

П. М. Клепацкий, канд. техн. наук; В. Н. Фарафонов, канд. техн. наук;
Т. Ф. Шкарупа, канд. техн. наук

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТЕ ПО СИСТЕМЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

The Methods of the calculation of the consumption of the natural gas under his transport on system main pipe line is offered. The Analysis of the consumption of the natural gas object systems main pipe line is executed. The Structure of the consumption of the natural gas is offered. It Is Designed analytical dependencies and is determined set dates required for calculation of the consumption of the volumes of the natural gas. The Numerical values of these expressions are determined on the grounds of experienced data. The Methods are included in organization standard «Beltransgaz» for carry out calculation rates of the consumption of the natural gas under its transport on system main pipe line.

Введение. В данной работе разработана методика расчета и представлена структура затрат природного газа при транспортировке по газотранспортной системе (ГТС) (рис. 1).

Основная часть. Анализ потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) показывает, что основной статьей потребления природного газа при транспортировке его по ГТС является статья, учитывающая расход при работе газоперекачивающего агрегата (ГПА) с приводом от газотурбинной установки (ГТУ) и расход газа в качестве топливного газа газомоторкомпрессоров (ГМК) компрессорного цеха (КЦ) подземных хранилищ газа. Расход газа по этой статье составляет 90–95% от затрат природного газа на его транспорт, что объясняется высокой суммарной установленной мощностью по ГТУ и ГМК. Для ОАО «Белтрансгаз» и магистрального трубопровода «Ямал-Европа» установленная мощность превышает 500 МВт.

Расчет начинается после получения годового плана (контракта) по транзиту природного

газа зарубеж и потребителям республики, графиков поставок и контрактных условий поставок. Данные о техническом состоянии газоперекачивающего оборудования, климатические параметры вводятся в программу оптимизации (минимизации) потребления ТЭР при безусловном выполнении плана поставок, обеспечении безопасности и работоспособности ГТС. В результате оптимизации рассчитываются объемы компримированного газа по каждой компрессорной станции (КС), число включаемых в работу ГПА и условия их работы.

Результаты оптимизации используются в программе расчета количеств планового потребления природного газа на его транспорт по ГТС для каждого КЦ и КС.

Программы расчета планового потребления природного газа на его транспорт выполняется в соответствии с алгоритмом расчета объема топливного газа ГПА компрессорных цехов ГТУ, основные положения ГТУ, которые изложены ниже.

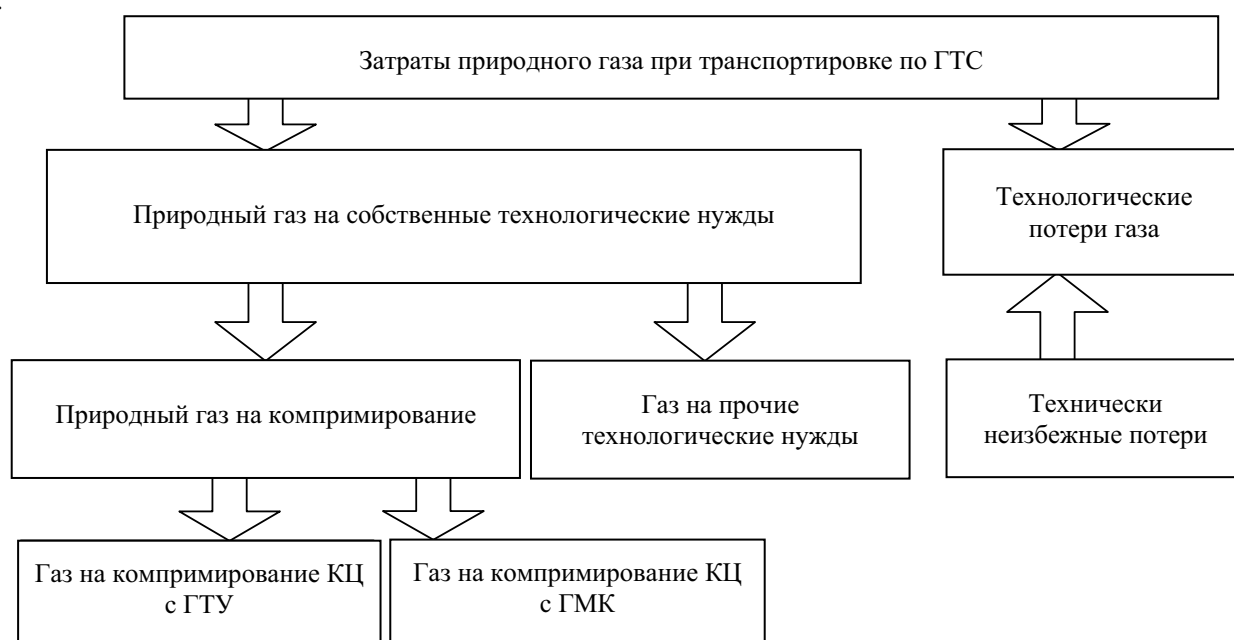


Рис. 1. Структура затрат природного газа при транспортировке по ГТС

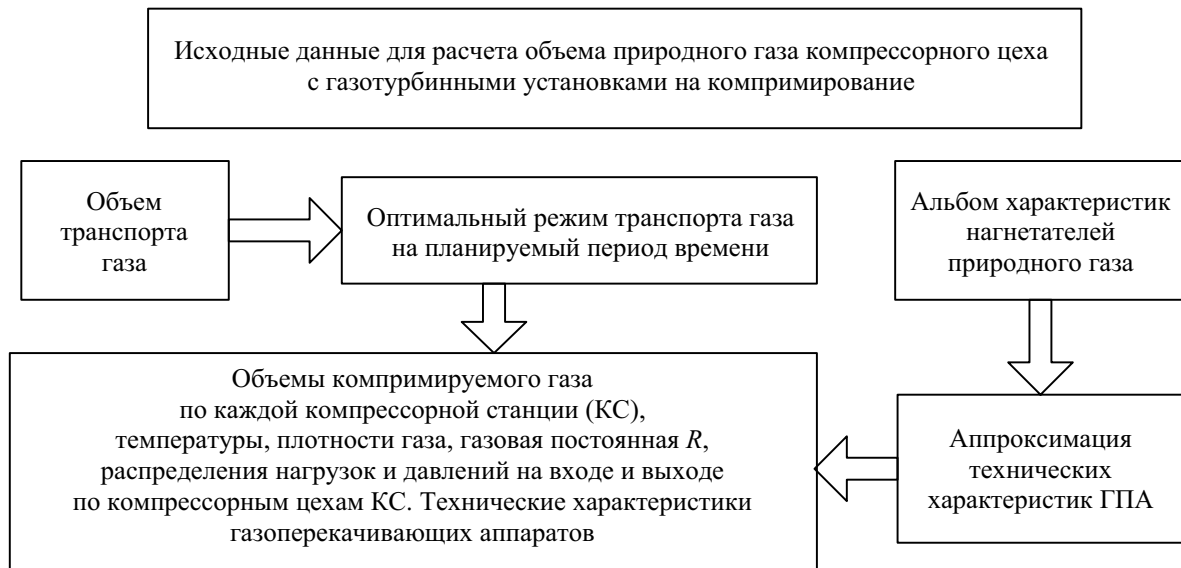


Рис. 2. Схема определения исходных данных для программы расчета планового потребления природного газа на его транспорт по ГТС

Далее по тексту приведена схема предварительного определения исходных данных, необходимых для проведения расчета планового потребления природного газа на компримирование (рис. 2).

$$N_i = zRT_1 \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k\eta_{пол}}} - 1 \right) q_m, \quad (1)$$

$$q_m = q \rho_c, \quad (2)$$

$$N_e = N_i + \Delta N_m + N_r, \quad (3)$$

$$N_{пол} = \frac{N_i}{\eta_{пол}}, \quad (4)$$

$$q_{тг} = \frac{N_e}{H_n \eta_{ГТУ}} = \frac{N_i}{H_n \eta_{ГТУ} \eta_{мех}} = \frac{N_{пол}}{H_n \eta_{ГТУ} \eta_{мех} \eta_{пол}}, \quad (5)$$

$$H_{тг}^{ПРС} = \frac{q_{тг}}{N_{пол}} = \frac{1}{H_n \eta_{ГТУ} \eta_{мех} \eta_{пол}}, \quad (6)$$

$$V_{тг} = \int_0^{\tau_{пл}} \left[H_{тг}^{ПРС} (\eta_{пол}) N_{пол} (\eta_{пол}, \varepsilon) \right] dt, \quad (7)$$

где N_i – внутренняя мощность центробежного нагнетателя (ЦБН), кВт,

N_e – мощность на муфте привод – нагнетатель, кВт;

ΔN_m – механические потери энергии в ЦБН, кВт;

N_r – тепловые потери ЦБН в окружающую среду, кВт;

$N_{пол}$ – внутренняя мощность ЦБН, работающего по политропному процессу сжатия газа, кВт;

z – коэффициент сжимаемости природного газа на входе в компрессор;

R – газовая постоянная, кДж/(кг·К);

T_1 – температура природного газа на входе в компрессор, К;

k – коэффициент адиабаты природного газа;

ε – степень повышения давления газа в компрессоре;

$\eta_{пол}$ – политропный КПД;

$\eta_{ГТУ}$ – КПД приводного двигателя ГТУ;

$\eta_{мех}$ – механический КПД;

q_m – массовый расход природного газа через ЦБН, кг/м³;

q – объемный расход природного газа через ЦБН, приведенный к стандартным условиям, м³/с;

ρ_c – плотность природного газа в стандартных условиях, кг/м³;

$q_{тг}$ – удельный расход топливного газа на компримирование природного газа в ЦБН, кВт;

H_n – низшая объемная теплота сгорания природного газа, кДж/м³;

$H_{тг}^{ПРС}$ – норма расхода топливного газа на единицу произведенной политропной работы сжатия, м³/кДж;

$V_{тг}$ – количество топливного газа, м³.

Коэффициент, учитывающий влияние атмосферных условий k_a , аппроксимирован как функция температуры наружного воздуха T_a :

для ГПА Ц-6,3

$$k_a = 0,7543 + 9,94505 \cdot 10^{-4} T_a, \quad (8)$$

для ГПА Ц-16

$$k_a = 2,763 - 0,01458 T_a + 2,98302 \cdot 10^{-5} T_a^2, \quad (9)$$

для ГПА Ц-16С и ГПА-16 «Урал» коэффициент k_a рассчитывается по формуле

$$k_a = 1,02 + 0,0025(T - 268,15), \quad (10)$$

где T_a – средняя температура атмосферного воздуха за планируемый период, К.

Аналитическая зависимость политропного КПД нагнетателей от приведенной производительности ГПА получена оцифровкой графических зависимостей, приведенных в «Альбоме характеристик нагнетателей природного газа», с последующей их аппроксимацией. В этих зависимостях Q – приведенная производительности ЦБН, м³/с.

$$\eta_{\text{пол}} = A_1 Q^{*6} + A_2 Q^{*5} + A_3 Q^{*4} + A_4 Q^{*3} + A_5 Q^{*2} + A_6 Q^* + A_0, \quad (11)$$

где $A_0, A_1 \dots A_6$ – коэффициенты регрессии для политропного КПД;

$$Q^* = Q_{\text{ком}} z_{\text{ср}} T_1 0,101325 / (p_1 + p_{\text{атм}}) / 293,16 / 24 / 3600 K,$$

где $Q_{\text{ком}}$ – коммерческий расход газа, млн м³/сут;
 T_1 и p_1 – температура и избыточное давление на входе в компрессор, К и МПа;
 $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, МПа;

$$\begin{cases} K = 1 & \text{для СТД-4000, СТД-12500,} \\ K = \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{факт}}} & \text{для ГПА Ц-6,3; ГПА Ц-16С,} \end{cases}$$

где $n_{\text{ном}}$ и $n_{\text{факт}}$ – номинальная и фактическая скорости ГПА, об/мин. Значения коэффициентов зависимостей политропного КПД для различных ГПА приведены в табл. 1. Для ГПА 16 «Урал» значение политропного КПД принято равным значению политропного КПД в сертификационной точке, т. е. 0,87.

Потребность в топливном газе компрессорного цеха с ГМК, м³, определяется по формуле

$$\Pi_{\text{т}}^{\text{КЦ}} = \Pi_{\text{ГМК}} n_{\text{ГМК}} \tau, \quad (12)$$

где $\Pi_{\text{ГМК}}$ – суточное потребление топливного газа одним ГМК, м³;

$n_{\text{ГМК}}$ – число агрегатов ГМК, шт.;

τ – длительность планируемого периода, сут.

$$\Pi_{\text{ГМК}} = H_{\text{ГМК}}^0 q_{\text{ГМК}} N_0 24 \text{ (м}^3\text{)}, \quad (13)$$

где $H_{\text{ГМК}}^0$ – норма потребления топливного газа одним ГМК, м³/ч; значения приведены в табл. 2.

Относительное потребление топливного газа ГМК $q_{\text{ГМК}}$ определяется по формуле

$$q_{\text{ГМК}} = A + B N_{\text{ГМК}}^0 + C (N_{\text{ГМК}}^0)^2, \quad (14)$$

где $N_{\text{ГМК}}^0$ – относительная мощность двигателя ГМК, кВт.

$$N_{\text{ГМК}}^0 = N_{\text{ГМК}i} / N_{\text{ГМК}}^{\text{ном}}, \quad (15)$$

$N_{\text{ГМК}}^{\text{ном}}$ – номинальная мощность ГМК, кВт. Значения коэффициентов A, B, C , входящих в формулу (14), приведены в табл. 2.

Внутренняя мощность ГМК $N_{\text{ГМК}i}$, кВт, вычисляется по формуле

$$N_{\text{ГМК}i} = z R T_1 \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{\text{ад}}}} - 1 \right) q_{\text{ГМК}}^m, \quad (16)$$

где $q_{\text{ГМК}}^m$ – массовый расход природного газа через ГМК, кг/с.

$$q_{\text{ГМК}}^m = q_{\text{ГМК}} \rho_{\text{с}}, \quad (17)$$

где $q_{\text{ГМК}}$ – объемный расход природного газа через ГМК, приведенный к стандартным условиям, м³/с;

$\eta_{\text{ад}}$ – адиабатный КПД, величина переменная, зависящая от режима работы ГМК:

$$\eta_{\text{ад}} = A' + B' \varepsilon + C' \varepsilon^2. \quad (18)$$

Значения коэффициентов A', B' и C' приведены в табл. 2.

Таблица 1

Значения коэффициентов зависимостей политропного КПД от приведенной производительности

| Тип нагнетателя | ГПА Ц-6,3 | ГПА Ц-16С | ГПА 16 «Урал» | СТД-4000 | СТД-12500 |
|---|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|
| A_0 | 28,69318 | 10,0639 | $\eta_{\text{пол}} = 0,87$ | 2,95294 | -505,4966 |
| A_1 | $4,090 \cdot 10^{-2}$ | – | | – | $-2,97 \cdot 10^{-3}$ |
| A_2 | -0,761607 | $-1,9416 \cdot 10^{-3}$ | | $9,0491 \cdot 10^{-3}$ | 0,134464 |
| A_3 | 5,79522 | $5,5306 \cdot 10^{-2}$ | | $1,4111 \cdot 10^{-1}$ | -2,52518 |
| A_4 | -23,122 | -0,621093 | | -0,88523 | 25,14273 |
| A_5 | 51,06204 | 3,39952 | | 2,72991 | -140,005 |
| A_6 | -59,09872 | -9,00912 | | -4,0064 | 413,5052 |
| Значения КПД газотурбинных установок $\eta_{\text{ГТУ}}$, механический $\eta_{\text{мех}}$ и электрический $\eta_{\text{элк}}$ | | | | | |
| $\eta_{\text{ГТУ}}$ | 0,281 | 0,345 | 0,345 | – | – |
| $\eta_{\text{мех}}$ | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,98 | 0,98 |
| $\eta_{\text{элк}}$ | – | – | – | 0,99 | 0,99 |

Параметры зависимости относительного потребления топливного газа ГМК

| Параметр | 10 ГКМА-28/75-1 | 10 ГКНАМ2 |
|--|-----------------|-----------|
| | Значение | |
| $N_{\text{ГМК}}^{\text{НОМ}}$, кВт | 736 | 1104 |
| A | -0,107734 | 0,5255 |
| B | 0,873192 | 0,15484 |
| C | -0,219572 | -0,032617 |
| $H_{\text{ГМК}}^0$, м ³ /ч | 330 | 377 |
| A' | -1,36884 | 4,5484 |
| B' | 6,42404 | -6,12529 |
| C' | -4,30493 | 2,66482 |

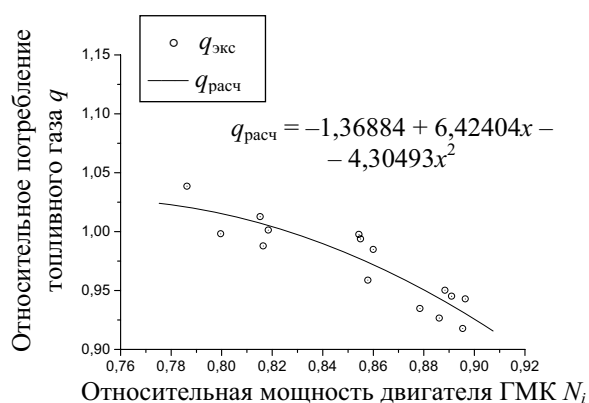


Рис. 3. Вид зависимости относительного потребления топливного газа от относительной мощности двигателя 10 ГКМА

Алгоритм расчета объема топливного газа ГПА компрессорных цехов с ГМК:

$$\Pi_{\text{ГТ}}^{\text{КЦ}} = \Pi_{\text{ГМК}} n_{\text{ГМК}} \tau, \quad (19)$$

$$\Pi_{\text{ГМК}} = H_{\text{ГМК}}^0 q N_0 24, \quad (20)$$

$$q = A + BN_0 + CN_0^2, \quad (21)$$

$$N_0 = N_i / N_{\text{НОМ}}, \quad (22)$$

$$N_i = zRT_1 \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{\text{над}}}} - 1 \right) q_m, \quad (23)$$

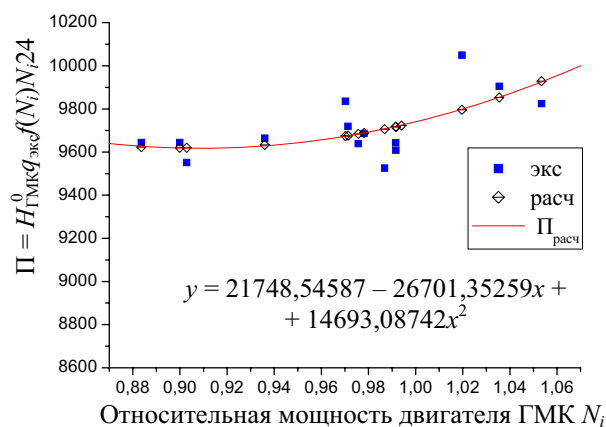


Рис. 4. Сравнение отчетно-статистических данных с результатами расчета по методике данной работы для 10 ГКНАМ

$$q_m = q p_c. \quad (24)$$

Из рис. 3 и 4 следует, что разработанная методика удовлетворительно согласуется с отчетно-статистическими данными об удельном фактическом потреблении ТЭР. Удовлетворительное согласие наблюдается и для КЦ с ГТУ.

Заключение. Разработанная методика как составная часть вошла в стандарт предприятия ОАО «Белтрансгаз» (СТП СФШИ.02.02-2008) для выполнения расчетов норм потребления ТЭР при транспорте газа.