

HENRYK WALDEN

**NIEIZOTERMICZNY PRZEPLYW GAZU
W GAZOCIĄGACH DALEKOSIĘŻNYCH**

**ROZPRAWY
INŻYNIERSKIE
CCVI**

TOM IX • ZESZYT 4 • ROK 1961

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	591
2. Rozkład temperatury gazu wzdłuż gazociągów dalekosiężnych	592
3. Hydrauliczne obliczenie nieizotermicznego przepływu gazu w gazociągach dalekosiężnych	595
4. Uwagi ogólne	597

1. Wstęp

Znane w hydraulice wzory do obliczeń gazociągów dalekosiężnych wyprowadzono przy założeniu izotermicznego przepływu gazu.

W pracy [1] otrzymano dla tego rodzaju przepływu wzór

$$(1) \quad Q = \frac{F}{\gamma} \left[\frac{\frac{g}{2Z_{sr}RT} (P_1^2 - P_2^2)}{\frac{\lambda L}{2D} + \ln \frac{P_1}{P_2}} \right]^{0,5},$$

gdzie Q oznacza wydatek objętościowy w m^3/sek , F pole przekroju poprzecznego gazociągu w m^2 , γ ciężar właściwy gazu w kG/m^3 , g przyspieszenie ziemskie w m/sek^2 , P_1 i P_2 odpowiednio ciśnienie początkowe i końcowe gazociągu w kG/m^2 , L długość gazociągu w m , $T = \text{const}$ stałą temperaturę bezwzględną gazu w $^\circ\text{K}$, Z_{sr} średnią wartość współczynnika ściśliwości gazu, R stałą gazową, D wewnętrzną średnicę gazociągu w m oraz λ współczynnik oporów liniowych.

We wzorze (1) $\ln(P_1/P_2)$ jest wielkością bardzo małą w porównaniu z $\lambda L/2D$. Przyjmując np. wartości $P_1 = 50$ at, $P_2 = 5$ at, $\lambda = 0,01$, $L = 50,000$ m, $D = 0,4$ m, otrzymamy

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = 2,3, \quad \lambda = \frac{0,01 \cdot 50,000}{0,8} = 625.$$

Z przykładu powyższego wynika, że pierwszy wyraz stanowi zaledwie 0,4% drugiego. W związku z tym pomijając $\ln(P_1/P_2)$ otrzymamy po przekształceniu wzoru (1) następującą zależność:

$$(2) \quad P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{\gamma Q}{F} \right)^2 \frac{\lambda L Z_{sr} RT}{gD}.$$

Założenie, że przepływ gazu jest izotermiczny, znacznie upraszcza wyprowadzenie wzoru.

W rzeczywistości w gazociągach dalekosiężnych zachodzi nieizotermiczny proces przepływu gazu, który powinien być uwzględniony w precyzyjnych obliczeniach gazociągów, zwłaszcza w przypadku dużych zmian temperatury gazu. Gaz ziemny doprowadzony jest do gazociągów dalekosiężnych ze złóż gazowych pod wysokim ciśnieniem lub sprężony za pomocą kompresorów. Temperatura sprężonego gazu na wlocie jest najwyższa, a następnie maleje w miarę rozprężania się gazu oraz

wymiany ciepła z otaczającym gazociąg gruntem osiągając na końcowym odcinku gazociągu stałą wartość zbliżoną do temperatury gruntu.

W pracy rozważane jest zagadnienie obliczenia nieizotermicznego przepływu w gazociągach dalekosiężnych dla dużych liczb Reynoldsa w strefie kwadratowej zależności oporów.

2. Rozkład temperatury gazu wzdłuż gazociągów dalekosiężnych

Krzywa rozkładu temperatury gazu da się podzielić na dwa odcinki: pierwszy, w którym zachodzi nieizotermiczny przepływ gazu i drugi o charakterze przepływu izotermicznego. Długość drugiego odcinka uzależniona jest przede wszystkim od temperatury początkowej gazu i gruntu oraz od długości gazociągu. W pewnych warunkach odcinek ten zanika zupełnie i wzdłuż całego gazociągu ustala się przepływ nieizotermiczny. Różnica temperatury między przepływającym z dużymi prędkościami gazem a ścianką gazociągu jest bardzo mała, w związku z czym można pominąć wpływ ścianki na przenikanie ciepła do gruntu.

Zmianę temperatury gazu oblicza się z następującego bilansu ciepła:

$$(3) \quad C_p \gamma Q dT = -k\pi D(T - T_0) dx.$$

Stąd mamy

$$\frac{dT}{T - T_0} = -\frac{k\pi D}{C_p \gamma Q} dx.$$

Całkując prawą stronę w granicach od zera do x oraz lewą odpowiednio od T_1 do T otrzymamy

$$\ln \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = -\frac{k\pi D}{C_p \gamma Q} x.$$

Na zmianę temperatury wzdłuż gazociągu mamy więc wzór

$$(4) \quad T = T_0 + (T_1 - T_0)e^{-ax},$$

gdzie

$$(5) \quad a = \frac{k\pi D}{C_p \gamma Q}.$$

Przyjęliśmy we wzorach powyższych oznaczenia: T , T_1 oraz T_0 bezwzględne temperatury gazu odpowiednio w zależności od odległości x , w przekroju początkowym gazociągu oraz gruntu w $^{\circ}K$, k współczynnik przenikania ciepła w $\text{kcal/m}^2 \text{ h } 1^{\circ}C$ i c_p ciepło właściwe gazu w $\text{cal/kg } 1^{\circ}C$.

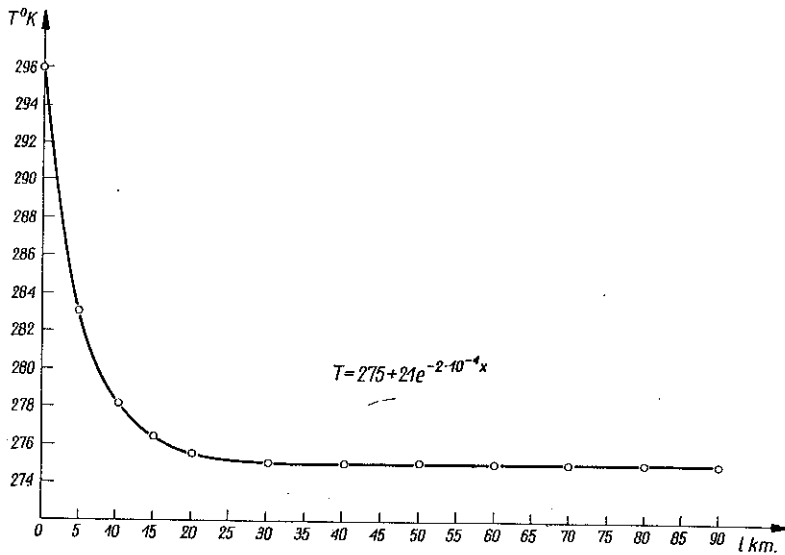
Na podstawie danych doświadczalnych [2] otrzymano następujące wartości współczynnika przenikania ciepła:

Tablica 1

L.p.	Rodzaj gruntu	k [$\text{kcal/m}^2 \text{ h } 1^{\circ}C$]
1	suchy piasek	1,0
2	wilgotna glina	1,25
3	wilgotny piasek	3,0

Ze wzoru (4) obliczono zmianę temperatury gazu ziemnego wzdłuż gazociągów Mościce-Kraków oraz Gliniczek-Pilzno na podstawie danych wziętych z pracy [3].

Na rys. 1 podano wykres temperatury w gazociągu Mościce-Kraków, którego wydajność $Q = 8,670 \text{ m}^3/\text{h}$, ciśnienie początkowe i końcowe $P_1 = 11,7 \text{ kG/cm}^2$, $P_2 = 6,7 \text{ kG/cm}^2$, temperatura początkowa $T_1 = 296^\circ\text{K}$, temperatura gruntu $T_0 = 275^\circ\text{K}$, długość $L = 88,600 \text{ m}$, średnica wewnętrzna $D = 0,25 \text{ m}$, ciężar właściwy gazu $\gamma = 0,74 \text{ kG/m}^3$, $c_p = 0,55 \text{ kcal/kG } 1^\circ\text{C}$ oraz $k = 1,2 \text{ kcal/m}^2\text{h } 1^\circ\text{C}$. Analogicznie na rys. 2 przedstawiono krzywą zmiany temperatury wzdłuż gazociągu Gliniczek-Pilzno przyjmując następujące dane: $Q = 18,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $P_1 = 18,6 \text{ kG/cm}^2$, $P_2 = 14,0 \text{ kG/cm}^2$, $T_1 = 298^\circ\text{K}$, $T_0 = 276^\circ\text{K}$, $L = 39,000 \text{ m}$, $D = 0,25 \text{ m}$, $\gamma = 0,80 \text{ kG/m}^3$, $c_p = 0,55 \text{ kcal/kG } 1^\circ\text{C}$, $k = 1,2 \text{ kcal/m}^2\text{h } 1^\circ\text{C}$.



Rys. 1

Z powyższych danych otrzymano następujące wzory:

Wzór pierwszy

$$T = 275 + 21e^{-2 \cdot 10^{-4} x}$$

Wzorowi temu odpowiada tablica 2 (wykres na rys. 1).

Tablica 2

x km	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90
T K	296	283	278	276,4	275,4	275	275	275	275	275	275	275

Wzór drugi

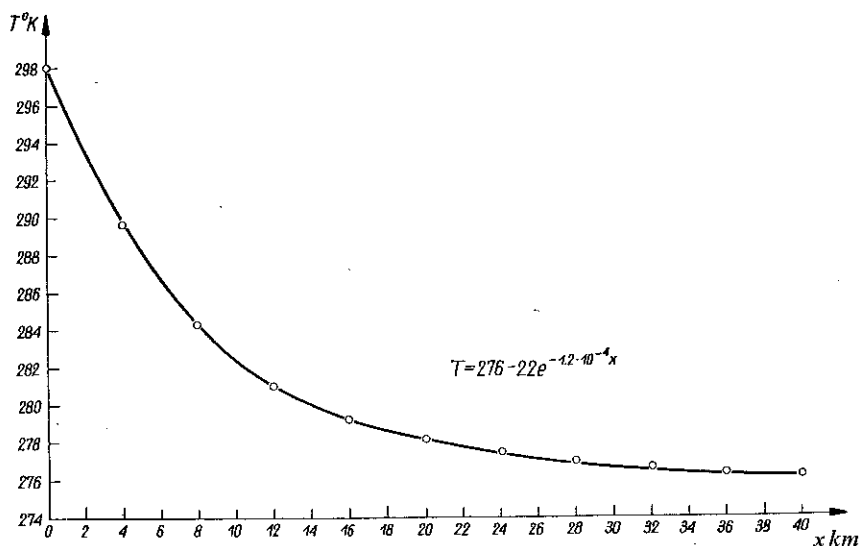
$$T = 276 + 22e^{-1,2 \cdot 10^{-4} x}$$

Wzorowi temu odpowiada tablica 3 (wykres na rys. 2).

Tablica 3

x km	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
T K	298	289,6	284,4	281,2	279,2	278	277,2	277,0	276,5	276,3	276,2

Wykresy zmian temperatury w obu gazociągach różnią się między sobą w sposób dosyć istotny. W gazociągu Mościce-Kraków nastąpił szybki spadek temperatury gazu od $T_1 = 296^\circ\text{K}$ do $T_2 = 275,4^\circ\text{K}$ na odcinku początkowym stanowiącym około 1/4 długości gazociągu. Na pozostałej długości gazociągu temperatura gazu wyrównała się z temperaturą gruntu utrzymując stałą wartość. W gazociągu Gliniczek-Pilzno ma miejsce bardziej powolny spadek temperatury od $T_1 = 298^\circ\text{K}$ w przekroju początkowym do $T_2 = 276,2^\circ\text{K}$ na wylocie gazociągu.



Rys. 2

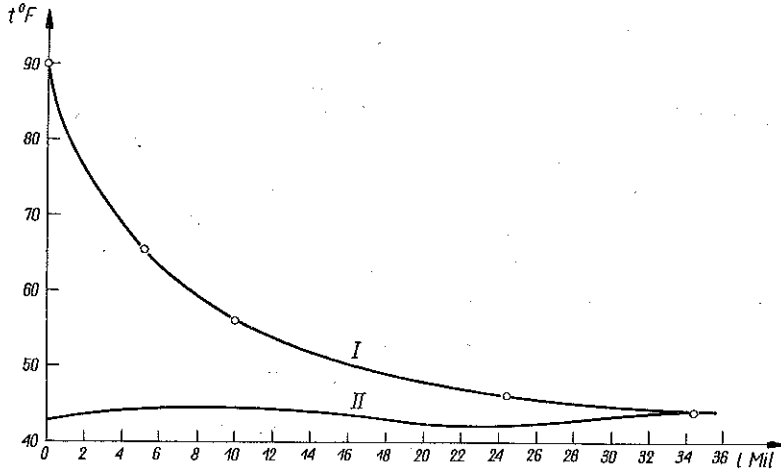
DEATON i FROST, [4], przeprowadzili szereg doświadczeń w celu zbadania zmian temperatur zachodzących zarówno w przepływającym gazie, jak i w gruntach wzdłuż gazociągu dalekosiężnego o średnicy 22", przechodzącego przez trzy stany USA: Teksas, Nowy Meksyk i Colorado. Krzywe doświadczalne zmiany temperatur gazu i gruntu podano na rys. 3. Wykres temperatury gazu wzdłuż gazociągu można podzielić na 2 odcinki:

- 1) nieizotermiczny od 0 do 32,8 mil; na tym odcinku temperatura maleje od 87°F do 44°F ;
- 2) izotermiczny od 32,8 mil do końca gazociągu utrzymuje się stała i jednakowa temperatura gazu i gruntu $t = 44^\circ\text{F}$.

Na podstawie analizy ciągłych pomiarów temperatury atmosfery, gruntu na różnych głębokościach i gazu ziemnego wzdłuż gazociągu autorzy wysnuli następujące wnioski:

1) temperatura gazu w okresie miesięcznym zmienia się nieznacznie pomimo jednoczesnych dużych wahań temperatury atmosfery,

2) zmiana temperatury gazu w gazociągu uzależniona jest przede wszystkim od pory roku,



Rys. 3

3) miesięczne wahania temperatury gruntu zanikają w niżej położonych warstwach,

4) w chłodnych miesiącach roku od października do kwietnia temperatura gruntu wzrasta wraz z głębokością, natomiast w pozostałych ciepłych miesiącach od maja do września maleje,

5) najwyższa temperatura gruntu na głębokości poniżej strefy zamarzania przypada we wrześniu, najniższa w marcu.

3. Hydrauliczne obliczenia nieizotermicznego przepływu gazu w gazociągach dalekosiężnych

W przypadku nieizotermicznego i ustalonego przepływu temperatura gazu jest według wzoru (4) wykładniczą funkcją odległości od przekroju początkowego gazociągu.

Obliczenie nieizotermicznego przepływu gazu sprowadza się do rozwiązania następującego układu równań:

1) równanie Bernoulliego

$$(6) \quad v dp + \frac{w dw}{g} + dh = 0;$$

2) równanie Darcy-Weisbacha

$$(7) \quad dh = \lambda \frac{w^2}{2gD} dx;$$

3) równanie ciągłości dla przepływu ustalonego

$$(8) \quad \gamma w = \frac{w}{v} = G = \frac{\gamma Q}{F};$$

4) równanie stanu gazu

$$(9) \quad pv = ZRT.$$

W równaniach przyjęto następujące oznaczenia: v jest objętością właściwą gazu w m^3/kG , w średnią prędkością w przekroju przewodu w m/sek , h wysokością strat liniowych w m , G wydatkiem ciężarowym gazu na jednostkę powierzchni przekroju $kG/m^2 \text{ sek}$.

Z równania (8) znajdziemy

$$w = Gv, \quad dw = Gdv.$$

Podstawiając powyższe do równania (6) otrzymamy

$$(10) \quad v dp + \frac{G^2 v dv}{g} + \frac{\lambda G^2 v^2 dx}{2gD} = 0.$$

Mnożąc obie strony przez P/v i uwzględniając wzór (9) mamy

$$(11) \quad P dp + \frac{G^2 ZRT}{g} \frac{dv}{v} + \frac{\lambda G^2 ZRT}{2GD} dx = 0.$$

Przepływy w gazociągach dalekosieżnych charakteryzują się przeważnie dużymi liczbami Reynoldsa w strefie kwadratowej zależności oporów, gdzie współczynnik oporów λ nie zależy od liczby R lecz tylko od chropowatości względnej ε . W danym przypadku można zastosować otrzymany w pracy [1] wzór empiryczny w postaci

$$(12) \quad \lambda = 0,0587 \varepsilon^{0,1858}.$$

Wzór (12) według tablicy porównawczej 4 jest zbliżony do znanego wzoru Nikuradsego dla rur chropowatych w strefie przepływu burzliwego

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \log \frac{1}{\varepsilon}\right)^2}$$

w zakresie praktycznie istniejących wartości chropowatości względnej ε od 0,0001 do 0,001.

Przy założeniu niedużych zmian ciśnienia w porównaniu ze zmianami temperatury w gazociągu można przyjąć

$$\frac{dv}{v} \approx \frac{dT}{T}.$$

Tablica. 4 Porównanie wartości λ w strefie kwadratowej zależności oporów

Lp.	Chropowatość względna $\varepsilon = \frac{2e}{D}$	Wzór Nikuradsego $\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2\log\frac{1}{\varepsilon}\right)^2}$	Wzór autora $\lambda = 0,0587e^{0,185\varepsilon}$
1	0,0001	0,01054	0,01060
2	0,0002	0,01197	0,01200
3	0,0003	0,01295	0,01300
4	0,0004	0,01375	0,01372
5	0,0005	0,01437	0,01430
6	0,0006	0,01493	0,01480
7	0,0007	0,01543	0,01523
8	0,0008	0,01588	0,01560
9	0,0009	0,01630	0,01600
10	0,001	0,01670	0,01630

Równanie (11) przyjmie postać

$$(13) \quad p dp + \frac{G^2 Z R}{g} dT = - \frac{\lambda G^2 Z R T}{2g D} dx.$$

Uwzględniając zależność (4) otrzymamy

$$(14) \quad p dp + \frac{G^2 Z R}{g} dT = - \frac{\lambda G^2 Z R}{2g D} [T_0 + (T_1 - T_0)e^{-\alpha x}] dx.$$

Przyjmując, że p , T oraz x są funkcjami zmiennej pomocniczej t , możemy związek (14) obustronnie scałkować względem t . Jeśli następnie obliczyć otrzymane w ten sposób całki w granicach od $t = 0$ do $t = t_1$, którym to wartościom odpowiadają odpowiednio liczby P_1 i P_2 , T_1 i T_2 oraz 0 i L , to znajdziemy

$$(15) \quad P_2^2 - P_1^2 + \frac{2G^2 Z_{sr} R}{g} (T_2 - T_1) = - \frac{\lambda G^2 Z_{sr} R}{g D} \left(T_0 L + \frac{T_1 - T_0}{a} - \frac{T_1 - T_0}{a} e^{-aL} \right),$$

a stąd

$$(16) \quad P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{\gamma Q}{F} \right)^2 \frac{Z_{sr} R}{g} \left[\frac{\lambda}{D} \left(T_0 L + \frac{T_1 - T_0}{a} - \frac{T_1 - T_0}{a} e^{-aL} \right) - 2(T_1 - T_2) \right].$$

Łatwo zauważyć, że wzór (16) dla nieizotermicznego przepływu sprowadza się po przyjęciu stałej temperatury $T = T_1 = T_2 = T_0 = \text{const}$ do wzoru (2) dla izotermicznego przepływu gazu.

4. Uwagi ogólne

Szeroko stosowany do hydraulicznych obliczeń gazociągów dalekosiężnych wzór (2) wynika jako szczególny przypadek ogólniejszego wzoru (16), który nadaje się do obliczenia tak izotermicznych jak i nieizotermicznych przepływów gazu.

Przed wyborem wzoru (2) lub (16) należy zbadać zmianę temperatury gazu wzdłuż gazociągu. Jeżeli temperatura gazu zmienia się wzdłuż całego gazociągu (jak np. w gazociągu Gliniczek-Pilzno), przyjmujemy do obliczeń wzór (16).

W ogólnym przypadku, gdy krzywa zmiany temperatury wzdłuż gazociągu daleko-siężnego składa się z części nieizotermicznej i izotermicznej (jak w przypadku gazociągu Mościce-Kraków), to stosujemy dla pierwszej części wzór (16) a dla drugiej wzór (2).

Literatura cytowana w tekście

[1] H. WALDEN. *Nowe wzory do obliczeń gazociągów dalekosieżnych*, Gaz. Woda. Technika Sanitarna, 3, 1954.

[2] А. Смирнов, *Транспорт и хранение газа*, Гостоптехиздат, Москва 1950.

[3] H. WALDEN, *Badanie współczynnika oporów hydraulicznych w rurach technicznych w zakresie przepływu burzliwego*, Zeszyty Naukowe P.W., Budownictwo, 14, 1960.

[4] DEATON, FROST, *Temperatures of Natural Gas Pipe Lines and Seasonal Variations of Underground Temperatures*, U. S. Bureau of Mines Report of Investigations, 3590, 1941.

Р е з ю м е

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

В работе рассматривается задача о неизотермическом течении газа в магистральных газопроводах при квадратичном законе сопротивлений.

В практике расчетов магистральных трубопроводов предполагается изотермическое течение газа. Это предположение может, в известных условиях, уменьшить точность выведенных формул.

На основании исследований течения газа констатируется, что в известных условиях вдоль всего трубопровода изменяется температура. В остальных случаях кривая температуры состоит из неизотермической и изотермической кривой.

Выводится обобщенная формула для определения неизотермического потока в магистральных трубопроводах.

Частным случаем этой формулы при предположении $T = \text{const}$ является известная в гидравлике зависимость для изотермического течения газа.

S u m m a r y

NON-ISOTHERMAL GAS FLOW IN LONG RANGE GAS LINES

The above problem of gas flow is considered in the range of quadratic resistance.

In engineering computations, isothermal gas flow is assumed for long range gas lines. This assumption may impair in some cases the accuracy of the equations.

It has been found experimentally that under certain conditions there is a temperature variability along the entire gas line. In other cases the temperature curve is composed of isothermal and non-isothermal segments.

A generalized equation is derived for the computation of non-isothermal flow in long range gas lines.

For $T = \text{const}$ we obtain, as a special case, the known relation for the isothermal flow.

ZAKŁAD MECHANIKI CIECZY I GAZÓW
IPPT PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 31 marca 1961r.