

ПЕТА ГЛАВА

3.5. Измерване на разход и количество вещество

Във всички отрасли на промишлеността измерването на количеството и на разхода на веществата е от съществено значение за управлението на технологичните процеси, за контрола на състоянието на съоръженията и тяхната производителност, за оптимизация на производствените процеси и др. Измерването на разхода на течности и газове се осъществява с уреди, наречени разходомери, а на количеството - с броячи. Често се използва комбинацията разходомер с брояч. Това е разходомер с вградено интегриращо устройство, така че при желание да се знае и количеството за даден интервал от време – час, денонощие, месец и т.н.

Уредите за измерване на количество и разход, намерили най-широко разпространение в промишлените измервания, могат да бъдат класифицирани в следните основни групи:

1. С променлив пад в налягането;
2. С постоянен пад на налягането /ротаметри, поплавъкови, бутални, клапанни/;
3. Тахометрични - турбинни /аксиални и тангенциални/, камерни /бутални, с овални колела, лопаткови и др./;
4. Електромагнитни;
5. Ултразвукови.

В зависимост от единиците, в които се измерва, разходът е масов или обемен. Преминването от масови единици в обемни се извършва по равенството

$$Q_M = Q_o \rho$$

Където Q_M е масовият разход, напр. kg/s ; Q_o - обемният разход, m^3/s ; ρ - плътността на флуида, kg/m^3 .

Измерването на разхода в масови единици носи значително по-пълна информация за количеството вещество за единица време. Когато се работи в обемни единици, трябва да се отчитат температурата и налягането на флуида в момента на измерването, особено при количествени сравнения. Това се налага поради съществената зависимост на плътността на различните флуиди от температурата и налягането. Във връзка с това резултатите от измерването се привеждат към нормални условия /температура 20°C и налягане 101325 Pa /.

3.5.1. Измерване на разход на флуиди по метода на променливия пад на налягане.

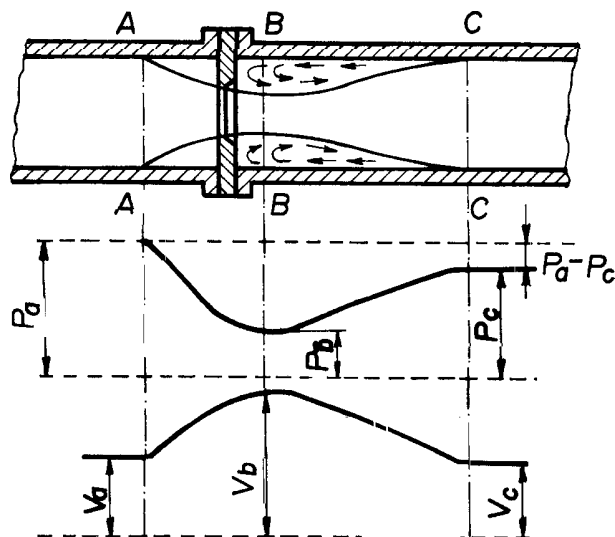
Разходомерите с променлив пад на налягане се основават на зависимостта между разхода на флуид и пада на налягане, създаван от специални стесняващи устройства, монтирани в тръбопроводите или в елементи на тръбопроводите.

Стесняващите устройства играят роля на първичен преобразувател на разходомерите с променлив пад на налягане. Те преобразуват измерваната

величина - разхода в пад на налягане. Падът на налягане се подава към следващия преобразувател, най-често диференциален манометър.

По конструкция и месторазположение на отвора, стесняващите устройства се подразделят на: диафрагми, дюзи и тръба на Вентури.

1. Диафрагми - стандартната диафрагма представлява тънък диск с кръгъл отвор с диаметър d , оста на който съвпада с оста на тръбопровода /фиг. 3.5.1./. При преминаването на флуида през диафрагмата се изменя налягането и средната му скорост. Ако се обозначи с А-А сечението на тръбопровода от което диафрагмата започва да влияе на потока, то от това сечение струята започва да се стеснява, скоростта да нараства, а налягането да намалява. Вследствие на инерцията, струята продължава да се стеснява и на някакво разстояние след диафрагмата. Ето защо мястото на най-голямото стеснение на струята ще лежи в сечение В-В. Разстоянието между сечението А-А и диафрагмата не надвишава диаметъра на тръбопровода а разстоянието от диафрагмата до сечението В-В е приблизително равно на $0,50 D$.



Фиг.3.5.1. Диафрагма

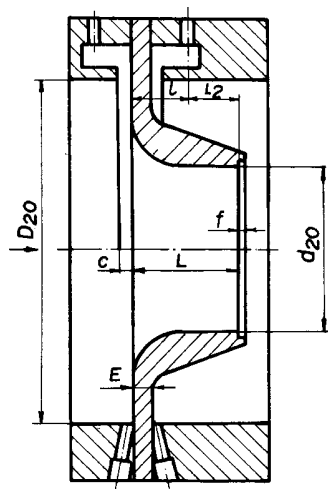
На участъка А-А до В-В средната скорост на потока нараства от V_A до V_B . Нараста и кинетичната енергия на потока. Това нарастване може да стане само за сметка на потенциалната енергия и налягането намалява от P_A до P_B .

След сечение В-В, струята започва да се разширява и в сечение С-С отново достига стените на тръбопровода. Този процес се съпровожда с намаляване на скоростта и нарастване на налягането. В сечението С-С, скоростта V_C , ще стане равна на V_A , ако се приеме, че плътността на средата не се е изменила, но налягането P_C , ще бъде по-малко от P_A , следствие на значителните загуби на енергия в мъртвите зони, намиращи се зад диафрагмата. В тези зони възниква силно вихрообразно движение.

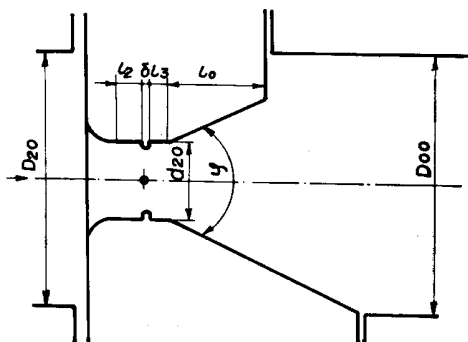
Загубата на налягане $P_A - P_C$ представлява от 40 до 90 % от пада на налягане $P_A - P_B$ и намалява с увеличаване на относителния диаметър на диафрагмата.

2. Измерителни дюзи /фиг. 3.5.2./ - представляват дроселно устройство с кръгъл отвор, който има плавно стесняваща се входна част и цилиндрична изходна част. Използват се два вида дюзи - стандартни и дюзи за измерване на разход на флуиди при малки стойности на критерия на Рейнолдс.

3. Дюза на Вентури /фиг. 3.5.3/, тя има плавно стесняваща се входна част, цилиндричен участък и конична изходна част.



Фиг.3.5.2. Измерителна дюза



Фиг.3.5.3. Дюза на Вентури

Диафрагмите се изработват от неръждаема стомана 1 х 18Н9Г, 12МХ, 15МХА и др., в зависимост от измервания флуид.

Дюзите имат по-сложен профил, изработването им е трудно, поради което и използването им е ограничено. Намерили са приложение за тръбопроводи с диаметър от 50 до 500 mm.

Дюзите на Вентури се изработват с дълга или скъсена изходна част. При дългата дюза на Вентури, най-големия диаметър на изходния конус е равен на диаметъра на тръбопровода, използват се в тръбопроводи с диаметър над 50 mm.

Цилиндричният участък е с дължина $/0,7 - 0,75/d$. Налягането P_1 се измерва непосредствено пред входната част, с помощта на камера, съединена с тръбопровода чрез процеп или отвори, както при диафрагмите. Налягането P_2 се измерва в цилиндричната част, посредством отвори, които са не по-малко от 4 и имат диаметър 3-10 mm. Изискванията относно широчината на процепа и сечението на камерата са както при диафрагмите. Дължината на конуса на късата дюза на Вентури l_0 трябва да бъде не по-малка от d_{20} . Преминаването на цилиндричната към коничната част остава без закръгление.

В процеса на експлоатация непосредствено до стесняващото устройство се отлагат твърди частици, самото стесняващо устройство кородира и ерозира. Това налага периодично да се извършва проверка на целия измервателен участък и особено на стесняващото устройство. За тази цел измервателният участък трябва да може да се изолира, а стесняващото устройство да се изважда за преглед. Когато спирането на флуидния поток е недопустимо, препоръчва се стесняващите устройства на единия от двата успоредни клона на тръбопровода да се спира. При спиране за проверка на стесняващото устройство се включва другия паралелен клон.

При замърсяване на стесняващите устройства, грешките в показанията са значителни. Те достигат до 5 - 12 %. Особено големи грешки се получават вследствие на корозия и ерозия на дроселните устройства.

Точността на измерване на безаварийната работа зависят също от правилния избор и от монтажа на средствата за връзка между стесняващото устройство и диференциалния манометър.

3.5.2. Разходомери с постоянен пад на налягане.

Действието на тези разходомери се основава на измерване на вертикалното преместване на чувствителния елемент /поплавъка/, което е във функционална зависимост с разхода на флуида. При преместването на поплавъка се изменя проходното сечение на тръбопровода. Конструктивно този тип уреди са разработени така, че зависимостта между преместването на поплавъка и разхода да бъде линейна.

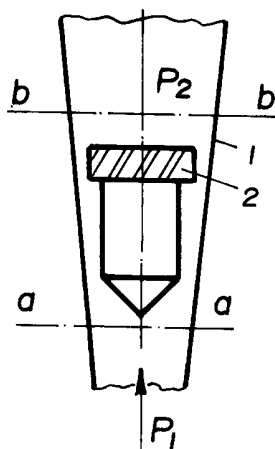
Противодействаща сила на движението на флуида се явява тялото на поплавъка. Тъй като тази сила е постоянна по големина, то и падът на налягането остава постоянен. Поради тази причина, тези устройства се наричат разходомери с постоянен пад на налягане.

Към устройствата с постоянен пад на налягане се отнасят ротаметрите, буталните и поплавъковите разходомери.

Схема на ротаметър е показана на фиг. 3.5.4. Той се състои от вертикална конусна тръба 1, в която се намира чувствителния елемент 2, изпълнен във вид на поплавък. За осигуряване на устойчива работа на поплавъка в горната му част са изрязани наклонени канали. При движение на флуида, поплавъкът се върти постоянно около оста си, без да се трие в стените на тръбата.

Под действие на динамичното налягане на възходящия флуид, поплавъкът заема определено положение в пространството на конусната тръба. Това равновесно състояние се определя от равенството на подемната сила на потока Σ и теглото на поплавъка P . Теглото на поплавъка се определя от израза

$$P = V_n g (\rho_n - \rho) \quad , 3.5.1.$$



фиг. 3.5.4. Ротаметър

Където V_n е обема на поплавка; ρ_n ρ плътността на материала, съответно на поплавка и измерваната среда; g - земно ускорение.

Силата S , действаща върху поплавка, се определя от равенството

$$S = (P_1 - P_2)F_o, \quad 3.5.2.$$

където P_1 и P_2 са съответно наляганията в уреда, непосредствено преди и след поплавка; F_d - най-голямото напречно сечение на поплавка.

При извеждане на уравнението за равновесие на поплавка е необходимо да се отчита и резултатната сила от динамичното налягане на потока W и силата на триене на потока в страничната повърхност на поплавка.

Известно е, че силата на динамичното налягане може да се изчисли от израза

$$W = \varphi \frac{\rho V_1^2}{2} F_o, \quad 3.5.3,$$

където φ е коефициент на обтичане на поплавка, зависещ от формата на челната и задната му част;

V_1 - средната скорост на потока в началното сечение.

Силата на триене N на потока в страничната повърхност на поплавка се намира по формулата

$$N = k V_k^n F_C, \quad 3.5.4.$$

където K е коефициент, зависещ от числото на Рейнолдс и грапавостта на стените на поплавка;

V_k^n - средната скорост на пръстеновидния канал на ротаметъра;

n - степенен показател, зависещ от скоростта;

F_C - триещата повърхност на поплавка.

В състояние на равновесие

$$P = S + W + N \quad , 3.5.5.$$

или ако се заместят съответните изрази се получава:

$$V_n g(\rho_n - \rho) = (P_1 - P_2) F_o + \varphi \frac{\rho V_1^2}{2} F_o + k V_k^n F_c \quad , 3.5.6.$$

$$P_1 - P_2 = \frac{V_n g(\rho_n - \rho)}{F_o} - \varphi \frac{\rho V_1^2}{2} - k V_k^n \frac{F_c}{F_o} \quad , 3.5.7.$$

От последното уравнение следва, че независимо от положението на поплавка, падът на налягането е постоянен и не зависи от измервания разход. Това се обяснява с обстоятелството, че скоростта на потока на измерваната среда остава постоянна при изменение на разхода, тъй като се изменя и площта на отвора на изтичане.

Ако за две сечения на конусната тръба се запише уравнението на непрекъснатостта и уравнението на Бернули с отчитане на геодезичната височина, не е трудно да се получи уравнението за обемния разход

$$Q = \alpha_o F_H \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} - 2gl} \quad , 3.5.8.$$

където α_o е коефициент за разхода на ротаметъра;

F_H - площта на пръстеновидния отвор, образуван от конусната тръба и най-голямото напречно сечение на поплавка;

l - разстоянието между сеченията.

Ако в израз 3.5.8. се замени 3.5.7. за уравнението на разхода се получава

$$Q = \alpha F_n \sqrt{\frac{2}{\rho F_o} [g(V_n \rho_n - F_o l \rho - N - W)]} \quad , 3.5.9.$$

Ако в горния израз се замени $l = \frac{V_n}{F_o}$ и се пренебрегнат силите N и W , разходът на

Флуида ще се определи от зависимостта

$$Q = \alpha F_n \sqrt{\frac{2g V_n (\rho_n - \rho)}{\rho F_o}} \quad , 3.5.10$$

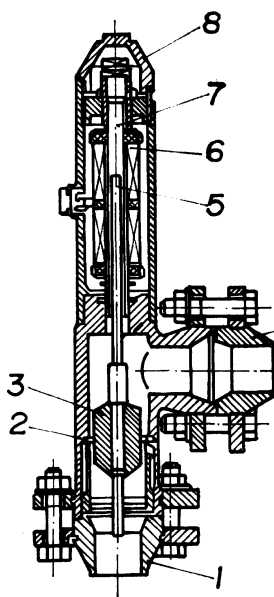
Ротаметрите имат редица предимства, които се заключават в следното: проста конструкция, удобство при измерване, възможност за измерване на малки разходи на течности и газове.

Описаната конструкция ротаметри имат и някои съществени недостатъци: липса на възможност за дистанционно предаване на данните, голям ход на поплавка, а при стъклените - непригодност за измерване в среда с висока температура и налягане. За да се избегнат тези недостатъци, прилага се присъединяване на поплавка с елемент от система за предаване на данни и съответно намаляване на хода на поплавок изработване на конусната тръба от метал и т.н. Отбелязаните конструктивни изменения превръщат ротаметъра в качествено нов уред, носещ названието поплавков разходомер.

На фиг. 3.5.5. е показана схемата на електрически дистанционен ротаметър тип РЗД. Флуидът постъпва през отвора на фланеца 1, премества коничния поплавок 3 спрямо диска 2 в осова посока и излиза през отвора на фланеца 4. Едновременно с поплавка се премества твърдо свързаната с него сърцевина 5 на диференциално-трансформаторната бобина 6. Сърцевината 5 е отделена от бобината 6 с разделителната тръба 7 от немагнитен материал. За нулиране на уреда служи винтът 8, преместващ бобината 6. Детайлите, които влизат в контакт със средата са изработени от легирана стомана.

Съществуващите конструкции ротаметри биват показващи, предназначени за местно измерване и с електрически или пневматични преобразуватели, които могат да се използват както за целите на измерването, така и за целите на регулирането на технологичните процеси.

Ротаметрите, предназначени за местно измерване се изработват със стъклена конусна тръба, градуирана в единици за разход. Ротаметрите с метална тръба са снабдени с преобразувател на преместването в електрически сигнал.



Фиг. 3.5.5. Електрически дистанционен ротаметър.

3.5.3. Турбинни разходомери за измерване на количество.

Турбинните разходомери се използват за измерване количеството на флуиди с малък вискозитет и ниски температури. Турбинните разходомери не са подходящи за измервания при абразивни флуиди.

Принципът им на действие се основава на преобразуването на скоростта на флуида в скорост на въртене на преобразователния елемент, представляващ турбинка. Скоростта на турбинката се преобразува в електрически импулси или с помощта на редуктор и броячен механизъм - в цифри, показващи количеството вещество.

Турбинните разходомери се изработват с винтова /аксиална/ или тангенциална турбинка. Разходомерите от първия тип се използват за измерване на големи разходи, а от втория - за сравнително малки разходи.

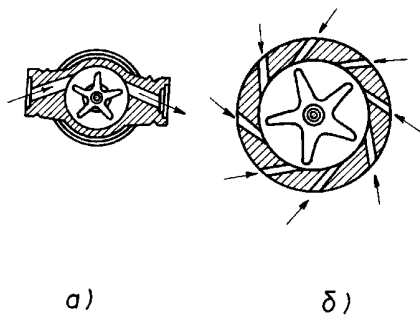
На фиг. 3.5.6. са показани схеми на тангенциални турбинни разходомери, като на фиг. 3.5.6.а, разходомерът е едноструен, а на фиг. 3.5.6б – многоструен. В едноструйните, потокът на общата струя действа на лопатките на турбинката тангенциално от едната ѝ страна, докато в многоструйните уреди потокът се разделя в направляващия апарат на няколко отделни струи, които действуват тангенциално от всички страни на ротора. Устройството на едноструйните разходомери е по-просто, но условията на работа на лагерите са значително по-тежки.

На фиг. 3.5.7. е показана схемата на аксиален турбинен разходомер. Аксиалният ротор 3 има формата на многоходов винт. Броят на лопатките с винтова форма може да варира от 4 до 24. При малък диаметър на турбинката броят на лопатките е малък /4-6/, но дължината им е голяма. При големите диаметри броят на лопатките се увеличава съществено /до 20-24/ и дължината им се намалява.

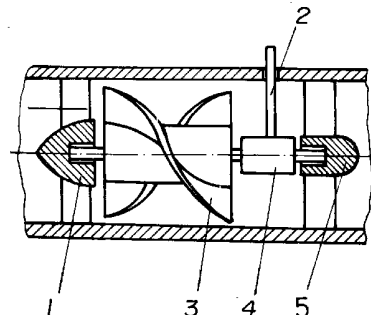
Честотата на въртене на ротора n е пропорционална на средната скорост на потока V_{cp} и обратно пропорционална на стъпката l на лопатките, т.е.

$$n = k_1 \frac{V_{cp}}{l}, \quad 3.5.11$$

където K_1 е коефициент на пропорционалност.



Фиг.3.5.6. Тангенциален турбинен разходомер



Фиг. 3.5.7. Аксиален турбинен разходомер

Ако се отчете, че разходът

$$Q = V_{cp} F, \quad 3.5.12.$$

където F е напречното сечение на потока,

$$n = k_1 \frac{Q}{lF} = kQ, \quad 3.5.13$$

т.е. честотата на въртене на ротора е правопрпорционална на разхода, респективно и на обема на измерваната течност. От формула 3.5.12. не е трудно да

се стигне до извода, че честотата на въртене зависи от вискозитета на измерваната течност, тъй като скоростта зависи от вискозитета. Турбинните разходомери се използват за измерване на разхода на вода при не много високи температури. За течности с вискозитет над $12 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ използването на турбинните разходомери е нежелателно.

Валът на ротора 1 /фиг.3.5.7./ е свързан с броячния механизъм 2 чрез редуктора 4, който понижава честотата на въртене. Ако редукторът е отделен от броячния механизъм с преграда и връзката между тях се реализира посредством магнитен съединител или ос, минаваща през салниково уплътнение в преградата, броячът не влиза в съприкосновение с измерваната течност. Такъв разходомер се нарича сух.

Мокри разходомери са тези, при които няма разделителна преграда и броячният механизъм с редуктора се намират в измерваната течност. При тях липсва триене на оста в уплътнението, поради което измерванията са значително по-точно, но същевременно изискванията за чистотата на измерваната течност са значително по-строги.

Във връзка с изграждането на централизирани системи за контрол, все по-голямо разпространение получават турбинните разходомери с тахометрично устройство за измерване на честотата на въртене на подвижния елемент. Това устройство се състои от две самостоятелни части - тахометричен преобразувател на честота на въртене на вала в честота на импулсите и измервател на честотата на тези импулси. Електрическият тахометричен преобразувател почти не товари вала на турбинката. Това води до съществено повишаване на точността на измерване. Грешката при измерване с тахометричен разходомер не надвишава 0,5 % докато при механичните броячи тя е около 2 %.

3.5.4. Електромагнитни разходомери.

В този тип разходомери за измерване на скоростта на потока се използва потенциалната разлика, в резултат от движението на течност в напречно магнитно поле. Под действието на магнитното поле, в движещата се течност се индуцира е.д.н., което при постоянство на другите параметри е пропорционално на скоростта на потока. Измерването на е.д.н. се осъществява между два метални електрода, потопени в потока. Принципната схема на измерителното устройство, почиващо на този метод, е показана на фиг.3.5.8.

Тръбата на немагнитен материал 2, покрита отвътре с електроизолационен материал, е разположена между полюсите 1 и 4 на магнит или електромагнит. Направлението на магнитните силови линии е перпендикулярно на оста на тръбопровода. В съответствие със закона на електромагнитната индукция, в точките лежащи в противоположните краища на хоризонталния диаметър на тръбата, се получава потенциална разлика. Чрез електродите 3 и 5 през тръбата 2 се измерва тази потенциална разлика.

Стойността на електродвижещото напрежение, индуцирано в потока течност, се определя от израза

$$E = BDV_{cp} \sin \alpha = \frac{4QB}{nD} \sin \alpha, \quad 3.5.14.$$

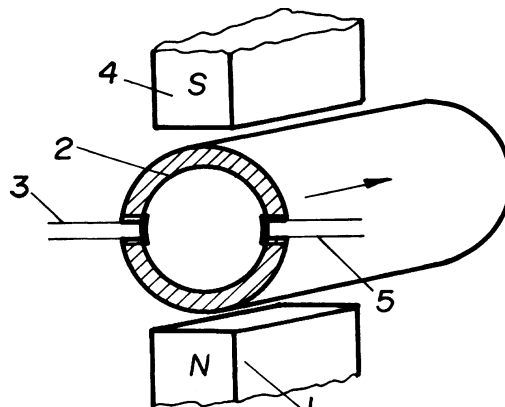
където B е магнитната индукция на полето, Т;

V_{cp} - скоростта на течността усреднена по сечението на канала, m/s;

Q - големината на разхода;

D - дължината на теоретичния проводник /диаметърът на тръбата, m;

α - ъгълът между магнитните силови линии и равнината, в която се движи проводникът.



Фиг.3.5.8. Електромагнитен разходомер

Следователно потенциалната разлика между електродите е пропорционална на обемния разход на течността Q , разстоянието между електродите D и стойността на магнитната индукция $B/2\sin\alpha=1$ за повечето промишлени магнитни разходомери/. За извода 3.5.14. е прието, че електропроводността на течността е значително по-висока от електропроводността на тръбопровода, а дебелината на стените е малка в сравнение със сечението на тръбопровода. Следователно методът е приложим само за електропроводими течности. Минималната проводимост на измерваната течност зависи от големината на товарния резистор, включен към датчика и степента на екраниране на веригата.

Индукционните разходомери се изработват с постоянно или променливо токово поле. Използването на електромагнитните разходомери с постоянно магнитно поле се ограничава от електрохимичните процеси, протичащи в течностите. Борбата с това неприятно явление се води чрез използването на неполяризиращи електроди или чрез намаляване на протичащия ток.

Значително по-голямо приложение са намерили разходомерите с променливо магнитно поле. В този случай индуцираното е.д.н. се определя по формулата

$$E = \frac{4QB \max \sin 2nft}{nD}, \quad 3.5.15$$

Където B_{\max} е големината на амплитудата на магнитната индукция, Т; f - честотата на изменение на магнитното поле, Hz; t – време, s .

Електромагнитните разходомери се изработват за разход от 1 до 25000 m³/h за тръбопроводи с диаметър от 3 mm до 1m при скорост на флуида от 0,6 до 10 m/s . Мощността на електромагнита е от 30 до 1650 W. Полезният сигнал при максималния разход е от 5 до 15 mV.

Електромагнитните разходомери притежават редица предимства. Те се използват за измерване на разход на течности в много широк диапазон. Преобразователната характеристика на този тип разходомери е линейна. Те не съдържат части, издаващи се вътре в тръбопровода и практически не създават допълнителни загуби на налягане.

Индукционните разходомери дават възможност за измерване на агресивни, абразивни и вискозни течности и пулпове, а също така на разтопени метали, т.е. на среди на които измерването на разхода по други методи е много трудно.

В нашата промишленост са намерили разпространение съветските индукционни разходомери тип ИП и ЗМР.

3.5.5. Ултразвукови разходомери.

Ултразвуковите разходомери се разработват въз основа на свойството на ултразвуковите вълни да се разпространяват в измервания флуид. Действието им се основава върху зависимостта между скоростта на разпространение на акустичните вълни в измерваната среда. Ако акустичните вълни се разпространяват със скорост V , резултантната скорост на разпространение ще бъде

$$C' = C + V \cos \alpha \quad , 3.5.16$$

където α е ъгълът между направлението на скоростта на потока и скоростта на разпространение на акустичните вълни.

Ултразвуковите разходомери се състоят от предавател и приемни, намиращи се на разстояние L . Времето t за което ултразвукът ще измине разстоянието, може да се пресметне чрез израза:

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \alpha} \quad , 3.5.17.$$

Обратният път се изминава за време t_2 , което се определя чрез формулата

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \alpha} \quad , 3.5.18.$$

От изразите за t_1 и t_2 изчисли разликата между двете времена

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L}{C - V \cos \alpha} - \frac{L}{C + V \cos \alpha} = \frac{2LV \cos \alpha}{C^2 - V^2 \cos^2 \alpha} \quad , 3.5.19$$

Като се преобразува горният израз, се получава, че:

$$\Delta t = \frac{2L}{C} \frac{V \cos \alpha}{1 - \frac{V^2 \cos^2 \alpha}{C^2}} \quad , 3.5.20.$$

Тъй като $V/C \ll 1$ уравнение 3.5.20 е с незначителна грешка, поради което то може да се запише така

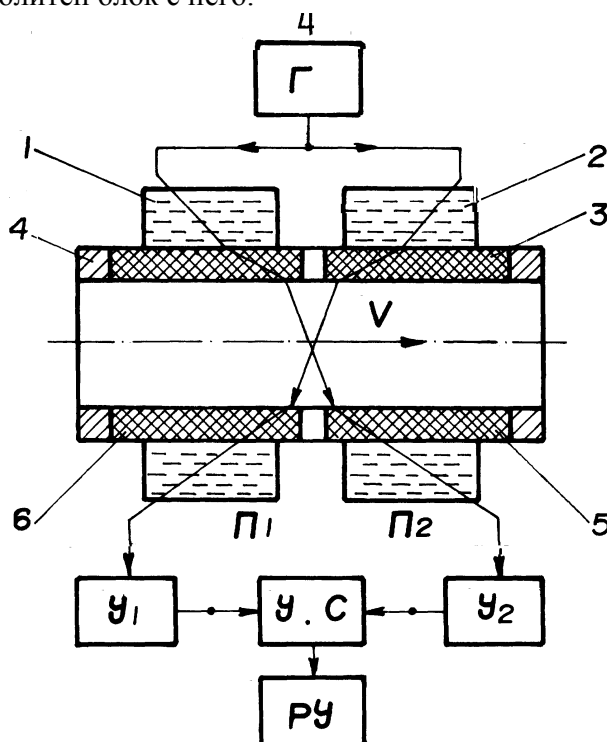
$$\Delta t = \frac{2L}{C^2} V \cos \alpha \quad , 3.5.21.$$

Когато направленията на разпространение на акустичния сигнал и направлението на потока съвпадат, разликата между двете времена е

$$\Delta t = \frac{2L}{C^2} V \quad , 3.5.22.$$

От уравнение 3.5.20. и 3.5.21. може да се констатира, че разликата между времената е пропорционална на скоростта на потока, а следователно и на разхода на флуид.

Блоковата схема на ултразвуков разходомер е показана на фиг.3.5.8. Високочестотният генератор Γ възбужда пиезоелементите 1 и 2, които излъчват непрекъснати ултразвукови трептения чрез двете мембрани 3 в измерваната среда. Мембраните се монтират херметично върху стените на тръбопровода 4 и представляват монолитен блок с него.



Фиг.3.5.8. Блокова схема на ултразвуков разходомер

Излъчените във флуида ултразвукови трептения се възприемат от приемни мембрани 5 и 6 и чрез пиезоелементите Π_1 и Π_2 се подават към усилвателите $У_1$ и $У_2$ и устройството за сравняване У.С. Към сравнителното устройство е свързано регистриращо устройство чрез което за определено време може да се регистрира, както скоростта на флуида, така и неговото количество.

Предимствата на ултразвуковите разходомери се изразяват в: висока точност 1 % приведена грешка; голямо бързодействие, липса на подвижни части; не се смущава потока при измерване; измерването не зависи от физико-химическите свойства на флуида и др.

Основен техен недостатък е, че се тарират с реален поток.

