

П. М. Клепацкий, доцент, канд. техн. наук; Т. Ф. Шкарупа, канд. техн. наук (ОИЯЭИ «Сосны» НАНБ); В. Н. Фарафонов, доцент, канд. техн. наук

### РАСЧЕТ ЦЕЛЕВОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ

The calculation method to determine the goal-oriented planning of energy-saving.

Газотранспортная система (ГТС) представляет собой разветвленную сеть газопроводов, ряд компрессорных станций (КС) с установленными на них газоперекачивающими агрегатами, подземными хранилищами газа, ГИС (газоизмерительные станции) и ГРС (газораспределительные станции). Назначение ГТС – транспортировка и поставка газа потребителям.

При течении газа в трубопроводе, вследствие взаимодействия между молекулами газа и молекулами стенки трубопровода возникают силы внутреннего трения. На преодоление этих сил тратится энергия потока.

Потери давления в простом газопроводе, т. е. трубопроводе с постоянным сечением и постоянной скоростью потока, составляют, Па:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{\pi^2 d^5} \cdot \frac{\rho^2(P_0, T_0)}{\rho(P, T)} \cdot c^2 \cdot Q_{\text{ком}}^2, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $l$  – длина трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;  $\rho(P, T)$  – плотность газа при давлении  $P$  и температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\rho(P_0, T_0) = 0,676$  – значение плотности газа в стандартных условиях (при давлении  $P_0 = 0,101325$  МПа и температуре  $T_0 = 293,15$  К), кг/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{ком}}$  – коммерческий расход газа, млн. м<sup>3</sup>/сут.;  $\pi = 3,14$ ;  $c = 46,3$ .

Коэффициент гидравлического трения зависит от режима течения газа в трубопроводе и относительной шероховатости трубы –  $\epsilon_{\text{ш}}$ .

Кроме потерь давления (энергии) на преодоление сил гидравлического трения в трубопроводах, в ГТС присутствуют потери давления на местных сопротивлениях, которые рассчитываются по уравнению, Па:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{l}{\pi^2 d^4} \cdot \frac{\rho^2(P_0, T_0)}{\rho(P, T)} \cdot c^2 \cdot Q_{\text{ком}}^2, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент потерь на местных сопротивлениях, определяемый конструкцией местного сопротивления и режимом течения газа. В газотранспортной системе основными потерями давления на местных сопротивлениях являются потери на технологических устройствах компрессорных станций.

При рассмотрении ГТС в целом, рассматриваются участки линейной части магистрального газопровода между двумя соседними компрессорными станциями (КС), которые образуются последовательно соединенными простыми участками газопровода.

Простые участки газопровода – это участки магистрального газопровода между отборами газа, т. е. участки с постоянным сечением трубопровода и расходом газа. Потери давления на таком участке описываются уравнением (1). Потери давления на магистральном трубопроводе между двумя КС будут состоять из суммы потерь давлений на простых участках трубопровода, с учетом потерь давления на местных сопротивлениях:

$$\begin{aligned} \Delta P = & \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{d_i^5} \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \frac{\rho(P_0, T_0)}{\rho(P_i, T_i)} \cdot Q_{\text{ком } i}^2 + \\ & + \sum_{j=1}^m \xi_j \cdot \frac{c^2}{2 \cdot d_j^4} \cdot \frac{\rho(P_0, T_0)}{\rho(P_j, T_j)} \cdot Q_{\text{ком } j}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ком } i}$  и  $Q_{\text{ком } j}$  – коммерческий расход газа на  $i$ -м участке магистрального газопровода и  $j$ -м местном сопротивлении;  $n$  – количество простых участков между рассматриваемыми КС;  $m$  – количество местных сопротивлений.

Влияние остальных участков ГТС системы на потери давления по магистральному газопроводу, т. е. отводов от магистрального трубопровода, в формуле (3) учитывается опосредованно через изменения в коммерческих расходах после каждого отбора, что приводит к изменению линейной скорости потока на участке  $W_i$ .

Потери давления  $\Delta P_{\text{КС}}$  на участке магистрального газопровода между  $(R-1)$ -й и  $R$ -й компрессорными станциями должны быть компенсированы на  $R$ -й КС, т. е. давление должно быть увеличено как минимум на величину  $\Delta P_{\text{КС}}$ , а может быть и выше, с учетом условий функционирования магистрального газопровода за  $R$ -й компрессорной станцией.

Таким образом, потери энергии в ГТС на транспортировку газа равны сумме потерь энергии на преодоление сил гидравлического трения по участкам магистрального газопровода от входа до выхода и сумме потерь энергии на местных сопротивлениях. Потери энергии в ГТС равны суммарной энергии потребляемой компрессорными станциями на политропическое сжатие газа.

Энергия, потребляемая компрессорными станциями ГТС, определяется суммированием потреблений энергии по станциям, работающим в отчетный период КС:

$$E_{\text{КС}} = \sum_{j=1}^R E_{\text{КС}_j}, \quad (4)$$

где  $R$  – число работавших в отчетном периоде компрессорных станций.

Энергия, потребляемая КС, состоит из суммы потребления энергии по компрессорным цехам станции, которые, в свою очередь, определяются суммированием энергий, потребляемой работающими компрессорами. Но поскольку все КС оборудованы однотипными компрессорами, потребление энергии КС определяется по формуле

$$E_{\text{КС}_j} = \sum_{i=1}^m E_{\text{компр}_i}, \quad (5)$$

где  $m$  – число работающих компрессоров в рассматриваемый период на  $j$ -й КС.

Внутренняя мощность компрессора рассчитывается по уравнению

$$N_i = P_1 \cdot v_1 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k \eta_{\text{пол}}}} - 1 \right) \cdot G, \quad (6)$$

где  $P_1$  – давление на входе в компрессор, Па;  $v_1$  – удельный объем на входе в компрессор, м<sup>3</sup>/кг;  $P_2$  – давление на выходе из компрессора, Па;  $\varepsilon = (P_2/P_1)$  – отношение давлений;  $\eta_{\text{пол}} = f(\varepsilon, Q_{\text{комм}})$  – политропный к.п.д.;  $k$  – коэффициент адиабаты перекачиваемого газа, рассчитываемый по уравнению состояния (для природного газа  $k = 1,33 \pm 0,2$ );  $G$  – массовый расход газа, кг/с.

При определении эффективности работы ГТС общее потребление ТЭР газотранспортной системой должно учитывать к.п.д. компрессоров в зависимости от режимов их работы в составе КЦ и КС. Следует также учитывать потребление ТЭР на собственные нужды КС, линейной части и газотранспортной системы в целом, потери газа в ГТС, потери газа при авариях и проведении планово-профилактических работ (ППР) и т. д. Таким образом, количество энергии потребляемой газотранспортной системой

$$E = E_{\text{КС}} + \sum_i \Delta E_i, \quad (7)$$

где  $E_{\text{КС}}$  – энергия на компримирование газа в ГТС, рассчитываемая по уравнению

$$E_{\text{КС}} = \sum_j E_{\text{КС}_j} = \sum_j \sum_i N_{ij} \cdot \tau_{ij}, \quad (8)$$

где  $\tau_{ij}$  – время работы  $i$ -го компрессора на  $j$ -й КС в отчетном периоде;  $N_{ij}$  – внутренняя мощность  $i$ -го компрессора на  $j$ -й КС, рассчитываемая по формуле (6);  $\Delta E_i$  – расход энергии по

статьям, непосредственно не связанным с компримированием газа в ГТС, таких, как потери газа при авариях, проведении планово-профилактических работ и т. д.

Расчеты, проведенные по представленной модели потребления ТЭР для восьми суточных режимов ГТС, показали, что потребление – сложная, многопараметрическая функция, зависящая:

- от объема поступления газа в ГТС или объема товаро-транспортной работы, произведенной системой;
- давления газа на входе в ГТС;
- изменения гидравлических сопротивлений труб, обвязок КС и ПХГ;
- давления газа на ГИС;
- изменения температуры грунта, которое существенно влияет на температуру входа КС; изменения температуры воздуха, которое влияет на режимы работы АВО газа;
- режимных факторов работы КС (2-х ступенчатое сжатие); режимов работы ПХГ;
- климатических факторов, которые влияют в основном на потребление ТЭР на собственные нужды;
- изменения конфигурации ГТС, т. е. ввод-вывод участка ГТС;
- объемов газа, теряемых при авариях и проведении ППР;
- влияния старения на трубопроводах и оборудовании ГТС.

При сравнении эффективности функционирования газотранспортной системы в различные временные периоды по потреблению ТЭР, необходимо учесть влияние этих факторов или привести условия работы ГТС к сопоставимым условиям по ряду параметров.

Расход топливно-энергетических ресурсов на компримирование газа КС составляет приблизительно 97% от общего потребления ТЭР газотранспортной системой, а с учетом потребления ТЭР на собственные нужды непосредственно связанные с компримированием газа этот процент будет еще выше. Поэтому допустимо перенести зависимости и численные значения коэффициентов, определяющие влияние выше-рассмотренных факторов на энергию компримирования газа, на потребления ТЭР газотранспортной системой (обобщенные энергозатраты) –  $E^{06}$ .

Таким образом, уравнение (8) можно переписать в виде

$$E = E^{06} + \sum_i \Delta E_i, \quad (9)$$

где  $\Delta E_i$  – расход энергии по статьям, непосредственно не связанным с компримированием газа в газотранспортной системе, таких, как потери газа при авариях, при проведении планово-профилактических работ и т. д. и не вошедших в расчет  $E^{06}$ .

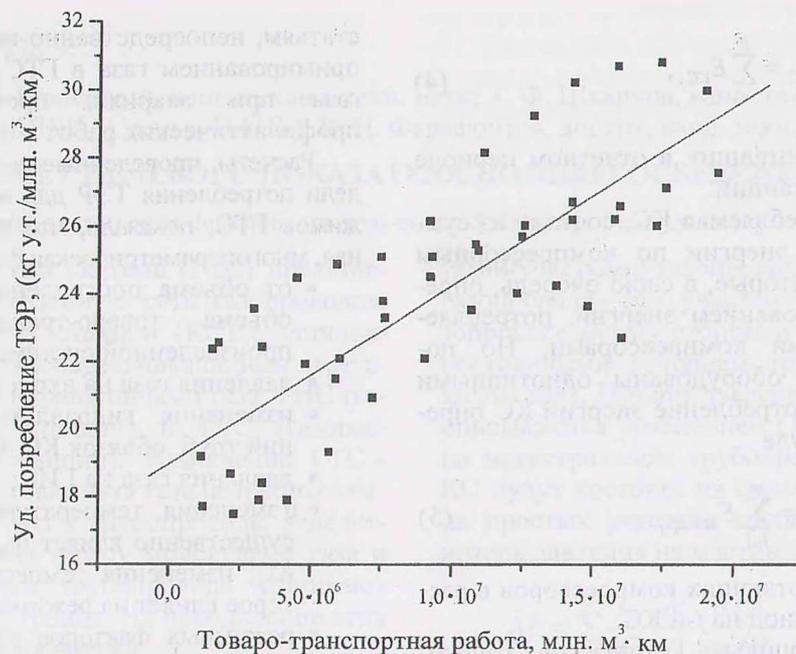


Рисунок. Зависимость удельного годового потребления ТЭР от произведенной газотранспортной системой товаротранспортной работы

Ведущим членом в уравнении, описывающем потребление ТЭР газотранспортной системой, является первое слагаемое —  $E^{06}$ .

Разложим эту функцию в ряд и, ограничившись только первыми членами разложения, получим уравнение

$$E^{06} = E_0^{06} + \frac{\partial E^{06}}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial E^{06}}{\partial P_{\text{вх}}} \cdot dP_{\text{вх}} + \frac{\partial E^{06}}{\partial P_{\text{вых}}} \cdot dP_{\text{вых}} + \frac{\partial E^{06}}{\partial T_1} \cdot dT_1 + \dots \quad (10)$$

Здесь  $E_0^{06}$  — потребление ТЭР газотранспортной системой в предыдущий отчетный период, т. е. период времени, к параметрам которого приводится текущее состояние ГТС. Для годового отчета об эффективности работы ГТС,  $E_0^{06}$  — годовое потребление топливно-энергетических ресурсов газотранспортной системы в предыдущем году. Если рассматривается эффективность работы ГТС за другой отчетный период, то значение  $E_0^{06}$  равно потреблению ТЭР за аналогичный период прошлого года.

При расчете первой производной в уравнении (10) потребление топливно-энергетических ресурсов системой определяется произведением ТТР на норму потребления, т. е.  $E^{06} = H \cdot A$ . Тогда

$$\frac{\partial E^{06}}{\partial A} = H + A \frac{\partial H}{\partial A}, \quad (11)$$

Производная  $\partial H / \partial A$  определена с использованием метода наименьших квадратов в предположении, что зависимость удельного потребления от товаротранспортной работы подчиняется линейной закону. Графическое отображение результатов, полученных методом наименьших квадратов, представлено на рисунке, из которого следует, что  $\partial H / \partial A = 1,02 \cdot 10^{-9}$  т у. т. / (млн. м³ · км)².

В качестве целевого показателя по энергосбережению для организаций, основной деятельностью которых не является производство промышленной продукции, устанавливается относительное снижение обобщенных энергетических затрат в сопоставимых условиях в отчетном периоде по сравнению с соответствующим периодом прошлого года. Таким образом, для ОАО «Белтрансгаз» в качестве целевого показателя по энергосбережению  $\eta$  предлагается:

$$\eta = \frac{E_{\text{отч}} - E_0'}{E_0'} \cdot 100\% \quad (12)$$

где  $E_{\text{отч}}$  — потребление ТЭР системой в отчетный период, т у. т.;  $E_0'$  — потребление ТЭР системой в предшествующий период, приведенное к условиям отчетного периода:

$$E_0' = E_0 + \frac{\partial E}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial E}{\partial P_{\text{вх}}} \cdot dP_{\text{вх}} + \frac{\partial E}{\partial P_{\text{вых}}} \cdot dP_{\text{вых}} + \frac{\partial E}{\partial T_1} \cdot dT_1 + \sum \Delta E_i \quad (13)$$

где  $E_0$  – потребление ТЭР системой в предшествующий период;  $(\partial E/\partial A)dA$  – поправка, приводящая потребление ТЭР к сопоставимым условиям в предшествующем и отчетном периодах по произведенной ТТР. С учетом понятия удельного потребления ТЭР (это потребление топливно-энергетических ресурсов на единицу произведенной продукции, т. е. товаротранспортной работы (1 млн. м<sup>3</sup> · км)), потребление ТЭР запишется  $E = H \cdot A$ . Тогда в соответствии с уравнением (11), перейдя к конечным приращениям, получим:

$$\frac{\partial E}{\partial A} \cdot \Delta A = \left( H + \frac{\partial H}{\partial A} \right) \cdot \Delta A. \quad (14)$$

Таким образом, поправка, приводящая потребление ТЭР к сопоставимым условиям в предшествующем и отчетном периодах, состоит из двух слагаемых:

– поправки, влияющей на изменение товаротранспортной работы  $\Delta E_1 = H_0 \cdot (A_i - A_{i-1})$  от значения  $A_{i-1}$  в предшествующем до значения  $A_i$  в отчетном периодах. Эта поправка учитывает изменение ТЭР, связанное с изменением ТТР без учета изменившихся условий производства самой товаротранспортной работы, т. е. при  $H = H_0$  – удельному потреблению ТЭР в предшествующий период;

– поправки, учитывающей изменения условий производства товаротранспортной работы –  $\Delta E_2 = A_i \cdot (\partial H/\partial A) \cdot (A_i - A_{i-1})$ . Появление этой поправки вызвано тем, что величина произведенной ТТР пропорциональна первой степени скорости потока газа, в то время как потери энергии на преодоление гидравлического сопротивления пропорциональны квадрату скорости. Введя обозначение  $k_1 = \partial H/\partial A$  и воспользовавшись значением производной  $\partial H/\partial A$ , получим окончательный вид поправки  $\Delta E_2 = k_1 \cdot A_i \cdot (A_i - A_{i-1})$ .

$\Delta E_3 = k_2 \cdot A_i \cdot (P_{\text{вх}i} - P_{\text{вх}i-1})$  – поправка, приводящая потребление ТЭР в предшествующем и отчетном периодах к сопоставимым условиям по среднему, за отчетный период, давлению входа в газотранспортную систему. Коэффициент  $k_2 = (\partial E/\partial P_{\text{вх}}) \cdot (1/A)$  – производная потребления ТЭР по давлению входа в ГТС на единицу товаротранспортной работы.  $P_{\text{вх}i-1}$  и  $P_{\text{вх}i}$  – средние по предшествующему и отчетному периодам давления на входе. Среднее давление входа в ГТС рассчитывается как средневзвешенное давление по отчетному периоду  $\sum P_{\text{вх}i} \cdot Q_{\text{ком}i} / \sum Q_{\text{ком}i}$ .

$\Delta E_4 = k_3 \cdot A_i \cdot (P_{\text{вых}i} - P_{\text{вых}i-1})$  – поправка, приводящая потребление ТЭР в предшествующем и отчетном периодах к сопоставимым условиям по среднему давлению выхода из ГТС. Коэффициент  $k_3 = (\partial E/\partial P_{\text{вых}}) \cdot 1/A$  – производная потребления

ТЭР по давлению выхода из ГТС на единицу ТТР.  $P_{\text{вых}i-1}$  и  $P_{\text{вых}i}$  – средние по предшествующему и отчетному периодам давления на выходе из ГТС, кг/см<sup>2</sup>.  $P_{\text{вых}}$  – среднее по периоду давление на выходе из ГТС, кг/см<sup>2</sup>.  $P_{\text{вых}}$  рассчитывается как средневзвешенное давление в рассматриваемом периоде,  $\sum P_{\text{вых}i} \cdot Q_{\text{ком}i} / \sum Q_{\text{ком}i}$ .

$\Delta E_5 = k_4 \cdot A_i \cdot (T_{\text{вх}i} - T_{\text{вх}i-1})$  – поправка, приводящая потребление ТЭР в предшествующем и отчетном периодах к сопоставимым условиям по средним температурам на входе в КС.  $k_4 = (\partial E/\partial T_1) \cdot (1/A)$  – производная потребления ТЭР по температуре входа в КС на единицу товаротранспортной работы.

Значения производных получены численным дифференцированием, потребление ТЭР по давлению входа в ГТС и выхода из ГТС, и средней температуре входа в КС.  $T_{\text{вх}i-1}$  и  $T_{\text{вх}i}$  – средние по предшествующему и отчетному периодам температуры на входе в КС.  $T_{\text{вх}}$  рассчитывается как средневзвешенная температура в рассматриваемом периоде  $\sum T_{\text{вх}i} \cdot Q_{\text{ком}i} / \sum Q_{\text{ком}i}$  по КС.

Данные для расчетов среднего давления входа в ГТС, среднего давления выхода из ГТС и средней температуры входа в КС предоставляются производственно-диспетчерским управлением.

Значения коэффициентов равны:

$$\begin{aligned} k_1 &= 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ т у. т./}(\text{млн. м}^3 \cdot \text{км})^2, \\ k_2 &= -1,12 \cdot 10^{-4} \text{ т у. т./}(\text{млн. м}^3 \cdot \text{км})/(\text{кг/см}^2), \\ k_3 &= 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ т у. т./}(\text{млн. м}^3 \cdot \text{км})/(\text{кг/см}^2) \text{ и} \\ k_4 &= 6 \cdot 10^{-6} \text{ т у. т./}(\text{млн. м}^3 \cdot \text{км})/К. \end{aligned}$$

$\Delta E_i$  – изменения в расходе ТЭР в предшествующем и отчетном периодах по статьям, непосредственно не связанным с компримированием газа в газотранспортной системе, таким как потери газа при авариях, при проведении планово-профилактических ремонтов и т. д., и не вошедшим в расчет  $E'$ . Уравнение (13), описывающее потребление ТЭР системой в предшествующий период, приведенное к условиям отчетного периода переписывается в виде

$$E' = E_0 + \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + \Delta E_4 + \Delta E_5 + \sum \Delta E_i, \quad (15)$$

а целевой показатель по энергосбережению в сопоставимых условиях (уравнение (12)) запишется в виде

$$\eta = (E_{\text{отч}} - E_0 - \Delta E_1 - \Delta E_2 - \Delta E_3 - \Delta E_4 - \Delta E_5 - \sum \Delta E_i) / E_0 \cdot 100\%. \quad (16)$$

Таким образом, на основе математической модели газотранспортной системы получена методика расчета целевого показателя по энергосбережению при транспортировке газа для ОАО «Белтрансгаз».