



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY  
A OBJEVY

(22) Přihlášeno 12 03 85  
(21) PV 1735-85

(51) Int. Cl.<sup>4</sup>

G 01 L 15/00;  
G 01 P 5/165

(40) Zveřejněno 13 03 86

(45) Vydáno 15 10 87

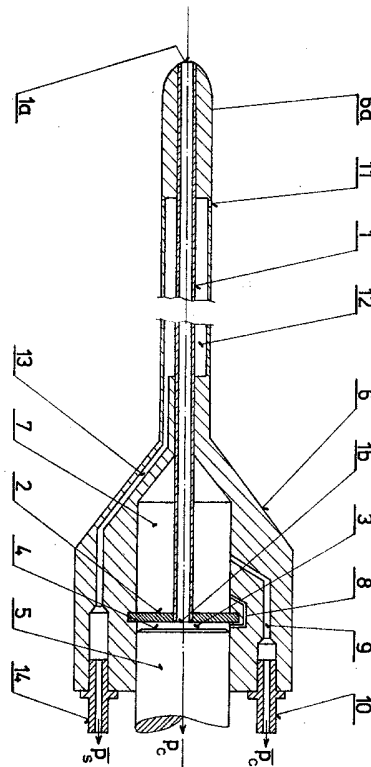
(75)

Autor vynálezu

ŠULC JIŘÍ ing. CSc., PRAHA

(54) Kombinovaná tlaková sonda

Kombinovaná tlaková sonda obsahuje kryt s prodlouženou vstupní částí, ve které je vstupní ústí celkového tlaku s vlnovodem procházejícím v krytu uspořádanou vyrovnávací komůrkou celkového tlaku, a upevněným v přepážce, za níž jsou za sebou řazeny distanční komůrka a citlivý prvek tlakového měniče, přičemž je vyrovnávací komůrka celkového tlaku spojena s distanční komůrkou a s vývodem střední složky celkového tlaku. Podstata řešení spočívá v tom, že ve vstupní části kolem vlnovodu je upravena vyrovnávací komůrka statického tlaku spojená s vývodem střední složky statického tlaku a spojená otvory se statickým tlakem měřené atmosféry.



Vynález se týká kombinované tlakové sondy, určené pro současné měření středních složek celkového tlaku  $\bar{p}_c$  a statického tlaku  $\bar{p}_s$  a časově proměnné, to je flukтуаční složky celkového tlaku  $p_c$  ve vyšetřovaném prostoru v proudu plynu, přičemž všechny tři složky  $\bar{p}_c$ ,  $\bar{p}_s$  a  $p_c$  se mohou měřit současně, avšak odděleně.

Kombinovaná tlaková sonda podle vynálezu je určena pro měření všech složek, potřebných pro vyjádření intenzity podélné turbulence  $I_u$  v proudícím plynu, to je pro nepřímé měření  $I_u$  pomocí tlakových veličin.

Relativní, čili bezrozměrová intenzita podélné turbulence  $I_u$ , nazývaná někdy v československé odborné literatuře "hladina turbulence" nebo "stupeň turbulence", je definována poměrem efektivní hodnoty časově proměnné složky podélné rychlosti  $\hat{u}$  a střední složky podélné rychlosti  $\bar{u}$ ,

$$I_u = \frac{\hat{u}}{\bar{u}}, \quad (1)$$

přičemž efektivní hodnota  $\hat{u}$ , to je směrodatná odchylka fluktuací podélné složky rychlosti  $u$ , je definována vztahem

$$\hat{u} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt \right)^{1/2} \quad (2)$$

a bývá též nazývána absolutní intenzitou turbulence. Pro okamžitou hodnotu podélné rychlosti  $U$  platí  $U = \bar{u} + u$ . Veličina  $T$  v rovnici (2) je časový interval,  $t$  je čas.

K měření složek  $\hat{u}$  a  $\bar{u}$ , potřebných pro vyjádření  $I_u$ , se používá například sonda se žhavným drátkem ve funkci čidla termoanemometru nebo laser-dopplerův anemometr. Obě tato zařízení jsou velmi náročná na čistotu média a na další podmínky, jako jsou například speciální úpravy měřicího prostoru a podobně, a proto jsou využívány převážně pouze při laboratorním měření.

Tyto dosud známé prostředky pro měření  $I_u$  nejsou uzpůsobeny pro použití v silně neizotermickém, znečištěném a agresivním prostředí, ve dvoufázovém prostředí, v místech s nebezpečným zářením, pro použití v obtížně přístupných místech, jako například ve strojích a potrubích.

Pro měření střední složky podélné rychlosti  $\bar{u}$  lze i v těchto náročných podmínkách použít dosud známé tlakové sondy. Tlakové sondy pro měření středních složek rychlosti jsou vytvořeny z trubek, připojených k měřicímu přístroji, například kapalinovému manometru, přičemž například z rozdílu středních složek celkového a statického tlaku ( $\bar{p}_c - \bar{p}_s$ ), lze určit  $\bar{u}$  ze známého vztahu

$$\bar{u} = \left( \frac{2(\bar{p}_c - \bar{p}_s)}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3)$$

kde  $\rho$  je hustota; obvyklé korekční faktory na tvar sondy, stlačitelnost a podobně zde nejsou pro zjednodušení uváděny. Na tomto principu jsou konstruovány například Pitotova trubka, Pitot-statická nebo Prandtlova trubka a další.

Pro měření časově proměnné složky podélné rychlosti  $u$  lze vycházet z přímé vazby mezi fluktuacemi dynamického tlaku a podélné rychlosti. K měření časově proměnných, to je flukтуаčních složek tlaku, lze použít vhodně upravenou mikrofonní sondu.

Dosud známé mikrofonní sondy pro měření časově proměnných složek tlaku  $p$  využívají citlivý tlakový měnič, nejčastěji kondenzátorový mikrofon, který je konstrukčně uzpůsoben tak, že tlak na obou stranách membrány je vyrovnáván pomocí kapiláry, která je neřílnou součástí mikrofonu, takže měnič zpracovává pouze časově proměnný tlak. Ten je k membráně měniče přiváděn.

děň vlnovodem, to je trubkou stálého nebo proměnného průřezu. Vhodně tvarovanou mikrofonní sondou, umístěnou ústím proti proudu plynu, lze měřit časově proměnnou složku celkového tlaku  $\bar{p}_c$ .

U mikrofonních sond obvyklé konstrukce s válcovým vlnovodem dochází v důsledku odrazu zvukové vlny od výstupního ústí vlnovodu k nežádoucím interferencím mezi postupnou a odraženou zvukovou vlnou ve vlnovodu. Kmitočtová charakteristika pro přenos časově proměnné složky tlaku ze vstupního ústí k membráně mikrofonu může vykazovat nežádoucí zvlnění, které však lze zčásti vyrovnat například ztlumením ústí vlnovodu porézní nebo vláknitou zátkou.

Výrazného vyrovnání zvlnění kmitočtové charakteristiky lze dosáhnout využitím československého autorského osvědčení č. 219 479, které řeší bezodrazové zakončení vlnovodu pomocí zakončovacího akustického obvodu vlnovodu, kterým se realizuje zatížení vlnovodu vlnovou impedancí prostředí. Obvod je vytvořen dutinou nad membránou měniče, akustickým odporem na konci vlnovodu a dalšími prvky vhodných velikostí.

Současné měření střední složky tlaku  $\bar{p}$  a časově proměnné složky tlaku  $p$  v jediném úzce vymezeném místě ve vyšetřovaném prostoru, přičemž měření obou složek je prováděno odděleně, umožňuje československé AO č. 242 037.

Podstata tohoto vynálezu spočívá v tom, že z distanční komůrky nad citlivým prvkem mikrofonní sondy, například kondenzátorovým mikrofonem, je vyvedeno spojení s dostatečným útlumem časově proměnného tlaku, které ústí do vyrovnávací komůrky, v níž je střední složka tlaku  $\bar{p}$  stejná jako v distanční komůrce nad mikrofonem, čímž jsou vytvořeny podmínky pro její měření. Princip tohoto vynálezu je možno využít k měření obou složek, to je  $\bar{p}_c$  a  $p_c$ , celkového tlaku v jediném místě v proudu plynu.

Dosud známé tlakové sondy nedovolují současné měření všech tří složek tlaku, to je  $\bar{p}_c$ ,  $\bar{p}_s$  a  $p_c$  v úzce vymezeném prostoru v proudu plynu. Měření těchto složek je možno provádět pomocí známých tlakových sond buď postupně, kdy se však může s časovým odstupem změnit charakter měřeného jevu, nebo současně dvěma dosud známými sondami, přičemž ústí sond však musí být od sebe dostatečně vzdálena tak, aby se sondy vzájemně neovlivňovaly, což zejména v případech proudění s velkými gradienty, kdy je okamžitý tlak  $p = \bar{p} + p$  prostorově silně proměnný, například ve smykových prouděch, vede ke značným chybám.

Mají-li být stanoveny současně, avšak odděleně tři složky tlaku, potřebné pro vyjádření  $\bar{u}$ ,  $\bar{u}$  a tím i  $I_u$  v úzce vymezeném místě v proudu plynu, je nutné realizovat kombinovanou tlakovou sondu, zdokonalenou podle tohoto vynálezu. Obsahuje kryt s prodlouženou vstupní částí, ve které je vstupní ústí celkového tlaku s vlnovodem procházejícím v krytu uspořádanou vyrovnávací komůrkou celkového tlaku, a upevněným v přepážce, za níž jsou za sebou řazeny distanční komůrka a citlivý prvek tlakového měniče, přičemž je vyrovnávací komůrka celkového tlaku spojena s distanční komůrkou a s vývodem střední složky celkového tlaku.

Podstata vynálezu spočívá v tom, že ve vstupní části kolem vlnovodu je upravena vyrovnávací komůrka statického tlaku spojená s vývodem střední složky statického tlaku a spojená otvory se statickým tlakem měřené atmosféry.

Kombinovaná tlaková sonda podle vynálezu dává účinek podstatně větší, než účinek obou známých samostatných sond, neboť poskytuje novou kvalitativní možnost měření intenzity podélné turbulence  $I_u$ . Přitom nová tlaková sonda nevykazuje popsané nevýhody stávajících prostředků pro měření  $I_u$ , to je termoanemometrických sond a laser-dopplerovského anemometru, a umožňuje měření  $I_u$  v prostředí, kde dosud známé prostředky nelze použít.

Kombinovanou tlakovou sondu podle tohoto vynálezu je možno použít pro měření přibližných, to je méně přesných hodnot intenzity podélné turbulence v proudu plynu. Na rozdíl od termoanemometrických sond je tato sonda dostatečně robustní a odolná, takže ji lze použít i ve

znečištěném, dvoufázovém či silně neizotermickém nebo agresivním prostředí a v prostředí s nebezpečným zářením. Citlivý element pro měření fluktuální složky tlaku je dostatečně chráněn před poškozením. Kombinovaná tlaková sonda nevyžaduje speciální úpravy měřicího prostoru, jako například laser-dopplerovský anemometr, a je tudíž použitelná nejen při laboratorních měřeních, ale též při měření ve vnitřních prostorách průtočných strojů, jako turbín a kompresorů, v potrubí a podobně. Sonda je dále výrobně levná.

Podstatným zjednodušením měření  $I_u$  pomocí této kombinované tlakové sondy je to, že pro vyjádření  $I_u$  postačují pouze údaje, které poskytuje sonda - viz rovnice (8) a (8a) - a není nutná znalost dalších veličin, jako například hustoty prostředí  $\rho$  a podobně.

Specifickou předností kombinované tlakové sondy podle vynálezu jsou možnosti jednoduchého měření intenzity a relativní intenzity podélné turbulence ve velmi malém místě měřeného prostoru, z čehož vyplývá vysoká rozlišovací schopnost změn turbulence v poli se silně proměnnými parametry v prostoru a vysoká rozlišovací schopnost turbulence malých měřítek. Specifickou předností sondy je možnost měření intenzity turbulence v prostředí, kde nelze použít přesnější laboratorní metody, a to pomocí jediné dostatečně odolné tlakové sondy minimálně ovlivňující charakter proudění.

Provedení kombinované tlakové sondy upravené podle tohoto vynálezu je znázorněno na příloženém výkresu, který představuje řez sondou.

V příkladu provedení obsahuje sonda vlnovod 1 ve formě trubky, která může mít stálý průřez a nebo průřez měnící se směrem od vstupního ústí 1a k výstupnímu ústí 1b. Ve shodě s československým vynálezem PV 7591-84 je vlnovod 1 pevně uložen v přepážce 2 a ústí do distanční komůrky 3 mezi přepážkou 2 a citlivým prvkem 4, například membránou tlakového měniče 5, například kondenzátorového mikrofonu. Tlakový měnič 5 společně s přepážkou 2 a v ní upevněným vlnovodem 1 jsou uloženy ve vhodně tvarovaném krytu 6 s vyrovnávací komůrkou 7 celkového tlaku dostatečně velkého objemu, případně vyplněnou tlumivým materiálem.

Distanční komůrka 3 a vyrovnávací komůrka 7 celkového tlaku jsou propojeny alespoň jednou kapilárou 8, která může být provedena v přepážce 2, v krytu 6 nebo na jejich rozhraní a případně je vyplněna vhodným tlumivým materiálem. Toto kapilárové spojení lze nahradit průlinčivým materiálem. Po obou stranách přepážky 2 je v důsledku nenaznačeného spojení distanční komůrky 3 a prostoru za citlivým prvkem 4 vytvořena rovnotlaká soustava s tlakem rovným střední hodnotě celkového tlaku  $\bar{p}_c$  v proudu plynu v místě vstupního ústí 1a.

Časově střední celkový tlak  $\bar{p}_c$  je z vyrovnávací komůrky 7 celkového tlaku přiváděn kanálkem 9, který však nemusí být integrální součástí krytu 6, k vývodu 10 celkového tlaku, jenž se obvyklým způsobem připojí na měřič tlaku, například kapalinový manometr. Namísto vývodu 10 celkového tlaku nebo přímo do vyrovnávací komůrky 7 celkového tlaku může být vestavěn citlivý prvek, například tlakový měnič, schopný měřit časově ustálený tlak, například piezorezistivní měnič. Měření časově proměnné složky celkového tlaku  $p_c$ , postupující vlnovodem 1 k citlivému prvku 4 tlakového měniče 5, zajišťuje tento měnič, který se předepsaným způsobem připojí na obvyklé měřicí přístroje.

Kryt 6 je protažen do vstupní části 6a, zpravidla válcové, v níž je pevně uloženo vstupní ústí 1a vlnovodu 1. Vstupní část 6a je opatřena jedním nebo více otvory 11 pro snímání statického tlaku. Tyto otvory 11 ústí do vyrovnávací komůrky 12 statického tlaku, umístěné ve vstupní části 6a, například ve tvaru souosé trubky, obklopující vlnovod 1. Tačto vyrovnávací komůrka 12 statického tlaku je samostatným kanálkem 13 připojena k vývodu 14 statického tlaku, který se obvyklým způsobem připojí k měřiči tlaku, například kapalinovému manometru, popřípadě je namísto vývodu 14 statického tlaku vestavěn citlivý prvek, například tlakový měnič, schopný měřit časově ustálený tlak, například piezoresistivní měnič.

Kombinovaná tlaková sonda podle tohoto vynálezu může být provedena jako přímá sonda, to

je s přímou osou, jak je znázorněno na přiloženém výkresu, popřípadě s osou nepřímou, například ohnutou o  $90^\circ$ , jak je obvyklé u známých tlakových sond pro měření v proudu plynu. Geometrický tvar vstupní části 6a krytu 6 sondy odpovídá obvyklému provedení pro tyto známé tlakové sondy.

Činnost kombinované tlakové sondy podle vynálezu lze popsat takto:

Ve vstupním ústí 1a vlnovodu 1 umístěném do proudu plynu působí okamžitý celkový tlak  $p_c$ , sestávající z časově střední složky celkového tlaku  $\bar{p}_c$  a z časově proměnné složky celkového tlaku  $p_c$ , přičemž  $p_c = \bar{p}_c + p_c$ . Časová střední složka celkového tlaku  $\bar{p}_c$  se vyrovnává ve vnitřním prostoru sondy, sestávajícím z vnitřního prostoru vlnovodu 1, distanční komůrky 3 a vyrovnávací komůrky 7 celkového tlaku, jakož i z prostoru za membránou tlakového měniče 5. Velikost střední složky celkového tlaku  $\bar{p}_c$  se stanoví tlakoměrným přístrojem, umístěným buď přímo ve vyrovnávací komůrce 7 celkového tlaku, nebo připojeným k vývodu 10 celkového tlaku, spojeným kanálkem 9 s rovnotlakým vnitřním prostorem sondy. Vhodným přístrojem je například diferenciální mynometr.

Časově proměnná složka celkového tlaku  $p_c$ , působící na vstupní ústí 1a vlnovodu 1, vyvolává ve vlnovodu 1 postupující akustické vlny šířící se od vstupního ústí 1a k tlakovému měniči 5. K proudění plynu vlnovodem 1 nedochází, pokud  $\bar{p}_c = \text{konstantní}$ .

Časově proměnná složka celkového tlaku  $p_c$ , působící na vstupní ústí 1a sondy, se v důsledku předané hybnosti mění na akustický tlak, přičemž časové změny celkového tlaku  $p_c$  a akustického tlaku v trubce jsou prakticky stejné, až na důsledky odrazu zvukové vlny ve výstupním ústí 1b vlnovodu 1. Odraz zvukových vln od výstupního ústí 1b je možno zmenšit na minimum aplikací pomocného akustického obvodu podle československého autorského osvědčení 219 479. V důsledku vyrovnání středního tlaku po obou stranách membrány měří tlakový měnič 5 pouze časově proměnnou složku celkového tlaku  $p_c$ , působící na vstupní ústí 1a sondy.

Stejně jako při obvyklém měření střední složky statického tlaku  $\bar{p}_s$  pomocí známých sond statického tlaku, působí na vstupní ústí 6a sondy v otvorech 11 okamžitý statický tlak  $p_s$ , sestávající ze střední složky statického tlaku  $\bar{p}_s$  a z časově proměnné složky statického tlaku  $p_s$ . Střední složka statického tlaku  $\bar{p}_s$  se vyrovnává ve vnitřním prostoru sondy, sestávajícím z vyrovnávací komůrky 12 statického tlaku a z kanálku 13 a její velikost se stanoví tlakoměrným přístrojem, umístěným buď přímo na konci kanálku 13, nebo připojeným k vývodu 14 statického tlaku.

Vhodným přístrojem je například opět diferenciální manometr, udávající přímo rozdíl  $(\bar{p}_c - \bar{p}_s)$ . V důsledku vnitřního tlumení celé soustavy pro měření  $p_s$  se časově proměnná složka statického tlaku  $p_s$  střeďuje a jako samostatný údaj se neuplatňuje.

Kombinovaná tlaková sonda podle tohoto vynálezu tedy měří současně, avšak odděleně tři složky tlaku: střední hodnotu celkového tlaku  $\bar{p}_c$ , střední hodnotu statického tlaku  $\bar{p}_s$  a časově proměnnou, tj. flukтуаční složku celkového tlaku  $p_c$ . Při použití kondenzátorového mikrofonu jako tlakového měniče 5 a při použití obvyklých měřicích přístrojů pro zpracování signálu z mikrofonu, jako je zvukoměr, mikrofonní zesilovač a podobně, je měřený signál upraven elektronickou cestou tak, že na výstupu z přístroje je zobrazena již přímo efektivní hodnota časově proměnného tlaku  $\hat{p}_c$ , definovaná analogicky k rovnici (2) vztahem

$$\hat{p}_c = \left( \frac{1}{T} \int_0^T p_c^2 dt \right)^{1/2} \quad (4)$$

Z  $\bar{p}_c$  a  $\bar{p}_s$  je možno určit střední složku podélné rychlosti  $\bar{u}$  obvyklým postupem s použitím rovnice (3), to je výpočtem například na základě údaje z diferenciálního manometru nebo jednoduchého elektrického obvodu pro vyjádření rozdílu  $(\bar{p}_c - \bar{p}_s)$ , jsou-li pro měření  $\bar{p}_c$  a  $\bar{p}_s$  použity tlakové měniče, například piezorezistivní tlakové měniče.

Pro časově proměnnou složku celkového tlaku  $p_c$ , respektive pro její efektivní hodnotu  $p_c^{\wedge}$ , měřenou pomocí tlakové sondy podle vynálezu, platí

$$p_c^{\wedge} = \rho [\overline{u\hat{u}} + \hat{u}^2/2] \quad (5)$$

Kvadratický člen  $\hat{u}^2/2$  v rovnici (5) je ve srovnání se zbývajícím členem  $\overline{u\hat{u}}$  v obvyklých případech turbulentních proudů veličina malého řádu, kterou lze zanedbat, a tudíž platí přibližně

$$p_c^{\wedge} \doteq \rho \overline{u\hat{u}} \quad (6)$$

Pro obvyklé případy turbulentních proudů se slabým akustickým polem oprávněně předpokládáme, že fluktuace statického tlaku jsou veličiny malé ve srovnání s fluktuacemi dynamického čili náporového tlaku, v nichž je hlavním činitelem  $u$ . Potom z rovnice (3) a (6) vyplývá vztah pro aproximativní hodnotu intenzity podélné turbulence  $u$ , měřené sondou

$$\hat{u} = \frac{p_c^{\wedge}}{[2\rho(\overline{p_c} - \overline{p_s})]^{1/2}} \quad (7)$$

Aproximativní hodnota relativní intenzity podélné turbulence  $I_u$ , definovaná v rovnici (1), měřená sondou podle vynálezu, je dána závislostí

$$I_u = \frac{p_c^{\wedge}}{2(\overline{p_c} - \overline{p_s})} \quad (8)$$

Přístroje, obvykle používané pro měření časově proměnného tlaku pomocí mikrofonů, jako jsou zvukoměr, mikrofonní zesilovač a podobně, nevyjadřují zpravidla efektivní hodnotu fluktuací tlaku  $\hat{p}$  přímo, ale ve formě hladiny fluktuací tlaku  $L$ , definované

$$L = 20 \log \frac{\hat{p}}{p_0} \quad (9)$$

kde  $p_0$  je normalizovaný referenční tlak o hodnotě  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Jestliže hodnotě  $p_c^{\wedge}$  odpovídá podle definičního vztahu (9) hladina  $L_c$ , pak lze závislost (7) a (8) pro  $\hat{u}$  a  $I_u$ , měřené sondou, upravit pro přímo čtené hodnoty  $L_c$  a  $(\overline{p_c} - \overline{p_s})$  na

$$\hat{u} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{(L_c/20)} \cdot [2\rho(\overline{p_c} - \overline{p_s})]^{-1/2} \quad (7a)$$

a

$$I_u = \frac{10 [(L_c - 100)/20]}{(\overline{p_c} - \overline{p_s})} \quad (8a)$$

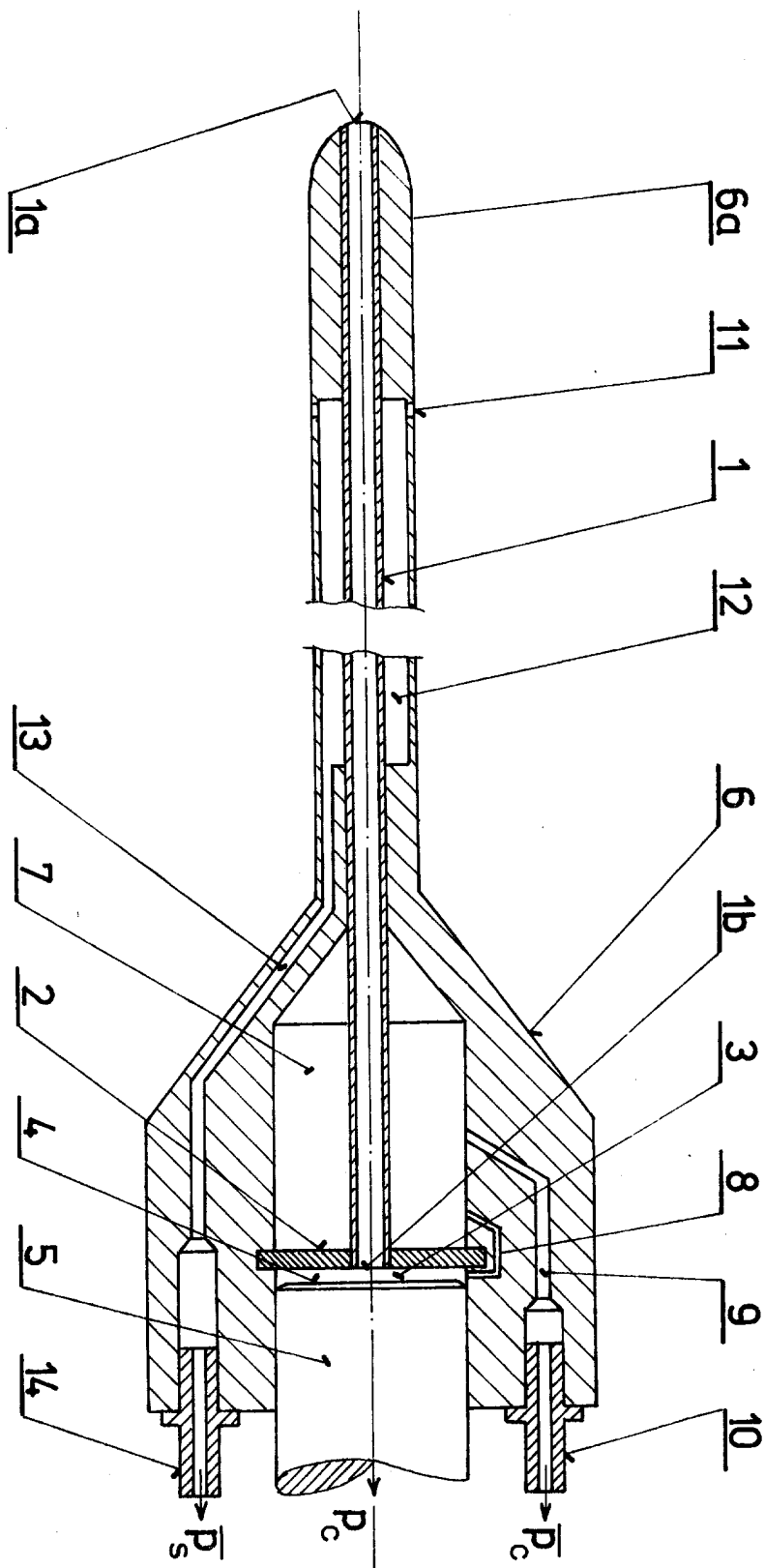
V důsledku popsaných vlastností a specifických předností má kombinovaná tlaková sonda podle vynálezu uplatnění jak ve výzkumu, tak i v průmyslové oblasti a ve zkušebnictví. Uplatnění sondy je možné v experimentech v mechanice plynů, ve vnitřní i vnější aerodynamice a v technické diagnostice. Z hlediska průmyslu je využití sondy možné zejména v automobilovém, leteckém a vzduchotechnickém průmyslu, ve stavbě motorů a průtočných strojů a při diagnostice turbulentních proudů plynů a par.

## P Ř E D M Ě T V Y N Á L E Z U

Kombinovaná tlaková sonda obsahující kryt s prodlouženou vstupní částí, ve které je vstupní ústí celkového tlaku s vlnovodem procházejícím vyrovnávací komůrkou celkového tlaku uspořádanou v krytu, a upevněným v přepážce, za níž jsou za sebou řazeny distanční komůrka a citlivý prvek tlakového měniče, přičemž je vyrovnávací komůrka celkového tlaku spojena s distanční komůrkou a s vývodem střední složky celkového tlaku, vyznačená tím, že ve vstupní části (6a) kolem vlnovodu (1) je upravena vyrovnávací komůrka (12) statického tlaku spojená s vývodem (14) střední složky statického tlaku a spojená otvory (11) se statickým tlakem měřené atmosféry.

1 výkres

247439



Severografia, n. p., Mos

Cena 2,40 Kčs