2. Гасоводи

2.1. Видови и производство на гас

Гасовите се делат на **природни** и **вештачки гасови**.

Природните гасови се добиваат на следните три начина:

1. од бушотините на **гасните наоѓалишта** – гасот воглавно се состои од метан (82-98%) и мал дел на тешки јагленоводороди.
2. од бушотините на **кондензатните наоѓалишта** – гасот се состои од метан (80-95%) и кондензат од бензин и керозин.
3. од бушотините на **наоѓалиштата на сирова нафта** – гасот е мешавина на метан (30-70%) со пропан и бутан.

Вештачки гасови се оние кои се добиваат по пат на гасификација на цврсти горива (мрк јаглен, лигнит) посебно поради ниската калориска вредност и големата количина пепел може да се согледа оправданоста на нивната гасификација.

Главни потрошувачи на природен и вештачки гас се електричните централи, индустриските котларници, гратските топлани, металуршката и цементната индустрија, домаќинствата итн. Гасовите се наоѓаат во гасовита или течна состојба. Метанот, етанот и етиленот се во гасовита состојба на обична температура (20 до 30°) и на атмосферски притисок. Пропанот, пропиленот, бутанот и бутиленот се во вид на пареа на обична температура и атмосферски притисок, односно во течна состојба на зголемени притисоци.

Според некои податоци, светските резерви на природен гас во 1966 год. изнесуваат $850 \cdot 10^{12} m_n^3$.

Од нив екеономично за производство биле $540 \cdot 10^{12} m_n^3$, а произведено било вкупно $0{,}6 \cdot 10^{12} m_n^3$. Најголеми резерви на природен гас се наоѓаат во поранешна СССР, околу 60 трилиони $(10^{12}) m_n^3$. Геолошките резерви во Германија изнесуваат $25 \cdot 10^9 m_n^3$, Италија $130 \cdot 10^9 m_n^3$, Југославија $41{,}7 \cdot 10^{12} m_n^3$ итн. Производството на природен гас е постојано во пораст. Во 1960 год. изнесувало $460 \cdot 10^9 m_n^3$, а во 1970 година $1000 \cdot 10^9 m_n^3$. Во таблицата 2.1 е прикажано производството на природен гас во $10^9 m_n^3$, во поранешна СССР и поранешна Југославија.

Година	1955	1960	1965	1970	1975
СССР	10	26	129	200	289
Југосвавија	0,02	0,065	0,33	0,977	1,44

2.2. Класификација и елементи на гасоводите

Гасоводите се делат на **собирни**, **магистрални** и **разводни**.

Собирните гасоводи се градат на гасните полиња и служат за транспорт на гас од бушотините до собирните станици во кои се врши обработка и припрема на гасот за транспорт до потрошувачките центри. Овие гасоводи имаат помали дијаметри и должини и се преместуваат штом капацитетот на бушотините се намали до онаа вредност при која експлоатацијата на гасот повеќе не е економична.

Под **магистрални гасоводи** се подразбираат цевководи низ кои се транспортира припремениот гас од собирните станици или гасогенераторите, ако е во прашање

вештачки гас, до големите потрошувачки центри. Во зависност од големината на работниот притисок на гасот, магистралните гасоводи се делат на:

- гасоводи со **висок притисок**; (притисок на гасот > **25 bar**)
- гасоводи со **среден притисок**; (притисок на гасот **12 - 25 bar**)
- гасоводи со **низок притисок**; (притисок на гасот < **12 bar**).

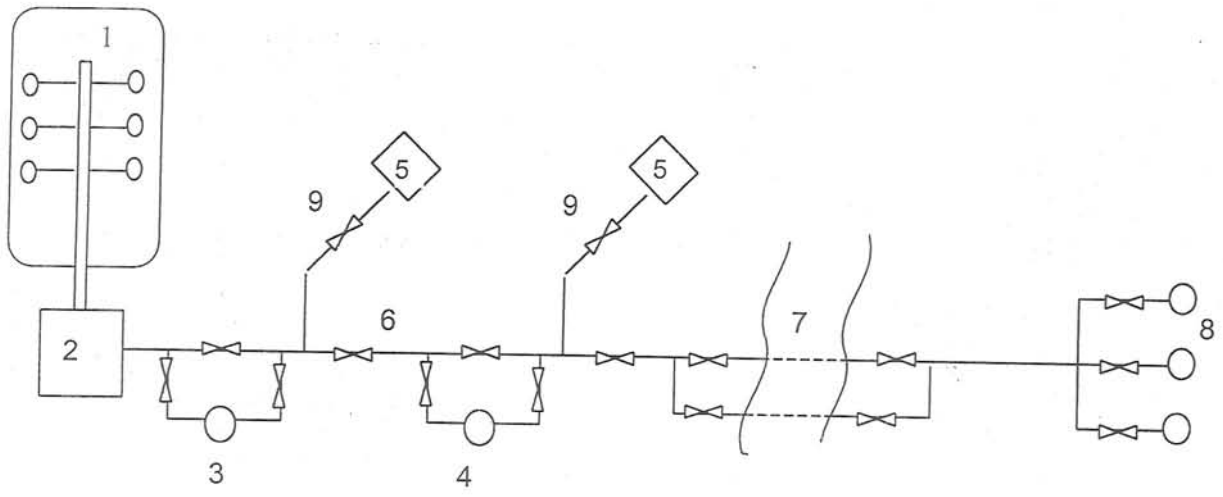
Должината на магистралните гасоводи се движи од десетина до неколку илјади км. Дијаметарот се движи од $150 - 1420\text{mm}$ па и повеќе. Годишниот капацитет обично се движи од $10 - 30 \cdot 10^9 \text{m}_n^3$.

Разводните гасоводи служат за дистрибуција на гасот до директните потрошувачи. Тие претставуваат сложени цевководни мрежи со изразито нестационарен режим на работа, бидејќи потрошувачката на гасот од страна на потрошувачите е многу нерамномерна. Разводните гасоводи во однос на работниот притисок на:

- гасоводи со **висок притисок**; (работен притисок на гасот $3 - 6$ bar). Овде спаѓаат и цевководите за транспорт на гасот од магистралните цевководи па до првата редукциона станица. Во овие гасоводи притисокот обично изнесува $6 - 12$ bar.
- гасоводи со **среден притисок**; (работен притисок на гасот $0{,}05 - 3$ bar)
- гасоводи со **низок притисок**; (работен притисок на гасот $< 0{,}05$ bar).

Елементите на еден комплетен магистрален гасовод се прикажани на сл. 2.1. Со поединечните броеви се означени:

1. гасно поле со собирни цевководи,	2. собирна станица,
3. главна компрессорска станица,	4. помошна компресорска станица,
5. станица за дистрибуција на гасот,	6. цевковод со арматура,
7. премин преку река,	8. резервоар за гас,
9. одводни цевководи	10.



сл. 2.1.

По должината на магистралниот гасовод, на секои 20 – 25 км се поставува станица за одржување и ремонт на објектите коки се наоѓаат во состав на гасоводот. Поради заштита од корозија гасоводите се премачкуваат со средства кои зависат од геолошкиот состав на теренот во кој цевководот е положен. Се она што е речено при заштитата од корозија за нафтоводите, важи и за цевководите низ кој поминува природен или вештачки гас.

2.3. Изградба на ~~нафтоводите~~ гасоводите за природен гас

Кина

- пред 1000 години, цевковод од бамбусова трска

САД:

1. -Прв метален цевковод (од олово) за транспорт на гас е изграден во Америка 1825 година.
2. -Во 1891 година, прв магистрален гасовод од челична цевка со D=200 mm и должина L = 195 km од Индијана до Чикаго.
3. Во периодот од 1928 до 1932 година во Америка се изградени два магистрални гасоводи:
   - Панхенд до Чикаго со должина од L = 1570 km.
   - Панхенд до Детроит со должина од L = 1375 km.
4. После овие два, изграден е и магистрален гасовод од Тенеси - Западна Вирџинија со должина од L = 2000 km

Според некои податоци денес САД располагаат со приближно $1 \cdot 10^6$ km магистрални и разводни гасоводи.

СССР:

1. прв гасовод е изграден во 1880 година, за транспорт на природен гас во Бакуу.
2. прв современ гасовод е изграден во 1940-41 година со D=300mm и L=69km (Дашава-Лвов).
3. Потоа:1943 година Бугуруслан - Кјубишев: D=350 mm, L=160km.
4. 1947 година Сартов - Москва: D=320 mm; L=843km.
5. Во 1960 година должина на гасоводен систем L = 21000 km
6. Во 1970 година должина на гасоводен систем L = 67000km со годишен капацитет од $170 \cdot 10^9$ m_n^3 гас.
7. До 1975 година е изградено L = 110000 km магистрални гасоводи,
8. На крајот од 1974 година пуштен е џиновскиот гасовод Сибир-Москва со L=3000 km и годишен капацитет $15 \cdot 10^9$ m_n^3 гас.
9. Планирано е во СССР до крајот на 1980 година околу L = 145 000 km магистрални гасоводи.

Во последно време се градат три многу важни гасоводи.

1. Едниот го гради СЕВ, со должина од L = 10000 km, D=1420mm. Се пружа од Оренбург па до секоја членка на СЕВ.
2. Вториот ги поврзува Среден Исток - Западна Европа (од Иран до Турска е готов) со должина од 4400km, D=1020 mm и годишен капацитет $20 \cdot 10^9$ m_n^3.
3. Третиот - Алжир до Италија со должина 2600km.

Вкупната должина на магистралните гасоводи во светот денес изнесува околу L = 1 200 000km.

П. Југославија

Во **П. Југославија** до сега е изградено околу L = 1000km магистрални гасоводи и преку L = 600km собирни гасоводи. Некои од нив се:

1) Гасовод Чајна Липа - Загреб - Сисак со L=125 km, и D = 150 mm

2) Гасовод Мокрин - Кикинда - Панчево - Смедерево со L=208,6 km и D=300mm

3) Обилиќ - Скопје L=85 km - се транспортира гас добиен од гасификација на јагленот.

Сега во П. Југолсвија се во изградба Околу L = 1700 km магистрален гасовод, од кои некои делници се привршуваат. Главната магистрала се пружа од Хоргоша - Нови Сад - Белград - Ниш се до Обилиќ, со спојување на постојниот Обилиќ-Скопје. Од оваа магистрала се одвојува гасоводот Сомбор - Зворник - Сарајево кој има L=300 km и во 1979 година е пуштен во погон.

Се смета дека светските геолошки резерви на природен гас во 1966 година изнесуваат $850 \cdot 10^{12}$ m_n^3, од кои економични за производство се $540 \cdot 10^{12}$ m_n^3, а произведено е $0{,}6 \cdot 10^{12}$ m_n^3.

Најголеми резерви има СССР $60 \cdot 10^{12}$ m_n^3.

СР Германија има резерви $25 \cdot 10^9$ m_n^3.

СФР Југославија има резерви $41{,}7 \cdot 10^9$ m_n^3.

2.4. Хидраулична пресметка на гасоводите при изотермичко струење

Температурата на гасот во гасоводот практично е еднаква на температурата на земјиштето ($T_{gas}=T_{zemja}$) на длабочина на поставеноста на цевководот и малку се менува при движењето на гасот. Значи течењето на гасот ќе се набљудува при константна температура, т.е. изотермичко - односно количината на топлина која гасот ја прима од околината за време на струењето доволна е да го надокнади падот на неговата температура поради експанзија, Џул-Томсоновиот ефект и поради промената на геодетската височина (искачување на цевководот во смерот на струењето ја смалува температурата на гасот).

Хидрауличните равенки кои го опишуваат **стационарното** и **изотермичко струење** на гасот при **константен проток** низ цевковод со наклон гласат:

- **равенката на движењето** (динамичка равенка)

$$\frac{dp}{\rho} + \alpha \frac{d(v^2)}{2} + gdz + \lambda \frac{v^2}{2D} dx = 0 \qquad (2.1)$$

- **билансот на количината на гасот**

$$G = \rho \cdot v \cdot A = idem \qquad (2.2)$$

- **равенката на состојбата на реален гас**

$$p = \rho \cdot Z \cdot R \cdot T \qquad (2.3)$$

Во претходните равенки се:

- p – притисокот на гасот,
- ρ – неговата густина,
- A – проточен пресек,
- D – внатрешен дијаметар на цевководот,
- dz – геодетска висина помеѓу посматраните попречни пресеци на цевководот ($dz>0$ одговара на успон, $dz<0$ на пад на висината на гасоводот),
- α – кориолисов коефициент,
- Z – коефициент на супер стисливоста кој го зема во педвид отстапувањето на реалниот од идеалниот гас и во овој случај е функција само од притисокот бидејќи температурата на гасот е константна.
- dp/p – потенцијална работа, која се троши за:
- v – брзина на струењето,
- λ – коефициент на триење,
- G – масен проток,

$\alpha \cdot dv^2/2$ – совладување на забрзување на гасот долж цевководот

$\lambda \cdot \frac{v^2}{2D} dx$ – за совладување на триењето

$g \cdot z$ – за совладување на геодетската височина помеѓу посматраните проточни пресеци на цевководот

2.4.1. Гасоводи со висок и среден притисок при константен проток на гасот

Во овие гасоводи спаѓаат:

- **магистралните гасоводи** во кои работниот притисок на гасот изнесува над 12 bara,
- **собирните цевководи** на гасните полиња при кои притисокот на бушотината е изразито голем, и
- **разводните гасоводи** во кои работниот притисок на гасот изнесува над 3 bara.

Во хидрауличната пресметка на гасоводите со **висок** и **среден притисок** нема никаква разлика, освен тоа што при гасоводите со **среден притисок** често пати се **занемарува експанзијата на гасот долж цевководот**. Бидејќи струењето на гасот при овие гасоводи по правило е турбулентно вредноста за **кориолисовиот број** $\alpha = 1$.

Најпрост случај на хидраулична пресметка на гасоводи со висок и среден притисок се јавува при **хоризонталното струење** и кога **експанзијата** на гасот долж цевководот може да се **занемари** (**dv=0**). Во ваков случај од равенката 2.2 и 2.3 следува:

$$\frac{dp}{\rho} = ZRT\frac{dp}{p}, \qquad v = \frac{G}{\rho A}, \qquad \Rightarrow \qquad v = \frac{G}{A}\cdot\frac{ZRT}{p}$$

и со нивна замена во равенката (2.1) - во која $dv=0$ и $dz=0$, следува:

$$-\frac{pdp}{ZRT} = \lambda\left(\frac{G}{A}\right)^2\frac{dx}{2D}$$

Ако се земе во пресметките средната вредност на коефицинетот на суперстисливоста $Z=Z_m$, решението на претходната диференцијална равенка гласи:

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda\frac{L}{D}Z_m RT\left(\frac{G}{A}\right)^2 \tag{2.4}$$

Средната вредност на коефициентот на суперстисливоста изнесува

$$Z_m = \frac{1}{2}(Z_1 + Z_2)$$

Ако се искористат врските:

$$\frac{G}{A} = \rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \text{ и } RT = \frac{p_1}{Z_1\rho_1} = \frac{p_2}{Z_2\rho_2}$$

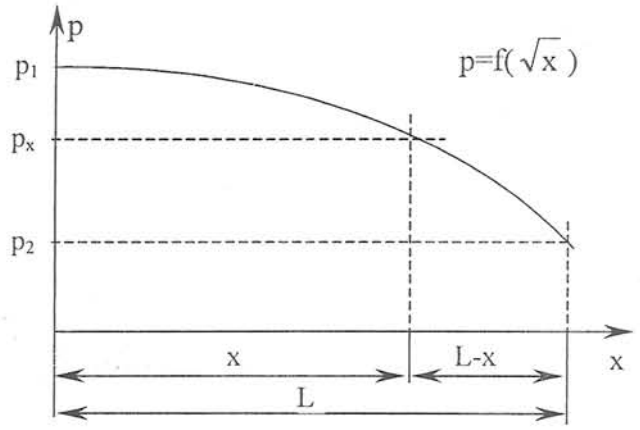
од равенката (2.4) се добиваат следните нејзини облици:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda\frac{L}{D}\frac{Z_m}{Z_1}\frac{\rho_1 v_1^2}{2} \tag{2.5}$$

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_2} = \lambda\frac{L}{D}\frac{Z_m}{Z_2}\frac{\rho_2 v_2^2}{2} \tag{2.6}$$

Равенката (2.5) се употребува при определување на притисокот p_2 на крајот на цевководот кога состојбата на гасот на почетокот на цевкодот е позната, а равенката (2.6) за определување на притисокот p_1 на почетокот на цевководот кога состојбата на гасот на неговиот крај позната.

Од претходните равенки се гледа дека падот на притисокот за време на струењето на стисливиот флуид во гасоводот е нерамомерна сл. 2.2.



сл. 2.2.

На почетокот на цевководот притисокот на гасот е најголем како и неговата густина додека брзината му е најмала. Низводно, притисокот и густината опаѓаат, а брзината на струењето расте. Често пати **средната вредност на коефициентот на стисливоста се пресметува според средниот притисок** т.е.:

$$p_m = \frac{1}{L}\int_0^L p_x dx$$

Бидејќи, (од сликата) $\frac{p_1^2 - p_x^2}{x} = \frac{p_x^2 - p_2^2}{L - x}$ следува $p_x = \sqrt{p_1^2 - \left(p_1^2 - p_2^2\right)\frac{x}{L}}$.

Со замена на оваа вредност во изразот за p_m, после интегрирање се добива:

$$p_m = \frac{2}{3}\cdot\frac{p_1^3 - p_2^3}{p_1^2 - p_2^2} = \frac{2}{3}\cdot\left(p_1 + \frac{p_2^2}{p_1 + p_2}\right)$$

Во случај кога притисоците p_1 и p_2 се познати, од равенката (2.4), најчесто треба да се определи капацитетот на гасоводот т.е.:

$$G = A\sqrt{\frac{D\left(p_1^2 - p_2^2\right)}{\lambda \cdot L Z_m R T}} \quad [kg/s], \qquad q_n = \frac{G}{\rho} \quad [m_n^3/s]. \tag{2.7}$$

при пресметките на гасоводите најчесто нивниот капацитет се изразува во вид на волуменски проток при нормални услови т.е. услови кои одговараат на нормална атмосфера (T_n=288K, p_0=101325Pa). Тогаш и коефициентот на триење се дава во зависност од соодветни величини. Најчесто, за неговата пресметка се употребува следниот образец:

$$\lambda = \frac{0{,}1206}{Re^{0{,}1505}} = 0{,}1206\left(\frac{D\pi\mu_n}{4\rho_n q_n}\right)^{0{,}1505}$$

Ако се замени изразот за λ во изразот (2.7) се добива:

$$q_n = \frac{2{,}47D^{2{,}622}}{\rho_n \mu_n^{0{,}0814}}\left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{Z_m R T L}\right)^{0{,}541} \quad [m_n^3/s]. \tag{2.8}$$

При магистрални гасоводи, должината на цевководот најчесто се изразува во километри, а капацитетот се смета за 1 ден=24 часови. Во таков случај изразот (2.8) го добива следниот облик:

$$q_n = k'_m D^{2,622} \cdot \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{Z_m L} \right)^{0,541} \quad [m_n^3/24h]. \tag{2.9}$$

каде: $$k'_m = \frac{5080}{\rho_n \mu_n^{0,0814} (RT)^{0,541}}$$

Во случај кога се зема во предвид експанзијата на гасот по должина на хоризонталниот гасовод, диференцијалната динамичка равенка ќе гласи:

$$-\frac{pdp}{ZRT} = -\left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{dp}{p} + \lambda \left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{dx}{2D}$$

Нејзиното решение гласи:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot Z_m RT} = \left(\frac{G}{A}\right)^2 \ln \frac{p_1}{p_2} + \lambda \left(\frac{G}{A}\right)^2 \frac{L}{2D} \tag{2.10}$$

За да се уочи големината на членот кој ја изразува експанзијата, во однос на членот на загубата на енергија, ќе го анализираме следниов пример: За гасоводот кој ги има следните параметри: p_1=50bar, p_2=25bar, L=50km, D=1000mm, λ=0,015, износот на тие два члена би бил: $\lambda(L/D)$=750; а $2\ln(p_1/p_2)$=1,38. Значи, членот кој ја искажува експанзијата (промената на брзината, т.е. притисокот) изнесува 1,38, Тогаш 1,38, без голема грешка, може да се занемари во однос на 750.

Сега ќе се разгледува најопшт случај на гасовод при **стационарно** и **изотермичко струење**. Ваков случај беше дефиниран со равенките (2.1),(2.2) и (2.3).

Кога станува збор за **кос гасовод**, се зема дека промената на висината на напречните набљудувани пресеци е рамномерна, т.е.:

$$dz = \frac{z_2 - z_1}{\ell} dx = \frac{\Delta z}{\ell} dx .$$

Од равенките (2.2) и (2.3) со елиминирање на густината ρ, за притисокот се добива:

$$p = \frac{G}{A} \frac{ZRT}{v}, \text{ од каде } dp = -\frac{G}{A} ZRT \frac{dv}{v^2}$$

Според претходното, првиот член во равенката (2.1) може да се напише во следниов облик:

$$\frac{dp}{\rho} = -\frac{G}{A} ZRT \frac{vA}{G} \frac{dv}{v^2} = -\frac{ZRT}{2} \frac{d(v^2)}{v^2}$$

и по замената, заедно со изразот за dz, равенката (2.1) го добива следниот облик:

$$-ZRT \frac{d(v^2)}{v^2} + \alpha d(v^2) + 2g \frac{\Delta z}{\ell} dx + \lambda \cdot v^2 \frac{dx}{D} = 0 \tag{2.11}$$

Равенката (2.11) претставува обична диференцијална равенка. По разделување на променливите се добива:

$$-\frac{ZRT \cdot d(v^2)}{v^2 \left(2g \frac{\Delta z}{\ell} + \frac{\lambda}{D} v^2 \right)} + \frac{\alpha \cdot d(v^2)}{2g \frac{\Delta z}{\ell} + \frac{\lambda}{D} v^2} + dx = 0 \tag{2.12}$$

Линеарната брзина на гасот на почетокот на гасоводот (x=0), се означува со v_1, а на крајот (x=l) со v_2. Се интегрира равенката (2.12) во граници од v_1 до v_2 и од x=0 до x=ℓ, се добива:

$$\frac{ZRT\ell}{2g\Delta z}\cdot\ln\left(2g\frac{\Delta z}{v^2\ell}+\frac{\lambda}{D}\right)\Bigg|_{v_1}^{v_2}+\alpha\frac{d}{\lambda}\ln\left(2g\frac{\Delta z}{\ell}+\frac{\lambda}{D}v^2\right)\Bigg|_{v_1}^{v_2}=-\ell$$

Се делат левата и десната страна со членот ZRTL/2gΔz и се воведуваат границите и се добива:

$$\ln\left(\frac{2g\dfrac{\Delta z}{v_2^{\,2}\ell}+\dfrac{\lambda}{D}}{2g\dfrac{\Delta z}{v_1^{\,2}\ell}+\dfrac{\lambda}{D}}\right)=-\frac{2g\Delta z}{ZRT}\left(1+\frac{D\alpha}{\lambda\ell}\right)+\alpha\frac{d}{\lambda}\ln\left(\frac{2g\Delta z+\lambda\ell v_2^{\,2}}{2g\Delta z+\lambda\ell v_1^{\,2}}\right) \tag{2.13}$$

Со цел оваа равенка да се прилагоди како пресметковна формула за гасоводи со висок и среден притисок, потребно е да се извршат следните трансформации:

Делот од изразот на десната страна во заградата го определува влијанието на промената на брзината на гасот по должина на цевководот. Овој дел од изразот останува непроменет. Линеарните брзини v_1 и v_2, кои се наоѓаат на левиот дел се заменуваат преку масениот проток на гасот и притисокот во соодветните точки, т.е:

$$v_1=\frac{G}{\rho_1 A}=\frac{G}{A}\frac{ZRT}{p_1},\qquad v_2=\frac{G}{\rho_2 A}=\frac{G}{A}\frac{ZRT}{p_2} \tag{2.14}$$

На крајот се врши ослободување од логаритмот во левиот дел од изразот (2.13). По овие преобразби се добива следниот нејзин облик:

$$p_1^2\cdot e^{-bc}-p_2^2=\frac{\lambda G^2\cdot ZRT\cdot\ell}{A^2D}\cdot\frac{1-e^{-bc}}{b} \tag{2.15}$$

Од оваа равенка може да се определи масениот проток на гасот во гасоводот, ако се познати притисоците на почетокот и на крајот на цевководот кој се пресметува

$$G=A\sqrt{\frac{\left(p_1^2\cdot e^{-bc}-p_2^2\right)Db}{\lambda ZRT\ell\left(1-e^{-bc}\right)}} \tag{2.16}$$

Формулите (2.15) и (2.16) се пресметковни формули за гасоводите со **висок** и **среден притисок**. Првата формула (2.15) дозволува да се определи падот на притисокот на познат (зададен) дел од гасоводот при зададен масен проток. По втората формула (2.16) можно е определување на масениот проток на гасот на познат (зададен) дел од гасоводот (зададена должина, дијаметар, коефициент на хидрауличен отпор - коефициент на триење, висинска разлика на гасоводот, температура на гасот) при зададен притисок на краевите на делот од гасоводот.

Во формулите (2.15) и (2.16) со коефициентот **b** е **земено влијанието на разликата почетокот и крајот на гасоводот** и се пресметува по равенката :

$$b=\frac{2g\Delta z}{ZRT}, \tag{2.17}$$

Коефициентот **c** го опфаќа **влијанието на промената на линеарната брзина на гасот на набжудуваниот дел на гасоводот**:

$$c=1+\frac{D\alpha}{\lambda\ell}\ln\frac{2g\Delta zD+\lambda\ell v_1^2}{2g\Delta zD+\lambda\ell v_2^2} \tag{2.18}$$

Ќе ги анализираме следните случаи:

1) За пресметка на гасоводи во кои **влијанието на промената на брзината не се зема во предвид брзинскиот коефициент c=1**, па престковните равенки го добиваат следниот облик:

$$p_1^2 \cdot e^{-b} - p_2^2 = \frac{\lambda G^2 \cdot ZRT \cdot \ell}{A^2 D} \cdot \frac{1 - e^{-b}}{b} \tag{2.19}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 \cdot e^{-b} - p_2^2\right)Db}{\lambda ZRT\ell\left(1 - e^{-b}\right)}} \tag{2.20}$$

2) За хоризонтален гасовод dz=0, па следува од равенка (2.17) b=0 и од (2.18):

$$c = c_0 = 1 + \frac{D\alpha}{\lambda\ell} \ln \frac{v_1^2}{v_2^2}, \text{ или } c = c_0 = 1 + \frac{2D\alpha}{\lambda\ell} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

односно при b=0, следува $\lim_{b \to 0} \frac{1 - e^{-bc}}{b} = c$:

па равенките (2.15) и (2.16) се трансформираат во следните:

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{\ell}{D}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ZRTc \tag{2.21}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 - p_2^2\right)D}{\lambda ZRT\ell c}} \tag{2.22}$$

3) За случај кога промената на брзината не се зема во предвид (**c=1**), како и промената на висинската разлика (**dz=0**), се добиваат следните изрази:

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{\ell}{D}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ZRT \tag{2.23}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 - p_2^2\right)D}{\lambda ZRT\ell}} \tag{2.24}$$

Равенките (2.23) и (2.24) добиени за третиот случај, се еднакви со равенките (2.4) и (2.7), т.е во случај кога експанзијата на гасот долж цевководот може да се занемари. Значи, на занемарувањето на екпанзијата на гасот му одговара c=1.

Во сите претходно добиени равенки, најчесто наместо вистинската вредност на коефициентотна стисливоста (Z) чија промена долж цевководот е непозната, се зема средната нејзина вредност Z_m.

За случај кога се оперира со волуменски притисок сведен на нормални услови $q_n(m^3/s) = G/\rho_n$, густината на гасот, сведена на нормални услови се чита од таблица за зададениот гас или се пресметува според познатиот состав на гасот.

(негативни коефициенти на Џул - Томсон)

Често пати во текот на хидрауличната пресметка на косите гасоводи **се занамерува промената на височината помеѓу посматраните проточни пресеци**. На тој начин косиот гасовод се заменува со хоризонтален. Ова може да доведе до појава на големи **грешки**, посебно кога се во прашање гасоводи со **мали (ниски) притисоци**.

За да се покаже истото ќе се набљудува, на пример, равенката (2.15) која важи за кос гасовод и равенката (2.23) која важи за хоризонтален гасовод. Споредувањето ќе се изврши при еднакви вредности на поедините величини. Со делење на левата и десната страна на двете равенки се добива:

$$\frac{p_{1k}^2 \cdot e^{-b} - p_{2k}^2}{p_{1h}^2 - p_{2h}^2} = \frac{1 - e^{-b}}{b}$$

каде што:

p_{1k} и p_{2k} се однесуваат на **кос гасовод.**

$$p_1^2 \cdot e^{-b} - p_2^2 = \frac{\lambda G^2 \cdot ZRT \cdot \ell}{A^2 D} \cdot \frac{1 - e^{-b}}{b} \tag{2.19}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 \cdot e^{-b} - p_2^2\right)Db}{\lambda ZRT\ell\left(1 - e^{-b}\right)}} \tag{2.20}$$

2) За хоризонтален гасовод dz=0, па следува од равенка (2.17) b=0 и од (2.18):

$$c = c_0 = 1 + \frac{D\alpha}{\lambda\ell} \ln \frac{v_1^2}{v_2^2}, \text{ или } c = c_0 = 1 + \frac{2D\alpha}{\lambda\ell} \ln \frac{p_1}{p_2}$$

односно при b=0, следува $\lim_{b \to 0} \frac{1 - e^{-bc}}{b} = c$:

па равенките (2.15) и (2.16) се трансформираат во следните:

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{\ell}{D}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ZRTc \tag{2.21}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 - p_2^2\right)D}{\lambda ZRT\ell c}} \tag{2.22}$$

3) За случај кога промената на брзината не се зема во предвид (**c=1**), како и промената на висинската разлика (**dz=0**), се добиваат следните изрази:

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{\ell}{D}\left(\frac{G}{A}\right)^2 ZRT \tag{2.23}$$

$$G = A\sqrt{\frac{\left(p_1^2 - p_2^2\right)D}{\lambda ZRT\ell}} \tag{2.24}$$

Равенките (2.23) и (2.24) добиени за третиот случај, се еднакви со равенките (2.4) и (2.7), т.е во случај кога екпанзијата на гасот долж цевководот може да се занемари. Значи, на занемарувањето на екпанзијата на гасот му одговара c=1.

Во сите претходно добиени равенки, најчесто наместо вистинската вредност на коефициентотна стисливоста (Z) чија промена долж цевководот е непозната, се зема средната нејзина вредност Z_m.

За случај кога се оперира со волуменски притисок сведен на нормални услови $q_n(m^3/s) = G/\rho_n$, густината на гасот, сведена на нормални услови се чита од таблица за зададениот гас или се пресметува според познатиот состав на гасот.

(негативни коефициенти на Џул - Томсон)

Често пати во текот на хидрауличната пресметка на косите гасоводи **се занемерува промената на височината помеѓу посматраните проточни пресеци**. На тој начин косиот гасовод се заменува со хоризонтален. Ова може да доведе до појава на големи **грешки**, посебно кога се во прашање гасоводи со **мали (ниски) притисоци**.

За да се покаже истото ќе се набљудува, на пример, равенката (2.15) која важи за кос гасовод и равенката (2.23) која важи за хоризонтален гасовод. Споредувањето ќе се изврши при еднакви вредности на поедините величини. Со делење на левата и десната страна на двете равенки се добива:

$$\frac{p_{1k}^2 \cdot e^{-b} - p_{2k}^2}{p_{1h}^2 - p_{2h}^2} = \frac{1 - e^{-b}}{b}$$

каде што:

p_{1k} и p_{2k} се однесуваат на **кос гасовод.**

p_{1h} и p_{2h} се однесуваат на **хоризонтален гасовод.**

Еднаквоста на поединиите величини во двата случаја, ја подразбира и еднаквоста на $p_{2k}=p_{2h}$. Се зема пример кога се: $\Delta z=250$ и некој гас за кого се: $T=288K$, $Z_m=0,95$, $R=518,3J/kg$. На овие вредности му одговара $b=0,0346$. Нека за косиот гасовод притисоците изнесуваат $p_{1k}=11bar$ и $p_{2k}=10bar$. За овој случај од претходната равенка за хоризонталниот гасовод би се добило:

$$p_{1h}^2 = p_{2h}^2 + \frac{\left(p_{1k}^2 \cdot e^{-b} - p_{2k}^2\right)\cdot b}{1-e^{-b}} = 117,2$$

односно $p_{1h} = 10,83$ bar.

Значи апсолутната грешка која е направена кога косиот гасовод во пресметката е заменет со хоризонтален изнесува:

$$p_{1k}-p_{1h}=11-10,83=0,17 \text{ bar.}$$

Релативната грешка во однос на падот на притисокот во косиот гасовод изнесува:

$$\frac{p_{1h}-p_{2h}}{p_{1k}-p_{2k}}\cdot 100\% = \frac{11-10,83}{11-10}\cdot 100\% = 17\%$$

2.4.2. Џул - Томсонов ефект

При движењето на природниот гас низ места со изразити локални отпори (регулациони вентили, филтри и др.), доаѓа до нагол пад, на притисокот како и пад на температурата. На гасоводните распределителни станици, снижувањето на температурата на гасот бара проверување на равенките на цевководот, на цевководната арматура (вентили, регулациона и мерна техника) итн. Оваа појава се нарекува **ефект на пригушување**. Карактеристика на пригушувачниот процес или **коефициентот на Џул - Томсон**, се нарекува лимесот од односот на измерената температура на гасот према неговиот притисок во изоенталписки процес:

$$D_i = \lim_{\Delta p\to 0}\left(\frac{\Delta t}{\Delta p}\right)_i = \left(\frac{\partial t}{\partial p}\right)_i = D_i(t,p)$$

За идеални гасови: $$D_i = \left(\frac{\partial t}{\partial p}\right)_i = D_i(t,p)$$

Пригушувањето при поголем број гасови, при обични температури и притисоци предизвикува ладење на гасот (позитивен коефициент на Џул - Томсон. при други услови (температура и притисок) пригушувањето предизвикува загревање на гасот

2.4.2. Пресметка на гасоводи со среден и висок притисок со попатна потрошувачка на гасот

При оперирањето со стандарден проток во формулата од (2.14) до (2.19) следува Q_n и ρ_n да се замени со Q_{st} и ρ_{st}. Сите останати параметри остануваат без промени.

Во сите изведени формули масениот или обемниот проток на гасот се искажува како секунден. За добивање на часов, потребно е да се изврши соодветно претварање.

Овде беше набљудуван случај кога масениот проток по должината на гасоводот останува константен.

2.4.2.2. Пресметка на гасовод со рамномерна потрошувачка на гасот по должината

При постоење на голем број на потрошувачи поставени блиску еден до друг по должината на гасоводот, можно е да се претпостави дека станува збор за гасовод со рамномерна потрошувачка на гасот по должината на гасоводот.

Движењето на гасот во тој случај ќе биде опишано со системот равенки (2.1)-(2.3) и равенката на билансот на гасот, која се запишува во следниот облик

$$M \equiv G = \rho \cdot v \cdot A = G_0 - m \cdot x \qquad (2.25)$$

Во оваа равенка, масениот проток на гасот се менува со оддалечување од почетокот на гасоводот, каде протокот е еднаков на G_0. Одведувањето (потрошувачката) на гасот по единица должина на гасоводот е еднакво на m [kg/ms].

Равенката (2.1) за хоризонтален гасовод (dz=0), го добива обликот

$$\frac{dp}{\rho} + \alpha D\left(\frac{v^2}{2}\right) + \lambda \frac{v^2}{2D} dx = 0 \qquad (2.26)$$

Ако брзината на гасот се менува незначително, инерцијалниот член може да се занемари.

Во тој случај формулата (2.26) го добива обликот:

$$\frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{v^2}{2D} dx = 0 \qquad (2.27)$$

Со замена во равенката (2.17) на равенките (2.2), (2.3) и (2.25), за хоризонтален цевковод без учество на инерцијалниот член, се добива следната равенка:

$$\frac{pdp}{ZRT} + \frac{\lambda}{2}\left(\frac{G_0^2 - 2G_0 mx + m^2 x^2}{A^2}\right)\frac{dx}{D} = 0 \qquad (2.28)$$

После интегрирање на равенката (2.28) од p_1 до p_2 и од 0 до ℓ се добива:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\lambda G_0^2 ZRT\ell}{A^2 D}\left(1 - a + \frac{a^2}{3}\right), \qquad (2.29)$$

каде $a = \frac{m\ell}{G_0}$ го претставува делот од гасот кој се одведува од набљудуваната гранка на цевководот.

По формулата (2.29) може да се пресметува гасоводот, ако е познат масениот проток на гасот на почетокот на гасоводот (G_0) и делот на гасот кој се одведува по должината на гасоводот ($a = \frac{m\ell}{G_0}$).

Во гасовод со непрекината поторошувачка (одвод) на гасот масениот проток ќе биде:

$$G_0 = A\sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2)D}{\lambda ZRT\ell\left(1 - a + \frac{a^2}{3}\right)}}, \qquad (2.30)$$

При отсуство на рамномерната потрошувачка (a=0), формулата (2.29) преминува во обична формула за хоризонтален гасовод без попатна потрошувачка. Најголема вредност на коефициентот е a=1. Тоа укажува на потполна потрошувачка (одвод) на гасот по должината на соодветната гранка на гасоводот.

Според тоа, значењето на членот во заградата на именителот во равенката (2.30), се менува од 1 при отсуство на одвод на гасот (a=0), до 0,333 при одвод на сиот гас кој влегува во цевководот (a=1), т.е.

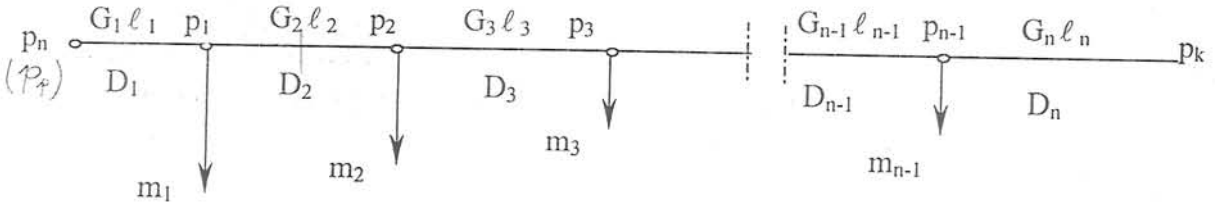
$$\left(1-a+\frac{a^2}{3}\right)=\begin{cases}1 & a=0\\ 0{,}333 & a=1\end{cases}$$

2.4.2.3. Пресметка на гасоводи со одведување (одвод) на гасот на повеќе места по должината

Ако одведувањето на гасот по должината на гасоводот не може да се третира како проблем на рамномерна потрошувачка, тогаш станува збор за хидраулична пресметка на гасовод со одведување на гасот на поедини места од гасоводот.

Шематски, гасоводот е претставен на сл. 2.3. Се состои од n гранки со различни дијаметри и должини со соодветни масени протоци и одводи. Ако на гасоводот се прилучени n гранки, тогаш $G_n=m_n$. При транзитен проток G_t, протокот за последната гранка ќе биде:

$$G_n = G_t + m_n$$



Слика 2.3. Пресметковна шема на гасоводи со висок и среден притисок со одведување на гасот на поедини места по должината

Протокот на првата гранка изнесува

$$G_1 = G_t + \sum_{i=1}^{i=n} m_i$$

За секоја гранка од гасоводот следува

$$p_n^2 - p_1^2 = \frac{\lambda_1 G_1^2 ZRT\ell_1}{A_1^2 D_1}$$

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\lambda_2 G_2^2 ZRT\ell_2}{A_2^2 D_2}$$

- - - - - - - - - - - -

$$p_{n-1}^2 - p_k^2 = \frac{\lambda_n G_n^2 ZRT\ell_n}{A_n^2 D_n}$$

Се сумираат левите и десните страни на овие равенките, па се добива:

$$p_n^2 - p_k^2 = ZRT\sum_{i=1}^{i=n}\frac{\lambda_i G_i^2 \ell_i}{A_i^2 D_i} \qquad (2.31)$$

Коефициентот на отклонување на реалниот гас од идеалниот Z; претставен е со неговата средна големина за сите гранки.

2.4.2.4. Гасоводи со паралелни гранки

Ако два гасоводи се поставени паралелно и работат со еднакви почетни и крајни притисоци, тогаш со ползување на формулата (2.20) за секој гасовод, може да се напише

$$G_1 = A_1\sqrt{\frac{\left(p_1^2\cdot e^{-b}-p_2^2\right)D_1 b}{\lambda_1 ZRT\ell\left(1-e^{-b}\right)}}\ ,\quad G_2 = A_2\sqrt{\frac{\left(p_1^2\cdot e^{-b}-p_2^2\right)D_2 b}{\lambda_2 ZRT\ell\left(1-e^{-b}\right)}}\ .$$

Индексите 1 и 2 се однесуваат соодветно на првиот, односно вториот гасовод.

Во зададениов случај должината на гасоводите е иста, а дијаметрите можат да бидат различни. Масениот проток на гасот низ паралелните гранки ќе биде еднаков на:

$$G = G_1 + G_2 = \left(A_1\sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} + A_2\sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}}\right)\cdot\sqrt{\frac{\left(p_1^2\cdot e^{-b}-p_2^2\right)b}{ZRT\ell\left(1-e^{-b}\right)}}\ .$$

Коефициентот b за двата гасовода е ист, бидејќи тој не зависи од параметрите на цевководот, а се определува како разлика на висините на краевите на гасоводот (Δz). Двата гасоводи имаат една и иста разлика на висината (Δz). Параметрите (z,R,T) се еднакви за двата гасовода. Средното значење на коефициентот Z зависи од средните притисоци, кои во случајов се потполно еднакви за првиот и вториот гасовод.

Протоците во гасоводите ќе бидат распределени со следниот однос

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{A_1}{A_1}\sqrt{\frac{\lambda_2 D_1}{\lambda_1 D_2}}\ . \qquad (2.32)$$

Овој однос е еднаков и за хоризонтален и за наклонет гасовод. Односот на волуменските протоци ќе се определува преку равенката (2.32), каде наместо масените протоци ќе се употребат соодветните волуменски протоци, сведени на стандардни или нормални услови.

Ако е зададен дијаметарот на гасоводот и општиот масен проток (или волуменски проток) при познати коефициенти на хидрауличните отпори, тогаш од равенката (2.19) се определува:

$$p_1^2\cdot e^{-b} - p_2^2 = \frac{ZRT\ell G_2^2}{\left(A_1\sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} + A_2\sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}}\right)^2}\cdot\frac{\left(1-e^{-b}\right)}{b}\ . \qquad (2.33)$$

За хоризонтални гасоводи (b=0). После определување на неопределеноста се добива:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{ZRT\ell G_2^2}{\left(A_1\sqrt{\frac{D_1}{\lambda_1}} + A_2\sqrt{\frac{D_2}{\lambda_2}}\right)^2}\ , \qquad (2.34)$$

Масениот проток во хоризонтален цевковод со паралелни гранки може да се изрази од формулата (2.33), ставајќи за b=0, или од равенката (2.34).

2.4.2.5. Определување на влијанието на висинската разлика на краевите

Влијанието на висинската разлика на краевите може да се земе во обзир само приближно. За разлика на краевите $\Delta z \le 1000\text{m}$ износот на $((1\text{-}e^{-b})/b)$ малку отстапува од единица:

Ако се усвои $c\approx 1$, се добива:

$$\left(p_1 e^{-b/2}\right)^2 - p_2^2 = \frac{\lambda Z R T \ell G^2}{A^2 D} \quad (2.35)$$

Показателната функција во последната формула, може да се разложи во ред, а при тоа, се отфрлаат сите членови после вториот (бидејќи $t/2 \leq 1$). Се добива, дека падот на притисокот за совладување на позитивната висиска разлика на краевите е:

$$\Delta p = \frac{b}{2} \cdot p_1$$

На тој начин, загубите од совладувањето на позитивната висинска разлика можат да се изразат во проценти од притисокот во почетокот на гасоводот. При $T=270K$, $Z=0,95$ се добиваат следните пресметковни вредности:

Δz [m]	100	250	500	750	1000
$\frac{\Delta p}{p_1}$ [%]	1,45	2,0	3,9	5,9	7,8

Големината на падот на притисокот за совладување на позитивната висина изнесува неколку проценти од притисокот на почетокот на гасоводот. Треба да се води сметка дека општиот пад на притисокот на распредителните гасоводи претставува некој дел од износот на притисокот p_1. Падот на притисокот од совладувањето на позитивната висина може да достигне значителна вредност од општиот пад, особено при мали односи на вредностите (p_1/p_2).

На пример, при $p=12 \cdot 10^5$ [N/m^2], $\Delta z=250$m и општ пад $2 \cdot 10^5$ (N/m^2), загубите за совладување на позитивната висина изнесуваат 2% од притисокот во почетокот на гасоводот или 12% од општиот пад на притисокот.

2.4.3. Хидраулична пресметка, на разводни (распределителни) гасоводи со низок притисок

Во последно време градските распределителни гасоводи, во кои надпритисокот на пречекорува $500\text{mmVS}=5 \cdot 10^3 \text{N/m}^2$, спаѓаат во гасоводи со низок притисок. Во хидрауличната пресметка на овие гасоводи густината на гасот се зема за константна големина. Во стварноста извесна промена на густината на гасот по должината на гасоводот постои, но тоа е толку незначителна, што може да се занемари.

За оценка на промената на густината на гасот во распределителните гасоводи најпрво се зема дека температурата на гасот е константна и еднаква на T_0. Коефициентот на отстапување на реалните гасови за низок притисок (близок до атмосферскиот) се зема исто така константен е еднаков на Z_0. Тогаш од равенката на состојба на гасот, густината ќе биде:

$$\rho = \frac{p}{Z_0 R T_0}$$

Апсолутната промена на густината во зависност од апсолутната промена на притисокот изнесува:

$$d\rho = \frac{dp}{Z_0 R T_0}$$

Ако претходните изрази се поделат меѓу себе, се добива релативна промена на густината:

$$\delta\rho = \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dp}{p},$$

каде:

dp – апсолутен износ на промената на притисокот на гасот во гасоводот;

p – апсолутен притисок на гасот во гасоводот;

dρ, ρ – апсолутна промена на густината и густината на гасот.

Најголемиот натпритисок на гасот изнесува $3\cdot10^3$ N/m^2; додека најмалиот го претставува притискот пред гасните прибори, се усвоја да е еднаков на $100\text{mmVS}\approx1\cdot10^3\text{N/m}^2$. Аналогно, најголемиот износ на апсолутната промена на притисокот (dp) на гасот во гасоводот изнесува $400\ \text{mmVS} \approx 4\cdot10^3\ \text{N/m}^2$.

Средниот апсолутен притисок на гасот во гасоводот изнесува:

$$p = \frac{p_{max} + p_{min}}{2} = \frac{105000 + 101000}{2} = 103000 \quad [\text{N/m}^2] = \text{Pa}$$

Најголема релативна промена на густината која може да се достигне во градските гасоводи со низок притисок, изнесува:

$$\delta\rho = \frac{dp}{p} = \frac{4000}{103000}\cdot100\% \approx 3{,}9\%,$$

На овој начин, може да се заклучи дека најголемата промена на густината на гасот во гасоводот со низок притисок може да достигне 4%. Често пати, во градските гасоводи падот на притисокот на поедините нивни делови кои се пресметуваат, е многу помал од $4\cdot10^3$ Pa. Густината на гасот во тие случаи уште помалку се менува.

Бидејќи релативната промена на густината на гасот не е голема и не преминува 4%, во хидрауличните пресметки на гасоводите со низок притисок, густината на гасот може да се земе за константна големина, еднаква на средната нејзина вредност на цевководот кој се пресметува:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

каде: ρ_1 и ρ_2 - густина на гасот во почетокот и на крајот на цевката.

2.4.3.1. Изведување на пресметковни формули за случај на рамномерен одвод на гасот по должината на хоризонтален гасовод со низок притисок

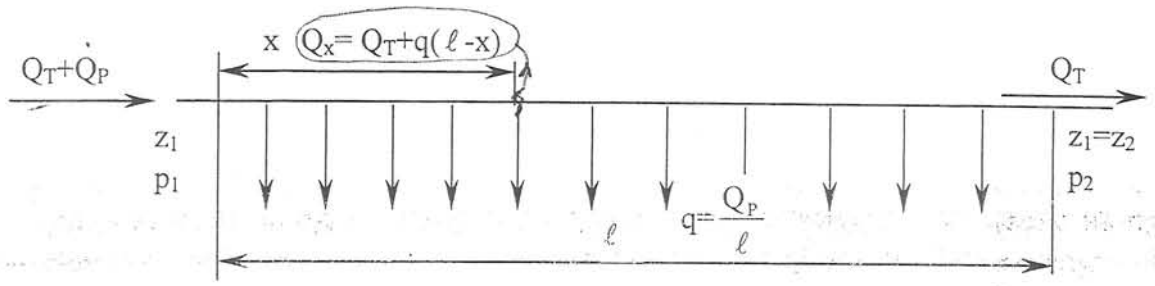
Во случај кога одведувањата на гасот од хоризонталниот гасовод се многу блиску (едно до друго), за да се поедностави пресметката се претпоставува дека гасот континуирано и рамномерно се одведува по должината на гасоводот.

Се набљудува дел од гасоводот со должина ℓ кој е потребно да се пресмета. По должината на гасоводот рамномерно се одведува q[m^3/sm] гас (специфичен коефициент на одведување на гасот на единица должина од гасоводот). Вкупната гасна количина, количината која стои на располагање за одведување (потрошувачка) се нарекува попатна потрошувачка Q_n:

$$Q_n = q\cdot\ell$$

Количеството на гас кое поминува низ набљудуваната цевка за обезбедување на другите цевки од гасната мрежа, се означува со Q_t (транзитен проток - потрошувачка). Износот на транзитниот проток не се менува по должината на набљудуваната цевка. Попатната потрошувачка е променлива величина која се намалува на нула на крајот од цевката. Попатната потрошувачка во било која точка во гасоводот (x) може да се изрази со линеарна зависност:

$$Q_{nx} = q\,(\ell - x)$$



Слика 2.4. Пресметковна шема на хоризонтален гасовод со низок притисок со рамномерно одведување на гасот по долж

Вкупниот проток во било која точка (x) на гасоводот е еднаков:

$$Q_x = Q_T + q\,(\ell - x)$$

Се определува падот на притисокот на хоризонталниот дел од гасоводот (сл. 2.4). Влијанието на промената на брзината поради инерцијалност се занемарува. На елементарен дел од гасоводот падот на притисокот се определува по формулата на Дарси - Вајсбак:

$$dp = \lambda \frac{v^2}{2} \frac{\rho}{D} dx \qquad (2.35)$$

Линеарната брзина на гасот v, е променлива величина. Се изразува преку волуменскиот проток на гасот:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q_T + q(\ell - x)}{A}$$

(2.35) Оваа вредност за в се заменува во формулата и се врши интегрирање во граници од 0 до ℓ. Се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2A^2 D} \int_0^{\ell} \lambda \left[Q_T + q(\ell - x)\right]^2 dx \qquad (2.36)$$

каде p_1 и p_2 претставуваат притисоци во почетокот и на крајот на гасот во цевката за која се врши пресметката.

Притисокот во формулата (2.36) може да биде апсолутен или надпритисок.

Коефициентот на хидрауличното триење λ, зависи од режимот на струење, значи за добивање на пресметковна формула потребно е да се набљудува конкретен случај, и во изразот (2.36) да се замени соодветниот коефициент λ.

За **ламинарен режим** (λ=64/Re) во граници на Рејнолдсовиот број од 0 до 2320.

$$Re = \frac{D}{\nu} \cdot \frac{Q_T + q(\ell - x)}{A}$$

После замена за λ и интегрирање, се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{32\nu\rho\ell}{A^2 D}\left[Q_T + 0{,}5Q_P\right] \qquad (2.37)$$

По формулата (2.37) се определува падот на притисокот на хоризонталниот дел на гасоводот со должина ℓ при услови на рамномерен одвод (потрошувачка) на гас по должината, а исто така и транзитен проток на гасот.

Во случај на гасовод без попатна потрошувачка (Q_P=0), пресметковната формула го добива следниот изглед:

$$p_1 - p_2 = \frac{32\nu\rho\ell Q_T}{A^2 D^2}$$

За гасоводна мрежа, кога нема транзитен проток ($Q_T=0$),

$$p_1 - p_2 = \frac{16\nu\rho\ell Q_P}{A^2 D^2}$$

За критичниот (преодниот) режим на струење при Рејнолдсови броеви од 2000 до 4000 (**зона на премин од ламинарен во турбулентен режим на течење**), коефициентот на хидрауличното триење може да се изрази по формулата на Занченко: $\lambda=0{,}0025\cdot Re^{1/3}$. Тогаш падот на притисокот изнесува:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2A^2 D}\int_0^{\ell} 0{,}0025\cdot\sqrt[3]{\frac{D}{\nu}\frac{Q_T + q(\ell - x)}{A}}\cdot\left[Q_T + q(\ell - x)\right]^2 dx$$

После интегрирање се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}00075\cdot\nu^{-1/3}\rho\ell}{2\cdot A^{7/3} D^{2/3} Q_P}\cdot\left[(Q_T + Q_P)^{10/3} - Q_T^{10/3}\right] \qquad (2.38)$$

Кога гасоводот нема попатна потрошувачка ($Q_P=0$), по определувањето на неопределеноста 0/0, се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}0025\cdot\nu^{-1/3}\rho\ell Q_T^{7/3}}{2A^{7/3}D^{2/3}}$$

При пресметка на на гасоводните мрежи, на кои не постои транзитен проток ($Q_T=0$), од формулата (2.38) се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}00075\cdot\nu^{-1/3}\rho\ell Q_P^{7/3}}{2A^{7/3}D^{2/3}}$$

Распределителните гасоводи можат да работат во критичниот режим на струење исто толку колку и при ламинарниот. Ова е потврдено со спроведените набљудувања во градските гасни мрежи.

За турбулентен режим на струење на гасот во граници на Рејнолдсовиот број од 4000 до 10^5, кога коефициентот на хидрауличните отпори се определува по формулата на Блазице ($\lambda=0{,}3164/Re^{0{,}25}$), интегрирањето на равенката (2.36) дава:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}0577\cdot\nu^{0{,}25}\rho\ell}{A^{1{,}75}D^{1{,}25}Q_P}\cdot\left[(Q_T + Q_P)^{2{,}75} - Q_T^{2{,}75}\right] \qquad (2.39)$$

Формулата (2.39) може да се примени за пресметка на **хоризонтален гасовод со низок притисок со рамномерно одведување на гасот по должината при турбулентен режим** или течење **во зоната на глатките цевки**.

При отсуство на попатната потрошувачка (проток) ($Q_P=0$), по определување на неопределениоста 0/0, по правилото на Lopital, се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}159\cdot\nu^{0{,}25}\rho\ell Q_P^{1{,}75}}{A^{1{,}75}D^{1{,}25}} \qquad (2.40)$$

За цевната мрежа, при отсуство на транзитниот проток ($Q_T=0$), од формулата (2.39) се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}0577\cdot\nu^{0{,}25}\rho\ell Q_T^{1{,}75}}{A^{1{,}75}D^{1{,}25}} \qquad (2.41)$$

Формулите (2.39), (2.40) и (2.41) се применливи за хидраулична пресметка на **хоризонтални гасоводи со низок притисок при хидрауличко глатки цевки (во зоната на Блазиус Re=4000 до 10^5)**.

Во преодната област на режимот на течење на гасот, каде коефициентот на хидрауличкото триење, освен од Re број, зависи и од рапавоста на внатрешните ѕидови на гасоводот, коефициентот на хидрауличкото триење може да се изрази по формулата на Алитшул:

$$\lambda = 0{,}1\left(\frac{1{,}46\Delta}{D} + \frac{100}{Re}\right)^{0{,}25}$$

каде Δ - апсолутна рапавост на внатрешната површина на цевките на гасоводот.

Со заменување на коефициентот на хидраулично триење во формулата (2.36) се добива падот на притисокот во гасоводот за преодната област во граници на Рејнолдсовиот број од Re_1 до Re_2.

$$p_1 - p_2 = \frac{0{,}1\rho}{2A^2D} \cdot \int_0^{\ell}\left(\frac{1{,}46\Delta}{D} + \frac{100}{Re}\right)^{0{,}25}\left[Q_T + q(\ell - x)\right]^2 dx \qquad (2.42)$$

Граничните вредности на Re броевите за преодната област може да се определат по фопрмулите $Re_1 = \frac{59{,}5}{\varepsilon^{1{,}43}}$ и $Re_2 = \frac{66{,}5 - 7{,}65\log\varepsilon}{\varepsilon}$. Релативната рапавост е еднаква на $\varepsilon = \frac{2\Delta}{D}$. Интегралот на десната страна од равенката (2.42) може да биде определен по нумеричката метода.

Во најпрост случај, кога протокот на гасот не зависи од растојанието, т.е гасовод е без попатна потрошувачка (Q_P=0), тогаш падот на притисокот по равенката (2.42) ќе биде:

$$p_1 - p_2 = 0{,}1 \cdot \left(1{,}46\Delta + \frac{100\nu}{Q_T}\right)^{0{,}25} \frac{Q_T^{\,2}\rho\ell}{2A^2D^{1{,}25}} \qquad (2.43)$$

При високи линеарни (линиски) брзини на гасот во гасоводите и сопствените Рејнолдсови броеви, поголеми од Re_2, коефициентот на хидрауличните отпори веќе не е функција од Re број. Тој зависи само од рапавоста на цевката. За овој режим во формулата (2.36) коефициентот λ може да се извади пред знакот на интегралот.

После интегрирање се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{\lambda\rho\ell}{6A^2DQ_P}\left[(Q_T + Q_P)^3 - Q_T^{\,3}\right] \qquad (2.44)$$

Во случај кога (Q_P=0), тогаш од формулата (2.44):

$$p_1 - p_2 = \frac{\lambda\rho\ell Q_T^{\,2}}{2A^2D} \qquad (2.45)$$

За пресметка на цевки во мрежата, каде Q_T=0, од (2.44) се добива:

$$p_1 - p_2 = \frac{\lambda\rho\ell Q_P^{\,2}}{6A^2D} \qquad (2.46)$$

Последните три формули (2.44) - (2.46) се применуваат за хидраулична пресметка на **хоризонтални гасоводи со низок притисок за турбулентен режим во зоната на квадратниот закон на триење**. Коефициентот на хидрауличното триење во нив може да се определи по формулата на Шифринсон:

$$\lambda = 0{,}111\left(\frac{\Delta}{D}\right)^{0{,}25}$$

Во сите претходно изведени формули за пресметка на гасоводите со низок притисок, учествуваат само линиските загуби (загубите на триење). По должината на гасоводите можат да се сретнат и локални (месни) отпори, поради постоење на најразлична цевна арматура. Ако се земат во предвид и месните отпори тогаш пресметковната формула го добива следниот облик:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2A^2D} \cdot \int_0^{\ell} \lambda [Q_T + q(\ell - x)]^2 dx + \rho \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \frac{v_i^2}{2} \qquad (2.47)$$

каде:

ξ_i – коефициент на местните отпори;
i – реден број на местниот отпор;
v_i – линеарна брзина на гасот,
n број на местните отпори.

Коефициентите на местните отпори се земаат од таблици на соодветниот местен отпор. Првиот член од десната страна на равенката (2.47), за сите режими на струење (течење) на гасот со учество на транзитна и попатна потрошувачка, добиен е во формулите (2.37) - (2.45).

2.4.3.2. Извод на општи пресметковни формули

При решавање на многу задачи при проектирањето и експлоатацијата на градските распределителни гасоводи не е потребно врзување за некој конкретен хидрауличен режим. Такви задачи настануваат кога е потребно општо решение. Таков е случај, на пример при техно-економски пресметки на гасоводни мрежи.

Коефициентот на хидрауличните отпори може да се изрази за различни режими по една општа формула:

$$\lambda = \frac{K}{Re^m} \qquad (2.48)$$

каде

K, m – константни коефициенти, зависат од хидрауличниот режим на струењето на гасот.

За случај на напрекинато и рамномерно одведување на гасот по должината на гасоводот, Re бројот е еднаков:

$$Re = \frac{D}{\nu} \cdot \frac{Q_T + q(\ell - x)}{A}$$

Се заменува последната формула во изразот (2.48), се добива:

$$\lambda = \frac{K}{\left(\frac{D}{\nu}\right)^m \left(\frac{Q_T + q(\ell - x)}{A}\right)^m} \cdot \qquad (2.49)$$

Во формулата на Дарси-Вајсбах $dp = \lambda \frac{\rho v^2}{2D} dx$ се изразува линиската брзина преку протокот, а коефициентот на хидрауличкото триење од равенката (2.49) и се добива:

$$dp = \frac{K \rho v^m}{2A^{2-m} D^{1+m}} \cdot (Q_T + q(\ell - x))^{2-m} dx \qquad (2.50)$$

Се врши интегрирање на десната страна во граници од 0 до ℓ. Со тоа се определува падот на притисокот на набљудуваната цевка. Ако во почетокот на гасоводот се означи

притисокот со p_1, а на крајот на гасоводот со p_2, тогаш падот на притисокот во цевката, според равенка (2.50) ќе биде:

$$p_1 - p_2 = \frac{K\rho\nu^m \ell}{2\cdot(3-m)A^{2-m}D^{1+m}} \cdot \frac{(Q_T + Q_P)^{3-m} - Q_T^{3-m}}{Q_P} \qquad (2.51)$$

Добиената формула (2.51) го определува падот на притисокот за било кој режим на струење. Исклучок прави преодната област при турбулентното струење. Формулата е употреблива за деловите од цевководите со попатна и транзитна потрошувачка на гасот.

За **ламинарен режим** коефициентите соодветно се еднакви на:

$$K = 64, \qquad m = 1,$$

За **критичен режим**:

$$K = 0{,}0025, \quad m = -1/3,$$

За **турбулентен режим** во случај на примена на **законот на Блазиус**:

$$K = 0{,}3164, \quad m = 0{,}25,$$

За **квадратен закон на отпори**:

$$K = 0{,}111\left(\frac{\Delta}{D}\right)^{0{,}25}, \quad m = 0.$$

Со уврстување на поедините коефициенти K и m во равенката (2.51), се добиваат соодветните пресметковни формули, изнесени во претходното поглавје.

По формулата (2.51) може да се определи падот на притисокот поради триење на цевки, во кои посоти **само попатна потрошувачка на гасот, т.е Q_T=0**.

$$p_1 - p_2 = \frac{KQ_P^{2-m}\rho\nu^m \ell}{2\cdot(3-m)A^{2-m}D^{1+m}} \qquad (2.52)$$

Ако пресметката се врши **само со транзитен расход, т.е Q_P=0**, тогаш од равенката (2.51) следува

$$p_1 - p_2 = \frac{KQ_T^{2-m}\rho\nu^m \ell}{2A^{2-m}D^{1+m}} \qquad (2.53)$$

За определување на вкупниот пад на притисокот по формулата (2.51)-(2.53), потребно е вклучување уште на локалните (местните) загуби.

2.4.3.3. Определување на пресметковните протоци

Во редица случаи при хидрауличните пресметки на гасоводите со низок притисок задоволувачки се ползува пресметка на потрошувачката на гасот. Овој метод добро е обработен во литературата за градско гасоснабдување и градски гасоводо-распределителни мрежи. Обично пресметката на потрошувачката се спроведува само за турбулентен режим на струење на гасот при квадратен закон на отпори.

Определувањето на пресметковните протоци (расходи) на гасот без влијание на режимот на течење и соодносот на попатната и транзитна потрошувачка (расход) на гасот може да доведе кон значителни грешки во пресметката (до 20%).

Пресметковен проток (расход) се нарекува таков еквивалентен проток, константен по сета должина на гасоводот, кој создава пад на притисокот, еднаков на падот, создаден со промената на протокот (расходот) на гасот по должината на гасоводот.

Падот на притисокот од пресметковниот проток на гасот е еднаков

$$(p_1 - p_2)_{pr} = \frac{A Q_{pr}^{2-m} \nu^m \rho \ell}{2F^{2-m} D^{1+m}} \tag{2.62}$$

Падот на притисокот за непрекинат одвод на гасот по должината на гасоводот е:

$$(p_1 - p_2)_{ne} = \frac{A\nu^m \rho \ell}{2(3-m)F^{2-m} D^{1+m}} \cdot \frac{(Q_T + Q_P)^{3-m} - Q_T^{3-m}}{Q_P} \tag{2.63}$$

Со замена на стварната промена на расходот на гасот по должината на гасоводот со еквивалентниот меѓу себе еднаков (изедначување на равенки (2.62) и (2.63)), се определува вредноста на пресметковниот проток (расход)

$$Q_{pr} = \left[\frac{1}{(3-m)} \cdot \frac{(Q_T + Q_P)^{3-m} - Q_T^{3-m}}{Q_P} \right]^{\frac{1}{2-m}} \tag{2.64}$$

Формулата (2.64) го определува пресметковниот расход (проток) на гасот во општ случај (вид). Како што од неа следува, пресметковниот проток зависи од режимот на течење на гасот во гасоводот (експонентот m) и соодносот помеѓу транзитниот и попатната потрошувачка на гасот.

Од равенката (2.64) може да се добијат најчестите случаи за пресметковни формули за конкретни режими на струење на гасот:

За **ламинарен режим (m=1)**, пресметковниот расход (проток) е еднаков:

$$Q_{pr} = Q_T + 0{,}5Q_P$$

За случај на **квадратен закон на отпори**:

$$Q_{pr} = \sqrt{Q_T^2 + Q_T Q_P + \frac{1}{3} Q_P^2}$$

За **турбулентен режим** во зоната на **Блазиус**:

$$Q_{pr} = \left[\frac{1}{2{,}75} \cdot \frac{(Q_T + Q_P)^{2,75} - Q_T^{2,75}}{Q_P} \right]^{\frac{1}{1,75}}$$

Ако гасоводот има само попатна потрошувачка тогаш $Q_T=0$, следува:

$$Q_{pr} = 0{,}5 \cdot Q_P$$

За **квадратен закон на отпори**:

$$Q_{pr} = \frac{Q_P}{\sqrt{3}} = 0{,}577 \cdot Q_P$$

Турбулентен режим во зоната на Блазиус:

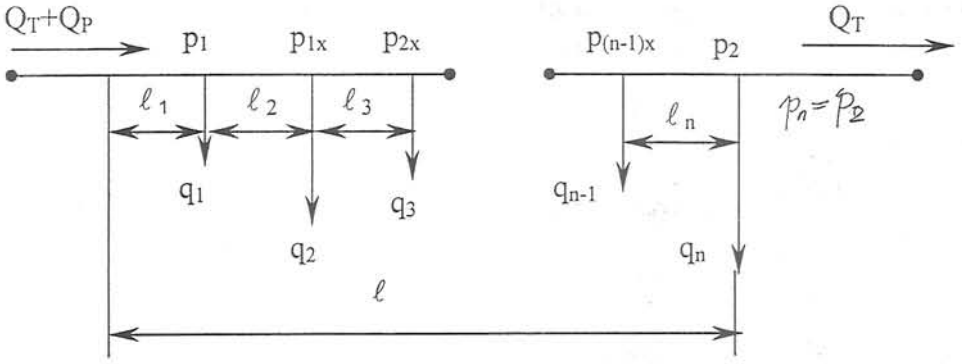
$$Q_{pr} = \frac{Q_P}{2{,}75^{\frac{1}{1,75}}} = 0{,}555 \cdot Q_P$$

Изнесените формули укажуваат дека, при различни режими на струење на гасот, големините на пресметковните протоци суштествено се разликуваат. Затоа при определување на пресметковни протоци следува земање во предвид на режимот на течење, а исто така и соодносот помеѓу транзитната и попатната потрошувачка.

2.4.3.4. Хидраулична пресметка на распределителните гасоводи со одведување на гасот на повеќе места по должината

Сите случаи на гасоводи со одведување на гасот на повеќе места по должината не можат да се сведат на шемата на рамномерно распределување на гасот по должина. Ова уште повеќе се одразува на гасоводите со јако нерамномерно распределување на одведување на гасот по должината.

Се набљудува шема на ваков гасовод (сл. 2.5). По гасоводот се транспортира гас со транзитен проток (потрошувачка) Q_T и попатна потрошувачка Q_p.



Слика 2.5. Пресметковна шема на гасовод со низок притисок со одведување на гасот на повеќе места по должината.

Долж гасоводот произволно се распределени одводите на гасот со различни величини, проточни величини q_i.

Попатниот проток е еднаков на сумата на одводите на набљудуваната цевка.

$$Q_P = \sum_{i=1}^{i-n} q_i$$

Во општ случај, доколку протокот на гасот низ секоја цевка не е еднаков, тогаш режимот на течење низ за секоја цевка може да биде различен. Притоа, исто така можат да се разликуваат и дијаметрите на соседните цевки.

Се определува падот на притисокот на секоја цевка. На **првата цевка**:

$$p_1 - p_{1x} = \lambda_1 \cdot \frac{(Q_T + Q_P)^2 \rho \ell_1}{2A_1^2 D_1}$$

на **втората цевка**:

$$p_{1x} - p_{2x} = \lambda_2 \cdot \frac{(Q_T + Q_P - q_1)^2 \rho \ell_2}{2A_2^2 D_2}$$

на **третата цевка**:

$$p_{2x} - p_{3x} = \lambda_3 \cdot \frac{(Q_T + Q_P - q_1 - q_2)^2 \rho \ell_3}{2A_3^2 D_3}$$

на **n-тата цевка**:

$$p_{(n-1)x} - p_2 = \lambda_n \cdot \frac{(Q_T + Q_P - q_1 - q_2 - \ldots - q_{n-1})^2 \rho \ell_n}{2A_n^2 D_n}$$

Во последнава равенка $p_n=p_2$.

Со сумирање на поедините падови на секоја цевка, се определува општиот пад по сета должина на набљудуваниот гасовод: при сумирањето се земаат и загубите поради местните отпори на гасоводот:

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}\sum_{i=1}^{i=n}\lambda_i \cdot \frac{\left(Q_T + Q_P - \sum_{j=1}^{j=n} q_{j-1}\right)^2 \ell_i}{A_i^{\,2} D_i} + \Delta p_m \qquad (2.65)$$

каде:

Δp_n – сума на местните отпори на сите одводни цевки кои се пресметуваат.

При определување на општиот пад по формулата (2.65), првиот член во редот, т.е член на одовод на гасот со индекс нула (q_0), е еднаков на нула ($q_0=0$).

Ако транзитниот проток на цевките не постои ($Q_T=0$), величината на одоводот еднаков ($q_1=q_2= \ldots =q_n$), растојанијата помеѓу одводите еднакви помеѓу себе ($\ell_1=\ell_2= \ldots =\ell_n$), гасоводот по сите одводни цевки има константен дијаметар ($D_1=D_2=D_3=\ldots=D$), тогаш

$$p_1 - p_2 = \frac{q_1^{\,2}\rho\ell_1}{2A^2 D}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\left[n^2 - \sum_{j=1}^{i=n}(j-1)^2\right] \qquad (2.66)$$

Со заменување на коефицинетот на хидрауличните отпори во формулата (2.66), при услови на ист хидрауличен режим на сите одоводни цевки на гасоводот, се добива следната равенка:

$$p_1 - p_2 = B\frac{Q_P^{\,2-m}\rho\ell\nu^m}{2n^{3-m}A^{2-m}D^{1+m}}\left(1^{2-m} + 2^{2-m} + 3^{2-m} + \ldots + n^{2-m}\right) \qquad (2.67)$$

На тој начин, формулата (2.67) дава можност за определување на пад на притисок во гасоводот со земање на предвид на одведување на гасот на повеќе места, при услови на еднакви растојанија помеѓу точките на одводот, еднаквост на дијаметрите во сите одоводни цевки и еднаквост на расходот (протокот) на гасот.

Хидрауличната пресметка на гасоводот со низок притисок со одвод на гасот по патот, дадено по формулите, ја зема во предвид испрекинатата распределба на одводот на гасот или распределбата на сосредоточните одводи. Затоа, потребно е да се установи границата, дозволувајќи избор на неопходниот начин на пресметка. При произволен избор може да биде дозволена и нумеричка постапка. (Хидрауличната пресметка со земање во предвид на сосредоточените одводи насекаде е правилна, но таа е доста погломазна, отколку при рамномерно непрекинат одвод (потрошувачка) на гасот.)

2.4.3.5. Избор на методата за пресметка

За анализа за избор на методата за пресметка (непрекинатата одвод на повеќе места по должината на гасоводот) на распределителниот гасовод со низок притисок, се зема дел од гасоводот со должина ℓ. На тој дел, на нееднакво растојание се наоѓаат n одоводи, низ кои се одведува еднакво количество на гас ($q_1=q_2= \ldots =q_n$).

Општотот количество на гас кое на набљудуваниот дел од гасоводот, го има на почетокот, се состои (транзитниот проток $Q_T=0$) од:

$$Q_P=q_1 + q_2 + \ldots + q_n$$

Се определува падот на притисокот на набљудуваниот дел за два случаја: за сосредоточно и за непрекинато рамномерно одведување на гасот. При непрекинато одведување, се зема само количеството на гасот Q_P. Специфичната потрошувачка по единица должина на гасоводот $q=Q_P/\ell$.

одведув. на повеќе места

Падот на притисокот за сосредоточниот одвод е еднаков на:

$$(p_1 - p_2)_{sos} = B\frac{Q_P^{2-m}\rho\ell\nu^m}{2n^{3-m}A^{2-m}D^{1+m}}\left(1^{2-m} + 2^{2-m} + 3^{2-m} + ... + n^{2-m}\right) \tag{2.68}$$

за непрекината :

$$(p_1 - p_2)_{ne} = B\frac{Q_P^{2-m}\rho\ell\nu^m}{2(3-m)A^{2-m}D^{1+m}} \tag{2.69}$$

Падот на притисокот, пресметуван по формулите (2.68) и (2.69), ќе се разликува еден од друг за некоја големина. Се определува апсолутната грешка на пресметката според формулата (2.69). За оваа цел, се одземаат падовите на притисоците добиени по равенките (2.68) и (2.69). Се добива:

$$\Delta p_a = B\frac{Q_P^{2-m}\rho\ell\nu^m}{2A^{2-m}D^{1+m}}\left[\frac{\left(1^{2-m} + 2^{2-m} + 3^{2-m} + ... + n^{2-m}\right)}{n^{3-m}} - \frac{1}{3-m}\right]$$

Релативната грешка на пресметката на падот на притисокот ќе биде еднаква на:

$$\delta p = \frac{\Delta p_a}{(p_1 - p_2)_{sos}} = 1 - \left[\frac{n^{3-m}}{(3-m)\left(1^{2-m} + 2^{2-m} + 3^{2-m} + ... + n^{2-m}\right)}\right] \tag{2.70}$$

Како што следува од оваа равенка, релативната грешка на пресметката по формулата за непрекинат овод на гасот по должината не зависи од големината на одводот и растојанијата помеѓу цевките на одведување, туку од режимот на струењето на гасот (показателот m) и бројот на одведување на делот на гасот од гасоводот кој се пресметува.

За **ламинарен режим (m=1)**, од равенката (2.70)

$$\delta p = 1 - \frac{n}{n+1} = \frac{1}{n+1} \tag{2.71}$$

За случај на **квадратен закон на отпори (m=0)**.

$$\delta p = 1 - \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} = \frac{3n+1}{(n+1)(2n+1)} \tag{2.72}$$

Во случај на други режими, во формулата (2.59) треба да се заменат соодветните вредности на показателот m.

Големината на релативната грешка може да биде однапред определена, ако е зададена точноста на хидрауличната пресметка. Се воведува ознака на зададената релативна грешка на пресметката δp. Тогаш, од равенките (2.71) и (2.72) се определува граничниот број на одведувањата - потрошувачката на делот од гасоводот кој се пресметува, соодветен за ламинарен и турбулентен режим, во зоната на квадратниот закон на отпори:

$$\eta_{gr} = \frac{1}{\delta p} - 1 \tag{2.73}$$

$$\eta_{gr} = \frac{(1-\delta p) + \sqrt{9(1-\delta p)^2 + 8\delta p(1-\delta p)}}{4\delta p} \tag{2.74}$$

Формулите (2.73) и (2.74) даваат можност правилно да се избере начинот (методот) на пресметка на делот од гасоводот, според зададена грешка на хидрауличната пресметка. Ако реалниот број на одводи при соодветниот режим се покаже поголем отколку бројот добиен по овие формули по пресметковен пат, тогаш можна е примена

на пресметка за по должина рамномерен одвод на гасот. Ако пак фактичкиот, број на одводи е помал, отколку добиениот по формулите, тогаш хидрауличната пресметка на гасоводот се врши по равенката за одведување на гасот на повеќе места по должината.

Според тоа, изборот на методот на пресметка се определува преку граничниот број на одведувања на делот (гранката) од гасоводот со низок притисок, кој се пресметува.

Граничниот број на одведувањето зависи од режимот на струење на гасот и дозволената (зададената) грешка при пресметката.

Ако хидрауличната пресметка на гасоводот со низок притисок се сосредоточен одвод на гасот се врши по формулите, земајќи го во обзир случајот на непрекината распределба на одводот на гасот по должината, тогаш грешката на пресметката зависи од режимот на струењето и бројот на одводи на гасот. Во колку е поголем бројот на одведувањата, во толку грешката при пресметката е помала. Грешката при пресметката за ист број на одводи е поголема при квадратен закон на отпори, отколку при ламинарен режим. Ова следува од равенките за релативната грешка за тие режими на течење (струење) на гасот.

$$D = D_0\sqrt{\frac{\left(r^2-1\right)\left(1-e^{-b}\right)}{\left(r^2e^{-b}-1\right)b}} \qquad (2.75)$$

Како што следува од формулата (2.75), дијаметарот помалку зависи од Δz, отколку должината на гасоводот и протокот. При проектирање на наклонети гасоводи, влијанието на висинската разлика на краевите Δz, може да биде компензирано со промената на дијаметарот.

$$\frac{\ell}{\ell_0} = \frac{b}{1-e^{-b}} \cdot \frac{r^2e^{-b}-1}{r^2-1}$$

Се пресметува односот на должините (ℓ/ℓ_0) во зависност од големината r (r = {1,1; 1,25; 1,5; 2,0; 3,0}) и коефициентот b (b={0,037; 0,074; 0,148; 0,333}). Добиените резултати се дадени во табела 2.4.

Табела 2.4. Вредности за ℓ/ℓ_0 во зависност од r и коефициентот b, при константен проток G_0=G.

	Однос ℓ/ℓ_0 при r константно				
b	1,1	1,25	1,5	2,0	3,0
0,037	0,783	0,934	0,957	0,978	0,985
0,074	0,610	0,834	0,913	0,946	0,959
0,148	0,214	0,660	0,805	0873	0,906
0,222	-	0,498	0,714	0,818	0,866
-0,037	1,080	1,120	1,095	1,025	1,015
-0,074	1,395	1,168	1,082	1,063	1,043
-0,148	1,820	1,350	1,200	1,130	1,090
-0,222	2,180	1,510	1,295	1,185	1,140

Од резултатите во табелата следува, дека должината во зависност од висинската разлика на краевите (Δz) се менува два пати повеќе отколку протокот. На пример, ако Δz = 500m (b = 0,074), тогаш при однос на крајните притисоци r = 1,25, за добивање на константен проток, неопходно е да се скрати должината на делот од гасоводот до 20%. При промена на знакот на Δz пресметковната должина на гасоводот се зголемува. Големината на промената на должината на гасоводот во зависност од висинската

разлика на краевите е променлива. Границата на влијанието на Δz зависи од големината на односот на крајните притисоци. Според претходно изнесеното, аледува дека е можно да се оцени влијанието на Δz на гасоводот врз големината на неговиот дијаметар. Аналитичкиот израз во тој случај го следниот облик:

???? фали равенка.

2.4.4. Промена на температурата на гасот во гасоводот

Ќе се набљудува температурниот режим на гасоводот и факторите кои влијаат на него.

Гасот кој доаѓа од магистралниот гасоводво градскиот гасовод, има температура приближна на температурата на земјиштето. По преминот на гасот низ регулационите вентили на мерно-регулационите гасораспределителни станици, тој се оладува. Загреан и овлажен гас може да пристапи во градскиот гасовод од гасниот резервоар.

На температурниот режим на гасоводот вилјаат:

1. топлотната размена на гасот со средината која го окружува (земјиштето),
2. ефектот на Џул-Томсон,
3. подигање на гасот во позитивно наклонетиот гасовод и
4. промена на брзината на гасот по должината на гасоводот.

Од термодинамичките начела, во воопштен аналитички облик, предложен од Н.И. Белоконем, за реални гасови - следува:

$$\delta Q = \delta Q^{*} + \delta Q^{**} = di - Vdp \qquad (2.3)$$

каде:

- dQ – полното количество на топлина добиено или оддадено од гасот;
- dQ^{*} – количество топлина на надворешната топлотна размена;
- dQ^{**} – количество на топлина на внатрешната топлотна размена;
- i – енталпија на гасот;
- V – волумен на гасот;
- p – притисок на гасот во гасоводот.

Количеството на топлина во надворешната топлотна размена:

$$\delta Q^{*} = -k\pi D\,(T - T_a)dx$$

Енталпијата на гасот е:

$$di = Gc_p \cdot dT - Gc_p D_i \cdot dp$$

каде

- Cp – масен топлотен капацитет на гасот
- Di – коефициент на Џул-Томпсон,
- k – коефициент на топлопредавање од гасот во средината.

Потенцијалната работа $V \cdot dp$ во равенката (2.76) се распределува по следниот начин:

$$-V \cdot dp = \delta L^{*} + Gd\left(\frac{v^2}{2}\right) + Ggdz + \delta L^{**} \qquad (2.76)$$

каде

- δL^{*} – работа, предадена од телата кон надворешниот систем, работа на надворешните сили, потрошена за промена на притисокот,
- δL^{**} – неповратна работа поради триење

$$\delta L^{**} = \delta Q^{**}$$

За приближно решавање на задачата ќе се усвои дека притисокот во гасоводот се распределува по линеарен закон, тогаш:

$$dp = -\frac{p_1 - p_2}{\ell} dx \quad .$$

Се набљудува температурен режим на гасоводот со рамномерно подигање (позитивна наклонетост) или спуштање (негативна наклонетост).

$$dz = \frac{\Delta z}{\ell} dx \quad .$$

Во равенката (2.76) се внесуваат значењата на поедините големини и се добива:

$$-k\pi D\,(T - T_a)dx = G \cdot c_p \cdot dT + G \cdot c_p D_i \cdot \frac{p_1 - p_2}{\ell} dx + G \cdot \frac{\Delta z}{\ell} dx + Gd\left(\frac{v^2}{2}\right) \quad . \qquad (2.77)$$

Во диференцијалната равенка (2.77) поедините фактори влијаат врз температурата на гасот во гасоводот. При решавање на оваа равенка влијанието на промената на брзината на гасот по должината на гасоводот се занемарува.

После интегрирање на (2.77) се определува температурата на гасот во било која точка од гасоводот

$$T = T_a + \underbrace{(T_1 - T_a)\cdot e^{-ax}}_{II} - \underbrace{D_i \frac{p_1 - p_2}{\ell} \frac{1 - e^{-ax}}{a}}_{III} - \underbrace{g \frac{\Delta z}{\ell} \cdot \frac{1 - e^{-ax}}{ac_p}}_{IV} \quad , \qquad (2.78)$$

каде:

- T_1 – почетна температура на гасот;
- x – растојание од почетокот на гасоводот до набљудуваната точка;
- $T_{за}$ – температура на околната средина;
- a – коефициент:

$$a = \frac{k\pi D}{Gc_p}$$

Вториот член после знакот на равенството ја карактеризира промената на температурата од надворешната топлотна размена,

Третиот член - снижувањето на температурата на гасот поради појавата позитивен ефект на Џул-Томпсон,

Четвртиот член - ја карактеризира измената на температурата на гасот во зависност од неговата положба (по висина).

Температурата на гасот на крајот на гасоводот ($x = \ell$) ќе биде:

$$T = T_a + (T_1 - T_a)\cdot e^{-a\ell} - D_i \frac{p_1 - p_2}{\ell} \frac{1 - e^{-a\ell}}{a} - g \frac{\Delta z}{\ell} \cdot \frac{1 - e^{-a\ell}}{ac_p} \quad . \qquad (2.79)$$

Како што следува од ф. (2.78), по должината на гасоводот гасот се пригушува - дроселира (притисокот се намалува поради триењето на гасот) и неговата температура од ова се намалува. За време на подигање на гасот се троши работа, поради што гасот дополнително се лади. Негативниот ефект на Џул-Томсон може да доведе до загревање на гасот при пригушување. При обични температури во гасоводите и движење на метан, се јавуваат само позитивни ефекти на Џул-Томпсон. Ако гасот тече (струи) под наклон, неговата температура ќе се зголемува. Со порастот на линеарната брзина гасот по должината на гасоводот (во формулите земена), температурата на гасот се намалува.

Ако гасоводот е изолиран и не постои топлотна размена (идеална топлотна изолација), тогаш во формулата (2.79) се става $a=0$ ($k=0$), после определување на неопределеноста 0/0 по Лопиталовото правило, се добива:

$$T = T_1 - D_i(p_1 - p_2) - g\cdot\frac{\Delta z}{c_p} \qquad (2.80)$$

Од равенката (2.80) очигледно е влијанието на поединечните фактори. Температурата на метанот при 0°C и притисок од $5\cdot10^5$Pa се намалува за 0,48°C при пригушување од $1\cdot10^5$ Pa. При нагиб на гасот (метан) во гасоводот за 1m, неговата температура се намалува за:

$$T_1 - T = \Delta T = g\cdot\frac{\Delta z}{c_p} = 9{,}81\cdot\frac{1}{2000}\approx 0{,}005°$$

за метан: $c_p = 2000\ [J/kgK]$

Средната температура на гасот во гасоводот е еднаква:

$$T_{sr} = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} T dx = T_a + \frac{T_1 - T_a}{a\ell}\cdot\left(1 - e^{-a\ell}\right) - \frac{D_i}{a}\frac{p_1 - p_2}{\ell} - g\frac{\Delta z}{\ell a c_p} + \qquad (2.81)$$

$$+\cdot\left(\frac{D_i}{a^2\ell}\cdot\frac{p_1 - p_2}{\ell} + g\frac{\Delta z}{\ell^2 a^2 c_p}\right)\left(1 - e^{-a\ell}\right)$$

За хоризонтален гасовод $\Delta z=0$ и при занемарување на ефектот Џул-Томпсон ($D_i=0$), се добива:

$$T_{sr} = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} T dx = T_a + \frac{T_1 - T_a}{a\ell}\cdot\left(1 - e^{-a\ell}\right) \qquad (2.82)$$

Како што следува од пресметковните формули, влијанието на наклонот на гасоводот (Δz) и ефектот на Џул-Томпсон доведува до тоа, да температурата на гасот, може да се спушти пониско од температурата на околната средина. Ова неопходно треба да се земе при проектирање и експлоатација на гасоводите.

Определувањето на средноинтегралната температура на гасот по формулите (2.81) и (2.82) се неопходни за пресметка на распределителните гасоводи од висок и среден притисок.

2.4.5. Адијабатско ширење на гасот

Адијабатско струење на гасот може да се оствари само кога потполно ќе се спречи размената на топлина помеѓу флуидот и околината. Покрај тоа, што во техничката пракса вистинско адијабатско струење ретко се остварува, сепак струењето на гасовите често се набљудува како да е адијабатско. На пример, истекување на гасовите низ разни отвори и млазници од садови со висок притисок, пригушување во вентили, бленди и други елементи за редукција на притисокот, секогаш се сметаат за адијабатски. Адијабатското струење има својството, за време на неговото остварување, тоталната температура на гасот да не се менува вдолж струјниот поток. Падот на притисокот се определува со интегрирање на диференцијалната равенка:

$$-\frac{dp}{\rho} = vdv + \underline{gdh_z}$$

во која со dh_z се означени загубите на струјната енергија помеѓу набљудуваните проточни пресеци во цевководот. Во случај на локални отпори следува:

$$\int_1^2 \rho g dh_z = \frac{1}{2}\xi\rho_1 v_1^2$$

каде

ξ – коефициент на локалниот отпор.

После замена, диференцијалната равенка го добива следниот облик:

$$-dp = \frac{G}{A}dv + \frac{1}{2}\xi\rho_1 v_1^2$$

каде: $G/A = \rho v = const.$

Ако се интегрира се добива равенката за промена на притисокот:

$$p_1 - p_2 = \frac{G}{A}(v_2 - v_1) + \frac{1}{2}\xi\rho_1 v_1^2 \qquad (2.83)$$

Со користење на

равенката на протокот: $G = \rho_1 v_1 A = \rho_2 v_2 A$ и равенката на состојбата: $\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1}$ и $\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2}$

равенката (2.83) може да се напише во обликот:

$$\frac{1}{2}\xi\frac{p_1 v_1^2}{RT_1} = p_1\left(1 + \frac{v_1^2}{RT_1}\right) - p_2\left(1 + \frac{v_2^2}{RT_2}\right)$$

односно:

$$\frac{\kappa}{2}\xi\frac{p_1 v_1^2}{a_1^2} = p_1\left(1 + \kappa\frac{v_1^2}{a_1^2}\right) - p_2\left(1 + \kappa\frac{v_2^2}{a_2^2}\right)$$

каде: $a_1^2 = \kappa RT_1$, $a_2^2 = \kappa RT_2$, означуваат брзини на звукот во посматраните проточни пресеци. По користење на изразите за Маховиот број во овие пресеци, се добива односот на притисоците пред и позади локалниот отпор:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1 + \kappa\left(1 - \frac{1}{2}\xi\right)M_1^2}{1 + \kappa M_2^2}. \qquad (2.84)$$

Одовде може да се пресмета падот на притисокот поради локалниот отпор во однос на износот на притисокот пред локалниот отпор :

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} = \frac{\kappa M_2^2 - \kappa\left(1 - \frac{1}{2}\xi\right)M_1^2}{1 + \kappa M_2^2} \qquad (2.85)$$

За **адијабатското струење** важи равенката:

$$i_t = i + \frac{v^2}{2} \qquad (2.86)$$

каде се i_t[J/kg], и i [J/kg] тотална и струјна енталпија на гасот, чии вредности се:

$$i_t = c_p \cdot T_t, \qquad i = c_p \cdot T, \qquad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1}R$$

Тотални услови: Услови во кои се наоѓа флуидот по смалување на неговата брзина на нула при адијабатски процес.

Значи, од равенката (2.86) се добива врската помеѓу тоталната и струјната температура на гасот во соодветниот проточен пресек на цевководот:

$$T_t = T\left(1+\frac{\kappa-1}{\kappa}\frac{v^2}{2RT}\right)$$

Ако се воведе и **Маховиот број**, се добива:

$$T_t = T\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M^2\right) \tag{2.87}$$

Од оваа равенка се пресметува температурата на струењето на гасот T во оној проточен пресек на цевководот во кој е познат Маховиот број, бидејќи тоталната температура T_t на агсот долж струјниот ток е константна и позната.

Со користење на равенката на адијабатата, може да се дојде до врската помеѓу тоталниот и струјниот притисок на гасот во одреден проточен пресек на цевководот. Таа врска гласи:

$$p_t = p\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \tag{2.88}$$

Потоа од равенката на протокот: $\frac{G}{A} = \rho v = \frac{pv}{RT} = \text{const}$, следува $\frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{p_2 v_2}{RT_2} = \text{const}.$

За односот на притисоците:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1 T_2}{v_2 T_1} = \frac{M_1 a_1 T_2}{M_2 a_2 T_1} = \frac{M_1\sqrt{\kappa RT_1}}{M_2\sqrt{\kappa RT_2}}\frac{T_2}{T_1} = \frac{M_1\sqrt{\kappa RT_2}}{M_2\sqrt{\kappa RT_1}}$$

Бидејќи T_t=const, равенката (2.87) дава

$$T_1\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^{\,2}\right) = T_2\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_2^{\,2}\right) \tag{2.89}$$

па односот на притисоците ќе биде:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{M_1}{M_2}\sqrt{\frac{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^{\,2}\right)}{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_2^{\,2}\right)}} \tag{2.90}$$

Со израмнување на изразите (2.84) и (2.90) се добива следната многу важна релација:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1+\kappa\left(1-\frac{1}{2}\xi\right)M_1^{\,2}}{1+\kappa M_2^{\,2}} = \frac{M_1}{M_2}\sqrt{\frac{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^{\,2}\right)}{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_2^{\,2}\right)}} \tag{2.91}$$

Од оваа равенка најчесто се пресметува Маховиот број M_1 пред локалниот отпор, бидејќи најчесто Маховиот број зад локалниот отпор е определен со некое барање. Потоа, од изразот (2.84) се наоѓа падот на притисокот, а од (2.89) падот на температурата поради локалниот отпор. Често пати врз база на изведените равенки се пресметуваат вредностите на сите величини при M_2=1 за различни гасови и истите се прикажуваат табеларно. На пример во Табела 2.5, за воздух се дадени параметрите на состојба при k=1,4, M_2=1.

Кога се во прашање отпори поради триење, диференцијалната равенка за определување на падот на притисокот гласи:

$$-\frac{dp}{\rho} = vdv + \frac{\lambda v^2}{2D}dx \tag{2.92}$$

Табела 2.5. Параметри на состојба за воздух при k=1,4, M_2=1

ξ	M_1	p_1/p_2	p_{t1}/p_1	p_{t1} [bar]	-
0,9	0,617	1,71	0,773	2,17	p_{t1} – тотален притисок во пресек 1 – 1
1,0	0,529	2,01	0,825	2,38	
2,0	0,447	2,40	0,872	2,70	
4,0	0,370	2,92	0,910	3,15	
6,0	0,320	3,38	0,931	3,56	
8,0	0,291	3,74	0,943	3,87	
10,0	0,270	4,03	0,951	4,15	

За да се изврши интегрирање потребна е трансформација на членот на левата страна. Најпрво се бара:

$$d\left(\frac{p}{\rho}\right)=\frac{\rho dp-pd\rho}{\rho^2}=\frac{dp}{\rho}-\frac{p}{\rho}\frac{d\rho}{\rho}$$

одовде:

$$\frac{dp}{\rho}=d\left(\frac{p}{\rho}\right)+\frac{p}{\rho}\frac{d\rho}{\rho}=RdT-RT\frac{dv}{v} \qquad (2.93)$$

бидејќи: од $p=\rho TR, \rightarrow \frac{p}{\rho}=RT, \rightarrow d\left(\frac{p}{\rho}\right)=RdT$, при R=const.

од $\rho v=G/A=\text{const}, \rightarrow \rho dv+vd\rho=0 \rightarrow \frac{d\rho}{\rho}=-\frac{dv}{v}$

Од равенката за енталпијата (2.86), следува:

$c_p dT+vdv=0$, односно $\frac{\kappa}{\kappa-1}RdT+vdv=0$ или $RdT=-\frac{\kappa-1}{\kappa}vdv$

По интегрирање во граници од T_1 до T и од v_1 до v следува:

$$RT=RT_1-\frac{\kappa-1}{2\kappa}\left(v^2-v_1^2\right)$$

Со замена на овие вредности во (2.93) го добива следниот облик:

$$-\frac{dp}{\rho}=\frac{\kappa-1}{\kappa}vdv+\left[RT_1-\frac{\kappa-1}{\kappa}\cdot\frac{v^2-v_1^2}{2}\right]\frac{dv}{v}$$

Сега, диференцијалната равенка (2.92) го добива следниот облик:

$$\lambda\frac{dx}{D}=2\left[RT_1\mp\frac{\kappa-1}{\kappa}\cdot\frac{v_1^2}{2}\right]\frac{dv}{v^2}-\frac{\kappa+1}{\kappa}\cdot\frac{dv}{v}$$

Решението на оваа равенка гласи:

$$\lambda\frac{\ell}{D}=\left[\frac{RT_1}{v_1^2}\mp\frac{\kappa-1}{2\kappa}\right]\left(1-\frac{v_1^2}{v_2^2}\right)+\frac{\kappa+1}{2\kappa}\ln\frac{v_1^2}{v_2^2}$$

Со посредство на изразот за Маховиот број претходната равенка гласи:

$$\lambda\frac{\ell}{D}=\frac{1}{\kappa}\left[\frac{1}{M_1^2}-\frac{1}{M_2^2}\right]+\frac{\kappa+1}{2\kappa}\ln\frac{M_1^2}{M_2^2}\frac{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_2^2\right)}{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2\right)} \qquad (2.94)$$

Со ℓ_* се означува онаа должина на цевката на чиј крај се постигнува брзина на струењето бројно еднаква со брзината на звукот т.е $M_2=1$, тогаш према равенката (2.94) ќе биде:

$$\lambda\frac{\ell_*}{D}=\frac{1}{\kappa}\left[\frac{1}{M_1^2}-1\right]+\frac{\kappa+1}{2\kappa}\ln\frac{\frac{\kappa+1}{2}M_1^2}{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2\right)} \tag{2.95}$$

Сите останати величини кои одговараат на крајниот пресек на цевката во кој се постигнува таква брзина на струење која е еднаква со брзината на звукот, ќе добијат ѕвезда како индекс. Во овој случај од порано изведените формули (2.89), (2.88) и (2.90) се добиваат следните односи:

$$\frac{T_1}{T_*}=\frac{\frac{\kappa+1}{2}}{1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2} \tag{2.96}$$

$$\frac{p_{t1}}{p_{t*}}=\frac{1}{M_1}\left(\frac{1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2}{\frac{\kappa+1}{2}}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \tag{2.97}$$

$$\frac{p_1}{p_*}=\frac{1}{M_1}\sqrt{\frac{\frac{\kappa+1}{2}}{1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2}} \tag{2.98}$$

Од равенката на протокот се добива:

$$\frac{v_1}{v_*}=\frac{\rho_*}{\rho_1}=M_1\sqrt{\frac{\frac{\kappa+1}{2}}{1+\frac{\kappa-1}{2}M_1^2}} \tag{2.99}$$

Равенките (2.96) до (2.99) се употребуваат при решавање на различни проблеми во техничката пракса кога е во прашање адијабатско струење на гасот, без оглед на тоа што првата равенка се однесува на струење со триење, а останатите на струење со локални отпори. Имено, кога ќе се изедначат едните и другите отпори, секогаш е можно да се определи некоја еквивалентна должина на цевката, која одговара на некој локален отпор, или пак коефициент на локален отпор кој одговара на некоја должина на цевката.

Врз основа на овие равенки се направени т.н. Фано табели кои даваат вредности за наведените односи и Маховиот број на почеток на цевката или пред локалниот отпор, за случај да се постигнува на крајот на цевката или зад локалниот отпор, брзината на гасот бројно еднаква со брзината на звукот. За двоатомни гасови и воздух ($\kappa=1,4$), а за останатите гасови и прегреана пара ($\kappa=1,3$). Во двата случаја претходно споменатите односи дадени се во таблици. Во нив изоставен е индексот 1, а индексот 2 заменет е со ѕвезда (*) бидејќи ($M_2=M_*=1$), и истите можат да се користат и за случај кога на крајот на цевката или зад локалниот отпор не се постигнува брзина на струење бројно еднаква со брзината на звукот. Имено, вредностите за M, T, p, p_t, v , секогаш се однесуваат на проточниот пресек кој се наоѓа пред оној проточен пресек во кој брзината на гасот ја достигнува брзината на звукот во услови кои владеат во тој пресек. Според тоа, кога е

$M_2=M_*=1$ таблиците се користат директно. Доволно е да се познава било која величина во пресекот кој се наоѓа пред пресекот во кој е постигната брзината на звукот и да се прочитаат од соодветната врста во таблицата останатите величини за тој проточен пресек.

Во случај кога $M_2\neq1$ табелите се користат индиректно. Пред да се помине на објаснување на користењето на таблицата и за случај $M_2\neq1$, ќе се изнесе една многу важна особина на адијабатското струење кое се јавува како последица на внатрешното триење.

За оваа цел диференцијалната равенка (2.92) ќе се трансформира во друг облик. Оваа равенка после множење со ρ и делење со p ќе биде:

$$-\frac{dp}{p}=\frac{\rho}{p}\left(vdv+\frac{\lambda v^2}{2D}dx\right)$$

Со замена: $a^2=\kappa RT;\qquad p=\rho RT;\qquad a^2=\kappa\frac{p}{\rho};\qquad \frac{\rho}{p}=\frac{\kappa}{a^2}$

се добива: $$-\frac{dp}{p}=\kappa\left(\frac{v}{a}\right)^2\frac{dv}{v}+\kappa\left(\frac{v}{a}\right)^2\frac{\lambda}{2D}dx$$

односно, после замената: $M=\frac{v}{a}$,

$$-\frac{dp}{p}=\kappa\cdot M^2\frac{dv}{v}+\frac{\kappa}{2}\lambda M^2\frac{dx}{D} \qquad (2.100)$$

Од равенката на континуитетот: од $\rho v=G/A=pv/RT=\text{const}$, се наоѓа

$$\frac{dp}{p}=\frac{dT}{T}-\frac{dv}{v}$$

Со замена во равенка (2.100), по нејзино средување се добива:

$$\frac{dT}{T}=\left(1-\kappa M^2\right)\frac{dv}{v}-\frac{\lambda\kappa M^2}{2D}dx \qquad (2.101)$$

Од равенка (2.101), потребно е да се елиминира односот dv/v. За таа цел се користи врската:

$$v=Ma=M\sqrt{\kappa RT}$$

од каде: $$\frac{dv}{v}=\frac{dM}{M}+\frac{1}{2}\frac{dT}{T}.$$

Со замена на вредноста dv/v во (2.101) после средување се добива:

$$\frac{dT}{T}=\frac{2\left(1-\kappa M^2\right)}{\left(1+\kappa M^2\right)}\frac{dM}{M}-\frac{\lambda\kappa M^2}{D(1+\kappa M^2)}dx \qquad (2.102)$$

На крајот од познатата врска: $T_t=T+\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M^2\right)=\text{const}$ следува:

$$\frac{dT}{T}=-(\kappa-1)\frac{MdM}{\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M^2\right)}$$

Па равенката (2.102) го добива следниот облик:

$$\frac{\lambda}{D}dx = \frac{.2\cdot(1-M^2)}{-\kappa M^3\left(1+\frac{\kappa-1}{2}M^2\right)}dM \qquad (2.103)$$

Левата страна на диференцијалната равенка (2.102) секогаш е позитивна како и именителот на нејзината десна страна. За да биде и нејзината десна страна позитивна мора да биде:

$$(1-M^2)dM > 0$$

За дозвучно струење (M<1) овој услов ќе биде исполнет кога $dM > 0$. Тоа значи дека дозвучното адијабатско струење се убрзува. За надзвучно струење ($M > 1$) мора да биде $dM < 0$, т.е надзвучната адијабатско струење се успорува. Двете струења тежат да ја достигнат брзината на звукот. Значи, топлината создадена поради внатрешното триење го забрзува дозвучното, а го успорува надзвучното адијабатско струење. Забрзувањето на дозвучното и успорувањето на надзвучното адијабатско струење не се одигрува со иста брзина. На пример: за случај на воздух (κ=1,4) потребна е должина на цевка од $\ell^*=230D$ за да дозвучното адијабатско струење од M=0,4 се забрза до брзината на звукот, односно $\ell^*=18D$ за да надзвучното адијабатско струење на воздухот од M=1,6 би се успорило до брзината на звукот. Во двата случаеви пресметките се вршени со кеофициент на триење $\lambda=0,01$.

2.4.5.1. Користење на Fanno таблицата за случај $M_2 \neq 1$:

Од таблицата се читаат односите T_2/T^*; p_2/p^*;...;$\lambda(\ell^*/D)$. Бидејќи, сега може да се најдат вредностите на изразот:

$$\lambda\frac{\ell_{1-*}}{D} = \lambda\frac{\ell_{1-2}}{D} + \lambda\frac{\ell_{2-*}}{D}$$

тогаш, според него, од табелата можат да се најдат останатите вредности: M_1; T_1/T^*; P_1/P^*;....

Сега на пример: ако е позната состојбата на гасот на почетокот на цевката или пред локалниот отпор, тогаш неговата состојба на крајот на цевката или позади локалниот отпор се наоѓа преку врските:

$$T_2 = \frac{\frac{T_2}{T_*}}{\frac{T_1}{T_*}}T_1; \qquad p_2 = \frac{\frac{p_2}{p_*}}{\frac{p_1}{p_*}}p_1$$

Кога е позната состојбата на гасот на крајот на цевката или позади локалниот отпор, тогаш неговата состојба на почетокот на цевката или пред локалниот отпор се наоѓа преку врските:

$$T_1 = \frac{\frac{T_1}{T_*}}{\frac{T_2}{T_*}}T_2; \qquad p = \frac{\frac{p_1}{p_*}}{\frac{p_2}{p_*}}p_2$$

2.5. Определување на погонските карактеристики на компресорот

За транспорт на гасот низ цевководите се употребуваат клипни компресори и турбокомпресори. Клипните компресори се користат кога е потребно да се остварат поголеми притисоци на гасот на почетокот на гасоводот, а турбокомпресорите за помали притисоци, а поголеми протоци. Компресорите се покренуваат со електромотор или гасен мотор.

Моќноста за погон на турбокомпресорот се определува од равенката:

$$P = \frac{GY}{1000\eta_k} \text{ [kW]}$$

каде:

$M = G$ (kg/s) – масен проток на гас, а

Y (J/kg) – единечна струјна работа на компресорот која изнесува:

$$Y = Z_m \cdot Y_{id}$$

Z_m – средна вредност на коефициент на стисливост.

Y_{id} – единечна работа на компресорот кога тој би работел со идеален гас

$$Z_m = \frac{1}{2}(Z_{vlez} - Z_{izlez}),$$

за **изотермична промена на сосотојбата,**

$$Y_{id} = RT \ln \frac{p_{izlez}}{p_{vlez}}$$

и за **адијабатска промена на состојба на гасот**

$$Y_{id} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_v \left[\left(\frac{p_{izlez}}{p_{vlez}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

каде:

p_i (N/m^3) – притисок на излез на гасот во компресорот;

p_v (N/m^3) – притисок на влез на гасот во компресорот;

T_v (K) – температура на влез на компресорот.

За случај на рекомпресија важи: $p_i = p_1$, а $p_v = p_2$,
каде p_1 и p_2 се притисоци на гасот на почетокот и на крајот на делницата.

Коефициентот на полезно дејство зависи од повеќе фактори и за Кларк-овите компресори е во функција од степенот на компресија $\Psi_k = p_i/p_v$ или рекомпресија $\Psi_k = p_1/p_2$, и е даден во таблица:

Ψ_k	1,20	1,50	2,00	3,00	5,00	8,00	10,00
η_k	0,52	0,64	0,74	0,81	0,82	0,79	0,72