



A XV-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2015

STUDIU ISTORICO-CRITIC AL ANEMOMETRIEI

Ion M. CERNICA

HISTORICAL AND CRITICAL REVIEW OF THE ANEMOMETRY

In this paper, on the base of extensive documentary, are present the main events and facts, which have had led to the evolution in time of both anemometry and the thermo-anemometry. At the same time, it shows the priority development of anemometers and thermo-anemometers. This study will be helpful to the specialists skilled in this area.

Keywords: anemometer, therm-anemometer, kata-thermometer, speed, wind, air, palette, cup

Cuvinte cheie: anemometru, termoanemometru, catatermometru, viteză, vânt, aer, paletă, cupă

1. Considerații generale

Măsurarea vitezei apei și vântului a reprezentat din cele mai vechi timpuri un element esențial în evoluția cunoașterii obiectelor și fenomenelor lumii reale. Încă în Egiptul antic s-a observat că viteza de învârtire a roții hidraulice este direct proporțională cu viteza apei în râul Nil. Folosirea șurubului lui Arhimede în Mesopotamia a arătat că viteza de rotație a acestuia este proporțională cu viteza curentului de apă care curge prin conducta de irigare. Dar aceste observații simple, de altfel ca și multe altele, nu au putut servi drept bază pentru realizarea practică a aparatelor de măsurare a vitezei vântului. A fost nevoie să treacă un anumit timp pentru ca mecanica fluidelor și alte științe fizice să conducă la apariția anemometriei – ramură a fizicii experimentale, care se ocupă

de studierea metodelor și mijloacelor de măsurare a vitezei vântului și curenților de aer din instalațiile industriale de condiționare și ventilare pe baza principiilor mecanicii fluidelor. Cuvântul „anemometrie” este compus din prefixul „anemo”, care provine de la grecescul „”, în transcriere latină „anemos” și care înseamnă „vânt”, și din sufixul „metrie”, adică a „măsura”, care în limba veche greacă desemna „μετρεω”.

Literatura de specialitate consemnează un număr mare de lucrări dedicate anemometriei, dar puține dintre ele abordează originea și evoluția în timp a acestei ramuri importante a fizicii experimentale. Istoric vorbind, primele mențiuni sumare cu privire la problema abordată au fost făcute încă în anul 1914 de profesorul canadian L. V. King [10]. Asupra acestei probleme s-au mai expus G. S. Harris [6], anul 1965, profesorul francez G. Comte-Bellot [3], anul 1976, și cercetătorul englez I. D. Unwin [20], anul 2007.

Cât de paradoxal nu ar părea, dar istoria anemometriei în literatura tehnico-științifică din România și R. Moldova până în prezent nu este reflectată. Pentru soluționarea acestei probleme, în cele ce urmează, pe baza unei ample documentări, se face o prezentare a principalelor evenimente și fapte istorice, care au stat la originea și dezvoltarea atât a anemometriei, cât și a termoanemometriei.

2. Evoluția anemometriei

Majoritatea istoriografilor anemometriei atribuie invenția anemometrului ilustrului om de cultură și știință al epocii Renașterii Leon Battista Alberti (figura 1) [3, 6, 10, 20]. În anul 1450 Leon Alberti construiește primul aparat pentru măsurarea vitezei vântului. Anemometrul lui Alberti era compus dintr-o placă ușoară, suspendată de un ax orizontal (figura 2). Sub acțiunea vântului placa se abate de la poziția verticală, corespunzătoare stării de repaus. Drept măsură a forței vântului servește unghiul de înclinare a plăcii față de axa verticală. Aproximativ prin anul 1500 Leonardo da Vinci a schițat un anemometru, care niciodată nu a fost realizat în practică [20].

Placa se găsește în echilibru sub acțiunea forței dinamice a curențului de fluid $C \frac{\rho v^2}{2} A_d$ și forței de gravitație în fluid $(\rho_p - \rho) g \tau$, unde A_d este aria laterală a sistemului expusă forței dinamice ascensionale a curențului de fluid, ρ_p – densitatea materialului plăcii și

τ – volumul plăcii. Luând în considerare o mișcare permanentă și neglijând frecarea între placă și fluid, condiția de echilibru a plăcii se scrie

$$C \frac{\rho v^2}{2} A_d = (\rho_p - \rho) g \tau \sin \alpha, \quad (1)$$

din care rezultă relația vitezei vântului

$$v = \sqrt{\frac{2g\tau}{CA_d} \cdot \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \cdot \sin \alpha} = k(\alpha) \sqrt{\sin \alpha}. \quad (2)$$

În consecință, prin măsurarea unghiului α la care se stabilizează placa se poate determina viteza V .



Fig. 1 Leon Battista Alberti
(1404-1472)

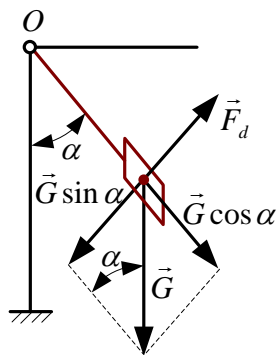


Fig. 2 Schema
anemometrului lui Alberti

Anemometrul este reinventat în anul 1667 de renumitul fizician englez *Robert Hooke* (1635-1703) [20]. Principiul de funcționare al anemometrului lui Hooke era bazat pe legătura între presiunea dinamică a vântului și viteza acestuia. Anemometrul construit de Hooke

a fost un anemometru cu presiune, care includea un anemometru și un tub Pitot (anemometrul cu tub Pitot). În anul 1687 Societatea Regală din Londra publică un număr mare de desene ale anemometrelor cu pale.

În 1805 amiralul englez *Francis Beaufort* (1774-1857) elaborează o scară destul de precisă pentru aprecierea vitezei vântului printr-o simplă observație, scară care este încă și astăzi folosită în metrologie și marină. Scara Beaufort este împărțită în 12 grade, fiecare grad fiind însoțit de o descriere detaliată a comportării curenților de aer pe mare și uscat. Gradul Beaufort s-a estimat cu viteza medie a vântului, măsurată cu un anemometru la înălțimea de 10 m pe o durată de 10 min. Legătura între viteza vântului v , exprimată în km/h, și gradul Beaufort, simbol bf , se exprimă prin relația

$$bf \approx \sqrt[3]{\frac{v^2}{9}}. \quad (3)$$

Relația (3) este valabilă pentru viteze ale vântului ce nu depășesc valoarea $v = 118$ km/h. Pentru viteze mai mari de această valoare, relația este lipsită de sens.

Primele anemometre inventate de omeni au fost de tip mecanic, elementul sensibil al acestora reprezentând un rotor cu pale (elice) capabil să se rotească sub acțiunea curenților de aer. Ele erau prevăzute cu un sistem de demultiplicare cu roți dințate și cu melc-roată melcată, care puteau transmite mișcarea de rotație de la elice la un ac indicator dispus pe un cadran. Sistemul astfel creat indica numărul de rotații efectuate de elice, care raportat la intervalul de timp corespunzător și la constanta aparatului, permitea măsurarea vitezei locale a curenților de aer.

Primul anemometru mecanic cu pale a fost realizat în anul 1647 de Christopher și Robert Hooke și a fost aplicat în meteorologie [20]. În secolele XVIII-XIX construcția de anemometre a fost impulsionată de necesitatea măsurării curenților de aer din minele de cărbuni britanice [20]. Printre cele mai cunoscute anemometre mecanice inventate pentru acest scop se regăsesc anemometrul lui Bouguer (1746), George Cayley (1849), Joseph Dickinson (1852), William Peace (1858), Rees și Benjamin Biram (1842), ultimul fiind perfecționat în repetate rânduri și utilizat în sistemele de ventilare ale Marii Britanii până în anul 1980.

Ulterior, s-au realizat și anemometre cu sisteme electrice și electronice de contorizare a numărului de rotații al elementului sensibil și indicare a vitezei vântului, fără ca partea aerodinamică să comporte modificări esențiale. Primul anemometru electric cu pale a fost descris de către Angelo Secci, între anii 1858-1859 [20]. Tot atunci, mai exact între anii 1877-1878, inginerul englez Henry Hall propune un sistem electric de contorizare pentru anemometrul lui Biram.

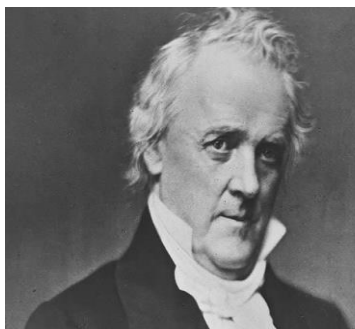


Fig. 3 John Thomas Romney Robinson (1792-1882)

Anemometrul mecanic cu cupe a fost inventat în anul 1846 de astronomul și fizicianul englez John Thomas Romney Robinson (figura 3), directorul renumitului Observator Armagh, și de atunci numeroase perfecțiuni tehnice i s-au adus, legate atât de partea aerodinamică, cât de sistemul tahometric. Anemometrul lui Robinson era compus din 4 cupe semisferice dispuse solidar pe un rotor cu ax vertical. Curentul de aer orizontal, de direcție arbitrară, rotea cupele cu o viteză corespunzătoare vitezei vântului.

Robinson considera că viteza liniară a cupelor constituie o treime din viteza vântului, fapt confirmat parțial de experiențele timpului. Mai târziu s-a stabilit unanim că coeficientul anemometrului cu cupe variază între 2 și 3.

În anul 1926 canadianul John Patterson reduce numărul cupelor până la trei, iar în 1935 Brevoort și Joiner perfecționează forma cupelor, extinzând astfel domeniul de măsurare liniar al anemometrului cu cupe până la viteze de 27 m/s , cu o precizie de 3%. Patterson a mai observat că cupele dezvoltă un moment maxim atunci când unghiul lor de înclinare în raport cu direcția vântului constituie 45° . Perfecțiunile tehnice originale aduse în 1991 de australianul Dersk Weston construcției cupelor a permis măsurarea vitezei și direcției vântului cu același rotor.

Primele anemometre cu cupe au avut o construcție asemănătoare cu anemometrele cu pale; erau prevăzute la fel cu un sistem de demultiplicare cu roți dințate și cu melc-roată melcată, capabil să transmită mișcarea de rotație unui ac indicator dispus pe un cadran.

Sistemul de contorizare și înregistrare indica numărul de rotații efectuat de rotor, care raportat la intervalul de timp corespunzător, permitea măsurarea vitezei locale a curentului de aer.

Cel mai cunoscut anemometru cu cupe în secolul al XIX-lea a fost anemometrul cu contacte electrice al lui Jules Richard [20]. Acest anemometru avea în partea inferioară un sistem de demultiplicare mecanic, care la un anumit număr de rotații efectuat de elementul sensibil închidea un contact electric. După numărul de contacte înregistrate de sistemul tahometric electric se putea determina numărul total de rotații al elicei. Pentru măsurarea vitezei vântului, era necesară orientarea aparatului cu axa pe direcția vântului.

Între timp s-a construit și un anemometru mecanic cu pendul [20]. Acesta era prevăzut cu un pendul centrifugal pe ax, acul indicator fiind pus în legătură cu manșonul pendulului. Aparatul indica direct viteza curentului fluid.

În afară de anemometre integratoare, se folosesc în măsurători și anemometre indicatoare, având cuplat pe axul elicei rotorul unui generator de curent alternativ miniatural. Tensiunea generată este funcție de turația elicei și se măsoară cu un milivoltmetru, gradat direct în unități de viteză.

3. Dezvoltare termooanemometriei

Faptul că viteza vântului poate fi determinată prin măsurarea vitezei de răcire a unui termometru încălzit a fost observat încă la începutul secolului al XIX-lea de *John Leslie* (1766-1832), cunoscut matematician și fizician scoțian [11]. În una dintre experiențele sale cu privire la propagarea căldurii el întâmplător a răsucit deasupra capului său un balon cu apă caldă, confecționat din tablă și legat de sfoară. Efectuând numeroase experiențe și generalizând datele experimentale, obține relația empirică dintre viteza de răcire a lichidului și viteza de mișcare a curentului de aer. Ulterior, Leslie propune aplicarea acestui principiu la crearea anemometrului. Era ferm convins că introducând în fluid un termometru cu alcool încălzit în prealabil și măsurând viteza lui de răcire se poate determina viteza de mișcare a fluidului. Dar ideea sa cu privire la crearea anemometrului termometric în acest mod, nu a fost fructificată.

În anul 1849 guvernul englez îl împuternicește pe profesorul *John Phillips* (1822-1887) de la Colegiul Regal din Londra cu cercetarea sistemelor de ventilare din minele de cărbuni britanice, care la acel timp erau în mare vogă [13-15]. Constatând că curenții de aer din minele de

cărbuni sunt foarte mici pentru a fi înregistrați cu ajutorul lumânărilor, fumului produs de praful de pușcă sau anemometrelor mecanice, el a recurs la folosirea ideii lui Leslie, reușind să construiască primul din lume catatermometru (în limba greacă prefixul „cata” înseamnă „în jos”, sugerând ideea reducerii temperaturii în măsurători). Aparatul lui Phillips reprezenta un termometru cu alcool, care, după ce era încălzit, se instala pe un suport în contact cu aerul din mină. Apoi se cronometra timpul în care meniscul termometrului coboară până la o valoare, care este cu 5...10 °F mai mare decât temperatura aerului înconjurător. Calculul vitezei curentului de aer era bazat pe o relație empirică, care indica o legătură invers proporțională între viteza aerului și pătratul timpului de răcire.

Însă, lucrările lui Leslie și Phillips au fost date uitării sau ignorate de generațiile viitoare de cercetători [20]. Abia în anul 1916 L. Hill, O. W. Griffith și M. Flack au publicat descrierea catatermometrului – aparat folosit și astăzi pentru aprecierea confortului hidrotermic al corpului uman [7, 8]. Acest aparat era construit dintr-un termometru cu alcool, cu un rezervor din sticlă de formă cilindrică de 2 cm diametru și 4 cm lungime, și un tub capilar de 18 cm lungime, pe care era aplicată o scară cu două diviziuni: 35 °C și 38 °C. Tubul capilar avea la extremitatea superioară o mică cavitate ovală, care proteja termometrul de o eventuală încălzire excesivă. După L. Hill, O. W. Griffith și M. Flack calculul vitezei vântului v se poate face cu relația

$$v = \left[\frac{q}{(t - t_a)b} - \frac{a}{b} \right]^2, \quad (4)$$

unde q reprezintă viteza medie de răcire, apreciată cu cantitatea de căldură pierdută la răcirea substanței termometrice de la 38 °C până la 35 °C raportată la aria suprafeței de răcire și timpul de răcire, în $\text{mcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, t – temperatura medie a termometrului, considerată $t = 36,5$ °C, t_a – temperatura medie a aerului, în °C, iar a și b constante empirice, $a = 0,2$ și $b = 0,4$ pentru viteze ale vântului $v < 1$ m/s și $a = 0,13$ și $b = 0,4$ pentru $v > 1$ m/s.

Astăzi este practic imposibil să se afirme cu certitudine cui la intersecția secolelor XIX-XX i-a venit primul în minte ideea amplasării în curentul de aer a unor fire subțiri încălzite electric și care a fost motivul. Fizicianul olandez A. van Dijk [4], bazându-se pe lucrările lui Boussinesq [1], explică acest lucru prin dorința de a găsi un mijloc în lupta contra încălzirii conductoarelor la trecerea curentului electric prin ele. Așa o fi sau nu, un lucru este cert, începutul secolului XX este marcat de realizarea practică a termoanemometrului electric.

Oficial, inventatorul termoanemometrului se consideră profesorul american de inginerie electrică Artur Edwin Kennelly (figura 4), pentru care a și fost distins în anul 1918 cu medalia de aur Howard Potts a Institutului Franklin din Philadelphia [10, 20]. Tot lui Kennelly îi aparține ideea emisă prima dată în 1909 cu privire la determinarea vitezei de mișcare a aerului prin măsurarea curentului necesar pentru menținerea constantă a temperaturii unui fir electric [9].



Fig. 4 Artur Edwin Kennelly (1861-1939)

Independent de Kennelly metoda termoanemometrică a fost descoperită de inginerul italian U. Bordini (1911) [2] și profesorul englez J. T. Morris (1912) [12]. Profesorul emerit al Școlii Centrale din Lyon G. Comte-Bellot susține în [3] că printre inventatorii termoanemometrului se numără renumitul om de știință francez de origine rusă D. P. Riabouchinsky (1909) [17], inginerii germani C. Retschy (1912) [16] și H. Gerdien (1913) [5], precum și profesorul canadian L. V. King (1914) [10]. Astfel că a desemna un singur inventator al termoanemometrului din rândul unor astfel de oameni de știință, precum Kennelly, Riabouchinsky, Morris și alții, este practic imposibil. Dar, indiferent dacă inventatorul termoanemometrului este profesorul american Artur Edwin Kennelly – așa cum îl creditează mulți istorici ai științei – sau nu, un

lucru oricum este cert: începutul secolului XX este marcat de realizarea practică a termoanemometrului electric.

Primele studii experimentale în domeniu a încercat să efectueze în 1902 un oarecare Shakespeare din Birmingham, dar din cauza unor dificultăți de ordin tehnic experiențele au eșuat [20]. Tot atunci profesorul francez J. V. Boussinesq (1905) [1] și A. Russell [18] inițiază primele studii teoretice în domeniul termoanemometriei electrice, deși la acea vreme se cunoștea deja că căldura cedată prin convecție forțată este proporțională cu diferența temperaturilor și cu rădăcina pătrată a vitezei de curgere [19].

După 1950 apar primele anemometre cu termistori, termometre termoelectrice și termometre manometrice.

4. Concluzii

O sinteză a celor mai importante evenimente și fapte, care au jucat un rol decisiv în istoria anemometriei, ca ramură a fizicii experimentale, conduce la următoarele concluzii:

- Anemometria ia naștere în Evul Mediu datorită contribuțiilor ilustrului om de cultură și știință al epocii Renașterii Leon Battista Alberti, considerat unanim și pe bună dreptate inventatorul anemometrului cu pale. Inventatorul anemometrului cu cupe este astronomul și fizicianul englez John Thomas Romney Robinson.

- În timp ce sistemului de contorizare și înregistrare i s-au adus numeroase perfecțiuni tehnice în decursul timpului, partea aerodinamică a anemometrului a rămas practic nemodificată.

- Inventatorul catatermometrului este profesorul englez John Phillips, iar al termoanemometrului profesorul american Artur Edwin Kennelly.

BIBLIOGRAFIE

[1] Boussinesq, J. V., *Calcul du pouvoir refroidissant des fluides*, Journal de Mathématiques Pures et Appliqués, 1905, serie 6, tome 1, pp. 285-332.

[2] Bordini, U., *Un procedimento per la misura della velocità dei gas*, Nuovo Cimento, 1912, series VI, vol. III, pp. 241-283.

[3] Comte-Bellot, G., *Hot-wire anemometry*, Annual review of fluid mechanics, 1976, vol. 8, pp. 209-231.

[4] Van Dijk, A., *Aliasing in one-point turbulence measurements: theory, DNS and hotwire experiments*, PhD thesis, 1999, Delft University of Technology.

- [5] Gerdien, H., *Der luftgeschwindigkeits-messer der Siemens Halske A.–G.*, Ber. Deutsch. Phys. Ges., 1913, vol. 20, pp. 961-968.
- [6] Harris, G. S., *A cold tip velocity meter*, J. Scient. Instr., 1965, vol. 42, no. 8, pp. 657-658; series. 2, vol. 2., 1969, pp. 83-86.
- [7] Hill, L., Griffith, O. W. and Flack, M., *The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation*, Phil. Trans. Roy. Soc., 1916, series B, vol. 207, p.183.
- [8] Hill, L., Vernon, H. M. and Hargood-Ash, D., *The kata-thermometer as a measure of ventilation*, Proceedings of the Royal Society B, 1922, vol. 93, pp. 198-206.
- [9] Kennelly, A. E., Wright, C. A., and van Bylevelt, T. S., *The convection of heat from small copper wires.*, Trans. AIEE, 1909, vol. 28, p. 363-397.
- [10] King, L. V., *Of the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry*, Phil. Trans. Roy. Soc, London, 1914, series A, vol. 214, p. 373-432.
- [11] Leslie, J., *An experimental inquiry into the nature and propagation of heat*, Edinburgh, J. Mowman, 1804, 562 p.
- [12] Morris, J. T., *The electrical measurement of wind velocity.*, The Electrician, 1912, pp. 1056-1059.
- [13] Phillips, J., *Contributions to anemometry – the therm-anemometer*, Report of the 19th meeting of the British Association for the Advancement of Science, London, 1850, p.28.
- [14] Phillips, J., *Ventilation of mines and collieries*, HMSO, London, 1850, 73 p.
- [15] Phillips, J., *On anemometry*, Report of the 16th meeting of the British Association for the Advancement of Science, London, 1847, p 340.
- [16] Retschy, C., *Beitrag zur herstellung und unterllung und untersuchung annaehrend geordueter luftstrome*, Der Motorwagen, 1912, vol. 15, pp. 463-468, 524-528.
- [17] Riabouchinsky, D., Bull. Inst. Aerodyn. Koutchino, 1909, vol. 2, pp. 115-120.
- [18] Russell. A., *The convection of heat from a body cooled by a stream of fluid*, Philosophical Magazine, 1910, vol. 20, issue 116, pp. 591-610.
- [19] Ser, L., *Traité de physique industrielle, production et utilization de la chaleur, vol. 1*, Paris, Masson G., 1888, pp.142-162.
- [20] Unwin, I. D., *The measurement of air flow in British coal mines: a historical review*, London, 2007, 88 p.

Conf. Dr. Ing. Ion M. CERNICA
 Facultatea de Energetică și Inginerie Electrică
 Universitatea Tehnică a Moldovei
 e-mail: ion_cernica@yahoo.com