

MERJENJE TLAKA V VAKUUMSKI TEHNIKI

Stanislav Južnič*

The measurement of pressure in vacuum technique

ABSTRACT

The article surveys the development of the measurement of pressures in three hundred years up to the middle of the 20th century. The data are given in chronological order, but on some occasions the development of each type of the manometer is described separately. Most manometers used in schools in lands inhabited by Slovenes are enumerated for each period.

POVZETEK

Opisujemo razvoj merjenja tlaka v vakuumski tehniki v tristo letih do srede 20. stoletja. Dosežki posameznih raziskovalcev so podani v časovnem vrstnem redu, ponekod pa je razvoj posameznih manometrov opisan tudi posebej. Popisali smo tudi manometre, ki so bili v posameznih obdobjih na voljo v šolah na ozemlju, naseljenem s Slovenci.

1 UVOD

Zmogljivosti vakuumskih črpalk so včasih zaostajale za zmogljivostmi manometrov, drugič pa so jih spet prehitvale. V prejšnjih številkah Vakuumista smo opisali razvoj črpalk, to pot pa opisujemo razvoj merilnikov.

2.1 Izum barometra

Najstarejši barometer je bil bržkone "črpalka", ki jo je Gasparo Berti postavil ob svoji hiši v Rimu leta 1640 in je bržkone neposredno vplival na Galilejeve učence /1/. Bertijev naprava je bila barometer na vodo, vendar je morala še počakati na pravilno razlago /2/.

Evangelisto Torricelli (1608-1647) je sledil obračanju antičnih vprašanj svojega učitelja Galileja. Namesto da bi raziskal, kako "horror vacui (strah pred praznoto)" vleče stolp Hg navzgor na zaprti strani U-cevi, je pojasnil, da ga z odprte strani potiska navzgor zračni tlak. S spremembo vprašanja je "strah pred praznoto" postopoma izgubil pomen, saj ga je nadomestil pojem (znižanega) zračnega tlaka.

Naslednji korak je bil storjen na Francoskem. 15.11.1647 je Pascal iz Pariza pisal sodnemu uslužbencu Florinu Périerju (1605-1672), možu svoje starejše sestre Gilberte. Prosil ga je, naj izmeri višino okoli 4 kg živega srebra v barometru na vrhu 1465 m visoke gore Puy-de-Dôme v bližini Pascalovega rojstnega kraja Clermont-Ferrand v Auvergne, 150 km zahodno od Lyona. Rezultat naj primerja z meritvijo ob vznožju gore. Šele 10 mesecev pozneje, 19.9.1648, je Périer s spremljevalci opravil več meritev. Za spremljevalce si je vzel ugledne meščane Clermonta, ki so potrdili uspeh poskusa: opata Boniera, kanonika Moniera, svetnika dvornega sveta Lavoille in Begonne, in zdravnika Laporte. V samostanskem vrtu ob vznožju hriba so ob 8. uri zjutraj v treh poskusih z dvema

enakima barometroma izmerili enako višino živosrebrnega stolpa, vsakič po 26 inčev (doimov) in 3,5 linije (66 cm) /3/. Nato so eno od obeh cevi s Hg nesli na vrh z relativno višino 500 toisov /4/. Tam so izmerili za 3 inče in poldrugo linijo manj (8 cm). Poskus so ponovili še petkrat na različnih krajih in v različnih razmerah: v zavetju in na odprtem, pri lepem vremenu, v dežju in v megli. Rezultat je bil vedno enak: 23 doimov in 2 linije (58 cm). Nazaj grede so na nižjem mestu »nekoliko nad samostanskimi vrtovi« namerili 25 doimov (62,5 cm).

Ko so se vrnili v samostanski vrt, jim je oče Chastain poročal, da je Hg v tam shranjeni U-cevi vseskozi ostalo na enaki višini, čeravno se je vreme menjalo z vetrom, nekajkratnim dežjem in meglo. Périer je nato še nekajkrat izmeril višino Hg v cevi, ki jo je imel s sabo na vrhu, in vsakokrat nameril 26 doimov in 3,5 linije (66 cm). Poskusu v vrtu je prisostvoval tudi opat de la Mare, ki je naslednji dan predložil meritev na vrhu zvonika cerkve Notre-Dame-de-Clermont, ki je bil postavljen 27 toisov (53 m) nad vrtom. Tam se je stolp Hg znižal za 2,5 linije (5,6 mm).

O poskusu je Périer poročal Pascalu 22.9.1648 in predložil meritve stolpa Hg na vsakih 100 toisov (195 m) višine. Pascal je poskuse ponovil na stolpu Saint-Jacques z višino okoli 25 toisov (49 m). Razlika med površinama Hg je bila več kot dve liniji (4,5 mm). Na vrhu stopnišča z okoli 90 stopnicami je nameril razliko pol linije /5/.

Konec istega leta je Pascal svoje in svakovo pismo objavil skupaj z rezultati meritev z barometrom v različnih francoskih krajih: v Parizu, v domači pokrajini Auvergne in v mestu Dieppe severozahodno od Pariza. Skupno težo zraka v atmosferi je ocenil na $8,5 \cdot 10^9$ francoskih funtov /6/.

Aprila 1652 je v pariškem salonu sorodnice Richelieu demonstriral delovanje svojega aritmetičnega računala in razlagal svojo teorijo vakuuma. Pascalove raziskave so pozneje prerasle v hidrostatično, o kateri je leta 1653 napisal *Traité de la Pesanteur de la Masse de l'Air in Traité de l'Equilibre des Liqueurs*, ki sta bili objavljena šele posmrtno leta 1663. V prvi razpravi je dokazoval, da vreme vpliva na zračni tlak /7/.

S tem je Pascal zaključil svoja fizikalna raziskovanja. Njegovo delo so nadaljevali drugi. Guericke je ponovil Périerove poskuse in leta 1660 za dve uri vnaprej napovedal nevihto v Magdeburgu /8/. Konec 17. stoletja so barometre za prodajo že proizvajali v Angliji, v naslednjem stoletju pa tudi drugod v Evropi.

2.2 Merjenje tlaka v izčrpani posodi in prvi tekočinski manometri

Razvoj prvih merjenj tlaka je manj dokumentiran od razvoja barometra. Kot pred desetletjem Pascal je tudi Boyle v Oxfordu svoje poskuse z vakuumom opravil kot del širšega raziskovanja lastnosti tekočin. Pascalov barometrijski poskus je ponovil v laboratoriju. Uporabljal je po vrstji tri črpalke, med katerima je prvi dve sestavil Hooke. Že Grotius je skušal izboljšati Guerickevo

* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.

črpalko. Vendar je bila njegova naprava po Hookovem mnenju prevelika za koristno uporabo. Zato je sestavil svoj model, imenovan »Pneumatic Engine or Air Pump« /9/. Poskuse, opravljene v letu 1658 in 1659 s to prvo Hookovo batno črpalko z živosrebrnim manometrom v zvonu, je Boyle opisal leta 1660 /10/. 2.1.1661 je družba, ki se je poldrugo leto pozneje preimenovala v RS, prosila Boyla naj prinese svojo »Pneumatic Engine« in pokaže poskuse z njo /11/.

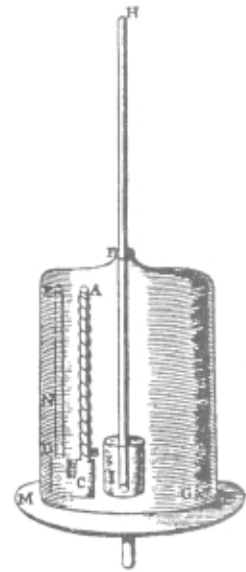
Robert Boyle (1627-1691) je bil rojen na Irskem kot sedmi sin grofa (Earl of Cork). Šolal se je privatno in potoval po Evropi do leta 1645. Od leta 1654 je živel v Oxfordu, kjer je v času kuge leta 1664 vodil RS, ki jo je pred tem pomagal ustanoviti, in izdajal Phil.Trans. Leta 1768 se je preselil v London in aktivno sodeloval v RS. Leta 1680 je bil izbran za predsednika RS, vendar položaja ni sprejel. Poleg kemije in fizike se je ukvarjal tudi s teologijo. Robert Hooke (1635-1703) je bil rojen v družini duhovnika na otoku Wight. Šolal se je v Westminsteru in na Oxfordski univerzi, kjer se je tako zanj kot za njegovega sorodnika Christopherja Wrena zavzel dr. John Wilkins, ki je bil skupaj z Oldenburgom tudi prvi tajnik RS. Wilkins je Hooke tudi priporočil Boyleu za asistenta. Od 12.11.1662 je bil Hooke skrbnik poskusov (curator of experiments) pri RS in s tem prvi profesionalni znanstvenik v Britaniji. Leta 1664 je postal profesor geometrije na univerzi Gresham, kjer je stanoval vse do smrti. 11.1.1665 je bil izbran za dosmrtnega skrbnika poskusov pri RS, kjer je bil po Oldenburgovi smrti med letoma 1677-1683 tudi tajnik in urednik Phil.Trans. Hooke je prispeval k razvoju številnih znanosti: fizike, horologije, fiziologije, geologije, astronomije, meteorologije in arhitekture /12/.

Boyle in Hooke sta imela barometer za odličen merilnik tlaka. Gotovo sta ga uporabljala že pred prvo objavo pnevmatskih poskusov leta 1660, ki je vsebovala meritve tlakov do 7,9 mbar /13/ s Hg-manometrom. V istem času je Guericke ocenil tlak pri Torricelijevem poskusu na 13 mbar.

Leta 1665 je Boyle objavil skico "živosrebrnega merilnika". Različne različice tega izuma so bile dve stoletji edini manometri, vse do McLeodovih izboljšav /14/. Tako se je začelo več stoletij plodno tekmovanje med črpalkami in manometri glede najnižjih tlakov, ki so jih še sposobni izčrpati oziroma izmeriti.

Leta 1662 je Boyle v drugi izdaji "New Experiments Physico-mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects, Defensio contra Franciscum Linus" objavil meritve tlakov do 42 mbar.

Januarja 1671 je Hooke poročal RS, da je sestavil dovolj veliko posodo, da lahko v njej sedi človek, in jo je mogoče povezati z zračno črpalko. Želel je raziskati vpliv znižanega tlaka na človeški organizem. 23.2.1671 je poročal RS, da je četrto ure sedel v izčrpani posodi in ni občutil posebnih težav. Člani RS so mu naročili, naj poskuse ponovi z živalmi in z gorečo svečo. Poskuse je ponovil pri tlaku 0,1 bar, vendar ni občutil težav, razen bolečine v ušesih. 20.5.1671 je poskuse ponovil tako, da je z mehonom izčrpaval zrak in tlak meril z manometrom. Sveča je ugasnila veliko prej, preden je občutil neprijetnosti v ušesih. Srčni utrip se mu med poskusom ni povečal /15/.



Slika 1: Boylev Hg-manometer "za ugotavljanje stopnje razredčenosti ali stisnjenosti zraka" /14/

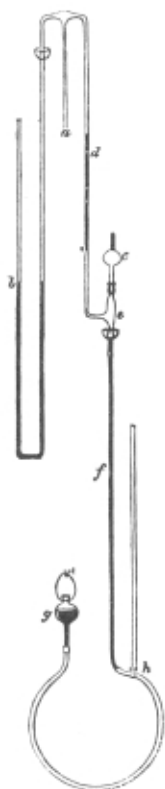
Tretjo črpalko je Boyle sestavil Papin, ki je bil njegov asistent med letoma 1675-1680. Izboljšal jo je tako, da je vakuum napolnil z "umetnim zrakom", ogljikovim dioksidom, pridobljenim z namakanjem koral v kislini. To črpalko z dvema cilindroma, ki je dosegala 1/100 bara, je Boyle opisal leta 1682 v New Experiments Physico-Mechanical, Second Continuation /16/.

Stopnjevanju zmogljivosti črpalk in manometrov so v naslednjih stoletjih botrovala tudi številne izboljšave. Hookov barometer na kolo, ki je bil posebej prirejen za vremenske spremembe, je Henri Victor Regnault (1810-1878), profesor fizike in kemije v Parizu, priredil za merjenje tlakov, manjših od atmosferskega. Naprave se je prijelo ime "diferencialni barometer" /17/.

3 Druga polovica 19. stoletja in McLeodov kompresijski manometer

Sredi 19. stoletja so s Hg-manometri lahko merili le tlake malo pod 1 mbar. Izboljšane črpalke so zahtevale boljši merilnik, ki ga je izumil Anglež Herbert G. McLeod (1841-1923).

McLeod je kot asistent leta 1863/64 spremljal profesorja Augusta Wilhelma von Hofmanna (1818-1892), ki se je iz Anglije vrnil v Bonn. Tam sta raziskovala Geissler in Plücker, tisti čas najpomembnejša raziskovalca katodnih elektronov. Po Hofmannovem imenovanju za profesorja kemije v Berlinu se je McLeod kot priznan raziskovalec razelektritev v vakuumu vrnil v Anglijo na mesto asistenta na Royal College of Chemistry. Od leta 1868 je bil tudi svetovalec oxfordskega diplomanta Lorda Roberta Cecila tretjega markiza Salisbury (1830-1903) pri njegovih poskusih v "Hatfield House", ki jo je tedaj podedoval skupaj z naslovom markiza. Salisbury je bil izbran za FRS leta 1869 in je še isto zimo južno krilo hiše osvetlil z obločnicami. Prav tedaj je McLeod objavil razpravo o črpalki, ki jo je Sprengel izumil v Londonu 4 leta prej. Leta 1873 je Salisbury, ki je bil leta 1866 in 1874 sekretar za Indijo, z McLeodovo pomočjo objavil v Phil. Mag. raziskave



Slika 2: McLeodov manometer (Madey (ur.), n.d., 1984, str. 102)

razelektritev v bližini Hg-termometrov. McLeod je pozneje v zapisu ob Salisburyjevi smrti povzel poročilo Kaysera iz Bonna o Salisburyjevi razpravi kot prvega dokazu, da lahko plin pri nizki temperaturi oddaja jasen spekter vidne svetlobe. McLeod je leta 1878 in 1879 raziskoval dinamo in električno žarnico ter pomagal tedanjemu zunanjemu ministru Salisburyju osvetliti notranjosti hiše z energijo iz lastne hidrocentrale. Njuno sodelovanje, kot primer visokega položaja znanosti v tedanji angleški družbi, je prenehalo šele med leti 1885-1902, ko je bil Salisbury s kratkimi presledki ministrski predsednik /18/.

Leta 1874 je McLeod stiskal plin pod stolpom Hg do merljivega višjega tlaka, iz katerega je potem po Boylovem zakonu izračunal prvotni tlak do milijoninke mbar. Merilnik je povezal s Sprenglovo črpalko, vakuumsko posodo in sifonskim barometrom, ki je imel okoli 5 mm široko cev. Posoda merilnika je imela prostornino okoli 48 cm³ in se je pri vrhu zožila v cev z merilom. Spodaj je bila povezana z okoli 800 mm dolgo cevjo,

ki je bila s spodnjim koncem povezana z zbiralnikom Hg. Dotok iz zbiralnika je uravnaval s pipo in opazoval premikanje površine Hg skozi teleskop. McLeodov manometer se še danes uporablja za meritve od 1 do 10⁻⁶ mbar.

William de la Rue in Hugo W. Muller sta leta 1878 v pariških Annalen de Chemie et de Physique objavila razpravo o kombinaciji Geisslerjeve črpalke s Sprenglovo in o McLeodovem vakuumskem merilniku. Prevod njune razprave je bral tudi Edison in konec leta 1879 nabavil McLeodov manometer za svoj laboratorij v Menlo parku /19/. Gaede je McLeodov manometer razvil v obliko z vrtljivo osjo, ki se uporablja še danes /20/.

3.1 Manometri v deželah, poseljenih s Slovenci pred 20. stoletjem

Med 51 napravami, ki jih je 17.9.1755 profesor matematike Erberg popisal na jezuitskem kolegiju v Ljubljani, je bil na 29. mestu zapisan "Barometer za meteorološka opazovanja" /21/. Bržkone so ga uporabljali še leta 1811, ko je Janez Krstnik Kersnik (1783-1850) v kabinetu za kemijo Centralnih šol v Ljubljani popisal dva aerometra. Med posodami iz stekla in kristala je popisal štiri steklene valje za aerometer. V oddelku "hidrostatika" kabineta za fiziko in matematiko je popisal dva barometra, ki ju je znova popisal leta 1847 pod številkami 109-111. Leta 1847 je popisal še barometrične cevi, izdelane v Sagarjevi tovarni stekla med letoma 1809-1845, in pred letom 1811 nabavljene barometre različnih vrst: na nateg z noniusom, potovalni z noniusom in Vehtovo barometrično cev. Imel je tudi dva barometra za vaje, ki ju je izdelal Fanzoy med letoma 1809-1845.

Tabela 1: Naprave za merjenje tlaka in nadtlaka po popisih Liceja in Gimnazije v Ljubljani iz leta 1847 ali 1866

Naziv naprave	Leto nabave	Leto popisa, evidenčna številka	Leto odpisa	Izdelovalec	Cena v fl:kr
Barometri: - potovalni z noniusom - potovalni po de Saussurju (1740-1799) - kovinski Burdonov na nateg z noniusom - na nateg s termometrom, noniusom - barometrična cev - dva barometra za vaje	1809-45	1847(110),1866		Hanaczik	28:35
	1809-45	1847, 1866 1865	1866		12:60 40: 0
	pred 1809	1847(109)			
	1861				36: 0
	1809-45 1809-45	1847(111),1866 1847(113)	pred 1867	Veht Fanzoy	5:77
Aerometri: - atmometer (železna pločevina) - Nicolsonov iz medenine - Meisnerjev, s stekleno cevjo, stojalom - Mohsov iz medenine - Beaumov iz medenine - Beaumov iz stekla; lesa ter iz Ag in Cu	1809-45	1847(355)	pred 1866	Freyberger	
	1809-45	1847,1866		Riebler	1:57
	1809-45	1847,1866		Hanaczik	42: 0
	1809-45	1847,1866		Hanaczik	2:10
	1809-45	1847,1866		Hanaczik	1: 5
	1809-45	1847	pred 1866	Hanaczik	
Recipienti: 2 zračno tesnjena; 3 navadna steklena	1809-45	1847(100)		Samassa	
Barometrične cevi	1853				
Barometer z receptorjem	1853				
Bleichov barometer	1858				

Tabela 2: Naprave za merjenje tlaka po popisih gimnazij v Kopru, Celovcu in Ljubljani v drugi polovici 19. stoletja.

Naziv naprave	Leto nabave	Inventarna številka	Popisan v izveštjih gimnazije:
navadni barometer s skalo	1852		Celovec
Fortinov barometer	1853		Celovec
barometrične cevi	1853		Ljubljana
barometer z receptorjem	1853		Ljubljana
Bleichov barometer	1858		Ljubljana
cev z Hg	pred 1858	8	Inventar gimnazije Koper
barometer s skalo in termometrom	1861		Ljubljana
Kapellejev barometer v posodi	1862		Ljubljana
aneroidni barometer	1863	143	Koper, tudi inventar
barometer Williama Nicholsona (1753-1815)	1864	159	Inventar gimnazije Koper
Bourdonov kovinski barometer	1865		Ljubljana
aneroidni barometer	1870		Celovec
naprava za prikaz Torricellijevega zakona	1871	278	Koper, tudi inventar
aneroidni barometer	1872		Celovec
Fortinov in Bourdonov barometer, manometer	1875		Koper
aneroidni barometer s termometrom	1893		Koper
barometer	1895		Koper
model aneroida, gazometer	1901		Koper

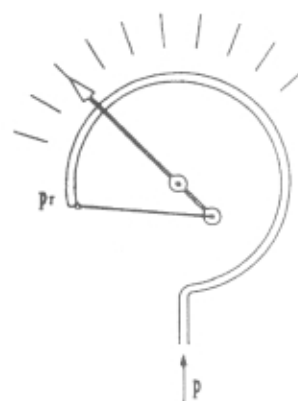
V dobi hitrega razvoja raziskovanja vakuuma po izumu katodne elektronke v drugi polovici 19. stoletja so tudi šole na Slovenskem dopolnjevale svoje fizikalne kabinete s sodobnejšimi manometri. 22.9.1870 so v Ljubljani na prvi samostojni razstavi učnih pripomočkov kazali tudi "fizikalne aparate v podobah", ki so bile last "c.kr. učiteljske izobraževalnice" (učiteljsišča). Med drugim so razstavili tudi slike "plinometra in plinohrana" /22/.

Tabela 1 kaže naprave za merjenje tlaka in nadtlaka po popisih Liceja in Gimnazije v Ljubljani med Kersnikovim popisom iz leta 1847 in Mitteisovim popisom fizikalnega kabineta gimnazije v Ljubljani leta 1866 /23/.

Tudi v šolah zunaj Ljubljane so nakupovali številne manometre. Tako so Bourdonov kovinski barometer kupili na gimnaziji v Kopru leta 1875, deset let za gimnazijo v Ljubljani. Z njim so merili upogib, ki jo fluid povzroča na elastičnem elementu.

Tabela 2 kaže naprave za merjenje tlaka po inventarjih in popisih gimnazij v Kopru, Celovcu in Ljubljani v drugi polovici 19. stoletja.

Tudi goriški gimnazijski profesor Anton Šantel je leta 1883 pri sestavi lastne Hg-črpalke uporabljal manometer, s katerim je ocenjeval, ali je črpanje zraka iz recipientov zadosti hitro za praktično uporabo naprave. Objavil je, da je merilnik že po 1 minuti pokazal "gostoto nič", ko ni bilo več mogoče videti razlike gladin živega srebra v krakih. Ni pa zapisal tipa uporabljenega manometra.



Slika 3: Bourdonov manometer na (italijanski) gimnaziji v Kopru, nabavljen leta 1875

4 Merilniki tlaka konec 19. stoletja in v 20. stoletju

Z McLeodovim manometrom so tlak določali posredno po meritvi višjega tlaka. Poznejši raziskovalci so idejo posrednega merjenja še stopnjevali. Izkazalo se je, da tlak plina lahko določimo tudi posredno iz povsem drugačnih lastnosti plina: toplotne prevodnosti, viskoznosti, radiometriškega pojava in razelektritev. Prva dva našeta pojava sta po Maxwellovi kinetični teoriji sicer neodvisna od tlaka, vendar le za povprečne proste poti

molekul, veliko manjše od posode, kar pri vakuumu ne velja /24/. Viskoznost, radiometriške in električne pojave je za posredno merjenje tlaka uporabljal že Crookes sredi poletja 1876 vzporedno z McLeodovim manometrom /25/. Kljub temu so uporabne manometre razvili šele dve desetletji pozneje.

4.1 Merilniki tlaka na viskoznost

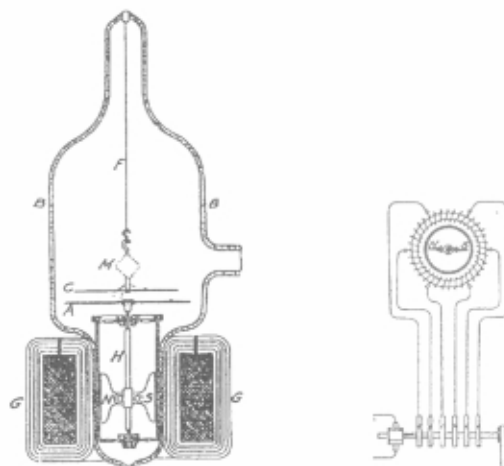
Sutherland je leta 1896 skušal obnoviti zanimanje za pojave v radiometru. Po njem imenujemo enačbo, ki opisuje spreminjanje viskoznosti s temperaturo. Leta 1897 je opisal določanje tlaka z merjenjem viskoznosti plina. Njegovo idejo je uporabil Hogg leta 1906, sedem let pozneje pa Langmuir, ki je istega leta objavil (Langmuirjev) zakon termoionske emisije. Uporabljal je vlakno iz kremenca, ki je nihalo v plinu. Pojemanje amplitude nihanja je merilo tlak plina. Langmuirjev opis je sodelavec Saul Dushman (1883-1954) leta 1915 uporabil v merilniku z vrtljivim valjem za meritve do 10^{-7} mbar /26/. Leta 1916 je Langmuir opisal svojo inačico manometra in visokovakuumsko črpalko.

Saul Dushman (1883-1954) je bil rojen v judovski družini v Rostovu v Rusiji. Leta 1892 se je družina odselila v Kanado. Študiral je v Torontu, kjer je leta 1912 tudi doktoriral iz fizikalne kemije. Nato je odšel k GE v Schenectady, kjer je vseskozi tesno sodeloval z Langmuirjem. Leta 1917 je postal državljani ZDA. Med letoma 1923-1925 je vodil raziskovanja v prvi GE tovarni žarnic "Edison Lamp Works" v Harrisonu, New Jersey. Od leta 1928 do upokojitve 1948 je bil pomočnik direktorja raziskovalnega laboratorija GE. Leta 1949 je izdal knjigo o znanstvenih temeljih vakuumске tehnike, ki je postala nepogrešljiva na svojem področju /27/.

J.W. Beams je v petdesetih letih povečal zanimanje za manometre na viskoznost. Pokazal je, da lahko tlak v vakuumu določimo z merjenjem frekvence vrtenja lebdeče jeklene kroglice v magnetnem polju. Frekvenca je bila okoli 1 MHz. Tako je lahko v principu meril do 10^{-9} mbar. Pozneje, leta 1972, je napravo izpopolnil J.K. Fremery in se danes uporablja za meritve med 10^{-2} in 10^{-7} mbar /28/. Vendar manometri na viskoznost niso bili zelo uporabljani pred izboljšavami W. Steckelmacherja leta 1973.



Slika 4: Saul Dushman (1883-1954)



Slika 5: Dushmanov merilnik z vrtljivim valjem (Redhead, *The birth of electronics, J. Vac. Sci. Technol.* 16 (3) (May/Jun 1998) str. 1399)

4.2 Uporaba radiometriškega pojava za merjenje tlaka

Martin Knudsen (1871-1949) je marca 1910 na univerzi v Kopenhagenu sestavil manometer na radiometriški pojav, ki v njegovem času sicer še ni bil povsem pojasnjen, so pa v grobem poznali odvisnost radiometriškega pojava od tlaka. Knudsen je meril celotni tlak v prostoru, ne pa parcialnih tlakov kot McLeod, ki ni mogel npr. meriti tlaka Hg-pare. Zato je Knudsen svojo napravo imenoval "absolutni manometer" po podobnosti z "absolutnim elektrometrom", ki ga je leta 1855 opisal William Thomson (1824-1907), poznejši Lord Kelvin.

Knudsen je meril navor zaradi prenosa gibalne količine od segrelih molekul plina na eni strani do hladnejših molekul na drugi strani plošč. Vzporedno k segreti kovinski plošči je postavil gibljivo kovinsko ploščo kot ročico torzijske tehtnice za merjenje odbojne sile. Plošči sta bili zelo tanki, debeline $2,5 \cdot 10^{-4}$ cm oziroma 0,01 cm. Zato je odsev premika plošče na majhnem zrcalu opazoval skozi teleskop.

V Knudsenovih poskusih je bila razdalja med ploščama veliko manjša od povprečne proste poti molekul. Med izčrpavanjem plina odbojna sila med ploščama narašča obratno sorazmerno s tlakom do neke najvišje vrednosti, nato pa se manjša sorazmerno s tlakom. Podobne ugotovitve so objavili že Crookes in drugi leta 1875 in 1876. Vendar je Knudsen prvi izpeljal enostavno enačbo za sorazmernost odbojne sile in tlaka pri znanem korenu razmerja temperatur. Tako je lahko odčital velikost tlaka iz meritve odbojne sile med ploščama. Sestavil je več manometrov. Prvi je imel Cu-valj polmera 1,63 cm, najbolj priročni pa cev iz stekla debeline 0,41, širine 1,4 cm in višine 2,95 cm. Temperature je meril z Hg-termometrom. Črpal je z Gaedeovo Hg-črpalko do tlaka $4 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ mbar H_2 , O_2 ali CO_2 , ki ga je obenem meril še z McLeodovim manometrom.

Poljak Smoluchowski (1872-1917), profesor na univerzi v Lvovu, je nemudoma objavil teorijo toka razredčenega plina in novembra 1910 opisal delovanje Knudsenovega merilnika z Maxwellovo kinetično teorijo.

Medtem ko je pohvalil Knudsenove meritve, je kritiziral njegovo teorijo, po kateri v ozkem pasu nad robom večji tlak zaradi višjih hitrosti molekul prevlada nad zmanjšanjem tlaka zaradi manjše proste poti ob oviri in tako skupni tlak naraste. Spor je nadaljeval starejšo polemiko Maxwella in Oskarja Emila Meyerja (1834-1909) z univerze v Breslau proti Irskima raziskovalcema Stoneyu iz Galwaya in Fitzgeraldu iz Dublina. Fitzgerald in Stoney sta trdila, da je odboj med loputama radiometra površinski pojav. Maxwell pa je pravilno domneval, podobno kot pozneje Knudsen, da "do tlaka zaradi neenakosti temperatur pride le blizu robov plošč, kjer drugi odvod temperature po prostornini ni enak nič" /29/.

Poljski vitez **Marian (Maryan) von Smolan Smoluchowski** (1872-1917) je bil rojen v okolici Dunaja, kjer je študiral pri Stefanu in leta 1894 promoviral. Nekaj časa se je izpopolnjeval v laboratorijih Gabriela Lippmanna v Parizu, Lorda Kelvina v Glasgowu in Emila Gabriela Warburga (1846-1931) v Berlinu. Poučeval je na avstrijskih univerzah. Med letoma 1898-1913 je bil profesor na univerzi v Lvovu, nato pa v Krakovu, na koncu kot rektor. Leta 1898 je s povprečno prosto potjo v kinetični teoriji molekul pojasnil preskok temperature (in hitrosti) med površino plošče in plinom. Pojav sta odkrila August Adolf Kundt (1839-1894) in Warburg pri merjenju razredčenega plina postavljenega med plošči različnih temperatur na univerzi v Strassbourgu leta 1875 /31/. V letih 1905 in 1906 je Smoluchowski razvil Boltzmannov opis Brownovega gibanja sočasno in neodvisno od Einsteina v Bernu. Leta 1907 in 1908 je s statistično teorijo pojasnil opalescenco. Bil je med najpomembnejšimi zagovorniki Boltzmannovega opisa drugega zakona termodinamike. Umril je v Krakovu med prvo svetovno vojno za epidemijo kolike.

Smoluchowski je zapisal, da Knudsenov manometer ne daje absolutnih rezultatov, saj naj bi bila meritve pri majhnih temperaturnih razlikah med ploščama odvisna tudi od materiala plošče /30/. Vendar je bil Knudsenov referat o "absolutnem radiometru" s silo sorazmerno tlaku sprejet že na 1. Solvayskem kongresu med 30.10. in 3.11.1911 v Bruslju. Tam sta z avstrijskih univerz sodelovala le Einstein iz Prage in Fritz Hasenöhrl (1854-1915) z Dunaja, ne pa tudi Smoluchowski.

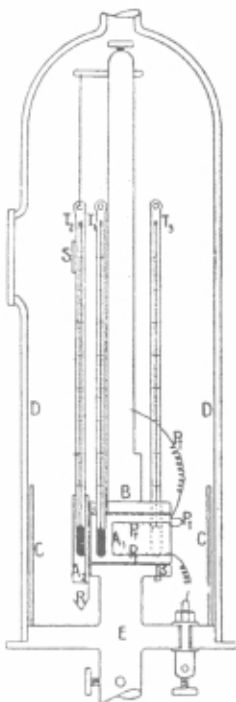
Knudsenov manometer je leta 1934 izboljšal tudi Gaede, ki ga je imel najraje med vsemi merilniki /32/. Danes se ne uporablja več, razen v posebnih okoliščinah /33/.

4.3 Toplotna prevodnost pri merjenju tlaka

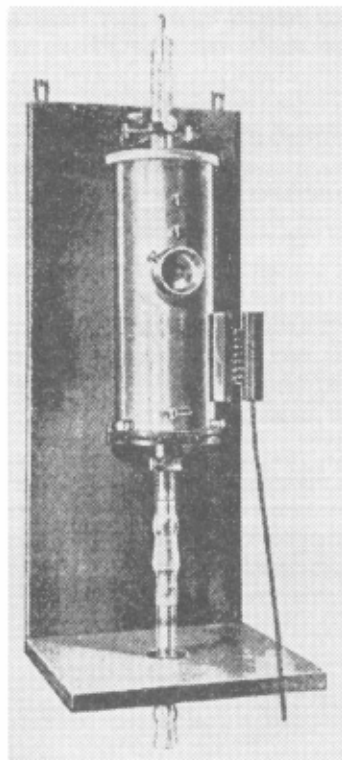
Spor glede absolutne veljavnosti meritev Knudsenovega manometra sta Knudsen in Smoluchowski nadaljevala in v plodni debati v naslednjem letu 1911 analizirala še delovanje manometra na toplotno prevodnost, ki ga danes imenujemo po Piraniju. Nista omenjala Stefanovih meritev z diatermometrom, temveč predvsem meritve toplotne prevodnosti, ki sta jih opravila Kundt in Warburg leta 1875. Ugotovila sta, da do okoli 1 mbar toplotna prevodnost ni odvisna od tlaka, kar je bilo v skladu z Maxwelllovo napovedjo. Knudsen pa je raziskoval nižje tlake, pri katerih je povprečna prosta pot molekul plina veliko večja od velikosti posode /34/.

Pri merjenju plina med ploščama različne temperature sta August Adolf Kundt (1839-1894) in Warburg odkrila temperaturni skok med površino plošče in plinom, ki ga ni bilo mogoče pojasniti drugače kot s kinetično teorijo molekul, ki jo je objavil Smoluchowski leta 1898 /35/.

Piranijevemu izumu so botrovale nerodnosti pri delu z McLeodovimi merilniki pri Siemens & Halske v Berlinu. Tam je Pirani pri raziskovanju Ta-žarnic uporabljal okoli 50 mcLeodov. Vsak je vseboval okoli 2 kg Hg, zato je pogosto prihajalo do razbijanja in je bilo strupeno živo srebro razlito vsepovsod po tleh laboratorija. V stiski se je redoljubni Pirani že junija 1906 odločil za razvoj



Slika 6: Eden izmed Knudsenovih manometrov na radiometriški pojav iz leta 1910



Slika 7: Gaedov molvakuometer



Slika 8: Marcello Pirani (1880-1968)

naprave za posredno določanje tlaka v vakuumskih posodah z merjenjem toplotne prevodnosti plina. Sprememba električne upornosti segretega vodnika v vakuumu je merila toploto, izgubljeno s prevajanjem skozi plin. Tako je dobil mero za tlak. Nekaj mesecev pred Piranijem sta W. Voegelé v Hamburgu in pozneje Rohn razvila podobne manometre z uporabo termična ali termistorja /36/, ki so marsikje nadomestili McLeoda /37/.

Marcello Pirani (1880-1968) je bil rojen v Berlinu staršem italijanskega rodu. Po študiju na tehnični univerzi v Berlinu se je tam pridružil Nemškemu fizikalnemu društvu, ki so ga vodili Max Planck in drugi. Po doktoratu se je oktobra 1904 zaposlil pri tovarni žarnic Siemens&Halske v Berlinu. Od leta 1918 je bil tudi profesor na Tehnični univerzi v Berlinu in po ustanovitvi Osrama leta 1919 vodja njegovih raziskovalnih laboratorijev. Okoli leta 1930 je namesto žarnic začel uporabljati razelektritve v razredčenih plinih za razsvetljavo. Leta 1930 je že proizvajal svetilke z 70% izkoristkom, naslednje leto pa je začel prodajo svetilk z Na-paro in nato fluorescenčnih svetilk. Leta 1936 je Pirani zaradi nasprotovanja nacističnim oblastem odšel v Anglijo h General Electric Co. v Wembley, kjer so že leta 1923 raziskovali njegov manometer. Leta 1953 se je vrnil v München in dve leti pozneje k Osramu v Berlin.

V tridesetih letih so razvili še drugačne merilnike tlaka preko toplotne prevodnosti v plinu. Nekateri so uporabljali bimetalni termometer, drugi pa so merili hitrost izparevanja v Dewarjevi posodi /38/.

4.4 Mehanski manometer

Leta 1929 sta Američana A.R. Olsen in L.L. Hurst opisala manometer na kapacitanco, s katerim sta lahko merila tlake med 10 in 10^{-4} mbar. S tem sta kronala stoletje razvoja neposrednih merilnikov tlaka, s katerimi je Boyle najprej opazoval stolp kapljevine, McLeod pa je pozneje meril tlake in prostornine pri povišanem tlaku. Olsenovemu in Hurstovemu podobne mehanske manometre sta sestavila že Bourdon in Lorenz leta 1917, ki sta z upogibom cevi merila tlake od 1 bar do 30 mbar. Z mehanskimi manometri na membrano so merili tlake tudi do 0,1 mbar /39/.

4.5 Ionizacijski merilniki na vročo katodo

Merilniki nizkih tlakov so pred prvo svetovno vojno zaostajali za dosežki črpalk. Uporabni manometri so bili le McLeodov, Knudsenov in Langmuir-Dushmanov z vrtljivim valjem /40/. Zadnja dva sta bila zapletena, počasna in nista merila dovolj nizkih tlakov. Zato so iskali boljše rešitve. Šele izum ionizacijskega merilnika na vročo katodo je omogočil razvoj sodobnih vakuumskih manometrov. O. von Baeyer je leta 1909 na univerzi v Berlinu z nadaljevanjem Lenardovega raziskovanja počasnih elektronov iz segrete Wehneltove oksidne katode pokazal, da je triodo mogoče uporabiti kot manometer v vakuumu. Za izumitelja ionizacijskega merilnika na vročo katodo imamo O.E. Buckleya, ki je leta 1916 pri Ameriški telefonski in telegrafski družbi merilni podtlak s pogostostjo ionizacij na vroči triodi. Tri Pt-elektrode, zataljene v 6 cm dolgo stekleno elektronko, je uporabljajal za katodo, anodo in zbiralec pozitivnih ionov. V popolnem vakuumu elektroni letijo od katode k anodi, tako da tok ne teče na

zbiralnik. V plinu pa elektroni s trki ustvarjajo pozitivne ione. Ti letijo proti zbiralniku, ki je negativen glede na katodo. Buckley je meril od tlaka odvisno razmerje med kolektorskim in anodnim tokom na območju med 10^{-2} mbar in $5 \cdot 10^{-4}$ mbar. Rezultate so potrdile vzporedne meritve z McLeodovim in Knudsenovim manometrom. Podobno razmerje kot v zraku je izmeril tudi v H_2 in Hg. Ker v triodi ni bilo premičnih delov, vibracije niso motile meritev. Ionizacijski merilnik je bil tudi mnogo cenejši, hitrejši in enostavnejši od svojih predhodnikov, saj je tlak določala meritev na galvanometru. Z ionizacijskim merilnikom je bilo mogoče meriti tudi tlak par kovin, nasprotno od starejših merilnikov, možne pa so bile tudi miniaturne izvedbe.

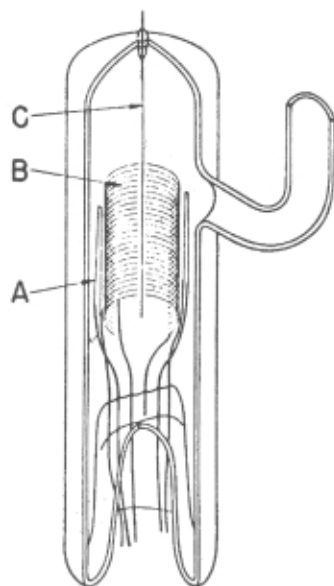
Buckleyev merilnik se je uporabljal do srede 20. stoletja za meritve tlakov do 10^{-8} mbar in manj, ki jih je dosegel npr. P.A. Anderson v Washingtonu leta 1935 pri merjenju kontaktne napetosti med Ba in W po Kelvinovi metodi /41/. Pri nižjih tlakih so meritev motili mehki rentgenski žarki, ki nastajajo zaradi obstreljevanja anode z elektroni in povzročajo stalni tlak okoli 10^{-8} mbar /42/. Zanje so vedeli proizvajalci katodnih elektronov, ne pa njim sorodni raziskovalci vakuumске tehnologije pred letom 1947. Neodvisnost preostalega toka od tlaka sta sicer opisala že E.K. Jaycox in H.W. Weinhard leta 1931 ter Wayne B. Nottingham z MIT 6 let pozneje, vendar njihovih meritev niso uporabili za novo obliko ionizacijskega manometra. Zaradi neodvisnosti preostalega toka od tlaka pod 10^{-8} mbar tam ni veljala linearna odvisnost toka ionov od tlaka pri dani emisiji elektronov, ki jo je Dushman izmeril med 10^{-2} in $4 \cdot 10^{-5}$ mbar /43/.

Problem je bil jasno zastavljen v Nottinghamovem referatu na 7. konferenci fizikalne elektronike v ZDA leta 1947. Ni bilo treba več dolgo čakati na rešitev, ki jo je Denis Alpert iz Westinghousovih raziskovalnih laboratorijev predstavil leta 1950 na MIT. Namesto valjaste plošče v osi črpalke je uporabil ionski zbiralnik iz tankega vodnika. Tako je močno znižal pretok mehkih rentgenskih žarkov iz mrežice. Z zmanjšanjem površine ionskega zbiralnika je lahko meril do 10^{-11} mbar, kolikor je še meril tlak zaradi preostalega toka zaradi rentgenskih žarkov na tanki vodnik.

Paul Aveling Redhead je bil rojen v Angliji leta 1924 in je dvajsetleten končal študij fizike v Cambridgeu. Do leta 1947 je raziskoval mikrovalovne katodne elektronke za Britansko ministrstvo za mornarico, nato pa je odšel k Nacionalnemu raziskovalnemu svetu v Kanado.

Ena od pomanjkljivosti ionizacijskih manometrov je bila, da so na kolektorju lovili ione plina in tako nižali tlak, ki naj bi ga merili. Alpert je problem izrabil za izboljšavo črpalke. Obenem je predložil uporabo povsem kovinskih zaklopk za izolacijo sistema od črpalke, uporabljenih pri višjih tlakih, in uporabo ionizacijskega merilnika za glavno črpalko pri nizkih tlakih. S tem je dotlej samostojen razvoj črpalke in merilnikov po treh stoletjih združil v enotno napravo.

Alpertovo odkritje je pokazalo, da so že leta 1931 dosegali 10^{-9} mbar, čeprav tako nizkega tlaka niso znali izmeriti /44/. Alpertove ideje so razvijali v črpalkah s pastmi, ki so molekule plina lovile na površine znotraj sistema, ne da bi jih odstranjevali. Izboljšave so kmalu znižale mejo vakuumu od 10^{-8} na 10^{-11} mbar, npr. v

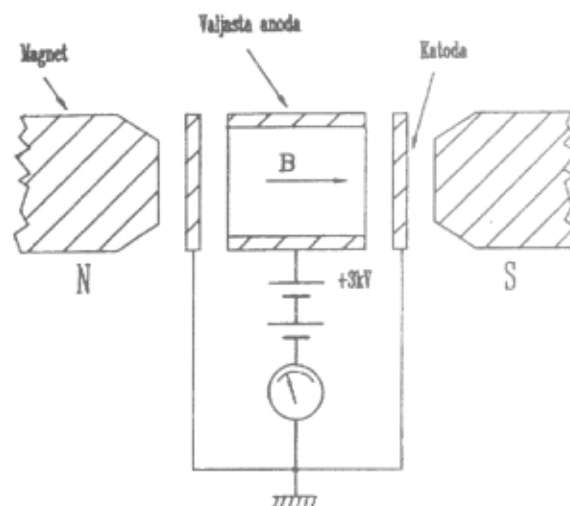


Slika 9: Prvotna oblika Bayard-Alpertove ionizacijske črpalke z vlaknom A, mrežico B in kolektorjem C (Redhead, n.d., 1984, str. 34)

Redheadovem moduliranem merilniku iz leta 1960 in "ekstraktorju" iz leta 1966.

4.6 Ionizacijski merilniki na hladno katodo

Napravo je izumil F.M. Penning leta 1937 pri podjetju Philips. V medsebojno pravokotnem električnem in magnetnem polju je dobil razelektritev, imenovano po Angležu Johnu Edwardu Townsendu (1868-1957), katere tok je bil pogosto nelinearna funkcija tlaka. Penningov manometer je meril do 10^{-6} mbar, izboljšave po 2. svetovni vojni pa delujejo do 10^{-12} mbar /45/. Enostavne merilne naprave te vrste so veliko uporabljali, saj so nasprotno od McLeoda hitro dajale nepre-



Slika 10: Shema Penningovega ionizacijskega merilnika s hladno katodo

kinjene rezultate, dobro vidne tudi z razdalje. Zaradi nelinearnosti in občasnih napak Penningov merilnik ni uporaben pri zelo natančnih meritvah. V industriji ga uporabljamo za tlake med 10^{-2} in 10^{-7} mbar.

Za potrebe projekta Manhattan za izdelavo atomske bombe med 2. svetovno vojno so Backus in sodelavci v ZDA razvijali ionizacijske merilnike na hladno katodo. Leta 1943 ali 1944 so izumili tudi iskalnik razpok v vakuumskem sistemu z masnim spektrometrom, ki je prišel v prodajo konec vojne.

V petdesetih letih so dognali, da je mogoče uporabiti križanje polj za odpravo pomanjkljivosti Penningovega manometra s spremembo oblike katode za izboljšanje lovljenja elektronov. Izboljšani manometri na hladno katodo so lahko merili do 10^{-14} mbar.

Tabela 3: Časovni razvoj naprav za merjenje tlaka v vakuumu do srede 20. stoletja

leto	izumitelj	vrsta merilnika in merjena količina	merilno območje
pred 1660	Boyle	neposredni, kapljevinski	1 bar - 0,1 mbar
1874	McLeod	kompresijski	10^2 mbar - 10^{-7} mbar
1897	Sutherland	viskoznostni na torzijsko tehtnico	1 mbar - 10^{-4} mbar
1906	Hogg	viskoznostni, na torzijsko tehtnico	
1906	Pirani	toplotna prevodnost	1 bar - 10^{-4} mbar
1906	Voege	toplotna prevodnost, s termočlenom	1 bar - 10^{-4} mbar
1909	von Baeyer	ionizacijski na vročo katodo	10^{-3} - 10^{-8} mbar
1910	Knudsen	prenos gibalne količine	10 mbar - 10^{-3} mbar
1913	Langmuir	viskoznostni, na nihajoče vlakno	1 mbar - 10^{-4} mbar
1917	Lorenz, Bourdon	neposredni, mehanski	1 bar - 30 mbar
1929	Olsen, Hurst	neposredni, mehanski, na kapacitanco	10 mbar - 10^{-4} mbar
1937	Penning	ionizacijski, na hladno katodo	10^{-3} mbar - 10^{-6} mbar
1946	Downing, Mellen	ionizacijski na hladno katodo, radioaktivnost	0,3 bar - $5 \cdot 10^{-4}$ mbar
1950	Bayard, Alpert	ionizacijski, na vročo katodo	10^{-4} mbar - $5 \cdot 10^{-12}$ mbar

5 SKLEP

Razvoj merilne tehnike je važen del zgodovine vsake znanosti, saj spodbuja njen razvoj in se z njim prepleta. Kratek sprehod skozi preteklost vakuumetrov nam je približal medsebojne vplive med vakuumskimi črpalkami in merilniki ustvarjenega tlaka.

6 LITERATURA

- /1/ M.H. Hablanian, Comments on the history of vacuum pumps (v zborniku: Theodore E. Madey in William C. Brown (ur.)), History of Vacuum Science and Technology, American Institute of Physics, New York 1984, str. 18
- /2/ Madey, n.d., 1984, str. 9
- /3/ 66 cm. Pravičen rezultat bi moral biti višji
- /4/ Fathomov, okoli 1 km. Hrib ima nadmorsko višino 1465 m
- /5/ 1,1 mm (M.J. Sparnaay, Adventures in vacuums, North-Holland 1992 str. 15 in 17; E.M. Kljauš, I.B. Pogrebisskii, U.I. Frankfurt, Pascal, Nauka, Moskva 1971, str. 402; Boris Tarasov, Paskal, Molodaja gvardija, Moskva 1979, str. 128-129)
- /6/ 4 milijone ton (Pascal, Récit de la Grande Expérience... Poročilo o velikem poskusu z ravnovesjem tekočin, zamišljenim po g. B.P. za izdelavo traktata, ki ga je obljubil v svojem povzetku o praznem, in opravljenem po g. P.P. na eni najvišjih planin v Auvergnu, 1648; S.G. Gindikin, Rasskazi o fizikah i matematikah, Nauka, Moskva 1985, str. 130-131)
- /7/ Jean Bernhardt, La question du vide chez Hobbes, Rev.Hist.Sci. XLVI/2-3 (1993) str. 227; Tarasov, n.d., 1979, str. 330
- /8/ Sparnaay, n.d., 1992, str. 39-40; U. Frankfort in A. Frenk, Christiaan Huygens, Mir, Moskva 1976, str. 98
- /9/ Nichols, n.d., 1999, str. 22 in slika za stranjo 86
- /10/ Boyle, New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air; Made, for the Most Part in a Pneumatic Engine, Oxford 1660
- /11/ Nichols, n.d., 1999, str. 26-27
- /12/ Richard Nichols, Robert Hooke and the Royal Society, The Book Guild Ltd, Sussex 1999, str. 1, 5, 9 in 22; A.N. Bogoljubov, Robert Hooke, Nauka, Moskva 1984, str. 47, 52, 54 in 229
- /13/ Redhead, The ultimate vacuum, Vacuum 53 (1999) str.137-138
- /14/ Redhead, The measurement of vacuum pressures, v zborniku Madey (ur.), n.d., 1984, str. 31
- /15/ Nichols, n.d., 1999, str. 60
- /16/ Latinsko Boylevo delo Experimentorum novorum physico-mechanicorum continuatio secunda, Geneve, Tournes, 1682 je Wilde popisal v knjižnici Liceja v Ljubljani leta 1803, danes pa jo hranijo NUK pod sign. 8340, vezano s šestimi deli drugih avtorjev
- /17/ Elementary treatise of physic, experimental and apilled, for the use of college and schools, translated and edited from Ganot's, Éléments de physique, New York 1886, str. 159, pogl. 186
- /18/ E.A. Marland, Herbert McLeod, Vacuum 23, No. 5, str. 171-174; Heinrich Kayser (1853-1940), Handbuch der Spectroskopie, Leipzig 1900, vol. 1, str. 204
- /19/ Robert Friedel in Paul Israel, Edison's Electric Light, Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 1986, str. 61-62
- /20/ Günter Reich, Wolfgang Gaede, v Redhead (ur.), Vacuum Science and Technology, Pioners of the 20th Century, History of vacuum science and technology, Vol. 2, AIP Press, 1994, str. 53
- /21/ A. Müllner, Die Realistischen Discipline in Laibacher Jesuiten Collegium, Argo IX (1901) str. 171
- /22/ Učiteljski tovariš, 1870, str. 317
- /23/ Kersnikov popis iz leta 1847, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc. fond 1, Arh. enota 76; Heinrich Mitteis (1822-1878), Inventarium der Instrumente, Apparate, Sonstigen Unterrichtsbehelfe und Einrichtungsstücke des physikalischen Kabinetts an k.k.Gymnasium in Laibach mit Ende des 2. Semesters 1866, Zgodovinski muzej Ljubljana, akc. fond.1, Arh. enota 49
- /24/ Penning, High vacuum gauges, Philips Tech.Rev. 2 (1937) str. 202-203
- /25/ Robert K. DeKosky, William Crookes and the Quest for Absolute Vacuum in the 1870s, v Madey, n.d., 1984, str. 97-98
- /26/ William Sutherland (1859-1912), Phil.Mag. 42 (1896) str. 373-391 in 476-492 ter 43 (1897) str.83; Brush in Everit, Maxwell, Osborne Reynolds and the Radiometer, HSPS 1 (1969) str. 124; I.Langmuir, J.Am.Chem.Soc 35 (1913) str.107 in Phys.Rev. I (1913) str. 337; Saul Dushman, Phys.Rev 5 (1915) str. 212
- /27/ J.M. Lafferty, Saul Dushman, v Redhead (ur.), n.d., 1994, str. 34-41
- /28/ Redhead, n.d., 1984, str.32; W. Steckelmacher, Vacuum 23 (1973) str.165-169; J.K. Fremery, J.Vac.Sci.Technolog. 9 (1972) str.108; J.W. Beams, D.M. Spitzer, J.P. Wide, Rev. Sci. Instrum. 33 (1962) str. 151
- /29/ Georg Johnston Stoney (1826-1911), Sc. Trans. Roy. Dublin Soc. (2) 1 (1878) str. 39; Georg Francis Fitzgerald (1851-1901), Phil. Mag. (5) 7 (1879) str. 15; Maxwell, On stresses in rarified gases arising from inequalities in temperature, Phil. Trans. 170 (1879) str.332; Knudsen, n.d., 1910, str. 810-811
- /30/ Smoluchowski, Ann. Phys. 32 (1910) str. 182-184; 35 (1911) str. 1002
- /31/ Kundt in Warburg, Ann. Phys. 155 (1875) str. 337-366 in 156 (1875) str. 177-211; Smoluchowski, Wien. Ber. 107 (1898) str. 304 in 108 (1899) str. 14; Einstein, Mairan von Smoluchowski, Naturwiss. 5 (1917) str. 737. Ponatis v Sbornie naučnih trudov, IV, Nauka, Moskva 1967, str. 36-37
- /32/ Gaede, Z.techn.Phys. 15 (1934) 664; Reich, n.d., 1994, str. 53
- /33/ Redhead, n.d., 1984, str. 32
- /34/ Ann. Phys. 33 (1910) str. 1435 in 1559; 34 (1911) str. 182-184, 593 in 823; 35 (1911) str. 389 in 983; 36 (1911) str. 871; 44 (1914) str. 525; 46 (1915) str. 641; 83 (1927) str. 385; H. Adam in Steckelmacher v Vacuums science and technology, n.d., 1994, str. 76
- /35/ Einstein, n.d., 1917, str.737
- /36/ Pirani, Selbstzeigendes Vakuum-Messinstrument, Verh. d. D. Phys. Ges. 8 (1906) str. 686; W. Voegelé, Ein neues Vakuummeter, Phys. Z. 7 (1906) 498-500; Redhead, n.d., 1984, 32
- /37/ N.R. Campbell, B.P. Dudding in J.W. Ryde (GE Wembley, Anglija), A substitute for McLeods gauge, Nature 112 (3.11.1923) str. 651; Marland, n.d., str. 171.
- /38/ Penning, n.d., 1937, str. 202-203.
- /39/ A.R. Olsen in L.L. Hurst, J. Am. Chem. Soc. 51 (1929) str. 2378; Redhead, n.d., 1984, str. 33
- /40/ Redhead, n.d., 1999, str. 143
- /41/ O. von Baeyer, Über langsame Kathodenstrahlen, Phys. Z. 10 (1909) str. 168.; O.E. Buckley, An ionization manometer, Proc. Nat. Acad. Sci. 2 (1916) str. 683-685; Paul A. Anderson, The Contact Difference of Potential Between Tungsten and Barium. The External Work Function of Barium, Phys.Rev. 47 (1935) str. 960; Redhead, n.d., 1984, str. 33
- /42/ H.A. Steinherz in Redhead, Ultrahigh vacuum, Sci. Am. (March 1962) str. 2, ponatis v Madey, n.d., 1984, str. 146
- /43/ E.K. Jaycox in H.W. Weinhart, Rev.Sci.Instrum. 2 (1931) str. 401; W.B. Nottingham, J. App. Phys. 8 (1937) str. 762; Saul Dushman, Phys. Rev. 17 (1921) str. 7
- /44/ Steinherz in Redhead, n.d., 1994, str. 148
- /45/ Redhead, n.d., 1994, str. 33