



Gaz turbinasi kanallarida supersonik oqimning barqarorligini saqlash mexanizmlari.

Oqyo'lova Nigora Inobiddin qizi

Andijon davlat texnika instituti. Stajor o'qituvchi

nigoraqyulova@gmail.com

Tel: +99(894)0142266

Anotatsiya: mazkur maqolada gaz turbinasi ichidagi kanallarda supersonik ($Mach > 1$) gaz oqimining barqarorligini saqlashga yo'naltirilgan mexanizmlar mukammal nazariy va amaliy jihatdan tahlil qilinadi. Supersonik oqim operatsiyasi davomida yuzaga keladigan bosim insultlari, to'liqlar (shock waves), laminar-turbulent o'zgarishlar, sirt qirralarida ajralish zonalari va muhandislik jihatdan noxush oqim sharoitlari gaz turbinasining samaradorligi va chidamliligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shu munosabat bilan maqolada birinchi navbatda supersonik kanal oqimlarida barqarorlikka tahdid soladigan asosiy hodisalar — zarba to'liqlari/chegara qatlamlari o'zaro ta'siri (shock/boundary layer interaction, SBLI), to'liq refleksiya, sirt ajralishi, rezonans/aks sado holatlari — aniqlanib, keyin ularni bartaraf etish uchun mexanizmlar (masalan, shakl optimallashtirish, sirt profilini o'zgartirish, qo'shimcha energiya sarmoyasi, massasini kamaytirish, to'liqning pasaytirilishi) taklif qilinadi. Ishda matematik-modellashtirish va raqamli simulatsiyalar usullari qo'llanib, supersonik oqimning barqarorligini saqlashda samarador mexanizmlarning nisbiy ta'siri ko'rsatildi. Olingan natijalar gaz turbinasining kanallari dizayni va operatsiyasida supersonik rejimda oqim barqarorligini oshirish uchun amaliy tavsiyalarni shakllantiradi.

Kalit so'zlar: supersonik oqim, gaz turbinasasi kanali, to'liq refleksiya, shock-boundary layer interaction, barqarorlik mexanizmi, kanal profili optimallashtirish, turbulent ajralish, aks sado.

Kirish

Gaz turbinasi ichidagi kanallarda supersonik oqimlar ($Mach$ soni birlikdan yuqori) ishlatilishi turbinani kichikroq o'lchamda, yuqori quvvat va energiya zichligi bilan loyihalash imkonini beradi, biroq bu jarayon bilan birga oqimning barqarorligini saqlash muammosi paydo bo'ladi: supersonik oqim sharoitida bosim tushishlari, to'liqlar refleksiya, sirt qatlamida yuklanishlar, ajralish zonalari va akustik/yuqori chastotali tebranishlar yuzaga kelishi mumkin. Bu esa gaz turbinasining samaradorligini pasaytiradi, komponentlar yuki va charchashini oshiradi hamda xavfsizlikni kamaytiradi. Shu bois, turbinaning kanallari, xususan supersonik oqim bosqichi bilan ishlaydigan rotor yoki stator kanallari uchun oqim barqarorligini ta'minlovchi mexanizmlar muhim ahamiyatga ega. Ilmiy jihatdan bu mavzu compressible oqimlar mexanikasi, kanal aerodinamika, sirt qatlamlari nazariyasi hamda to'liqlar-qatlamlar o'zaro ta'siri (shock/boundary layer interaction, SBLI) kabi

murakkab fizik hodisalarni o'z ichiga oladi. Mazkur maqolaning maqsadi — gaz turbinasi kanallarida supersonik oqimning barqarorligini saqlashda qo'llanilayotgan mexanizmlarni tizimli tahlil qilish, mexanizmlarning samaradorligini aniqlash uchun matematik va raqamli analiz metodlarini qo'llash hamda dizayn tavsiyalarini shakllantirishdan iborat. Ilmiy yangiligi shundaki, maqolada channel profili optimallashtirish va shakl modifikatsiyasi orqali shock-boundary layer mexanizmining barqarorlikka ta'siri kvantitativ ko'rinishda berilgan hamda kanal ichidagi akustik va to'liq-oqim o'zaro ta'siri mexanizmlarini integratsiyalashtiruvchi yondashuv taklif etilgan.

Materiallar va metodlar

Supersonik oqim barqarorligini tahlil qilishda ikkita asosiy metodologiya qo'llaniladi: birinchi — analitik fizik modelni shakllantirish, ikkinchisi — raqamli simulatsiya yordamida oqimning murakkab xatti-harakatini aniqlash. Analitik model sifatida siqiluvchan gaz oqimlari nazariyasi (Euler va Navier–Stoks tenglamalari compressible oqimlar holatida) bilan birga kanal ichida shakllanuvchi zarba to'liqlari (shock waves) va ularning chet qatlamiga ta'siri (boundary layer) hisobga olindi. Umumiy oqim tenglamalari: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$, $\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$, $\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}) - \nabla \cdot \mathbf{q}$, bu yerda $\boldsymbol{\tau}$ — viskoz stress tensor, $\mathbf{q}$ — issiqlik bosilgisi. Kanallar uchun geometrik parametrlarda shakl o'zgarishi, sirt profil modifikatsiyasi va sirt uyg'unligi (ribbing, turbulizatorlar) orqali to'liq refleksiyaning va ajralish zonalarini oldini olish mexanizmlari tahlil qilindi. Raqamli metodlar sifatida yuqori aniqlikdagi compressible CFD (large eddy simulation, LES, yoki RANS + zonal LES) qo'llanildi, shu bilan birga shock reflection monitoringi, ajralish kabilyatining chastota tahlili va akustik (Strouhal soni) o'zaro ta'siri analizi kiritildi. Metodologik variant sifatida kanal ichida supersonik oqim sharoitida devor-plitalar sirtida oddiy sirt qo'shish va yassi profilga nisbatan ribli yoki shaklli profilning samaradorligi solishtirildi. Shuningdek, to'liqni pasaytirish va barqarorlikni oshirish uchun passiv (masalan, sirt rug'lari, protuberanslar, poroz devor) va aktiv (masalan, plyonkali kengaytiruvchi kanallar, to'liq so'ndiruvchilar, akustik rezonatorlar) mexanizmlar tahlil qilindi. O'lchamsiz sonlar (Mach soni M , Reynolds soni Re , Strouhal soni St , shock strength coefficient σ_s , boundary layer thickness ratio δ/ℓ) doirasida olingan natijalar kanal dizayniga qo'llashi mumkin bo'lgan mezonlarga aylantirildi.

Natijalar va muhokama

Tadqiqot natijalari ko'rsatdiki, supersonik gaz turbinasi kanalida barqaror oqimni ta'minlash uchun bir necha mexanizm birgalikda ishlashi kerak: birinchi navbatda, kanal profili optimallashtirilishi (masalan, egri chiziqli divergent bo'limlar, to'liq refleksiyaning nazorat qiluvchi sirt geometriyasi) supersonik to'liqlarning devor-shakliy refleksiyaning kamaytiradi va sirt yaqinida ajralish zonalarini oldini oladi; natijada to'liq-chegara qatlam o'zaro ta'siri (SBLI) darajasi sezilarli kamayadi, bu esa oqimning barqarorligini oshiradi. Ikkinchi mexanizm — sirt strukturasining modifikatsiyasi (rib, protuberanslar, turbulizator elementlari) orqali sirt qatlamini nazorat qilish, sirt yaqinidagi laminarlikni kamaytirish yoki ajralish zonalarini

kechiktirish hisobiga barqarorlikni yaxshilaydi. Uchinchi mexanizm — akustik rezonanslar va to‘lqin-to‘lqin (shock–shock) hamda to‘lqin-oqim o‘zaro ta’sirini pasaytiruvchi usullar (masalan, poroz devorli so‘ndiruvchilar, to‘lqin dispersiyasini oshiruvchi sirt materiallari) barqarorlikni mustahkamlaydi. Qo‘shimcha ravishda, simulatsiya natijalari shuni ko‘rsatdiki, kanal ichidagi Mach soni $M \approx 1.6$ — 2.2 oraliqda, $Re \geq 10^6$ va Strouhal soni $St \leq 0.05$ bo‘lgan holatda barqaror oqim osonroq ta’minlanadi; ammo agar $M > 2.5$ yoki kanal profil o‘zgarishlari juda keskin bo‘lsa, ajralish zonalari va to‘lqin oyinlari (shock buffet) boshlanadi. Misol uchun, ribli sirt bilan jihozlangan kanalga nisbatan yassi sirtli kanalda to‘lqin-separation chastotasi $\sim 30\%$ ga yuqoriroq bo‘lgan; passiv sootuvchi element qo‘shilganda chastota 18% ga pasaygan. Shuningdek, akustik rezonatorlar yordamida to‘lqin amplitudasini $\sim 25\%$ ga kamaytirish imkoniyati aniqlangan. Ushbu natijalar gaz turbinasi kanallarida supersonik rejimlarni qo‘llashda barqarorlikni ta’minlovchi optimallikni belgilab beradi.

Xulosa

Gaz turbinasi ichidagi supersonik oqimlarni amaliy jihatdan muvaffaqiyatli ishlatish uchun oqim barqarorligini saqlash har tomonlama yondoshuvni talab qiladi: kanal geometriyasi, sirt profilini, sirt strukturasini, to‘lqin va akustik holatlarni integratsiyalash kerak. Mazkur maqolada ta’kidlanganidek, kanal shaklini soflashtirish va shock – boundary layer o‘zaro ta’sirini kamaytirish orqali oqim ajralishi va to‘lqin oyinlarini oldini olish mumkin; sirt modifikatsiyalar orqali sirt qatlamini barqarorlashtirish kanal ichidagi turbulent jarayonlarni nazorat qiladi; akustik va to‘lqin so‘ndiruvchilar orqali esa dinamik yuklanishlar va rezonanslarni kamaytirish mumkin. Amaliy tavsiyalar: supersonik gas turbine kanallarida $M \approx 1.5$ — 2.2 diapazonida ishlash, kanal tebranishi va ajralishini cheklovchi rib/protuberans integratsiyasi, passiv tovush/oqim so‘ndiruvchilari va sirt geometriyasidagi silliqlikni ta’minlash tavsiya etiladi. Kelajakda ayniqsa 3D-shaklli, pulsatsiyali oqim sharoitidagi barqarorlikni saqlash mexanizmlarini, real gaz xossalarini (masalan, turbogaz mahsulotlaridagi kimyoviy reaksiyalar) bilan birga o‘rganish dolzarb. Shu bilan supersonik kanal li gaz turbinalarining samaradorligi, chidamliligi va xavfsizligi sezilarli darajada oshiriladi.

Adabiyotlar

1. S. Lee, Y. Zhao, J. Luo, J. Zou, Y. Zhang. “A Review of Flow Control Strategies for Supersonic/Hypersonic Fluid Dynamics.” *Aerospace Research Communications*, 2024, 1(1): 25-49. [Frontiers Publishing Partnerships](#)
2. VI Zvegintsev. “Gas-dynamic problems in off-design operation of supersonic inlets of high-velocity air-breathing engines.” *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, 58(6): 822-835. link.springer.com
3. S. Sudhof. Development Techniques for Supersonic Turbines. Doktorlik dissertatsiyasi, DLR Records, 2020. elib.dlr.de
4. J. Sousa, G. Paniagua. “Design and optimization of supersonic turbines for internal supersonic passages.” *Energy Conversion and Management*, 2022. [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)

5. Hugo F. S. Lui, Tulio R. Ricciardi, William R. Wolf, James Braun, Iman Rahbari, Guillermo Paniagua. “Unsteadiness of Shock–Boundary Layer Interactions in a Mach 2.0 Supersonic Turbine Cascade.” arXiv preprint, 2022. arxiv.org