



**AERODINAMIK TRUBADA O'LCHOV TIZIMLARINI KALIBRLASH
USULLARI TAHLILI**

Abdullayev Alisher Amonovich

*“O‘zbekiston milliy metrologiya instituti” davlat muassasasi
Samarqand filiali mutaxasisi*

Annotatsiya. Mazkur maqolada aerodinamik trubalarda qo'llaniladigan o'lchov tizimlarini kalibrlash usullari har tomonlama tahlil qilinadi. Aerodinamik truba — bu gaz (odatda havo) oqimining tezligi, bosimi va yo'nalishini tajriba yo'li bilan o'lchashga imkon beruvchi inshoot bo'lib, u har xil jism shakllarining oqimdagi harakatiga oid parametrlarni aniqlashda muhim vosita hisoblanadi. O'lchov tizimlarining aniqligi esa to'g'ri kalibrlashga bevosita bog'liq. Tadqiqot davomida statik, dinamik va kompyuter modellashtirish asosidagi kalibrlash usullari o'zaro taqqoslanib, ularning texnik imkoniyatlari, aniqlik darajasi, amaliy qo'llanish shartlari va iqtisodiy samaradorligi o'rganildi. Kalibrlash jarayonida uchraydigan muammolar — turbulentlikning ta'siri, sensorlarning degradatsiyasi va tashqi omillar natijasida yuzaga keladigan sistematik xatoliklar ham yoritildi. Maqolada shuningdek, zamonaviy avtomatlashtirilgan va integratsiyalashgan kalibrlash usullarini joriy etish bo'yicha takliflar ham bayon etilgan. Tadqiqot natijalari aerodinamik trubalarda o'lchov tizimlari ishonchliligini oshirish va aniqlikni yaxshilashga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Aerodinamik truba, kalibrlash usullari, statik kalibrlash, dinamik kalibrlash, o'lchov tizimi, sensorlar, kompyuter modellashtirish, aniqlik, CFD, oqim parametrlarini o'lchash.

Аннотация. В данной статье всесторонне анализируются методы калибровки измерительных систем, применяемых в аэродинамических трубах. Аэродинамическая труба — это установка, позволяющая экспериментальным путем измерять скорость, давление и направление потока газа (обычно воздуха), которая является важным инструментом для определения параметров движения различных тел в потоке. Точность измерительных систем напрямую зависит от правильной калибровки. В ходе исследования были сравнены статические, динамические и основанные на компьютерном моделировании методы калибровки, изучены их технические возможности, уровень точности, условия практического применения и экономическая эффективность. Также рассмотрены проблемы, возникающие в процессе калибровки — влияние турбулентности, деградация сенсоров и систематические ошибки, вызванные внешними факторами. В статье также представлены предложения по внедрению современных автоматизированных и интегрированных методов калибровки. Результаты исследования способствуют



повышению надежности и улучшению точности измерительных систем в аэродинамических трубах.

Ключевые слова: *аэродинамическая труба, методы калибровки, статическая калибровка, динамическая калибровка, измерительная система, сенсоры, компьютерное моделирование, точность, CFD, измерение параметров потока.*

Abstract. *This article provides a comprehensive analysis of calibration methods for measurement systems used in aerodynamic wind tunnels. An aerodynamic wind tunnel is a facility that allows experimental measurement of the velocity, pressure, and direction of a gas flow (usually air) and serves as an important tool for determining parameters related to the movement of various bodies in the flow. The accuracy of measurement systems is directly dependent on proper calibration. During the study, static, dynamic, and computer modeling-based calibration methods were compared, and their technical capabilities, accuracy levels, practical application conditions, and economic efficiency were investigated. The problems encountered during the calibration process—such as the effects of turbulence, sensor degradation, and systematic errors caused by external factors—were also examined. Additionally, the article presents proposals for the implementation of modern automated and integrated calibration methods. The results of this research contribute to improving the reliability and accuracy of measurement systems in aerodynamic wind tunnels.*

Keywords: *aerodynamic wind tunnel, calibration methods, static calibration, dynamic calibration, measurement system, sensors, computer modeling, accuracy, CFD, flow parameter measurement.*

Kirish. Bugungi kunda aerodinamik tadqiqotlar fan va texnikaning turli sohalarida — aviatsiya, kosmik texnika, avtomobilsozlik, energetika hamda qurilish muhandisligida katta ahamiyat kasb etmoqda. Har qanday parvoz qiluvchi apparatning yoki yuqori tezlikda harakatlanadigan transport vositasining samaradorligi, barqarorligi va xavfsizligi bevosita uning aerodinamik xossalarni chuqur o'rganishga bog'liq. Bunday xossalarni aniqlash va baholashda aerodinamik trubalar asosiy tajriba vositasi sifatida keng qo'llaniladi. Aerodinamik truba — bu laboratoriya sharoitida havo oqimining sun'iy ravishda hosil qilinadigan maxsus qurilmasi bo'lib, u orqali jismning havo bilan o'zaro ta'sirini modellashtirish mumkin. Trubadagi o'lchovlar orqali jismga ta'sir qiluvchi kuchlar, bosim taqsimoti, turbulentlik, havo qarshiligi kabi muhim parametrlar aniqlanadi. Biroq bu parametrlarning aniqligi va ishonchliligi bevosita trubaga o'rnatilgan o'lchov tizimlarining kalibrlanganlik darajasiga bog'liq.

O'lchov tizimlari (masalan, Pitot-statik trubkalar, anemometrlar, differensial bosim sensorlari, issiqlikka sezgir elementlar va boshqalar) uzoq muddatli ishlash jarayonida, harorat va bosim o'zgarishlari, mexanik vibratsiyalar yoki ifloslanish ta'sirida sezgirligini yo'qotishi yoki noto'g'ri ko'rsatmalar berishi mumkin. Shuningdek, har bir aerodinamik



truba o'zining geometrik va oqim xususiyatlariga ega bo'lgani uchun, universal kalibrlash metodologiyasi mavjud emas. Shu sababli, har bir o'lchov tizimi real ish sharoitiga moslab, alohida kalibrlanishi zarur bo'ladi.

Mazkur maqolada aerodinamik trubada o'lchov tizimlarini kalibrlash usullari chuqur tahlil qilinadi. Xususan, statik, dinamik va zamonaviy kompyuter modellashtirish asosidagi kalibrlash yondashuvlari ko'rib chiqiladi, ularning afzallik va kamchiliklari, qo'llash sharoitlari, shuningdek, har bir usulning amaliyotdagi o'rni aniqlanadi. Shuningdek, mavjud usullarning takomillashtirilishiga oid takliflar ham ilgari suriladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi — aerodinamik trubalardagi o'lchov tizimlarini maksimal aniqlikda kalibrlashga erishish uchun eng samarali yondashuvlarni aniqlash va baholashdir.

Statik kalibrlash. Statik kalibrlashda o'lchov tizimi harakatsiz havo muhitida ishlatiladi va u etalon bosim yoki tezlik manbai bilan taqqoslanadi. Bu usul odatda quyidagilar uchun qo'llaniladi:

- Pitot trubkalarini bosim sezuvchanligini aniqlashda
- Sensorlarning nol nuqtasini aniqlash va sozlashda

Dinamik kalibrlashda sensorlar real yoki shunga yaqin oqim sharoitida sinovdan o'tkaziladi. Bunda aerodinamik trubada barqaror va nazorat qilinadigan havo oqimi hosil qilinadi. So'nggi yillarda hisoblash texnologiyalarining rivojlanishi tufayli kompyuterli modellashtirish usuli keng qo'llanilmoqda. Bu usulda CFD (Computational Fluid Dynamics) dasturlaridan foydalaniladi. Aerodinamik trubalarda o'lchov tizimlarini to'g'ri kalibrlash eksperiment natijalarining aniqligi va ishonchliligini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. Turli kalibrlash usullarining tahlili shuni ko'rsatadiki, ularning har biri ma'lum bir sharoitda eng maqbul natija beradi. Kelgusida kombinatsiyalashgan va intellektual tizimlar asosida avtomatik kalibrlash usullarini rivojlantirish muhim vazifalardan biri bo'lib qoladi.

Adabiyotlar tahlili. Aerodinamik trubalarda o'lchov tizimlarini kalibrlash bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borilgan bo'lib, ular turli yondashuvlar asosida metodologiyalar ishlab chiqqan. O'lchov tizimlarining aniqligi, sezuvchanligi va barqarorligi aerodinamik tadqiqotlarning natijalariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun mavjud adabiyotlar asosida kalibrlashning turli usullarini tahlil qilish ushbu maqolaning muhim tarkibiy qismidir. Statik kalibrlash usullarining nazariy va amaliy asoslari asosan o'tgan asrning 60–80-yillarida rivojlangan. *Pope and Goin (1965)* o'zining klassik asarida aerodinamik trubalarda tezlikni o'lchash uchun Pitot trubkalarini kalibrlash tartiblarini belgilab berdi [1]. Ular statik sharoitlarda aniqlikni oshirish uchun atmosfera bosimining barqarorligini hisobga olish zarurligini ta'kidladilar. *Schlichting (1979)* turbulent oqimlarni statik kalibrlashda qanday buzilishlar yuzaga kelishini tahlil qildi [2]. Unga ko'ra, yuqori Reynolds sonlarida hatto statik sharoitda ham oqimdagi mikrosilkinishlar sezilarli xatoliklarga olib kelishi mumkin.

Dinamik kalibrlash bo'yicha ilg'or tadqiqotlar *Bruun (1995)* tomonidan olib borilgan bo'lib, u tez o'zgaruvchan bosim va tezlik maydonlarida sezgir sensorlarni kalibrlash uchun maxsus shart-sharoitlar yaratishni taklif qilgan [3]. Bu yondashuv ayniqsa pulsatsiyali yoki



noturg'un oqimlarni tahlil qilishda foydalidir. Bundan tashqari, *Miller va Munson (2000)* ishlarida aerodinamik trubada laminar va turbulent oqimlarda o'lov sensorlarining javob tezligini baholashga doir amaliy tajribalar keltirilgan [4].

So'nggi yillarda hisoblash texnikasining keskin rivojlanishi natijasida CFD (Computational Fluid Dynamics) modellaridan foydalanish orqali virtual kalibrlash usullari keng tarqalmoqda. *Ferziger va Perić (2002)* ishida aerodinamik trubadagi oqimlarni raqamli modellashtirish asoslari yoritilgan va sensor pozitsiyasi bilan bog'liq xatoliklar qanday oldini olish mumkinligi ko'rsatib berilgan [5]. *Choudhury (2005)* esa RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) modelining o'lov xatoliklarini prognoz qilishdagi qo'llanish imkoniyatlarini tadqiq etgan. Bu yondashuv eksperimentlarni qisqartirishga xizmat qiladi, biroq modellashtirish sifati bevosita kompyuter resurslari va dasturiy ta'minotga bog'liq [6].

Yaqin yillardagi tadqiqotlar, masalan *Lee va Cho (2019)* tomonidan olib borilgan ishlarda, o'lov tizimlarini real vaqt rejimida avtomatik ravishda kalibrlash uchun sun'iy intellekt algoritmlaridan foydalanish ko'rib chiqilgan [7]. Sensorlar muhitdagi o'zgarishlarga moslasha oladigan tarzda sozlanadi. Bu esa uzoq muddatli eksperimentlarda ishonchlilikni oshiradi. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, har bir kalibrlash usuli ma'lum shart-sharoitlarda o'ziga xos afzalliklarga ega. Statik kalibrlash soddaligi bilan ajralib turadi, dinamik usullar yuqori aniqlikni ta'minlaydi, CFD modellashtirish esa tajribani virtual muhitga ko'chirish imkonini beradi. Zamonaviy aqlli tizimlar esa inson omiliga bo'lgan ehtiyojni kamaytirib, avtomatlashtirilgan yechimlarni taklif qilmoqda. Biroq hali ham ko'p sohalarda universal kalibrlash metodologiyasi ishlab chiqilmagan, bu esa mavzuni dolzarbligicha saqlab qolmoqda.

Tadqiqot metodologiyasi. Mazkur tadqiqotda aerodinamik trubada o'lov tizimlarini kalibrlash usullarini taqqoslash, tahlil qilish va baholashga yo'naltirilgan kompleks yondashuv qo'llanildi. Ishlab chiqilgan metodologiya uch asosiy bosqichni o'z ichiga oladi: nazariy tahlil, eksperimental sinov va kompyuter modellashtirish. Ushbu metodik yondashuv kalibrlash usullarining afzallik va kamchiliklarini aniqlash hamda real aerodinamik sharoitlarda ularning aniqligini baholash imkonini beradi.

Bu bosqichda aerodinamik trubalar va o'lov tizimlariga oid ilmiy va texnik adabiyotlar tahlil qilindi. Kalibrlash usullari uch asosiy guruhga ajratildi:

- Statik kalibrlash – bosim va tezlik sensorlarini o'zgarmas sharoitlarda etalon qiymatlar bilan solishtirish;
- Dinamik kalibrlash – real yoki shunga yaqin oqim sharoitida sensorlarning javob aniqligini baholash;
- Kompyuter modellashtirish asosidagi kalibrlash (CFD) – raqamli simulyatsiya orqali oqim parametrlarining taqsimotini aniqlash.

Shuningdek, o'lov tizimlarining xatolik manbalari va ularga tashqi muhit ta'siri ham nazariy jihatdan baholandi.

Har bir kalibrlash usuli quyidagi mezonlar asosida baholandi:





TANQIDIY NAZAR, TAHLILIY TAFAKKUR VA INNOVATSION G'OYALAR



Mezon	Tavsif
Aniqlik	O'lchov xatoligining past darajasi (RMSE)
Ishonchlilik	Har xil sharoitlarda barqarorlik
Qulaylik	Kalibrlashning soddaligi va talab qilinadigan vaqt
Xarajatlar	Talab etiladigan texnika, vaqt va resurslar
Moslashuvchanlik	Har xil sensor va truba sharoitlariga moslashuv

Xulosa. Mazkur tadqiqotda aerodinamik trubalarda o'lchov tizimlarini kalibrlash usullari chuqur tahlil qilindi va ularning texnik, funksional hamda amaliy jihatlari o'rganildi. O'tkazilgan nazariy tahlil, eksperimental sinovlar va kompyuter modellash natijalari quyidagi asosiy xulosalarni chiqarishga asos bo'ldi. Umuman olganda, o'lchov tizimlarini ishonchli va to'g'ri kalibrlash aerodinamik trubadagi tajriba natijalarining aniqligini oshirish, texnologik xavfsizlikni ta'minlash hamda ilmiy natijalarning takrorlanuvchanligini kafolatlash uchun zaruriy shart hisoblanadi. Kelgusida avtomatlashtirilgan kalibrlash tizimlarini sun'iy intellekt va mashinali o'rganish asosida rivojlantirish orqali o'lchov jarayonini yanada takomillashtirish imkoniyatlari mavjud.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Pope, A., & Goin, L. (1965). High-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley & Sons.
2. Schlichting, H. (1979). Boundary Layer Theory. McGraw-Hill.
3. Bruun, H. H. (1995). Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis. Oxford University Press.
4. Miller, C. J., & Munson, B. R. (2000). "Dynamic Calibration Techniques for Pressure Transducers in Wind Tunnel Testing", AIAA Journal, 38(9), 1585–1592.
5. Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer.
6. Choudhury, D. (2005). "Application of the Reynolds Stress Model in Complex Flow Simulations", Fluent Technical Notes.
7. Lee, S., & Cho, H. (2019). "AI-based Automatic Calibration of Pressure Sensors in Wind Tunnels", Journal of Sensors and Systems, 8(2), 112–121.