

З КАФЕДРИ ПРЕЗИДІЇ НАН УКРАЇНИ



РУСАНОВ
Андрій Вікторович —
член-кореспондент
НАН України, директор
Інституту проблем
машинобудування
ім. А.М. Підгорного
НАН України

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РОЗРОБКИ ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ ІМ. А.М. ПІДГОРНОГО НАН УКРАЇНИ В ГАЛУЗІ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

**Стенограма наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 3 липня 2019 року**

У доповіді розглянуто основні результати досліджень, виконаних в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, які свідчать про високу ефективність і перспективність використання розроблених методів розрахунку й реалізації запропонованих технічних рішень для створення сучасних турбомашин та іншого машинобудівного обладнання нового покоління.

Вельмишановний Борисе Євгеновичу!
Шановні члени Президії та запрошені!
Цього року виповнюється 80 років від часу, коли з ініціативи академіків Василя Михайловича Хрущова та Георгія Федоровича Проскури в Харкові було створено Інститут енергетики АН УРСР. Згодом з цього інституту виокремилося багато наукових установ нашої Академії, в тому числі й Інститут проблем машинобудування. Академік Г.Ф. Проскура заклав один з основних напрямів наукових досліджень нашого Інституту — енергетичне турбобудування. Його улюблений вислів: «Немає нічого більш практичного, ніж досконала теорія», став головним принципом організації досліджень в Інституті проблем машинобудування — всім прикладним роботам і впровадженням завжди передують глибокі фундаментальні дослідження.

У галузі енергетичного турбобудування Інститут має значні досягнення, а його розробки стали науковим підґрунтям для розвитку великої енергетики на території колишнього Радянського Союзу та багатьох інших країн. Однак, з огляду на обме-



Рис. 1. Парова турбіна Т-120/130-12,8 виробництва ЗАТ «Уральський турбінний завод» з розробленою в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України проточною частиною циліндра середнього тиску. Турбіну встановлено на Мінській ТЕЦ-3 (Республіка Білорусь)

женість часу для виступу, я зупинюся лише на отриманих останнім часом результатах і здобутках Інституту як за цим, так і за деякими іншими напрямками діяльності.

В Інституті сформувалася дуже потужна школа обчислювальної гідрогазодинаміки. Розроблено метод і програмний комплекс для моделювання просторових в'язких турбулентних течій рідини й газу на основі чисельного інтегрування осереднених рівнянь Нав'є–Стокса (Рейнольдса) з урахуванням реальних властивостей робочих тіл.

Багато із застосованих у цих моделях підходів та методів було запропоновано вперше у світі. Зокрема, узагальнений метод розщеплення для побудови неявних схем на випадок повністю неструктурованих різницевих сіток із задовільною формою елементарних об'ємів. Крім того, ми вперше запропонували і реалізували інтерполяційно-аналітичний метод врахування реальних властивостей рідин і газів при дослідженні тривимірних течій. Ці методи, з одного боку, забезпечують високу точність результатів моделювання, а з іншого, на відміну від відомих наявних методів, потребують набагато менших витрат комп'ютерного часу.

Зазначені вищі методи та моделі, створені в Інституті, дали можливість проводити як фундаментальні дослідження з вивчення за-

кономірностей перебігу гідрогазодинамічних процесів, так і прикладні дослідження, в тому числі з підвищення ефективності турбомашин різних типів. Слід зауважити, що розроблене нами програмне забезпечення було впроваджено в Україні, Росії та Польщі на більшості провідних підприємств, що спеціалізуються на проектуванні турбомашин. Серед них – ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка» (м. Запоріжжя, Україна), ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект» (м. Миколаїв, Україна), Акціонерне товариство «Мотор Січ» (м. Запоріжжя, Україна), Alstom Power Elblag (м. Ельблонг, Польща), ПрАТ «Турбогаз» (м. Харків, Україна), Акціонерне товариство «Турбоатом» (м. Харків, Україна).

Наступним кроком у розвитку теорії розрахунку та проектування турбомашин було створення нових методів побудови тривимірної геометрії проточних частин турбомашин різних типів на основі обмеженої кількості параметризованих величин. Було розроблено методологію проектування проточних частин турбомашин з використанням методів різних рівнів складності – від одномірних до просторових. Завдяки цьому лише в останні роки ми брали участь у багатьох проектах з модернізації і розроблення турбомашин. Наведу кілька прикладів.

Фахівці Інституту розробили проточну частину циліндра середнього тиску 9-ї модифікації теплофікаційної турбіни серії Т-100 виробництва Уральського турбінного заводу. Ці турбіни є найпоширенішими на території колишнього Радянського Союзу, загалом їх було виготовлено понад 300 одиниць. Призначені вони для роботи у великих і середніх містах. Основна мета проекту полягала в підвищенні внутрішнього ККД циліндра середнього тиску щонайменше на 2,5% порівняно з попередньою 8-ю модифікацією. В результаті нам вдалося збільшити внутрішній ККД на 2,9%, тобто ціль проекту було досягнуто.

У великій енергетиці шлях від розроблення до впровадження досить тривалий. Хоча цю

роботу ми завершили ще у 2013 р., поставку першої турбіни на Мінську ТЕЦ-3 у Республіці Білорусь було здійснено тільки наприкінці минулого року (рис. 1).

У галузі енергетичного турбобудування стратегічним партнером нашого Інституту є АТ «Турбоатом». Особливо наша співпраця інтенсифікувалася після підписання Генеральної угоди про науково-технічне співробітництво між Національною академією наук України та АТ «Турбоатом» у галузі енергетичного турбобудування. На підставі цієї угоди Інститут спільно з АТ «Турбоатом» затвердили перспективний план співпраці, згідно з яким ми сьогодні активно працюємо. Назву лише окремі роботи, виконані в рамках цього співробітництва.

Співробітники Інституту розробили проточну частину циліндрів високого і середнього тисків нової надпотужної турбіни для АЕС виробництва АТ «Турбоатом». Її проектна потужність становить 1250 МВт. Завдяки застосуванню створених нами методів розрахунку і проектування вдалося досягти унікальних характеристик, зокрема внутрішнього ККД понад 96% (рис. 2).

Розроблено систему соплового регулювання нового типу для парових турбін серії К-300. У запропонованій конструкції, на відміну від наявних систем, відсутня радіальна камера вирівнювання тиску. Замість неї встановлено додатковий стушні, а весь регулюючий відсік виконано діагональним зі спеціальною формою профілів лопаток. Це забезпечило можливість підвищення ККД залежно від режиму роботи на 5–10%. Парк турбін цього типу тільки в Україні становить більш як 40 одиниць.

У НАЕК «Енергоатом» на 2020–2021 рр. заплановано модернізацію кількох циліндрів низького тиску потужних парових турбін. З метою економії коштів цю модернізацію виконуватимуть з використанням резервних роторів. У цьому разі найбільший ефект можна отримати в останніх ступенях. Ми вже здійснюємо роботи з розроблення ступенів зі складними навалом лопаток прямого апарату і новим робочим колесом, що дасть можливість змен-

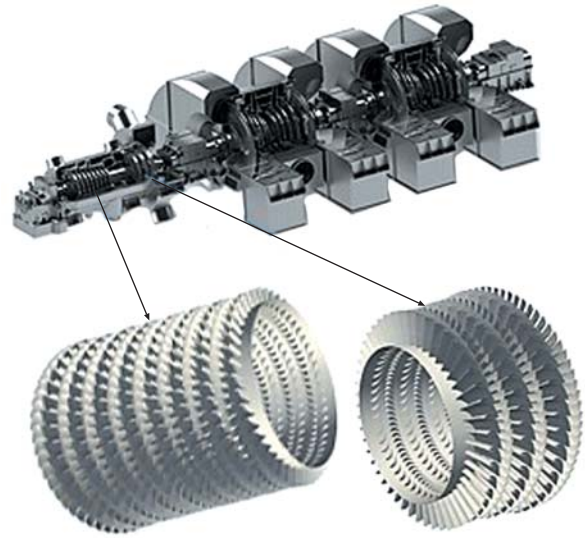


Рис. 2. Циліндри високого і середнього тисків надпотужної (1250 МВт) парової турбіни для АЕС виробництва АТ «Турбоатом»

шити відрив потоку на виході з проточної частини і збільшити ККД на 5–10%.

Активно розвивається наша співпраця з підприємством і за напрямом «гідромашини». З використанням технології складного просторового навалу вдосконалено лопатеву систему робочих коліс гідротурбін типу ПЛ-20, призначених для модернізації Кременчуцької ГЕС (рис. 3). Впровадження цієї розробки відбувається саме в цей час.

Спільно з АТ «Турбоатом» продовжується створення швидкохідної насос-турбіни потужністю 200 МВт. На сьогодні ми завершили теоретичні дослідження і розробили ескіз проточної частини. Зазначу, що на відміну від звичайних гідротурбін, для насос-турбін до 80-х років минулого століття не було методів проектування.

Наш Інститут зіткнувся з цією проблемою при розробленні гідроагрегатів для Дністровської ГАЕС. Тоді ми фактично побудували свою теорію проектування насос-турбін.

В Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України існує і постійно розвивається експериментальна база, зокрема гідродинамічні стенди, які мають ста-



Рис. 3. Нова лопатева система робочого колеса типу ПЛ-20, розроблена в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України з використанням методів просторового профілювання для модернізації гідротурбін Кременчуцької ГЕС



Рис. 4. Спіральна камера, виготовлена за допомогою 3D-друку, і перший варіант робочого колеса швидкохідної насос-турбіни для ГАЕС потужністю 200 МВт

тус національного надбання. Слід зазначити, що подібних лабораторій у світі налічується не більш як 15, причому дві з них знаходяться у Харкові – в нашому Інституті й на підприємстві «Турбоатом». Однак ми не конкуруємо між собою, а знайшли шляхи для розвитку взаємовигідної співпраці.

Зараз ми виконуємо роботи з підготовки модельних випробувань нової насос-турбіни. Завдяки застосуванню технології 3D-друку

вдалося значно зменшити вартість і скоротити час виготовлення вузлів модельного блока. Так, вартість виготовлення модельного робочого колеса з металу становить у середньому 10 тис. дол. США, а з пластику на 3D-принтері – 4 тис. грн. Це дало змогу суттєво збільшити кількість досліджуваних варіантів. На рис. 4 показано, як виглядає спіральна камера, виготовлена за допомогою 3D-друку, і перший варіант робочого колеса.

Співпраця з АТ «Турбоатом» не обмежується лише гідрогазодинамікою проточних частин. Наші методи широко застосовуються при розрахунку на міцність і ресурс різних елементів турбомашин: корпусів, роторів, лопаток із замками, кришок гідротурбін тощо. Крім того, ці методи використовуються і для термоеконічного аналізу, зокрема при створенні конденсаторів нового покоління потужних енергоблоків АЕС.

На завершення теми про співробітництво з АТ «Турбоатом» скажу, що ми ретельно відстежуємо світові тенденції в енергетичному турбобудуванні. Зокрема, наш Інститут виконував експертизу одного з проектів фірми Toshiba, у процесі якої ми мали змогу ознайомитися з останніми досягненнями цієї компанії. Спираючись на цю інформацію, з повною відповідальністю можемо стверджувати, що продукція АТ «Турбоатом» не лише відповідає світовому рівню, а й у багатьох напрямках сьогодні саме вона визначає світовий тренд розробок у цій галузі. Це стало можливим завдяки плідній співпраці з установами НАН України та закладами вищої освіти. Яскравим прикладом тому є зварні ротори, технологію виробництва яких було розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Приблизно 10 років тому в нашому Інституті було започатковано новий напрям, пов'язаний з турбомашинами, – розроблення проточних частин турбодетандерних агрегатів (рис. 5). Ці роботи виконуються у співпраці з нашим партнером – харківською компанією ПрАТ «Турбогаз». Ми адаптували й розвинули наші методи розрахунку і проектування проточних частин згідно з вимогами до цих об'єктів.

Спочатку було розроблено методи побудови радіально-осьових робочих коліс турбін. Варто зазначити, що у світі застосовують радіально-осьові турбінні колеса виключно з «тонкими» лопатками з гострими вхідними кромками. Фахівці нашого Інституту довели, що для таких об'єктів доцільно використовувати спеціально спрофільовані лопатки з «товстими» вхідними кромками. Це дає низку переваг: ефективність, міцність, відсутність потреби в проміжних лопатках. ПрАТ «Турбогаз» став першим у світі підприємством з виготовлення радіально-осьових робочих коліс турбін турбодетандерів з подібними лопатками.

Далі ми навчилися проектувати осе-радіальні робочі колеса компресорів, як з проміжними лопатками, так і без них, у тому числі колеса зі складними навалами лопаток.

У результаті в нас склалася дуже тісна і плідна співпраця з ПрАТ «Турбогаз». Щороку ми виконуємо кілька спільних проектів. Наприклад, минулого року було започатковано 4 проекти для Узбекистану та Ірану. До речі, зараз триває випробування однієї з розроблених минулоріч турбодетандерних установок.

Отже, на сьогодні, завдяки багаторічним дослідженням, Інститут має у своєму розпорядженні методи, методології, а також знання про фізичні процеси та закономірності їх перебігу, достатні для розроблення турбомашин будь-яких типів, технічні характеристики яких повністю відповідатимуть або навіть перевершуватимуть найкращі світові зразки.

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України займається не тільки турбінною тематикою. Історично у нас склалася потужна школа з міцності щодо різних об'єктів, зокрема, як було вже сказано, і турбомашин. Ми розробили різні методи моделювання напружено-деформованого стану, в тому числі на базі методу скінчених елементів з урахуванням пошкоджень матеріалу. Результати цих досліджень сьогодні широко використовуються на практиці, наприклад, у ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля».

Значних успіхів було досягнуто в дослідженнях різного типу багатошарового скління



Рис. 5. Турбодетандерна установка комплексної підготовки газу і серія проточних частин турбін радіально-осьового типу, розроблених в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

авіаційної та військової техніки і розробленні на цій основі методів його розрахунку. Фахівці Інституту створили методологію проектування скління техніки на задані характеристики. Отримані результати відповідають або навіть перевершують найкращі світові зразки. Так, було розроблено, випробувано і зараз експлуатується на літаках Ан-148, Ан-158 і Ан-178 композиція полегшеного скління ТСК 008, завдяки якій вдалося зменшити масу літака на 21%. Є й інші приклади успішного застосування таких підходів.

Подальшим розвитком зазначених методів стало їх узагальнення для досліджень, спрямованих на підвищення птахостійкості авіаційних двигунів. Разом з ДП «Івченко–Прогрес» розроблено і затверджено технічне завдання на виконання програми досліджень за цією тематикою.

Понад 40 років в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН Укра-

їни проводяться дослідження за напрямом «Водневі технології». Ще у 1970-х роках Харковом їздили автомобілі з написом «воднева енергетика». Сьогодні цей напрям продовжує розвиватися, хоча акценти дещо змістилися. Так, на основі багаторічних досліджень розроблено технологію, а згодом і діючі лабораторні та напівпромислові зразки безмембранних електролізерів для генерації водню і кисню під високим тиском. Ці електролізери є унікальними і мають низку переваг над світовими аналогами: високу ефективність, тиск до 700 бар, відсутність коштовних матеріалів, зокрема металів платинової групи. Такі електролізери мають великий потенціал для застосування, що пов'язано насамперед з високим тиском, оскільки в такому стані водень і кисень як паливо мають якісно інші можливості. Їх можна ефективно використовувати, наприклад, у системах акумулювання енергії або для мережі паливних станцій, куди не потрібно буде dopravляти водень, адже його можна буде генерувати на місці.

Інший напрям — використання водневих технологій для підвищення ефективності малодебітних нафтогазових свердловин. Співробітники Інституту розробили ефективну, недорогу та екологічно чисту технологію, яку вже випробувано та впроваджено в Україні, Росії, Казахстані, Узбекистані, Туркменістані, Грузії, Китаї.

Наступним, відносно новим, напрямом в Інституті стало дослідження теплового стану контейнерів у сховищах відпрацьованого ядерного палива. Річ у тім, що в таких сховищах основна увага приділяється радіаційній безпеці, тоді як тепловий стан контейнерів також потребує ретельного контролю. Для вирішення цього завдання ми використали наші методи, знання і досвід у галузі теплофізики. Досліджено і встановлено вплив метеорологічних умов на безпеку зберігання відпрацьованого ядерного палива. Результати цих досліджень впроваджено на Запорізькому сховищі відпрацьованого ядерного палива, а працівник нашого Інституту став експертом МАГАТЕ з цих питань.

В Інституті проводиться багато інших цікавих і актуальних досліджень, таких як створення двигунів внутрішнього згорання, що працюють на біопаливі, розроблення методів виготовлення та спалювання рідких композитних палив, у тому числі зі стічних відходів (біомулів), відпрацьовуються завдання з оптимального розташування об'єктів з урахуванням їх властивостей тощо.

Завершуючи свій виступ, хотів би приділити увагу деяким питанням, вирішення яких є необхідною умовою для забезпечення сталого і надійного функціонування Об'єднаної енергетичної системи України. В електрогенеруючому балансі України передбачається значне зростання частки генерації на відновлюваних джерелах енергії, що зумовлює необхідність збільшення компенсувальних і маневрових потужностей. В Україні ці функції покладаються на енергоблоки ТЕС та ТЕЦ. Крім того, у зв'язку з відносно низькою собівартістю зберігатиметься велика частина генерації на АЕС. Виходячи з цих та інших факторів, на сьогодні критично важливими для енергетичної безпеки України є такі питання:

1) Потрібна модернізація і заміна енергоблоків ТЕС і ТЕЦ, які виробили свій проектний і подовжений ресурси, а таких блоків у нашій тепловій енергетиці багато. Енергоблоки українських ТЕС перебувають у найбільш критичному стані порівняно з іншими генеруючими потужностями. Більшість з них уже виробила встановлений і подовжений ресурси й наближається до критичного значення, проте за останні 5 років в Україні не відбулося жодної заміни енергоблоків ТЕС на нові. До того ж застаріле обладнання має низькі показники енергетичної ефективності, що крім зростання вартості електроенергії збільшує екологічне навантаження на навколишнє середовище.

2) Необхідне розроблення і впровадження на українських ТЕС енергоблоків з супернадкритичними початковими параметрами пари. Такі блоки (тиск 26–32 МПа, температура 580–620 °С) порівняно з блоками з надкритичними параметри пари (тиск 24–26 МПа, температура 540–580 °С) можуть забезпечити

зниження питомих витрат палива на 20–25%. При цьому в процесі переходу на підвищені початкові параметри пари слід провести докорінну модернізацію або повну заміну котельного обладнання, а отже, доцільно встановлювати більш економічні та екологічно чисті котли з циркулюючим киплячим шаром.

3) Важливим є створення на базі газових енергоблоків ТЕЦ парогазових установок. Енергоблоки ТЕЦ працюють переважно на природному газі, тому їх доцільно модернізувати в парогазові установки, що дозволить зменшити питомі витрати палива на 25–30%.

4) На часі розроблення і впровадження енергоблоків АЕС з реакторами четвертого покоління. До речі, сьогодні у світі активно ведуться роботи зі створення ядерних реакторів 4-го покоління, які здатні забезпечити надкритичні початкові параметри пари (тиск 25 МПа, температура 500 °С). Впровадження таких реакторів на енергоблоці потужністю 1000 МВт забезпечить зниження питомих витрат палива приблизно на 20%, що дасть змогу

істотно підвищити економічність і зменшити теплові викиди. Установи НАН України (перелусім установи Відділення ядерної фізики та енергетики) можуть взяти участь у міжнародних проєктах з розроблення ядерних реакторів 4-го покоління, а також зі створення парових турбін для АЕС з надкритичними початковими параметрами пари.

Що стосується науково-технічного і виробничого потенціалу України для вирішення цих завдань, на мою думку, він достатній. Ми маємо все необхідне: і потужні наукові установи, і профільні підприємства, такі як АТ «Турбоатом», НВКГ «Зоря»–«Машпроєкт», ДП «Івченко–Прогрес», ТОВ «Котлопром» та багато інших. Однак без реальної підтримки держави, а можливо, і запровадження спеціальної державної програми забезпечити в майбутньому стає функціонування енергетичної системи України не вдасться.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик