



РУСАНОВ

Андрій Вікторович –

член-кореспондент НАН
України, доктор технічних наук,
професор, директор Інституту
проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН
України
ORCID: 0000-0003-1345-7010

НАУКОВІ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТУРБОМАШИН НОВОГО ПОКОЛІННЯ З ПОКРАЩЕНИМИ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

**Стенограма наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 14 червня 2017 року**

У доповіді наведено результати фундаментальних і прикладних досліджень з термо- і газогідродинаміки і теплофізики, на основі яких сформовано концептуальні підходи до вирішення проблеми створення високоефективних проточних частин турбомашин різного призначення. Наведено приклади практичного використання розроблених методів, моделей і програмних комплексів при вирішенні важливих завдань, у тому числі із забезпечення енергонезалежності і збереження енергомашинобудівного потенціалу України.

Шановний Борисе Євгеновичу!

Шановні члени Президії! Шановні запрошені!

Турбомашини відомі вже кілька століть. Одним із перших зразків турбомашини можна вважати гвинт Архімеда. Незважаючи на тривалу історію, й дотепер немає остаточного визначення, що таке турбомашини. Тому я наведу кілька визначень, які, на наш погляд, є найбільш точними і прийнятними.

Турбомашини — це машини з робочими поверхнями (лопатки, лопаті, гвинти тощо), що обертаються.

Призначена турбомашини для перетворення одного виду енергії на інший, тобто енергії робочого тіла на механічну енергію або навпаки. За цією ознакою турбомашини поділяються на два основних типи: *турбіни* — турбомашини, в яких енергія робочого тіла перетворюється на механічну енергію на роторі, і *компресори* (насоси, вентилятори) — турбомашини, в яких механічна енергія від ротора перетворюється на енергію робочого тіла.

Існують турбомашини, які здатні працювати і як турбіна, і як компресор (залежно від режиму), наприклад гідроагрегати гід-

роакумулювальних електростанцій. Крім того, є турбоустановки, що мають як компресор, так і турбіну (газотурбінні двигуни, турбодетандерні агрегати тощо).

Як робоче тіло в турбомашиних використовуються різні гази та/або рідини і їх суміші, а саме: для гідротурбін робочим тілом є вода, для парових турбін — водяна пара, для газових турбін — повітря і продукти згоряння, для вітряків — повітря.

Турбомашини застосовують у найрізноманітніших галузях промисловості, насамперед в енергетиці — парові, газові та гідротурбіни. Так, на сьогодні понад 99% електрогенерувальних потужностей України становлять ТЕС, ТЕЦ, АЕС, ГЕС і ГАЕС, тобто так звана велика енергетика. Також турбомашини використовують на транспорті, у хімічній та видобувній галузях промисловості, на газоперекачувальних станціях, у металургії і навіть у медичному обладнанні.

Одним із основних критеріїв, за яким оцінюють ефективність турбомашин, є показник співвідношення змін енергій робочого тіла у реальному процесі до ідеального, як правило, ізоентропічного процесу. Таке співвідношення називають коефіцієнтом корисної дії (ККД).

За організацію робочого процесу відповідає проточна частина турбомашини. Проточною частиною є тракт, де протікає робоче тіло. Робочі поверхні є складовими проточної частини. Фактично вплив проточної частини на ККД турбомашини є визначальним, тому в доповіді основна увага приділяється науковим проблемам створення проточних частин турбомашин.

Зауважу, що ККД турбомашини не є ККД всієї енергоустановки, оскільки це лише одна, хоча й дуже важлива, її складова. ККД турбомашини, як правило, значно вищий за ККД енергоустановки в цілому і найчастіше перевищує 90%. Наприклад, ККД енергоблока ТЕС залежить від ККД термодинамічного циклу і ККД обладнання — котла, електрогенератора і, звісно, безпосередньо парової турбіни (турбомашини). Сумарний ККД більшості сучасних енергоблоків ТЕС становить 35–38%, енерго-

блоків, розрахованих на більш високі суперкритичні параметри, — 44–46%, а енергоблоків з бінарними циклами (парогазові установки) може перевищувати 50%. Проте в будь-якому разі ККД турбомашини прямо пропорційно впливає на ККД енергоблока в цілому.

До сказаного слід додати, що в Україні, на жаль, немає жодного діючого парогазового блока або блока, який працював би на суперкритичних початкових параметрах пари (температурою понад 600 °C і тиском понад 300 Бар). Хоча, наприклад, у наших сусідів, поляків, таких блоків уже декілька. Україна має достатній потенціал для вирішення завдання зі створення вітчизняного енергоблока для ТЕС на суперкритичних початкових параметрах, тим більше, що першу у світі турбоустановку на суперкритичних параметрах було створено у Харкові під керівництвом академіка Леоніда Олександровича Шубенка-Шубіна ще у 1961 р. Це складне і комплексне завдання, яке потребує об'єднання зусиль науковців різних напрямів — турбіністів, котельників, матеріалознавців та інших фахівців.

Розглянемо потенціал турбомашин. За нашими оцінками, у великій енергетиці за рахунок гідрогазодинамічного удосконалення проточних частин ККД турбомашин можна збільшити на 2–6%. Багато це чи мало? Для прикладу, підвищення ККД на 2% досить поширеної установки потужністю 300 МВт дає приріст генерації, еквівалентної тій, яку виробляє одна з найбільших вітроустановок у світі — E-126 (126 — це діаметр у метрах гвинта вітряка). І це фактично є додатковою енергією без збільшення витрат палива і, відповідно, без підвищення екологічного навантаження на довкілля. Цим прикладом я в жодному разі не хочу протиставити традиційну й відновлювану енергетику, а тільки ілюструю перспективи і важливість розвитку й оновлення наявних класичних електрогенерувальних потужностей. Особливо це актуально для України, де більшість енергоблоків відпрацювала свій ресурс і потребує реконструкції або заміни.

Крім того, в останні десятиліття, з огляду на загальну спрямованість на енергозбереження,

інтенсивне впровадження турбомашин відносно малої потужності спостерігається в комунальній енергетиці, на промислових об'єктах для утилізації викидної теплоти, у геотермальній енергетиці та інших сферах економіки. І якщо раніше ефективності, тобто ККД, таких турбомашин приділяли незначну увагу, то тепер вимоги стали значно жорсткішими. Як правило, такі турбомашини розробляють невеликими партіями або навіть індивідуально під конкретні умови. Для досягнення більшої ефективності почали застосовувати нові типи турбомашин, наприклад турбіни з інтегральним редуктором, різні частини яких мають різні швидкості обертання роторів, або турбіни, що працюють у широкому діапазоні режимів.

Отже, сьогодні необхідною умовою є вміння в короткі строки розробляти проточні частини турбомашин з досить високими показниками ефективності. Для порівняння, якщо раніше на цикл розроблення газотурбінного двигуна потрібно було 10 років, а парової турбіни — не набагато менше з урахуванням процесу виробництва, то сьогодні від моменту укладення договору до постачання проміжок часу з урахуванням проектування для потужних турбомашин становить 3–4 роки, а для малих — 1–2 роки.

Загальною тенденцією при розробленні проточних частин турбомашин для підвищення їх ефективності є те, що вони, по-перше, розробляються індивідуально не тільки для кожного нового виробу, а й для кожного окремого елемента. Раніше дуже поширеною була практика уніфікації окремих елементів турбін, наприклад, використовувалися стандартні профілі лопаток турбін або компресорів. По-друге, завдяки новітнім технологіям виробництва почали застосовувати проточні частини дуже складної просторової форми, тобто використовувати так зване просторове профілювання. Звісно, чим складніша форма проточної частини, тим більш складні фізичні процеси в ній відбуваються і тим важче їх досліджувати.

З огляду на сказане, можна зробити висновок, що на сьогодні в галузі турбомашинобудування постала наукомістка проблема, пов'язана з необхідністю вивчення фундамен-

тальних термогазодинамічних явищ, якими супроводжуються просторові турбулентні течії робочого тіла, і створення на їх основі методів моделювання процесів і оптимізації геометрії проточних частин турбомашин. Ці методи мають забезпечувати:

- високу точність моделювання фізичних процесів;
- можливість отримання геометрії проточних частин турбомашин з великою ефективністю;
- стислі строки вирішення оптимізаційного завдання.

В Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України (ІПМаш) напрям теорії течії та створення проточних частин турбомашин існує вже досить давно. Він є одним із пріоритетних напрямів наукової діяльності Інституту, можна навіть сказати, що Інститут певною мірою створювався під цей напрям. Біля його витоків стояли такі видатні вчені, як академіки Георгій Федорович Проскура і Леонід Олександрович Шубенко-Шубін.

Значна частина досліджень за цим напрямом проводилася й продовжує проводитися за допомогою фізичного експерименту, але разом із розвитком обчислювальної техніки в ІПМаш НАН України інтенсивно розвивалося і математичне моделювання. Так, досягнуто значних успіхів у галузі математичного моделювання просторових в'язких течій рідини і газу на основі чисельного інтегрування осереднених рівнянь Нав'є—Стокса (Рейнольдса).

Для врахування реальних термодинамічних властивостей робочих тіл в ІПМаш вперше було запропоновано інтерполяційно-аналітичний метод апроксимації рівнянь стану води і водяної пари ІАРWS-95 і модифікованих рівнянь Бенедикта—Вебба—Рубіна з 32 членами. Це дало змогу моделювати процеси в турбомашинах, що працюють на низькокиплячих робочих тілах з фазовими перетвореннями, які широко застосовуються для утилізації низькотемпературного тепла. Турбулентні ефекти враховуються за допомогою двопараметричної диференційної моделі турбулентності SST Ментера.

Інтегруються вихідні рівняння з використанням розробленої в Інституті неявної ЕНО-схеми з різницями проти потоку (розпаду-розриву Годунова або розщеплення Роя).

Реалізовано ці математичні моделі у програмному комплексі IPMFlow, що є розвитком комплексів FlowER та FlowER-U. Слід зазначити, що на теренах колишнього Радянського Союзу в ІПМаш математичну модель розрахунку просторової в'язкої течії у проточній частині турбомашини було реалізовано вдруге, а у вигляді повноцінного програмного комплексу (FlowER) — взагалі вперше.

Математична модель пройшла дуже велику і ретельну апробацію. Розглянемо кілька прикладів. Так, порівняння з експериментом результатів розрахунків течії у турбінному ступені показало, що розбіжність за значеннями ККД становить менш як 0,1%.

Модель дозволяє відтворювати складну просторову структуру течії, зокрема так звані вторинні течії. Розглянемо візуалізацію вторинних течій у решітці Ходсона за результатами розрахунку та її порівняння з експериментом. Видно усі основні складові вторинних течій: каналний, підковоподібний і кутовий вихори, а також положення сідлової точки. Візуалізація таких результатів дає чіткіше уявлення про складну просторову структуру течії порівняно з фізичним експериментом, оскільки у фізичному експерименті можливості візуалізації дуже обмежені.

Великі можливості математичне моделювання надає при вивченні нестационарних явищ, хоча, звісно, таке моделювання складніше і потребує значних ресурсів обчислювальної техніки. Наприклад, можна досліджувати нестационарний процес проходження кромкових аеродинамічних слідів.

Наявність таких моделей, безумовно, відкрила широкі можливості в процесах газогідравлічного удосконалення проточних частин турбомашин, але справжнім проривом стало розроблення алгоритму проектування й оптимізації проточних частин з використанням математичних моделей різних рівнів складності (від одновимірних до просторових), а також

методів аналітичного опису геометрії проточних частин на основі обмеженої кількості параметризованих величин. Поки що, на жаль, у цьому алгоритмі немає можливості автоматизації аналізу результатів. Це пов'язано з тим, що сучасні оптимізаційні методи пошуку екстремуму потребують розгляду від кількох сотень до кількох тисяч варіантів (залежно від кількості варіюваних параметрів). При вирішенні практичних завдань часу на проведення такої кількості тривимірних розрахунків немає, тому аналіз результатів виконують у ручному режимі, а результат і тривалість виконання проекту значною мірою залежать від кваліфікації спеціаліста. Як правило, наші фахівці, завдяки великому досвіду, вкладаються у 5–10 тривимірних розрахунків при проектуванні одного ступеня.

Важливою складовою алгоритму проектування є формування 3D-геометрії проточної частини. Від того, наскільки швидко та зручно виконуватиметься цей крок, залежатиме успіх розв'язання задачі в цілому. Нами було розроблено методи, які дозволяють на підставі досить невеликої кількості параметризованих величин будувати широкий клас лопаткових апаратів осьового та радіально-осьового типів. Як параметризовані обирають величини або загальнозживані у турбобудуванні, або такі, що мають просту геометричну інтерпретацію.

Отже, можна стверджувати, що в ІПМаш на основі глибоких фундаментальних досліджень було створено методи, а на їх основі — відповідне програмне забезпечення, яке дає можливість розробляти дизайн вискоелективних проточних частин турбомашин різного призначення.

Розглянемо кілька прикладів практичного застосування описаних розробок у реалізації різних проектів.

Перші приклади стосуються галузі гідроенергетики. Розроблено нову модифікацію проточної частини гідротурбіни ПЛ-20 — основної на Дніпровському каскаді, на якому зараз триває модернізація. Було застосовано так званий складний навал лопатей робочого колеса, що

дало змогу збільшити ККД у максимумі майже на 1 %, а це дуже багато для гідротурбін.

Зараз в ІПМаш виконуються дослідження з модернізації проточної частини насос-турбіни Дністровської ГАЕС, до речі, оригінальну проточну частину перших трьох машин цієї ГАЕС, які вже експлуатуються, та четвертої, яка ще буде вироблена, розроблено ще у 1986 р. у нашому Інституті. Ми плануємо у новій модифікації застосувати так зване сплітерне робоче колесо, тобто з різними розмірами лопатей. Хоча цю розробку ще не завершено, вже сьогодні ми отримали дуже обнадійливі результати.

Наступний приклад — розроблення проточної частини циліндрів середнього тиску (ЦСТ) 9-ї модифікації теплофікаційної турбіни Т-100 виробництва Уральського турбінного заводу. Ці турбіни є найпоширенішими на території колишнього Радянського Союзу, усього їх виготовлено понад 300 одиниць. Вони призначені для роботи у великих і середніх містах. Основною метою проекту було підняти внутрішній ККД ЦСТ щонайменше на 2,5 % порівняно з попередньою 8-ю модифікацією.

Головними відмінностями нової проточної частини від попередньої є більш плавна форма меридіональних (обмежувальних) обводів, а також нова лопаткова система з новою формою профілів. Попередні лопатки, розроблені на основі атласу профілів МЕІ, також забезпечують досить високий рівень аеродинамічної досконалості, але наші профілі, по-перше, завжди розробляються індивідуально під кожну турбіну і, по-друге, мають гладку форму поверхонь, без розривів другої похідної. Хоча у візуалізації течії важко розгледіти переваги однієї проточної частини над іншою, в обох випадках картина течії сприятлива. Різниця помітна на графіках розподілів тиску на поверхнях лопаток. У модифікованій проточній частині розподіли гладкіші, без перегинів. Як наслідок, ККД зріс у кожному ступені і в ЦСТ у цілому. Внутрішній ККД підвищився на 2,9 %, тобто мета проекту була досягнута. Зараз триває процес впровадження цієї турбіни в Казахстані.

І ще один приклад — проточна частина циліндрів високого і середнього тиску (ЦВСТ)

нової надпотужної турбіни ВАТ «Турбоатом» для АЕС. Її потужність становить 1250 МВт. Для порівняння, потужність усієї ДніпроГЕС-1 вдвічі менша. На сьогодні розроблено варіант, який має унікальні характеристики — внутрішній ККД, вищий за 96 %.

Також було розроблено новий варіант ЦВТ турбіни К-325-23,5, у якій застосовано сучасні, розроблені нами індивідуально для кожного ступеня, профілі. За нашими розрахунками, це має забезпечити збільшення ККД ЦВТ на 3,4 %, а потужності — на 4,7 МВт.

Наступний приклад — серія мінітурбін для когенераційних установок, що працюють на низькокиплячих робочих тілах, розроблених на замовлення Інституту проточних машин ім. Роберта Шевальського ПАН у м. Гданськ (ІПМ ПАН). Ці турбіни досить малого розміру, через що виникають проблеми з їх газодинамічною ефективністю. Ми розробили проточні частини турбін різних типів потужністю від 30 до 100 кВт з ККД >80 %, що досить непогано для таких турбін. На сьогодні виготовлено і випробувано одну турбіну, друга перебуває на стадії виробництва.

Загалом проект з ІПМ ПАН — це приклад того, як потрібно підтримувати і фінансувати науку. Цей проект ІПМ ПАН виграв у рамках програми стратегічних проектів Уряду Польщі. ІПМ ПАН на його виконання отримав близько 35 млн євро на 4 роки. У результаті виконання проекту не тільки розроблено, а й виготовлено кілька енергетичних установок, на яких проводиться дослідження запропонованих інноваційних рішень.

Інший приклад — серія радіально-осьових турбін турбодетандерних агрегатів комплексної підготовки газу виробництва харківської компанії «Турбогаз». Ця компанія раніше випускала турбіни радіального типу зі сталим перетином лопатки робочого колеса, зараз вони активно використовують проточні частини, розроблені за нашою участю. Завдяки цьому внутрішній ККД турбін підвищився на 5–10 % і становить 90–94 % в усьому діапазоні режимів роботи. Кілька таких розробок уже впроваджено і успішно працюють упродовж кількох років.

Крім того, для компанії «Турбогаз» створено новий типовий компресор, який у точці максимальної ефективності має ККД, на 7% вищий порівняно з попереднім компресором.

У подальшому ми плануємо спробувати використати наші розробки при створенні турбонаддувів автомобільних двигунів.

На наш погляд, наведені приклади переконливо свідчать, що методи, моделі і програмні комплекси, розроблені на основі фундамен-

тальних досліджень, дають можливість вирішувати важливі прикладні завдання, в тому числі із забезпечення енергонезалежності і збереження енергомашинобудівного потенціалу України.

Підтверджує це і широка географія наших впроваджень і співпраці.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. МЕЛЕЖИК*

A.V. Rusanov

Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems
of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv)

SCIENTIFIC PROBLEMS OF NEW GENERATION TURBOMACHINERY
WITH IMPROVED TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 14, 2017

The report presents the results of fundamental and applied research on thermo- and gas hydrodynamics and thermophysics, on the basis of which conceptual approaches to solving the problem of creation of high-efficiency flow parts of turbomachines of various purposes are formed. Examples are given of practical use of the developed methods, models and software packages in solving important tasks, including ensuring energy independence and preserving the machine building potential of Ukraine.

Keywords: turbomachines, flow parts of turbomachines, mathematical modeling of spatial viscous flows of liquid and gas.