

МАГИСТРАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Лекция №9



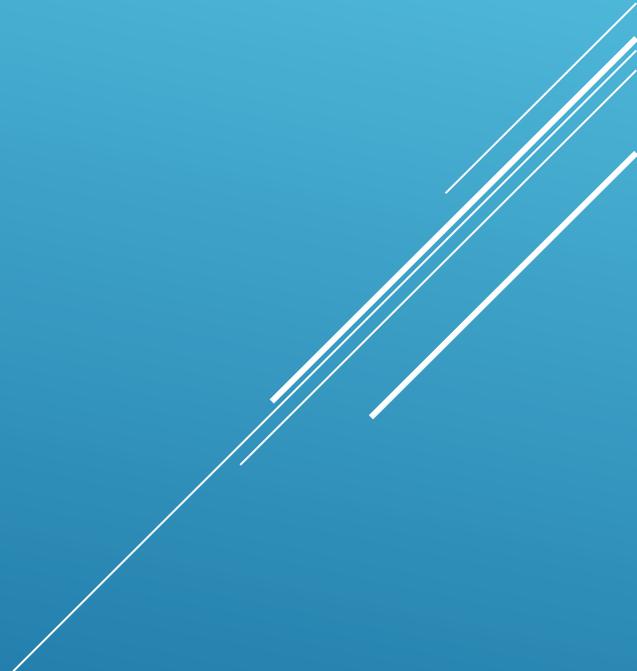
ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ ГАЗА

Магистральные трубопроводы.

Лекция №9



РАСХОД ГАЗА В ГАЗОПРОВОДЕ



При установившемся режиме работы газопровода (без отборов и подкачек) массовый расход газа в любом его сечении остается неизменным, то есть

$$G = F_1 \cdot \rho_{\Gamma_1} \cdot w_1 = \dots = F_n \cdot \rho_{\Gamma_n} \cdot w_n = F \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w = idem, \quad (4.16)$$

где

F — площадь живого сечения газопровода; ρ_{Γ} w — соответственно плотность и средняя скорость движения газа в рассматриваемом сечении; $1\dots n$ — индексы соответственно 1-го и n -го произвольных сечений.

Поскольку газ является сжимаемой средой, то с удалением от компрессорной станции (и соответствующим падением давления) его плотность уменьшается. Это приводит к возрастанию скорости движения газа. Поэтому для газового потока уравнение баланса удельной энергии можно записать только в дифференциальной форме

$$\frac{dP}{\rho_{\Gamma}} + \frac{d(w^2)}{2} + g \cdot dz + g \cdot dh_{\tau} = 0. \quad (4.17)$$

В условиях магистрального газопровода в большинстве случаев можно пренебречь силами инерции $d(w^2)/2$ и разностью геодезических отметок $g \cdot dz$.

Тогда уравнение энергии (4.17) можно переписать в виде

$$\frac{dP}{\rho_{\Gamma}} = -g \cdot dh_{\tau} \quad (4.18)$$

для решения уравнения (4.18) в случае изотермического установившегося движения газа воспользуемся уравнением СОСТОЯНИЯ

$$\frac{P}{\rho_{\Gamma}} = Z \cdot R \cdot T, \quad (4.19)$$

уравнением неразрывности

$$G = F \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho_{\Gamma} \cdot w = idem, \quad (4.20)$$

уравнением Дарси–Вейсбаха

$$dh_{\tau} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g} \cdot dx, \quad (4.21)$$

где T — температура газа; x — продольная координата для произвольного сечения; D — внутренний диаметр газопровода.

Умножив левую и правую части (4.18) на ρ_r^2 и выразив dh_r с помощью уравнения Дарси—Вейсбаха (4.21), получим

$$\rho_r \cdot dP = -g \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{\rho_r^2 \cdot w^2}{2 \cdot g} \cdot dx = -\frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot (\rho_r \cdot w)^2 \cdot dx. \quad (4.22)$$

Выразим значение ρ_r в левой части (4.22) из уравнения состояния (4.19), а произведение $\rho_r \cdot w$ из уравнения неразрывности

$$\rho_r = \frac{P}{Z \cdot R \cdot T}; \quad \rho_r \cdot w = \frac{G}{F}.$$

В результате выражение (4.22) можно представить в виде

$$\frac{P}{Z \cdot R \cdot T} dP = -\frac{\lambda}{2 \cdot D} \cdot \frac{G^2}{F^2} dx \quad (4.23)$$

ИЛИ

$$2P \cdot dP = -\frac{\lambda}{D} \cdot \frac{G^2}{F^2} (Z \cdot R \cdot T) \cdot dx. \quad (4.24)$$

Интегрируя левую часть уравнения (4.24) от P_H до P_K , а правую от 0 до ℓ и освобождаясь от минуса, получим

$$P^2 \Big|_{P_K}^{P_H} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{G^2}{F^2} \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot x \Big|_0^{\ell_{КС}} . \quad (4.25)$$

или

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{G^2}{F^2} \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{КС} \quad (4.26)$$

где P_H, P_K — соответственно давление в начале и конце участка газопровода; $\ell_{КС}$ — длина линейного участка газопровода между компрессорными станциями.

В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления λ зависит от режима течения (параметра Рейнольдса) и шероховатости внутренней поверхности трубы. Шероховатость трубы для конкретного газопровода — вполне определенная величина. Значение параметра Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{4 Q}{\pi \cdot D \cdot v_{\Gamma}} = \frac{4 Q \cdot \rho_{\Gamma}}{\pi \cdot D \cdot \mu_{\Gamma}} = \frac{4 G}{\pi \cdot D \cdot \mu_{\Gamma}}, \quad (4.27)$$

где Q , G — соответственно объемная и массовая производительность газопровода.

Так как динамическая вязкость μ зависит от температуры и практически не зависит от давления, то при установившемся движении газа величина параметра Re , а следовательно, и значение коэффициента гидравлического сопротивления λ по длине газопровода остаются практически неизменными. Например, для газопровода диаметром $D = 1,39$ м при перекачке газа с относительной плотностью по воздуху $\Delta = 0,7$ значение коэффициента гидравлического сопротивления изменяется в пределах 1 %.

Если известны давления в начале и конце участка газопровода, уравнение (4.26) можно решить относительно массового расхода газа

$$G = F \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_K^2) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{КС}}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_K^2) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{КС}}} \quad (4.28)$$

В практических расчетах газопроводов используется понятие коммерческого расхода, то есть объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям (для магистральных газопроводов это понятие опускается как само собой разумеющееся). На основании уравнения состояния, а также с учетом, что $\Delta = \rho_{\Gamma} / \rho_{\text{возд}} = R_{\text{возд}} / R$, коммерческий расход составит

$$Q = \frac{G}{\rho_{\text{СТ}}} = \frac{G \cdot Z_{\text{СТ}} \cdot R \cdot T_{\text{СТ}}}{P_{\text{СТ}}} = \frac{G \cdot Z_{\text{СТ}} \cdot R_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{СТ}}}{\Delta \cdot P_{\text{СТ}}} = \frac{G \cdot R_{\text{ВОЗД}} \cdot T_{\text{СТ}}}{\Delta \cdot P_{\text{СТ}}}, \quad (4.29)$$

где $\rho_{\text{СТ}}$ — плотность газа при стандартных условиях; $Z_{\text{СТ}}$ — коэффициент сжимаемости газа при стандартных условиях, $Z_{\text{СТ}} = 1$; $R_{\text{ВОЗД}}$ — газовая постоянная воздуха.

С учетом (4.29) значение коммерческого расхода определяется из выражения

$$Q = K \cdot D^{2.5} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \cdot Z \cdot \Delta \cdot T \cdot \ell_{КС}}}, \quad (4.30)$$

где K — коэффициент, зависящий от размерностей величин, входящих в выражение (4.30), и равный

$$K = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{T_{СТ}}{P_{СТ}} \cdot \sqrt{R_{ВОЗД}}. \quad (4.31)$$

При использовании смешанной системы единиц D (м), T (К), P (МПа), L (км) и Q (млн м³/сут) значение коэффициента K составляет $K = 105,087$.

ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ГАЗОПРОВОДА



Рассмотрим участок газопровода протяженностью $l_{КС}$, с давлением в начале и конце участка соответственно равными P_H и P_K (рис 4.3)

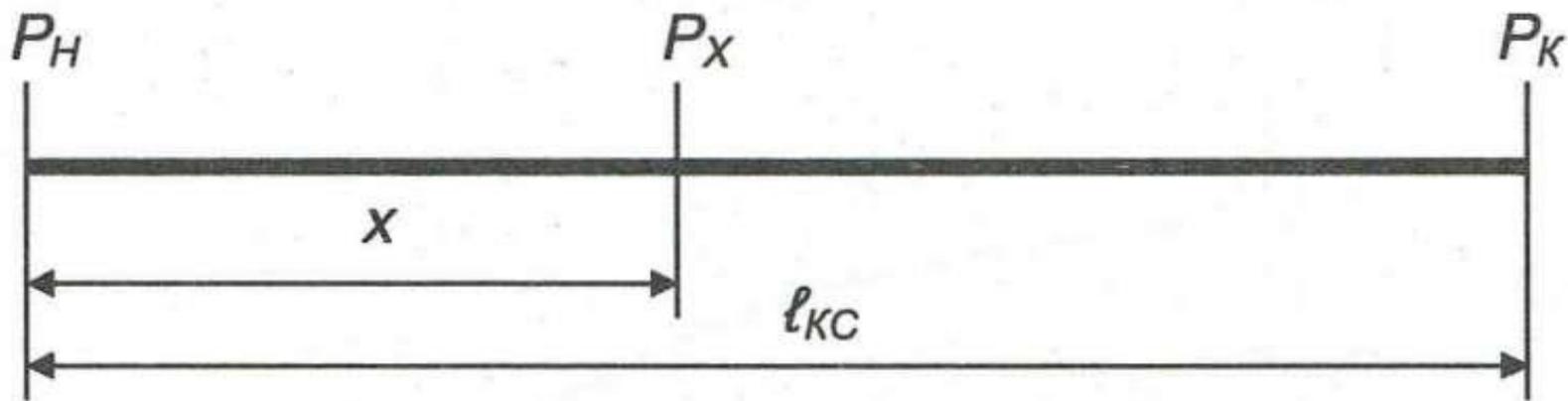


Рис. 4.3. Расчетная схема газопровода

Если газопровод не имеет сбросов и подкачек, то массовый расход газа в нем неизменен. На этом основании пренебрегая различием коэффициента сжимаемости Z на участках x и $(\ell_{КС}-x)$, можно записать

$$G = F \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_x^2) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot x}} = F \cdot \sqrt{\frac{(P_x^2 - P_K^2) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot (\ell_{КС} - x)}}, \quad (4.32)$$

откуда следует

$$\frac{P_H^2 - P_x^2}{x} = \frac{P_x^2 - P_K^2}{\ell_{КС} - x}, \quad (4.33)$$

где x, P_x — соответственно расстояние от компрессорной станции до произвольного сечения и давление в этом сечении ($x < \ell_{КС}$).

Освобождаясь от знаменателей и решая (4.33) относительно P_x получим формулу распределения давления по длине газопровода

$$P_x = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \frac{x}{l_{КС}}}. \quad (4.34)$$

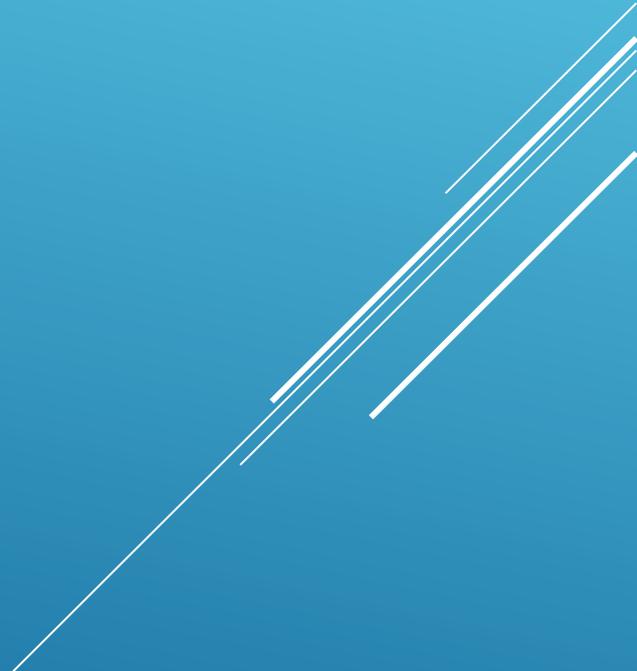
Зависимость (4.34) является уравнением параболы (рис. 4.4). По мере удаления от компрессорной станции скорость падения давления возрастает. Это объясняется тем, что с понижением давления уменьшается плотность газа.

В соответствии с уравнением неразрывности, при уменьшении плотности газа увеличивается скорость его движения, то есть возрастают потери на трение и, следовательно, возрастает гидравлический уклон. Чем больше давление газа на входе в следующую КС, тем меньше изменяется величина гидравлического уклона по длине рассматриваемого перегона. Тем меньше энергозатрат требуется на восстановление давления газа от P_K до P_H .



С увеличением расстояния между компрессорными станциями возрастают удельные потери давления, а значит, и потери энергии на компримирование (сжатие) газа. Следовательно, для уменьшения удельных энергозатрат на перекачку газа - одной из основных статей эксплуатационных расходов на газопроводах - целесообразно работать с высокими давлениями на входе КС. Несмотря на то что при этом возрастает количество компрессорных станций, экономия энергозатрат будет весьма существенной.

СРЕДНЕЕ ДАВЛЕНИЕ В ГАЗОПРОВОДЕ



Среднее давление газа в газопроводе необходимо для определения его физических характеристик, а также для нахождения количества газа, заключенного в объеме трубопровода.

Поскольку изменение давления по длине газопровода происходит по закону параболы (рис. 4.5), то среднее давление необходимо определять как его среднеинтегральное значение

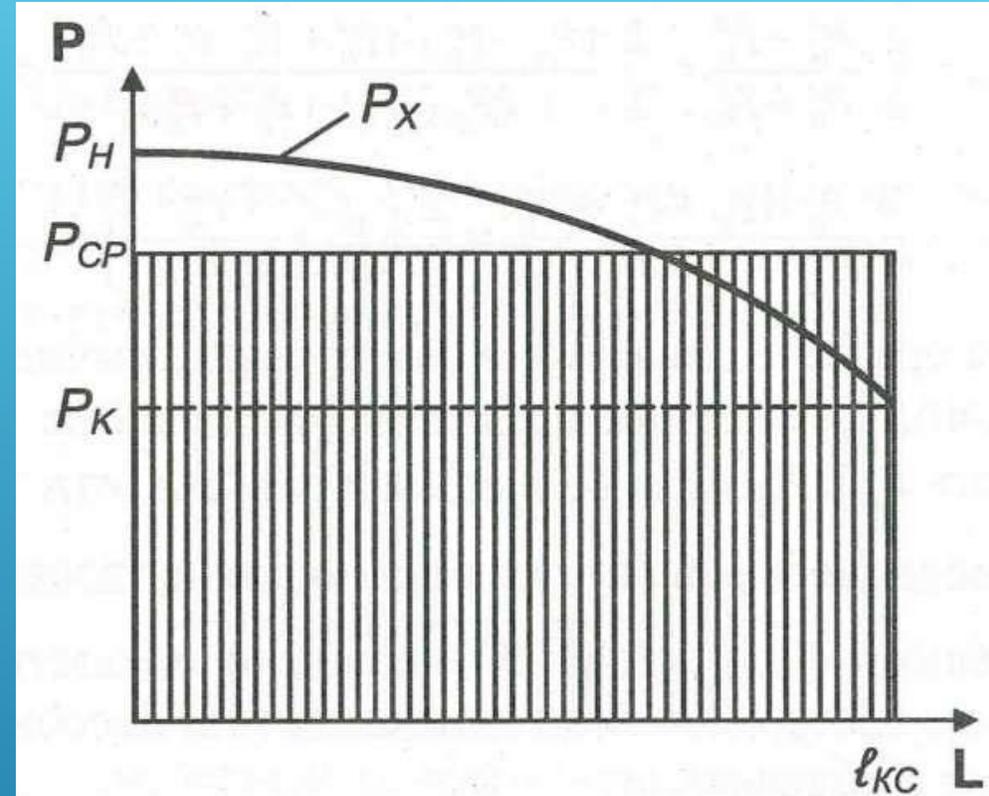


Рис. 4.5. Среднее давление в газопроводе

$$P_{CP} = \frac{1}{\ell_{КС}} \int_0^{\ell_{КС}} P_x dx = \frac{1}{\ell_{КС}} \int_0^{\ell_{КС}} \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \frac{x}{\ell_{КС}}} dx. \quad (4.35)$$

Введем новую переменную

$$S = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \frac{x}{L}}. \quad (4.36)$$

Тогда

$$dS = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\frac{P_H^2 - P_K^2}{\ell_{KC}}}{\sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2) \cdot \frac{x}{\ell_{KC}}}} dx = \frac{1}{2} \cdot \frac{-\frac{P_H^2 - P_K^2}{\ell_{KC}}}{S} dx, \quad (4.37)$$

Откуда

$$dx = 2S \cdot \left(-\frac{\ell_{KC}}{P_H^2 - P_K^2} \right) dS. \quad (4.38)$$

Подставляя (4.36) и (4.38) в исходное выражение (4.35), получим

$$P_{CP} = \frac{1}{\ell_{KC}} \int_{S_1}^{S_2} S \cdot 2S \cdot \left(-\frac{\ell_{KC}}{P_H^2 - P_K^2} \right) dS = - \int_{S_1}^{S_2} \frac{2S^2}{P_H^2 - P_K^2} dS = \frac{2}{3} \cdot \frac{S^3}{P_H^2 - P_K^2} \Big|_{S_2}^{S_1}. \quad (4.39)$$

Найдем пределы интегрирования

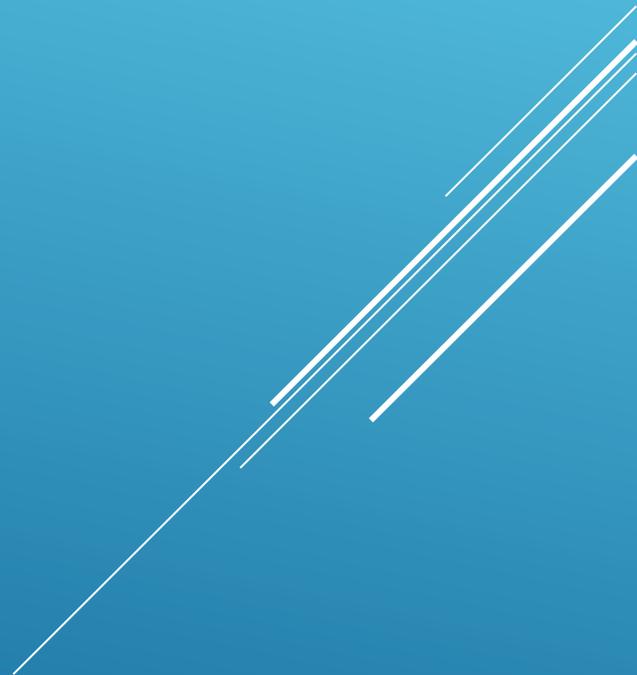
$$S_1 = S \Big|_{x=0} = P_H;$$
$$S_2 = S \Big|_{x=\ell_{KC}} = P_K.$$

Следовательно, среднее давление в газопроводе составит

$$\begin{aligned} P_{CP} &= \frac{2}{3} \cdot \frac{P_H^3 - P_K^3}{P_H^2 - P_K^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(P_H - P_K) \cdot (P_H^2 + P_H \cdot P_K + P_K^2)}{(P_H - P_K) \cdot (P_H + P_K)} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{P_H \cdot (P_H + P_K) + P_K^2}{P_H + P_K} = \frac{2}{3} \cdot \left(P_H + \frac{P_K^2}{P_H + P_K} \right). \end{aligned} \quad (4.40)$$

Величина среднего давления в газопроводе, вычисленная по формуле (4.40), всегда выше среднеарифметической. с увеличением разности P_H и P_K будет возрастать и разница этих значений.

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА ПО ДЛИНЕ ГАЗОПРОВОДА



На основании формулы (4.28) несложно показать, что при стационарном изотермическом движении газа массовый расход в газопроводе составляет

$$G = \frac{\pi \cdot D^{2.5}}{4} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{КС}}} \quad (4.41)$$

Фактически движение газа в газопроводе всегда является неизотермическим. В процессе компримирования газ нагревается. Даже после его охлаждения на КС температура поступающего в трубопровод газа составляет порядка $20...40^{\circ}\text{C}$, что существенно выше температуры окружающей среды (T_0). Практически температура газа становится близкой к температуре окружающей среды лишь у газопроводов малого диаметра ($D_y < 500$ мм) на удалении $20...40$ км от компрессорной станции, а для газопроводов большего диаметра всегда выше T_0 . Кроме того, следует учесть, что транспортируемый по трубопроводу газ является реальным газом, которому присущ эффект Джоуля — Томсона, учитывающий поглощение тепла при расширении газа.

При изменении температуры по длине газопровода движение газа описывается системой уравнений:

удельной энергии $\frac{dP}{\rho_{\Gamma}} = -g \cdot dh_{\Gamma} ,$

неразрывности $G = F \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w ,$

состояния $\frac{P}{\rho_{\Gamma}} = Z \cdot R \cdot T ,$

теплового баланса $K_{CP} \cdot \pi \cdot D \cdot (T - T_0) \cdot dx = -G \cdot c_p \cdot dT .$

Рассмотрим в первом приближении уравнение теплового баланса без учета эффекта Джоуля - Томсона. Разделяя переменные и интегрируя уравнение теплового баланса

$$\frac{K_{CP} \cdot \pi \cdot D}{G \cdot c_p} \cdot \int_0^{\ell_{KC}} dx = - \int_{T_H}^{T_K} \frac{dT}{T - T_0},$$

получим

$$a_i \cdot \ell_{KC} = - \ln \frac{T_K - T_0}{T_H - T_0} = \ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0}, \quad (4.42)$$

где a_i – расчетный коэффициент, $a_i = \frac{K_{CP} \cdot \pi \cdot D}{G \cdot c_p}$; K_{CP} – средний на участке полный коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду.

Величина произведения $a_t \cdot l_{KC}$ безразмерна и называется числом Шухова

$$a_t \cdot l_{KC} = Шу = \frac{K_{CP} \cdot \pi \cdot D \cdot l_{KC}}{G \cdot c_p} . \quad (4.43)$$

Решая уравнение (4.42) относительно температуры газа в конце газопровода, получим

$$T_K = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-a_t \cdot l_{KC}} . \quad (4.44)$$

На удалении x от начала газопровода температура газа определяется по аналогичной формуле

$$T_x = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-a_t \cdot x} . \quad (4.45)$$

Как видно, изменение температуры по длине газопровода имеет экспоненциальный характер (рис. 4.6). Рассмотрим влияние изменения температуры газа на производительность газопровода

Умножив обе части уравнения удельной энергии на ρ_r^2 и заменив величину dh_r на формулу Дарси-Вейсбаха получим

$$\rho_r \cdot dP = -\frac{\lambda}{2D} \cdot (\rho_r \cdot w)^2 dx.$$

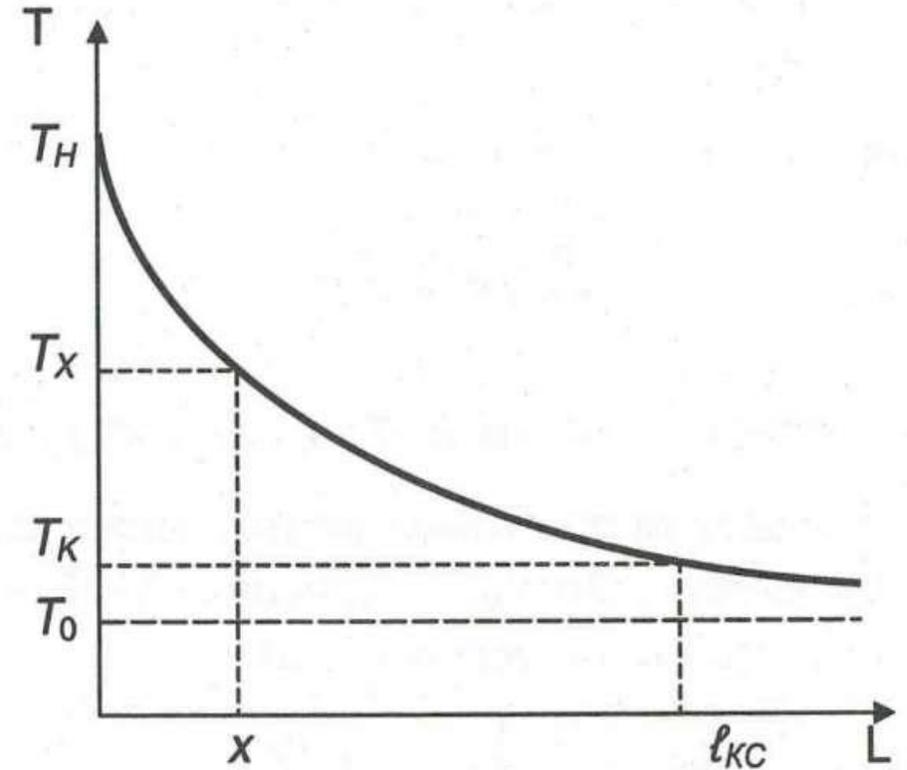


Рис. 4.6. Распределение температуры по длине газопровода

(4.46)

Выразим плотность газа в левой части выражения (4.46) из уравнения состояния $\rho_r = P/(ZRT)$ произведение $\rho_r \cdot w$ из уравнения неразрывности, dx из уравнения теплового баланса

С учетом этих преобразований уравнение удельной энергии принимает вид

$$\frac{P \cdot dP}{Z \cdot R \cdot T} = -\frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{G^2}{F^2} \left(-\frac{1}{a_t} \cdot \frac{dT}{T - T_0} \right) = \frac{\lambda}{2D} \cdot \frac{G^2}{F^2 \cdot a_t} \cdot \frac{dT}{T - T_0} \quad (4.47)$$

ИЛИ

$$P \cdot dP = \frac{\lambda \cdot G^2 \cdot Z \cdot R}{2D \cdot F^2 \cdot a_t} \cdot \frac{T \cdot dT}{T - T_0} \quad (4.48)$$

Обозначив $A_T = \frac{\lambda \cdot G^2 \cdot Z \cdot R}{2D \cdot F^2 \cdot a_1}$ и интегрируя левую часть уравнения (4.48) от P_H до P_K , а правую от T_H до T_K , получим

$$\int_{P_K}^{P_H} P \cdot dP = A_T \cdot \int_{T_K}^{T_H} \frac{T \cdot dT}{T - T_0}. \quad (4.49)$$

Поменяв пределы интегрирования и произведя замену

$$\int_{T_K}^{T_H} \frac{T \cdot dT}{T - T_0} = \int_{T_K}^{T_H} \frac{T - T_0 + T_0}{T - T_0} \cdot dT = \int_{T_K}^{T_H} dT + \int_{T_K}^{T_H} \frac{T_0 \cdot dT}{T - T_0}, \quad (4.50)$$

имеем

$$\int_{P_K}^{P_H} P \cdot dP = A_T \cdot \left(\int_{T_K}^{T_H} dT + T_0 \cdot \int_{T_K}^{T_H} \frac{dT}{T - T_0} \right). \quad (4.51)$$

Произведя интегрирование в указанных пределах, получим

$$\begin{aligned} \frac{P_H^2 - P_K^2}{2} &= A_T \cdot \left(T_H - T_K + T_0 \cdot \ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0} \right) = \\ &= A_T \cdot T_0 \cdot \ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0} \cdot \left(1 + \frac{T_H - T_K}{T_0 \cdot \ln \frac{T_H - T_0}{T_K - T_0}} \right). \end{aligned} \tag{4.52}$$

С учетом (4.42)

$$\frac{P_H^2 - P_K^2}{2} = \frac{\lambda \cdot G^2 \cdot Z \cdot R}{2D \cdot F^2 \cdot a_t} \cdot T_0 \cdot a_t \cdot \ell_{КС} \cdot \left(1 + \frac{T_H - T_K}{a_t \cdot L \cdot T_0} \right)$$

или

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{\lambda \cdot G^2}{D \cdot F^2} \cdot Z \cdot R \cdot T_0 \cdot \ell_{КС} \cdot \varphi_H, \quad (4.53)$$

где

φ_H — поправочный коэффициент, учитывающий изменение температуры по длине газопровода (неизотер-

мичность газового потока), $\varphi_H = \left(1 + \frac{T_H - T_K}{a_t \cdot L \cdot T_0} \right)$.

С учетом (4.53) зависимость для определения массового расхода газа примет вид

$$G = \frac{\pi \cdot D^{2.5}}{4} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T_0 \cdot \ell_{КС} \cdot \varphi_H}} \quad (4.54)$$

Значение φ_H всегда больше единицы, следовательно, массовый расход газа при изменении температуры по длине газопровода (неизотермическом режиме течения) всегда меньше, чем при изотермическом режиме при $T_0 = \text{idem}$. Произведение $T_0 \cdot \varphi_H$ называется среднеинтегральной температурой газа в газопроводе.

При значениях числа Шухова $Sh > 4$ течение газа в трубопроводе можно считать практически изотермическим при $T_0 = idem$. Такой температурный режим возможен при перекачке газа с небольшими расходами по газопроводам малого (менее 500 мм) диаметра на значительное расстояние.

Влияние изменения температуры газа проявляется при значениях числа Шухова $Sh < 4$, то есть в подавляющем большинстве случаев. Чем больше диаметр газопровода, тем меньше интенсивность теплообмена между газовым потоком и окружающей средой. Конечная температура газа определяется методом последовательных приближений, из-за чего теплогидравлический расчет газопровода становится итерационным процессом.

При перекачке газа наличие дроссельного эффекта приводит к более глубокому охлаждению газа, чем только при теплообмене с грунтом. В этом случае температура газа может даже опуститься ниже температуры T_0 (рис. 4.7).

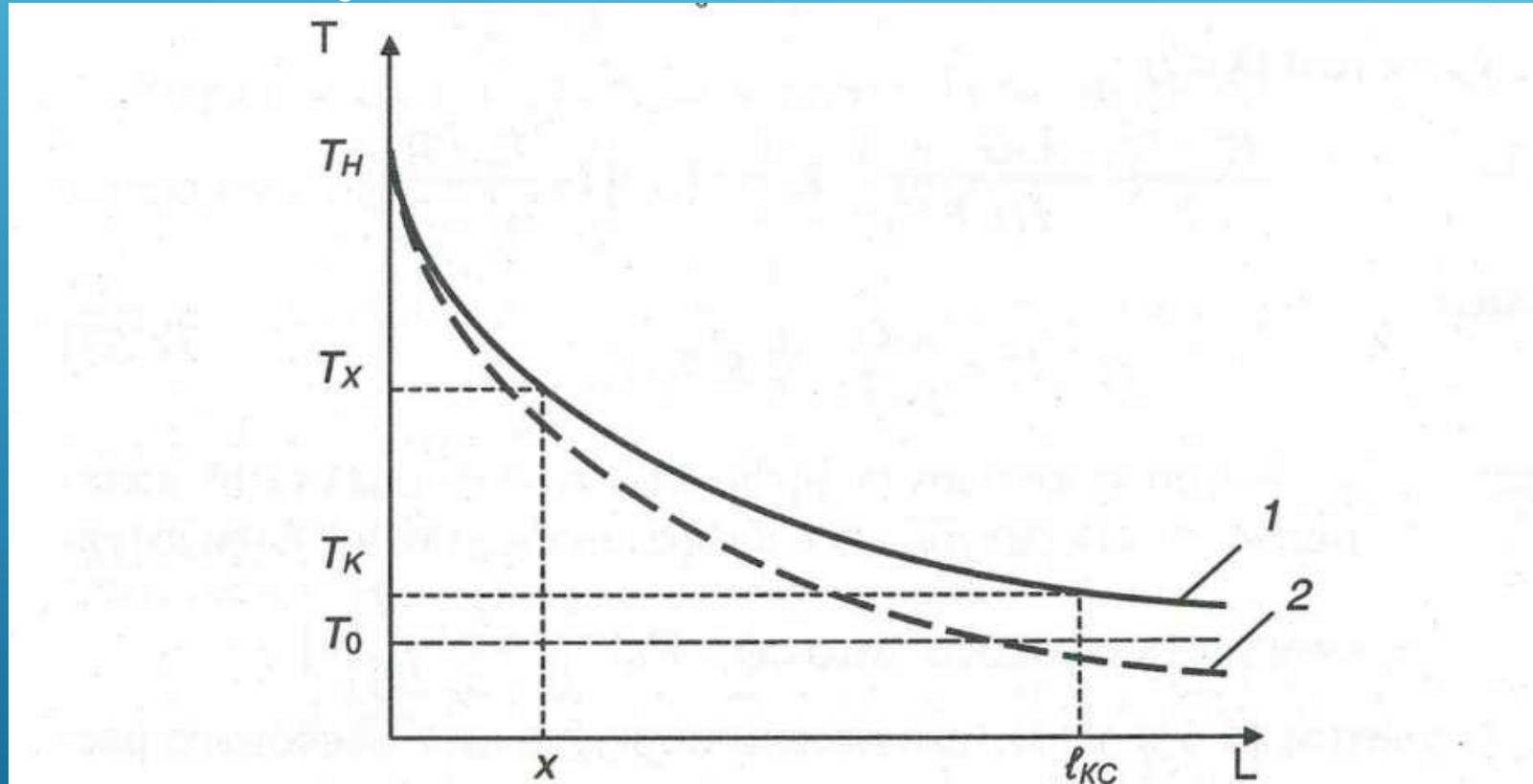


Рис. 4.7. Влияние эффекта Джоуля – Томсона на распределение температуры газа по длине газопровода:

1 – без учета Di ; 2 – с учетом Di

С учетом эффекта Джоуля-Томсона закон изменения температуры по длине газопровода принимает вид

$$T_x = T_0 + (T_H - T_0) \cdot e^{-a_t \cdot x} - Di \cdot \frac{P_H^2 - P_K^2}{2 \cdot a_t \cdot \ell_{КС} \cdot P_{СР}} \cdot (1 - e^{-a_t \cdot x}), \quad (4.55)$$

где $P_{СР}$ – среднее давление на участке газопровода, вычисляемое по формуле (4.40); Di – коэффициент Джоуля-Томсона, рассчитываемый по формуле (4.15) для средних значений давления и температуры на линейном участке газопровода.

Средняя температура газа $T_{СР}$ на участке газопровода определяется по формуле

$$T_{СР} = T_0 + (T_H - T_0) \cdot \frac{1 - e^{-a_t \cdot \ell_{КС}}}{a_t \cdot \ell_{КС}} - Di \cdot \frac{P_H^2 - P_K^2}{2 \cdot a_t \cdot \ell_{КС} \cdot P_{СР}} \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-a_t \cdot \ell_{КС}}}{a_t \cdot \ell_{КС}} \right). \quad (4.56)$$

Значение коэффициента теплопередачи K_{cp} в выражении (4.42) в зависимости от способа прокладки газопровода следует определять по формулам, приведенным в табл. 4.1.

Для практических расчетов при подземной и наземной прокладке коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гр}$ может быть рассчитан по следующим эмпирическим формулам:

для песка

$$10^3 \cdot \lg \lambda_{гр} = -134,2 + 23,89 \cdot \omega_{гр} - 2,389 \cdot T_{гр} + 442,98 \cdot \rho_{гр} - 0,276 \cdot \omega_{гр}^2; \quad (4.57)$$

для суглинка

$$10^3 \cdot \lg \lambda_{гр} = -711,8 + 8,25 \cdot \omega_{гр} + 2,48 \cdot T_{гр} - 17,2 \cdot \rho_{гр}; \quad (4.58)$$

для смешанного грунта (песок, глина, суглинок, супесь, песчаник, известняк)

$$10^3 \cdot \lg \lambda_{гр} = -920,27 + 13,9 \cdot \omega_{гр} + 3,26 \cdot T_{гр} + 18,6 \cdot \rho_{гр} - 0,36 \cdot \omega_{гр}^2, \quad (4.59)$$

где $\omega_{гр}$ — влажность грунта, %; $T_{гр}$ — температура грунта на глубине заложения оси газопровода, К; $\rho_{гр}$ — плотность грунта, т/м³.

Ориентировочное значение коэффициента теплопередачи при подземной прокладке газопровода без тепловой изоляции можно определить также по формуле

$$K_{CP} = \bar{K} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{0,9}, \quad (4.60)$$

где D — внутренний диаметр газопровода, м; K — базовый коэффициент теплопередачи для газопровода диаметром 1 м, принимаемый по графику (рис. 4.8)

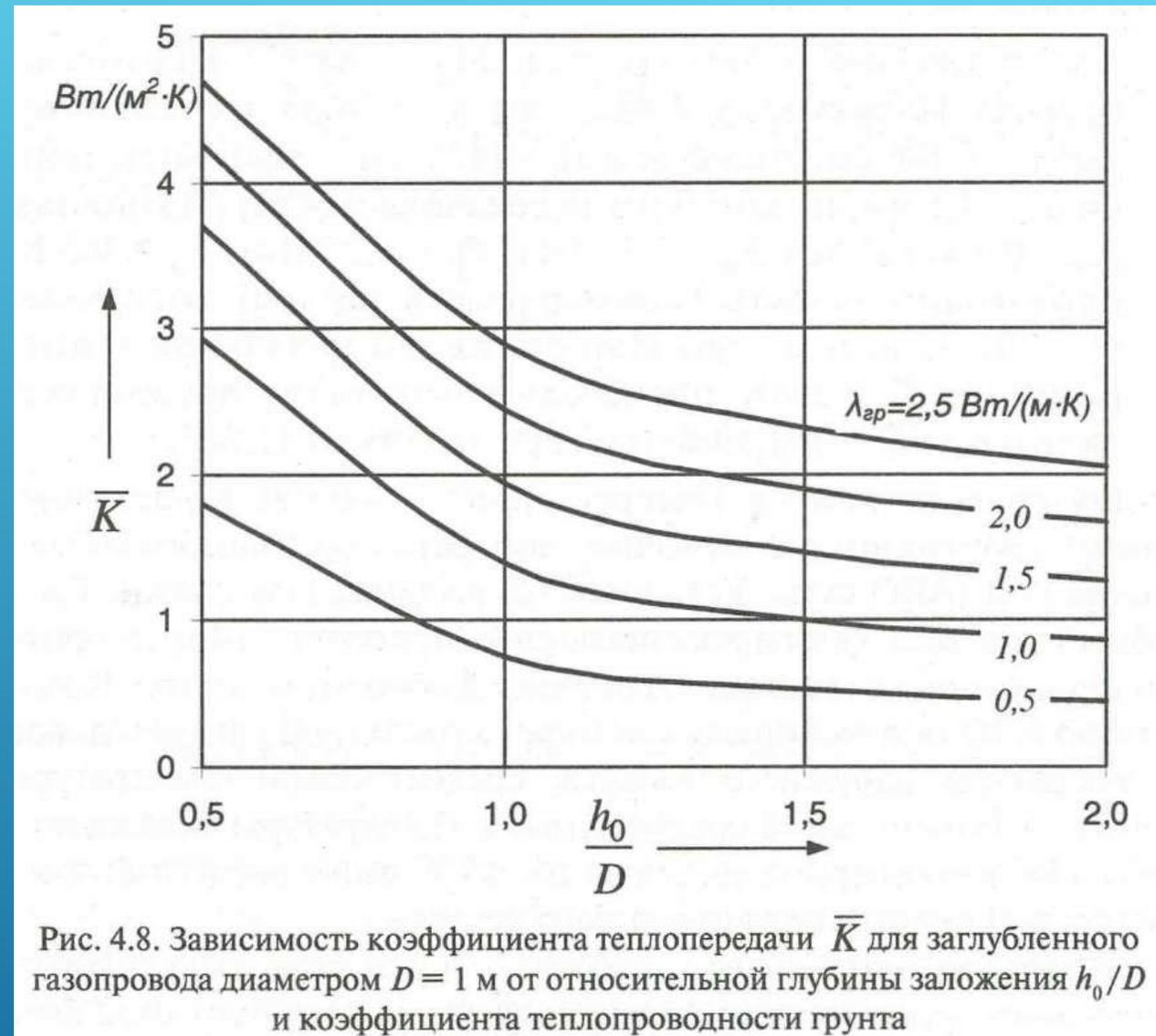
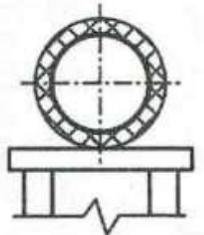
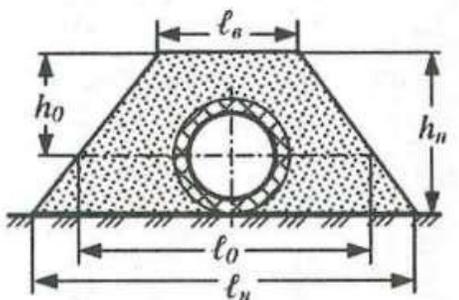
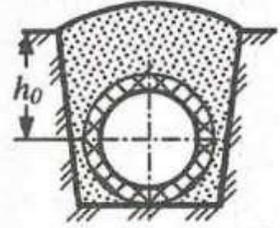


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента теплопередачи \bar{K} для заглубленного газопровода диаметром $D = 1$ м от относительной глубины заложения h_0/D и коэффициента теплопроводности грунта

Расчетные значения среднего коэффициента теплопередачи K_{CP} (Вт/м²)
для различных способов прокладки магистрального газопровода

| Надземная прокладка | Наземная прокладка (в насыпи) | Подземная прокладка |
|--|--|---|
|  $K_{CP} = \left(R_{из} + \frac{1}{\alpha_n} \right)^{-1}$ |  $K_{CP} = 0,5 \cdot (K_B + K_H),$ <p>где $K_B = (R_{из} + R_k + R_{сн} + R_a)^{-1}$;</p> $K_H = (R_{из} + R_{сп})^{-1}$ $\ell_0 = \frac{\ell_a \cdot (h_n - h_0) + \ell_n \cdot h_0}{h_n}$ $d_k = 1,13 \cdot \sqrt{(\ell_a + \ell_0) \cdot h_0}$ |  $K_{CP} = \left(R_{из} + \frac{1}{\alpha_{сп}} \right)^{-1}$ |

Условные обозначения: v_a – скорость ветра, м/с; D_H – наружный диаметр трубы, м; $D_{из}$ – наружный диаметр теплоизолированного газопровода, м; ℓ_0 – ширина насыпи в сечении на уровне оси трубы; d_k – характерный размер насыпи, м; $\delta_{сн}$ – толщина снегового покрова, м;

$h_{0Э} = h_0 + \lambda_{сп} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_{сн}}{\lambda_{сн}} \right)$ – эквивалентная глубина заложения оси газопровода, м;

Термическое сопротивление, м·К/Вт: теплоизоляции $R_{из} = \frac{D_n}{2 \cdot \lambda_{из}} \cdot \ln \frac{D_{из}}{D_n}$; насыпи $R_{из} = \frac{D_n}{2 \cdot \lambda_{сп}} \cdot \ln \frac{d_k}{D_{из}}$; грунта $R_{сп} = \left[0,65 \cdot \frac{\lambda_{сп}}{D_n} + \frac{D_n \cdot \lambda_{сп}}{h_0^2} \right]^{-1}$;

снегового покрова $R_{сн} = \frac{D_n}{2 \cdot \lambda_{сн}} \cdot \ln \frac{d_k + 2\delta_{сн}}{d_k}$; воздуха $R_a = \frac{D_n}{\alpha_{ан} \cdot d_k}$

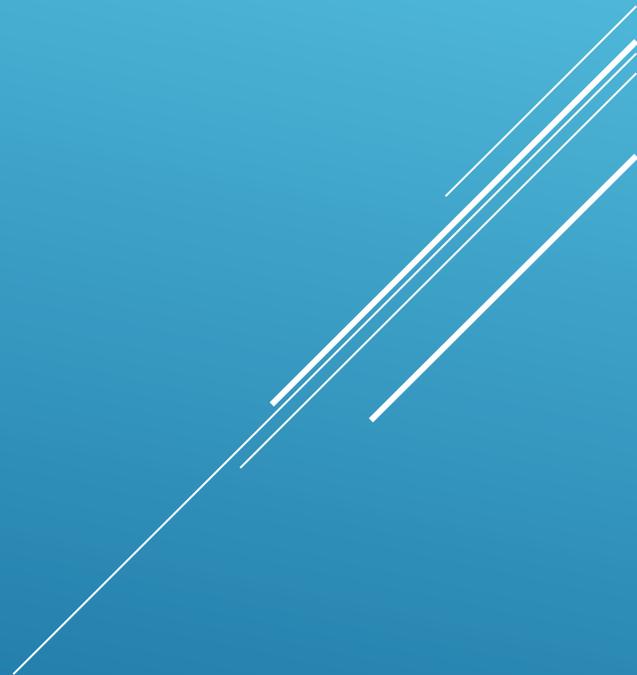
Коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·К): от поверхности насыпи в воздух $\alpha_{ан} = 10,8 \cdot \frac{v_a^{0,6}}{d_k^{0,4}}$; от поверхности грунта в воздух $\alpha_a = 6,2 + 4,2 \cdot v_a$;

от поверхности трубы в воздух $\alpha_n = 4,45 + 5,0 \cdot \frac{v_a^{0,6}}{D_n^{0,4}}$; от трубопровода в грунт

$$\alpha_{сп} = \frac{\lambda_{сп}}{D_n} \cdot \left[0,65 + \left(\frac{D_n}{h_{0Э}} \right)^2 \right]$$

Коэффициенты теплопроводности Вт/(м·К): $\lambda_{из}$ – теплоизоляции; $\lambda_{сп}$ – грунта; $\lambda_{сн}$ – снегового покрова (допускается принимать для свежавыпавшего снега $\lambda_{сн} = 0,1$ Вт/(м·К); для уплотненного снега $\lambda_{сн} = 0,35$ Вт/(м·К); для тающего снега $\lambda_{сн} = 0,64$ Вт/(м·К))

НЕОБХОДИМОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ



При компримировании газа в газоперекачивающих агрегатах происходит значительное повышение его температуры. На выходе из центробежных нагнетателей температура газа может достигать 60...70 °С.

Охлаждение газа на компрессорных станциях применяется:

- для уменьшения температурных напряжений стенки трубопровода вследствие значительной разницы температуры укладки газопровода в траншею и температуры транспортируемого газа;
- для предотвращения повреждения противокоррозионной изоляции газопровода (битумная изоляция плавится при температуре 60...80 °С, пленочное изоляционное покрытие отслаивается);
- для увеличения производительности магистрального газопровода.

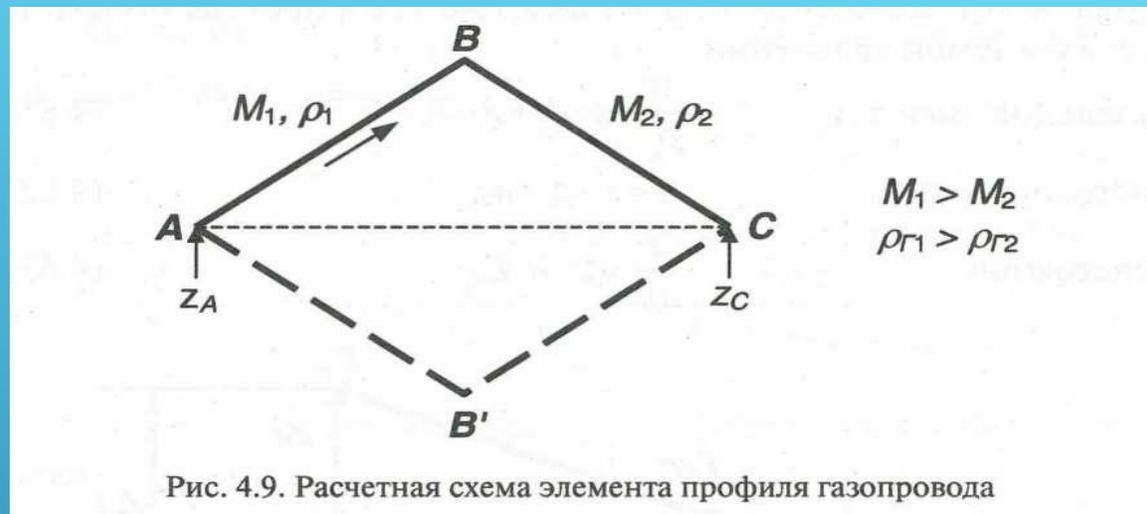
Например, для участка газопровода протяженностью $l_{\text{КС}} = 100$ км, диаметром $D = 1420$ мм, с толщиной стенки $S = 17,5$ мм, по которому перекачивается газ плотностью $\rho_{\text{СТ}} = 0,7$ кг/м³ при $P_{\text{В}} = 7,5$ МПа, $P_{\text{К}} = 5,2$ МПа, $T_{\text{Н}} = 303$ К, производительность (коммерческий расход) составляет $Q - 101,42$ млн м³/сут. При снижении начальной температуры до $T_{\text{Н}} = 298$ К, производительность газопровода увеличится до $Q = 102,69$ млн м³/сут, то есть на 1,25 %.

Охлаждение газа на компрессорных станциях в настоящее время производится с помощью аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО газа). Установка охлаждения газа должна быть общей для всех газоперекачивающих агрегатов компрессорного цеха, иметь коллекторную обвязку и обводную линию. Количество АВО газа выбирается исходя из расчетной среднегодовой температуры наружного воздуха, среднегодовой температуры грунта и оптимальной среднегодовой температуры охлаждения газа. Последняя принимается на 10... 15 °С выше расчетной среднегодовой температуры наружного воздуха.

В районах с холодным климатом для участков с многолетнемерзлыми грунтами перекачиваемый газ должен быть охлажден до температуры грунта. Стабильный уровень температуры обеспечивается станциями охлаждения газа, которые размещаются на площадках компрессорных станций с выделением их в отдельную производственную зону. Охлаждение газа до заданного уровня производится в испарителях холодильной установки после предварительной очистки и охлаждения в АВО газа компрессорной станции.

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ТРАСЫ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ГАЗОПРОВОДА





Рассмотрим элемент профиля трассы газопровода ABC, состоящий из двух равновеликих ветвей — восходящей AB и нисходящей BC (рис. 4.9). Начальная и конечная высотные отметки элемента профиля одинаковы ($z_A = z_C$). Поскольку давление газа по длине газопровода снижается, то и плотность газа также уменьшается. Поэтому масса газа M_1 заключенная в участке AB, больше массы газа M_2 на участке BC. Следовательно, сила тяжести, которую необходимо преодолеть для перемещения массы газа по участку AB, больше силы тяжести, способствующей движению массы газа по участку BC.

Наоборот, если начальный участок является нисходящим, а конечный восходящим (на рис. 4.9 пунктирной линией показан элемент профиля АВ'С, зеркально отображающий элемент АВС), энергия, способствующая движению газа по первому участку АВ' будет превышать энергию, затрачиваемую на подъем газа по участку В'С.

Таким образом, при расчете газопроводов, проходящих в условиях сильно пересеченной местности, в общем случае необходимо учитывать не только начальную и конечную высотные отметки, но и высотные отметки промежуточных точек трассы.

Согласно нормам технологического проектирования газопроводов, влияние рельефа следует учитывать в тех случаях, когда на трассе имеются точки, расположенные выше или ниже начального пункта газопровода более чем на 100 м. Расчет в таком случае следует выполнять с учетом слагаемого $g \cdot dz$ в уравнении удельной энергии. При этом отметка начальной точки газопровода принимается равной нулю ($z_H=0$). Отметки характерных точек профиля, находящиеся выше начальной точки, будут иметь положительные значения, ниже — отрицательные. Рассмотрим некоторые частные случаи расчета негоризонтальных газопроводов.

Наклонный газопровод

Рассмотрим установившееся движение газа в наклонном газопроводе постоянного диаметра D и протяженностью $l_{\text{КС}}$ (рис. 4.10). Движение газа в наклонном газопроводе описывается системой уравнений:

| | | |
|------------------|--|--------|
| удельной энергии | $\frac{dP}{\rho_{\Gamma}} + g \cdot dz + g \cdot dh_r = 0 ;$ | (4.61) |
|------------------|--|--------|

| | | |
|---------------|---------------------------------------|--------|
| неразрывности | $G = F \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w ;$ | (4.62) |
|---------------|---------------------------------------|--------|

| | | |
|-----------|---|--------|
| состояния | $\frac{P}{\rho_{\Gamma}} = Z \cdot R \cdot T .$ | (4.63) |
|-----------|---|--------|

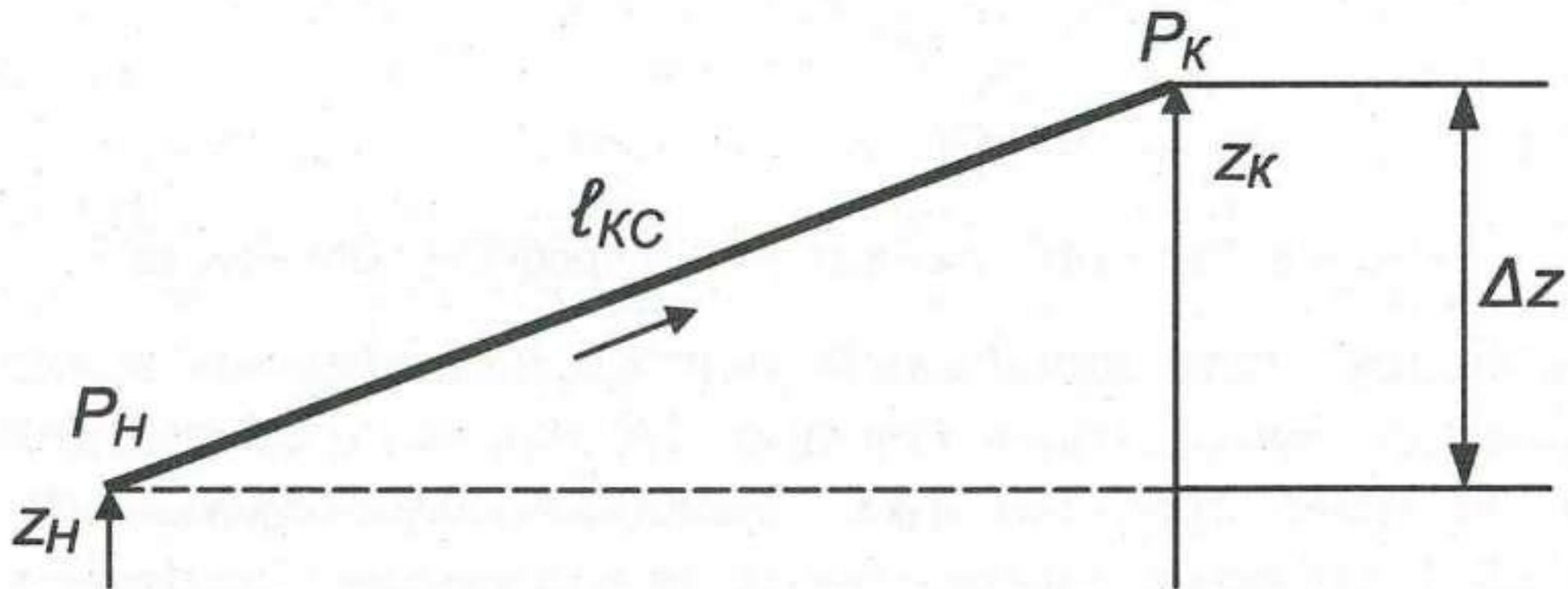


Рис. 4.10. Расчетная схема наклонного газопровода

Для наклонного газопровода

$$dz = \frac{z_K - z_H}{l_{КС}} dx = \frac{\Delta z}{l_{КС}} dx. \quad (4.64)$$

Умножив левую и правую части уравнения удельной энергии (4.61) на $2\rho_{\Gamma}^2$ и заменив величину dh_{Γ} выражением с учетом 4.62 и 4.64 получим

$$2\rho_{\Gamma} \cdot dP + 2\rho_{\Gamma}^2 \cdot g \cdot \frac{\Delta z}{l_{КС}} dx + \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{G^2}{F^2} \cdot dx = 0. \quad (4.65)$$

Выразим плотность газа из уравнения состояния $\rho_{\Gamma} = P/ZRT$
Тогда выражение 4.65 примет вид

$$\frac{2P \cdot dP}{Z \cdot R \cdot T} + 2g \cdot \frac{P^2}{(Z \cdot R \cdot T)^2} \cdot \frac{\Delta z}{l_{КС}} dx + \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{G^2}{F^2} \cdot dx = 0. \quad (4.66)$$

Умножим все слагаемые 4.66 на ZRT и, группируя их, получим

$$2P \cdot dP + \left(\frac{2g}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \frac{\Delta z}{\ell_{\text{КС}}} \cdot P^2 + \frac{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T}{D \cdot F^2} \cdot G^2 \right) \cdot dx = 0. \quad (4.67)$$

Обозначив $a_z = 2g/ZRT$ и $b_z = \lambda ZRT/DF^2$, перепишем уравнение удельной энергии в виде

$$2P \cdot dP + \left(\frac{a_z \cdot \Delta z}{\ell_{\text{КС}}} \cdot P^2 + b_z \cdot G^2 \right) \cdot dx = 0. \quad (4.68)$$

Разделяя переменные, проинтегрируем выражение 4.68

$$\int_0^{\ell_{\text{КС}}} dx = - \int_{P_H}^{P_K} \frac{2P \cdot dP}{\frac{a_z \cdot \Delta z}{\ell_{\text{КС}}} \cdot P^2 + b_z \cdot G^2} = \int_{P_K}^{P_H} \frac{2P \cdot dP}{\frac{a_z \cdot \Delta z}{\ell_{\text{КС}}} \cdot P^2 + b_z \cdot G^2}. \quad (4.69)$$

Производная знаменателя правой части выражения 4.69 равна

$$\frac{d}{dP} \left(\frac{a_z \cdot \Delta z}{l_{KC}} \cdot P^2 + b_z \cdot G^2 \right) = 2P \cdot \frac{a_z \cdot \Delta z}{l_{KC}} \quad (4.70)$$

то есть достаточно умножить числитель (4.69) на $a_z \cdot \Delta z / l_{KC}$ и будем иметь дифференциал знаменателя. Интегрируя 4.69 в указанных пределах, получим

$$l_{KC} = \frac{l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot \ln \frac{\frac{a_z \cdot \Delta z}{l_{KC}} \cdot P_H^2 + b_z \cdot G^2}{\frac{a_z \cdot \Delta z}{l_{KC}} \cdot P_K^2 + b_z \cdot G^2} = \frac{l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot \ln \frac{P_H^2 + \frac{b_z \cdot l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot G^2}{P_K^2 + \frac{b_z \cdot l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot G^2} \quad (4.71)$$

Потенцируя и освобождаясь от знаменателя

$$\left(P_K^2 + \frac{b_z \cdot l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot G^2 \right) \cdot e^{a_z \cdot \Delta z} = P_H^2 + \frac{b_z \cdot l_{KC}}{a_z \cdot \Delta z} \cdot G^2, \quad (4.72)$$

откуда

$$P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z} = G^2 \cdot \frac{b_z \cdot l_{KC} \cdot (e^{a_z \cdot \Delta z} - 1)}{a_z \cdot \Delta z} \quad (4.73)$$

Соответственно, массовый расход газа в наклонном газопроводе составит

$$G = \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z}}{b_z \cdot \ell_{КС} \cdot \left(\frac{e^{a_z \cdot \Delta z} - 1}{a_z \cdot \Delta z}\right)}} = F \cdot \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z}) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{КС} \cdot \left(\frac{e^{a_z \cdot \Delta z} - 1}{a_z \cdot \Delta z}\right)}}. \quad (4.74)$$

Если рассматриваемый участок газопровода восходящий ($\Delta z > 0$), то величина $e^{a_z \cdot \Delta z} > 1$, следовательно, активная движущая сила $P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z}$ при прочих равных условиях уменьшается, то есть перекачка на подъем создает дополнительное противодействие.

Кроме того, на восходящем участке газопровода возрастает сопротивление трению, так как множитель

$$\left(\frac{e^{a_z \cdot \Delta z} - 1}{a_z \cdot \Delta z} \right) > 1.$$

Таким образом, при прочих равных условиях массовый расход газа в восходящем газопроводе будет меньше, чем в горизонтальном. Для газопроводов, идущих под уклон, массовый расход газа наоборот будет больше, чем в горизонтальном газопроводе.

Рельефный газопровод

Рассмотрим газопровод, состоящий из n наклонных участков с осредненным постоянным уклоном (рис. 4.11).

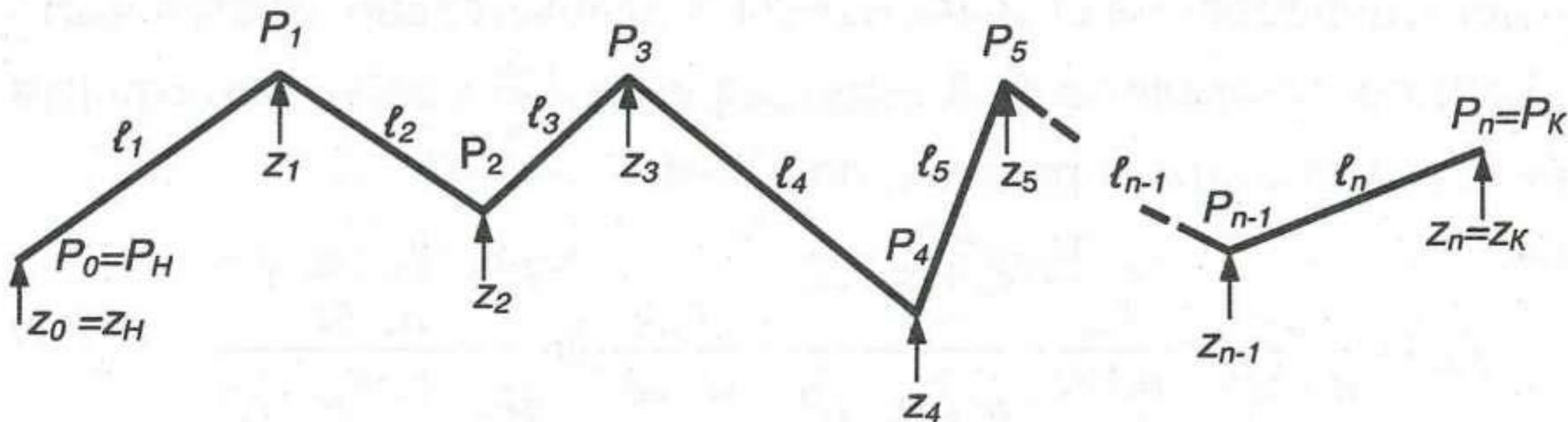


Рис. 4.11. Расчетная схема рельефного газопровода

Для каждого наклонного участка справедливо соотношение

$$\begin{aligned}\Delta z_1 = z_1 - z_n; P_H^2 - P_1^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z_1} &= \frac{b_z \cdot \ell_1}{a_z \cdot \Delta z_1} \cdot G^2 \cdot (e^{a_z \cdot \Delta z_1} - 1); \\ \Delta z_2 = z_2 - z_1; P_1^2 - P_2^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z_2} &= \frac{b_z \cdot \ell_2}{a_z \cdot \Delta z_2} \cdot G^2 \cdot (e^{a_z \cdot \Delta z_2} - 1); \\ \Delta z_n = z_n - z_{n-1}; P_{n-1}^2 - P_n^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z_n} &= \frac{b_z \cdot \ell_n}{a_z \cdot \Delta z_n} \cdot G^2 \cdot (e^{a_z \cdot \Delta z_n} - 1).\end{aligned}\tag{4.75}$$

В целом для рельефного газопровода

$$\Delta z = z_K - z_H, \ell_{КС} = \sum_{i=1}^n \ell_i.$$

Исключая неизвестные значения давления в узловых точках профиля трассы, для всего газопровода в целом можно

$$P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z} = b_z \cdot l_{KC} \cdot G^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{e^{a_z \cdot z_i} - e^{a_z \cdot z_{i-1}}}{a_z \cdot (z_i - z_{i-1})} \cdot \frac{l_i}{l_{KC}} \right]. \quad (4.76)$$

Обозначив выражение в скобках

$$\psi_{HT} = \sum_{i=1}^n \frac{e^{a_z \cdot z_i} - e^{a_z \cdot z_{i-1}}}{a_z \cdot (z_i - z_{i-1})} \cdot \frac{l_i}{l_{KC}}, \quad (4.77)$$

выразим из (4.76) значение массового расхода газа для негоризонтального (рельефного) газопровода

$$G = F \cdot \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z}) \cdot D}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot l_{KC} \cdot \psi_{HT}}} = \frac{\pi \cdot D^{2.5}}{4} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2 \cdot e^{a_z \cdot \Delta z}}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot l_{KC} \cdot \psi_{HT}}}. \quad (4.78)$$

Значение $\psi_{\text{нг}}$ можно упростить

$$G = \frac{\pi \cdot D^{2.5}}{4} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2 \cdot (1 + a_z \cdot z_K)}{\lambda \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \ell_{\text{КС}} \cdot \left[1 + \frac{a_z}{2 \cdot \ell_{\text{КС}}} \cdot \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}) \cdot \ell_i \right]}}. \quad (4.79)$$

Величина $\psi_{\text{нг}}$ не зависит от G , а определяется геометрическими размерами участков и свойствами перекачиваемого газа при средних значениях давления и температуры.

Выразим значение a_z через относительную плотность газа по воздуху

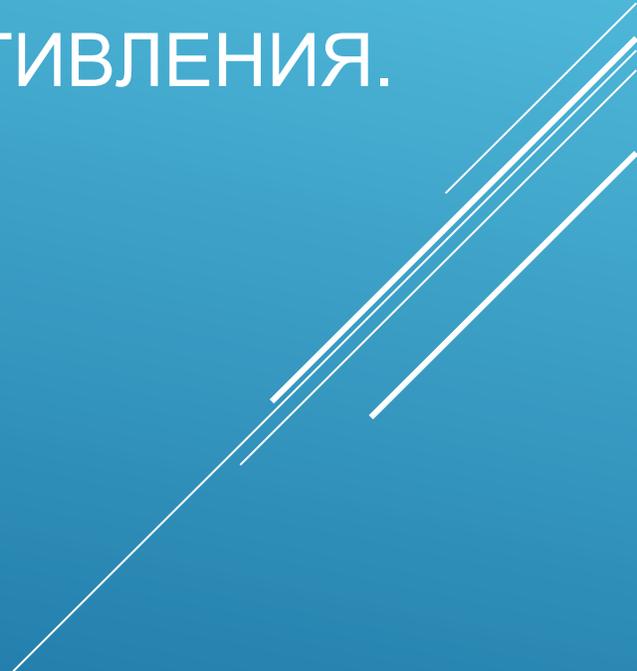
$$a_z = \frac{2g}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{2g \cdot \Delta}{Z \cdot R_{\text{возд}} \cdot T} = \frac{\Delta}{14,64 \cdot Z \cdot T}. \quad (4.80)$$

С учетом (4.80) объемная производительность (коммерческий расход в млн м³/сут) рельефного газопровода составит

$$Q = 105,087 \cdot D^{2,5} \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2 \cdot (1 + a_z \cdot z_K)}{\lambda \cdot Z \cdot T \cdot \Delta \cdot \ell_{KC} \cdot \left[1 + \frac{a_z}{2 \cdot \ell_{KC}} \cdot \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}) \cdot \ell_i \right]}} \cdot (4.81)$$

Температура T и коэффициент сжимаемости Z в формуле (4.81) принимаются средними по длине участка газопровода, то есть $T = T_{\text{ср}}$ и $Z = Z_{\text{ср}}$.

КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ.
КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ



Закономерности изменения гидравлического сопротивления для капельной жидкости и для газа одни и те же. Поэтому нет принципиальных различий в расчете коэффициента гидравлического сопротивления для нефтепроводов и газопроводов. Как и для капельной жидкости, коэффициент гидравлического сопротивления при перекачке газа является функцией числа Рейнольдса и шероховатости внутренней поверхности стенки трубы.

Для расчета коэффициента сопротивления трения отраслевыми нормами проектирования рекомендуется универсальная формула ВНИИГаза

$$\lambda_{TP} = 0,067 \cdot \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k_z}{D} \right)^{0,2}, \quad (4.82)$$

которая по своей структуре аналогична известной формуле Альтшуля для зоны смешанного трения.

В магистральных газопроводах наиболее распространено течение газа в квадратичной зоне турбулентного режима, течение в зоне смешанного трения возможно при неполной загрузке газопровода, а в зоне гидравлически гладких труб — характерно для распределительных газопроводов малого диаметра (газовые сети в населенных пунктах).

Из формулы (4.82) следуют частные случаи:

- в зоне гидравлически гладких труб при $\frac{158}{Re} \gg \frac{2 \cdot k_3}{D}$
$$\lambda_{TP} = 0,067 \cdot \left(\frac{158}{Re} \right)^{0,2} = \frac{0,1844}{Re^{0,2}}; \quad (4.83)$$
- в зоне квадратичного трения при $\frac{158}{Re} \ll \frac{2 \cdot k_3}{D}$
$$\lambda_{TP} = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot k_3}{D} \right)^{0,2}. \quad (4.84)$$

Так как при течении газа в магистральных газопроводах имеет место только турбулентный режим, то при трубопроводном транспорте газа используется упрощенная терминология: квадратичная зона трения называется квадратичным режимом, а зона смешанного трения — смешанным режимом.

Как и в нефтепроводах, режим течения газа характеризуется числом Рейнольдса

$$Re = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho_{\Gamma}}{\pi \cdot D \cdot \mu_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot \rho_{\text{ВОЗД}} \cdot \Delta \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \mu_{\Gamma}} = 17,75 \frac{\Delta \cdot Q}{D \cdot \mu_{\Gamma}}, \quad (4.85)$$

где Q — коммерческий расход газа, млн. м³/сут ; D — внутренний диаметр газопровода, м; μ_{Γ} — динамическая вязкость газа, Па·с.

Переходное (от смешанного к квадратичному трению) значение числа Рейнольдса определяется по формуле

$$Re_{\text{ПЕР}} = 11 \cdot \left(\frac{D}{2 \cdot k_3} \right)^{1,5} \quad (4.86)$$

ВНИИГаз рекомендует принимать среднее значение эквивалентной шероховатости стенки газопровода равным $k_3 = 0,03$ мм.

Для учета местных сопротивлений на линейной части газопровода коэффициент гидравлического сопротивления берется на 5% больше коэффициента сопротивления трения $\lambda_{\text{тр}}$. Величина коэффициента гидравлического сопротивления газопровода рассчитывается из выражения

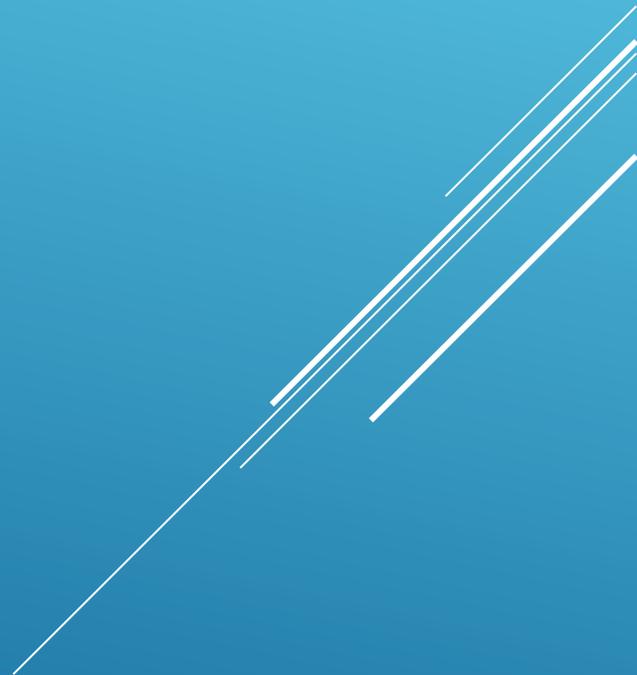
$$\lambda = 1,05 \cdot \frac{\lambda_{\text{ТР}}}{E^2}, \quad (4.87)$$

где E — коэффициент гидравлической эффективности газопровода.

Коэффициент гидравлической эффективности характеризует уменьшение производительности в результате повышения гидравлического сопротивления газопровода, вызванного образованием скоплений влаги, конденсата и выпадением гидратов. Согласно нормам проектирования, для расчета λ значение коэффициента гидравлической эффективности принимается равным 0,95 при наличии на газопроводе устройств для периодической очистки внутренней полости трубопровода, а при отсутствии указанных устройств принимается равным 0,92.

Коэффициент гидравлической эффективности в процессе эксплуатации определяется для каждого участка между КС не реже одного раза в год. По величине коэффициента E судят о загрязненности линейной части газопровода. При превышении указанных значений E необходимо проводить очистку полости газопровода. Скопления воды и конденсата удаляют продувкой. Если это не приводит к необходимому эффекту, по газопроводу пропускают очистные поршни.

РАСЧЁТ СЛОЖНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ



Простым газопроводом принято называть газопровод постоянного диаметра, по которому транспортируется газ с неизменным расходом Q . Газопроводы, отличающиеся от простого, называются **сложными**.

Любая сложная система газопроводов может быть разделена на элементарные участки, размеры которых (l_i, D_i) и производительности (Q_i) являются исходными данными для расчета системы в целом. При этом в узловых точках должны выполняться следующие условия: равенство давлений, сохранение массы газа и его теплосодержания. Такой поэтапный метод расчета весьма трудоемок, но достаточно просто реализуется с помощью ПК.

Нормами технологического проектирования допускается в первом приближении с достаточной для практических расчетов точностью заменять сложный газопровод эквивалентным простым, который имеет такую же пропускную способность при аналогичных граничных условиях, что и простой газопровод.

При гидравлическом расчете сложного газопровода (как и простого) решается одна из задач:

- определение пропускной способности Q при заданных начальном и конечном давлениях и геометрических размерах участков (L_i, D_i);
- определение конечного давления при заданных расходах и геометрических размерах участков;
- определение диаметров отдельных участков по заданному перепаду давления и расходам для участков известной длины.

Для расчета сложных газотранспортных систем применяются следующие способы:

- замена сложного газопровода эквивалентным простым (применяется при отсутствии сбросов и подкачек);
- замена сложного газопровода с различными расходами по участкам эквивалентным простым газопроводом с постоянным эквивалентным расходом (применяется в случае сбросов и подкачек газа).

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся случаи расчета сложных газопроводов.

Однониточный газопровод с участками различного диаметра

Рассмотрим однониточный газопровод с участками различного диаметра (рис. 4.12) с постоянным линейным коммерческим расходом Q

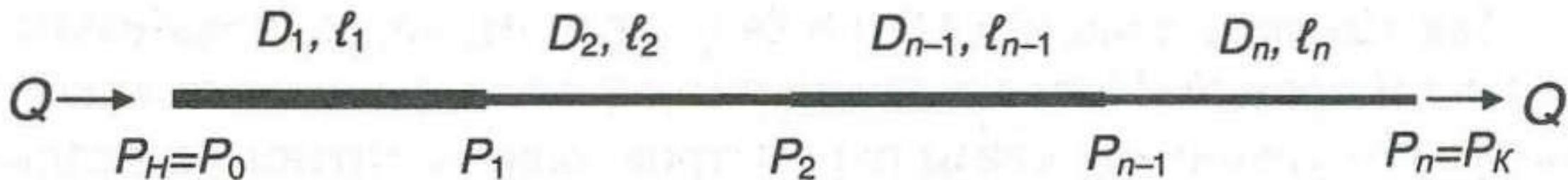


Рис. 4.12. Схема сложного однониточного газопровода с участками различного диаметра

Воспользуемся формулой для определения пропускной способности простого газопровода

$$Q = K \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda \cdot Z_{CP} \cdot \Delta \cdot T_{CP} \cdot \ell}} \cdot D^5. \quad (4.88)$$

Для каждого из участков сложного газопровода можем записать

$$Q_1 = K \cdot \sqrt{\frac{(P_H^2 - P_1^2) \cdot D_1^5}{\lambda_1 \cdot Z_{CP1} \cdot \Delta \cdot T_{CP1} \cdot \ell_1}}; Q_2 = K \cdot \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) \cdot D_2^5}{\lambda_2 \cdot Z_{CP2} \cdot \Delta \cdot T_{CP2} \cdot \ell_2}}, \dots,$$

$$Q_n = K \cdot \sqrt{\frac{(P_{n-1}^2 - P_n^2) \cdot D_n^5}{\lambda_n \cdot Z_{CPn} \cdot \Delta \cdot T_{CPn} \cdot \ell_n}}$$

Выразим из полученных равенств разности квадратов давлений, имея в виду, что $Q_1=Q_2=\dots=Q_n=Q$

$$P_H^2 - P_1^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_1 \cdot Z_{CP1} \cdot \Delta \cdot T_{CP1} \cdot \ell_1}{D_1^5}; \quad (4.89)$$

$$P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_2 \cdot Z_{CP2} \cdot \Delta \cdot T_{CP2} \cdot \ell_2}{D_2^5};$$

$$P_{n-1}^2 - P_n^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_n \cdot Z_{CPn} \cdot \Delta \cdot T_{CPn} \cdot \ell_n}{D_n^5}.$$

Проведя почленное сложение данных выражений в предположении, что $Z_{срi} \cdot T_{срi} = Z_{ср} \cdot T_{ср}$, получаем

$$P_H^2 - P_n^2 = P_H^2 - P_K^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \cdot Z_{ср} \cdot \Delta \cdot T_{ср} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \cdot l_i}{D_i^5}. \quad (4.90)$$

Для эквивалентного газопровода выражение 4.90 имеет вид

$$P_H^2 - P_K^2 = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \cdot Z_{ср} \cdot \Delta \cdot T_{ср} \cdot \frac{\lambda_э \cdot l_э}{D_э^5}. \quad (4.91)$$

Так как левые части (4.90) и (4.91) равны, то, следовательно, равны и правые. После сокращения одинаковых сомножителей получаем уравнение связи параметров эквивалентного и реального газопроводов

$$\frac{\lambda_э \cdot l_э}{D_э^5} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i \cdot l_i}{D_i^5}. \quad (4.92)$$

При квадратичном режиме в соответствии с (4.84) величина λ_i обратно пропорциональна $D_i^{0,2}$. Следовательно, можем переписать (4.92) в виде

$$\frac{\ell_{\text{э}}}{D_{\text{э}}^{5,2}} = \sum_{i=1}^n \frac{\ell_i}{D_i^{5,2}}. \quad (4.93)$$

В соотношении 4.93 сразу две неизвестные величины: $\ell_{\text{э}}$ и $D_{\text{э}}$. Задаваясь одной из них, легко найти вторую.

Параллельные газопроводы

Рассмотрим сложный газопровод, состоящий из нескольких параллельных ниток различного диаметра (рис. 4.13).

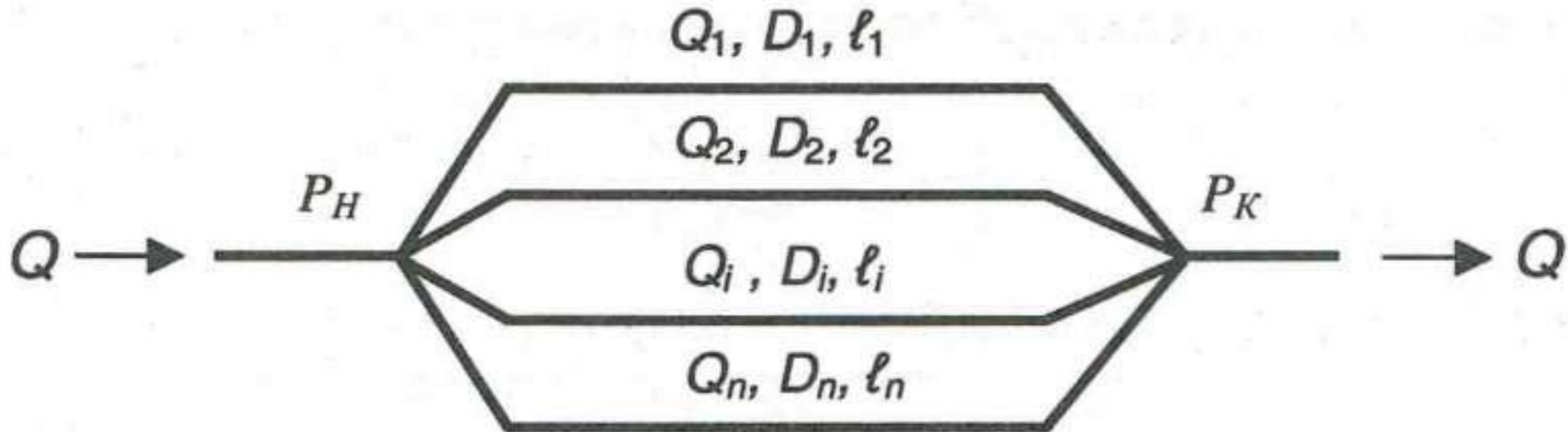


Рис. 4.13. Схема параллельных газопроводов

Поскольку начальное и конечное давление для каждой нитки параллельной системы газопроводов одинаково, из уравнения материального баланса следует, что

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (4.94)$$

Расход газа в каждой отдельной нитке газопровода описывается формулой (4.88):

$$Q_1 = K \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_1 \cdot Z_{CP1} \cdot \Delta \cdot T_{CP1} \cdot \ell_1}} \cdot D_1^5;$$

$$Q_2 = K \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_2 \cdot Z_{CP2} \cdot \Delta \cdot T_{CP2} \cdot \ell_2}} \cdot D_2^5;$$

$$\dots$$
$$Q_n = K \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_n \cdot Z_{CPn} \cdot \Delta \cdot T_{CPn} \cdot \ell_n}} \cdot D_n^5.$$

Соответственно, для системы параллельных газопроводов

$$\sum_{i=1}^n Q_i = Q_2 = K \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_i \cdot Z_{CPi} \cdot \Delta \cdot T_{CPi} \cdot l_i}} \cdot D_i^5. \quad (4.95)$$

Для эквивалентного газопровода величина расхода газа также описывается уравнением (4.88), где вместо l и D подставлены соответственно $l_{\text{э}}$ и $D_{\text{э}}$.

Приравняв правые части данных выражений и сократив одинаковые сомножители $Z_{\text{ср}i} T_{\text{ср}i} = Z_{\text{ср}} T_{\text{ср}}$, получаем

$$\sqrt{\frac{D_{\text{э}}^5}{\lambda_{\text{э}} \cdot l_{\text{э}}}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{D_i^5}{\lambda_i \cdot l_i}}. \quad (4.96)$$

В частном случае при квадратичном режиме течения газа с учетом 4.84 выражение 4.96 примет вид

$$\sqrt{\frac{D_э^{5,2}}{\ell_э}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{D_i^{5,2}}{\ell_i}}. \quad (4.97)$$

Для i -й параллельной нитки газопровода

$$Q_i = K \cdot \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\lambda_i \cdot Z_{CPI} \cdot \Delta \cdot T_{CPI} \cdot \ell_i}} \cdot D_i^5. \quad (4.98)$$

Решая совместно (4.95) и (4.98), получаем уравнение связи расхода в i -й нитке и системе параллельных газопроводов в целом при квадратичном режиме течения

$$\frac{Q_i}{Q} = \sqrt{\frac{D_i^{5,2}}{l_i}} / \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{D_i^{5,2}}{l_i}}. \quad (4.99)$$

Если длины параллельных ниток одинаковы, то справедливо соотношение

$$\frac{Q_i}{Q} = \frac{D_i^{2,6}}{\sum_{i=1}^n D_i^{2,6}}. \quad (4.100)$$

Газопровод со сбросами и подкачками газа

Рассмотрим участок газопровода постоянного диаметра с путевыми отборами и подкачками газа (рис. 4.14).

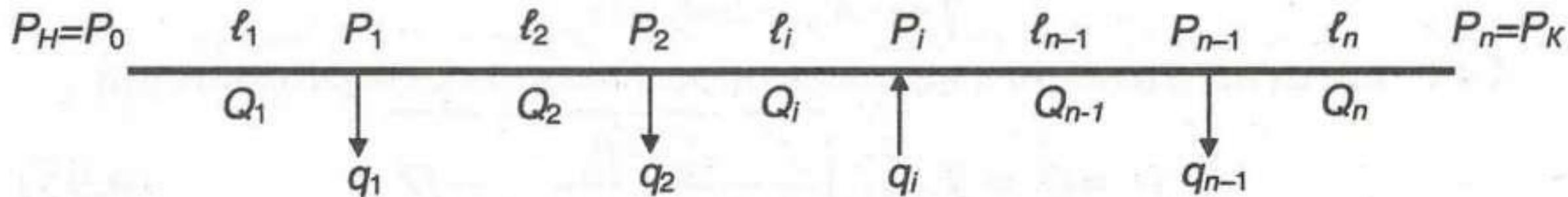


Рис. 4.14. Схема газопровода постоянного диаметра с путевыми отборами (подкачками)

Для каждого из участков сложного газопровода на основании формулы (4.88) выразим величину разности квадратов давлений

$$P_H^2 - P_1^2 = \left(\frac{Q_1}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_1 \cdot Z_{CP1} \cdot \Delta \cdot T_{CP1} \cdot \ell_1}{D^5};$$

$$P_1^2 - P_2^2 = \left(\frac{Q_2}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_2 \cdot Z_{CP2} \cdot \Delta \cdot T_{CP2} \cdot \ell_2}{D^5};$$

.....

$$P_{n-1}^2 - P_n^2 = \left(\frac{Q_n}{K}\right)^2 \cdot \frac{\lambda_n \cdot Z_{CPn} \cdot \Delta \cdot T_{CPn} \cdot \ell_n}{D^5}.$$

Складывая эти уравнения почленно и учитывая, что $P_H = P_K$ и $Z_{срi} \cdot T_{срi} = \text{idem}$, будем иметь

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{Z_{CP} \cdot \Delta \cdot T_{CP}}{K^2 \cdot D^5} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot \lambda_i \cdot l_i. \quad (4.101)$$

Для эквивалентного газопровода данное выражение имеет вид

$$P_H^2 - P_K^2 = \frac{Z_{CP} \cdot \Delta \cdot T_{CP}}{K^2 \cdot D^5} \cdot Q_3^2 \cdot \lambda_3 \cdot l_3. \quad (4.102)$$

Из равенства левых частей формул (4.101) и (4.102) следует равенство и их правых частей. После сокращения одинаковых сомножителей получаем

$$Q_3^2 \cdot \lambda_3 \cdot l_3 = \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot \lambda_i \cdot l_i. \quad (4.103)$$

При квадратичном режиме течения в соответствии с (4.84) $\lambda_i = \lambda_{\text{э}}$ и формула (4.103) принимает вид

$$Q_{\text{э}}^2 \cdot l_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot l_i.$$

Приняв $l_{\text{э}}$ равной общей длине газопровода l , получаем, что расход в эквивалентной магистрали равен

$$Q_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cdot l_i}. \quad (4.104)$$

Давление в j -й узловой точке с учетом принятых допущений составляет

$$P_j = \sqrt{P_H^2 - \frac{\lambda_{\text{э}} \cdot Z_{\text{CP}} \cdot \Delta \cdot T_{\text{CP}}}{K^2 \cdot D^5} \cdot \sum_{i=1}^j Q_i^2 \cdot l_i}. \quad (4.105)$$