проблемою в турбобудуванні є задача пластичності таких елементів турбомашин як оболонки обертанні і диски. Цим питанням присвячені роботи А. Н. Підгорного і В. В. Бортового.

У проблемній лабораторії при кафедрі ДММ для вивчення цих питань була створена унікальна установка ВРД-500 для дослідження міцності дисків і роторів турбомашин при великих швидкостях обертанні (до 30 000 об/хв) і високих температурах (до 900° С) [19, арк. 2].

На установці проводилися експериментальні дослідження для різних підприємств і організацій, таких як Центральний науково-дослідний інститут технології і машинобудування (м. Москва), п/с А-7187 (м. Коломна) та ін. Установка дозволила вивчити деякі просторові завдання термопружності і термопластичності, отримати

основні теоретичні залежності для визначення напруженого стану обертового, нерівномірно нагрітого циліндра кінцевої довжини (стосовно роторів турбомашин). Також була розглянута і вирішена задача про визначення руйнівних обертів і часу до руйнування обертових нагрітих дисків турбомашин. Проведені експерименти на розгінній установці, дозволили визначити вплив деяких конструктивних чинників на несучу здатність дисків турбомашин [20, арк. 25].

За цикл робіт в області міцності енергетичних машин і впровадження їх у практику турбобудування в 1984 р. колектив співробітників Інженерно-фізичного факультету ХПІ та Інституту проблем машинобудування АН УРСР (С. І. Богомолов, Ю. С. Воробйов, Голоскоков, Підгорний і Філіппов (посмертно) удостоєний звання Лауреатів Державної премії УРСР [21, с. 34].

### ЛІТЕРАТУРА

1. Центральний Державний архів громадських об'єднань України. Ф. 1, оп. 23, од. зб. 5125

2. Архів Інституту проблем машинобудування НАН України. Опис № 1 документальних матеріалів постійного зберігання за 1944 – 1969 роки

3. Завистовская Е. И. Проблемы прочности в турбостроении и развитие школы механики НТУ «ХПИ» / Е. И. Завистовская, А. А. Ларин // Вестник Национального технического университета «ХПИ». - История науки и техники. - 2009. – Вып. 48. – С. 40–49

4. Архів Інституту проблем машинобудування НАН України. Личное дело А. П. Филиппова справа № 7

5. Ларин А. А. Профессор Арег Вагаршакович Дабагян – ученый и организатор высшей школы (к 90-

летию со дня рождения) / А. А. Ларин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Історія науки і техніки. - 2011. – Вип. 1. - С. 83–89

6. Дабагян А. В. Некоторые колебательные процессы в роторах турбо- и гидрогенераторных установок при несимметричных и асинхронных режимах работы генератора: дис. ... докт. техн. наук / Арег Вагаршакович Дабагян. – Харьков, 1959. – 274 с.

7. Богомолов С. И. Изгибные колебания дисков совместно с лопатками: / Сергей Иванович Богомолов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 1955. – 12 с.

8. Богомолов С. И. Колебания дисков турбомашин дис. ... докт. техн. наук / Сергей Иванович Богомолов. – Харьков, 1969. – 448 с.

9. Богомолов С. И. Влияние центробежных сил и неравномерного нагрева на изгибные колебания круглых пластин / С. И. Богомолов // Динамика и прочность машин. – Вып. 10. – 1969. – С. 3–10

10. Слива О. К. Метод сосредоточенных параметров и его применение в исследовании колебаний рабочих лопаток турбомашин / Олег Кириллович Слива // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 1967. – 21 с.

11. Журавлева А. М. Исследование совместных колебаний конструктивных элементов роторов турбомашин: дис. ... канд. техн. наук / Алевтина Матвеевна Журавлева. – Харьков. – 1967. – 187 с.

12. Богомолов С. И. Взаимосвязанные колебания в турбомашинах и газотурбинных двигателях / С. И. Богомолов, А. М. Журавлева. - Х.: Вища школа. – 1973. – 179 с.

13. Богомолов С. И. Колебания сложных механических систем / С. И. Богомолов, А. М. Журавлева // Харьков: Вища школа. – 1978. – 136 с.

14. Каринцев И. Б. Исследование колебаний валов на коротких опорах жидкостного трения при турбулентном режиме: / Иван Борисович Каринцев. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 1965. – 17 с.

15. Ларин А. А. Вклад Евгения Григорьевича Голоскокова в развитие теории нестационарных колебаний / А. А. Ларин // Вестник НТУ «ХПИ» Динамика и прочность машин. - 2008. – Вип. 36, С. 4–11.

16. Архив НТУ «ХПИ», д. 1235. – Отдел кадров ХПИ. – Личное дело. – Богомолов Сергей Иванович. – Начато 26.09. 1946 г. – Окончено 05.06. 1952 г. – 25 л.

17. Бурлаков А. В. Исследование влияния ползучести на напряжения и деформации элементов паропровода: / Анатолий Васильевич Бурлаков. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков. – 1954. – 16 с.

18. Бурлаков А. В. Ползучесть изотропны и анизотропных оболочек с учетом концентрации напряжений: / Анатолий Васильевич Бурлаков. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Харьков. – 1974. – 24 с.

19. Державний архів Харківській області, оп. № 13, Д. № 1787 на 17 аркушах. План и отчет о научно-исследовательской работе проблемной лаборатории «Динамическая прочность деталей машин» ХПИ им. В. И. Ленина за 1966 год

20. Державний архів Харківській області. Оп. № 13, д. № 3028 на 32 листах. Отчет о научно-исследовательской работе проблемной лаборатории «Динамическая прочность деталей машин» ХПИ им. В. И. Ленина за 1969 год

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

*Ларин А.А., Меньшиков С.А. Содружество Харьковского политехнического института с Турбоатомом в области динамики и прочности машин. Статья посвящена совместной работе кафедры «Динамика и прочность машин» Харьковского политехнического института с Харьковским турбинным заводом над проблемами турбостроения.*

*Larin A.A., Menshikov S.A. Commonwealth Kharkov Polytechnical Institute with a plant Turboatom in dynamics and strength machines. The article is devoted to the joint work of the department «Dynamics and strength of machines» of the Kharkov Polytechnic Institute, with the Kharkov turbine plant on the problems of creation of turbine.*