

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

НОРМИРОВАНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ «БЕЛТРАНСГАЗ»

The calculation method to determine the fuel and energy planning consumption for compressor plants is developed. The calculation method is developed for compressor plants of «Beltransgas».

Нормирование расхода ТЭР – это определение минимальной потребности в энергоресурсах, используемых газотранспортной системой (ГТС) для выполнения плановых поставок газа потребителям. Норма расхода ТЭР – это плановый расход энергоресурсов на единицу производимой работы выпущенной продукции.

Целью планирования расхода ТЭР является расчет их необходимого объема с учетом:

- оптимального режима транспорта природного газа;
- выполнения нормативных удельных расходов ТЭР на транспорт газа, отнесенных к утвержденным единицам измерения выполненной работы;
- фактического технического состояния основного и вспомогательного энергопотребляющего оборудования объектов газотранспортной системы.

Исходной информацией для планирования затрат ТЭР является:

- плановые объемы транспортировки природного газа предприятием на планируемый период времени;
- тип используемого энергопотребляющего оборудования, его технические характеристики по данным заводов-изготовителей;
- нормативные и фактические показатели технического состояния основного технологического оборудования.

На основании планового объема транспорта газа рассчитывается плановый режим работы КС, объектов линейной части газопроводов и других технологических объектов ГТС.

В качестве нормативного планового режима работы принимается оптимальный режим, т. е. такой режим работы ГТС, при котором норма потребления ТЭР будет минимальной.

В качестве основного базового показателя объема производства всей ГТС предприятия принята товаротранспортная работа (ТТР), которая определяется по формуле

$$A_{\text{ттр}} = \sum_{i=1}^n Q_i L_i, \text{ млн. м}^3 \cdot \text{км}, \quad (1)$$

где Q_i – количество транспортируемого природного газа по i -му участку газопровода за отчетный или планируемый период времени, млн. м³; L_i – длина i -го участка магистрального газопровода, км.

Нормы по расходу электроэнергии и природного газа рассчитываются отдельно.

Норма расхода электроэнергии H_e и H_g расхода природного газа на собственные нужды (СН) потребителей системы ТЭР определяется по следующим формулам:

$$H_e = \frac{E_e}{A_{\text{ттр}}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{млн. м}^3 \cdot \text{км}, \quad (2)$$

$$H_g = \frac{E_g}{A_{\text{ттр}}}, \text{ кг у.т.} / \text{млн. м}^3 \cdot \text{км}, \quad (2a)$$

где E_e и E_g – суммарные потребности (фактический расход) в электроэнергии и природном газе на собственные нужды по всей системе, складывающиеся из суммы всех затрат электроэнергии и газа по всем энергопотребляющими объектами ГТС; $A_{\text{тр}}$ – суммарная товаротранспортная работа, произведенная по всей ГТС.

Структура потребления ТЭР объектами КС состоит из основных производственных и вспомогательных производственно-эксплуатационных нужд. Основные производственные нужды – это потребление ТЭР основным технологическим оборудованием, т. е. оборудованием, непосредственно занятым в транспорте и подаче природного газа потребителям. Вспомогательные производственно-эксплуатационные нужды – это потребление ТЭР оборудованием, не участвующем непосредственно в процессе транспорта газа, но обеспечивающем поддержание объектов КС в работоспособном состоянии, так называемая система жизнеобеспечения объектов.

Определение плановой потребности в газе на собственные нужды КС

Расход природного газа на собственные нужды КС – сумма постатейных расходов газа на СН КС.

Природный газ в качестве топлива используется на КС с ГПА с приводом от ГТУ и на КС с ГМК.

На основании данных расчета оптимального режима транспорта газа на планируемый период времени, т. е. объемов компримируемого газа по каждой КС, температуры газа, плотности газа, газовой постоянной (R), распределения нагрузок и давлений входа и выхода по компрессорным цехам КС, производится расчет плановой потенциальной работы сжатия (ПРС). Потребность КС в топливном газе для компримирования газа на планируемый период определяется исходя из нормативов затрат ТЭР на единицу производимой ПРС (нормы расхода ТЭР на единицу работы сжатия).

Удельная политропная работа сжатия (политропный напор)

$$H_{\text{пол}} = zRT_1 \frac{n}{n-1} \left(\varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

где $\varepsilon = P_1/P_2$ степень сжатия, определяемая отношением давлений на выходе и входе КС; T_1 и z – температура и коэффициент сжимаемости газа в условиях всаса в КС; n – коэффициент политропы природного газа; R – газовая постоянная.

Расчет потребления топливного газа газоперекачивающим агрегатом с ГТУ в качестве привода

Внутренний напор центробежного нагнетателя H_i рассчитывается

$$H_i = \frac{H_{\text{пол}}}{\eta_{\text{пол}}} = zRT_1 \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = zRT_1 \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{n-1}{n \times \eta_{\text{пол}}}} - 1 \right), \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{пол}}$ – политропный КПД ЦБН.

Мощность на муфте «привод – нагнетатель» N_e , необходимая для работы ГПА с заданными параметрами режима транспортировки газа, определяется по мощности приводимого компрессора (центробежного нагнетателя):

$$N_e = N_i + \Delta N_m + N_r, \quad (5)$$

где N_i – внутренняя мощность ЦБН, кВт, определяется как $N_i = H_i G_n$. G_n – массовый расход природного газа через ЦБН, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔN_m – механические потери энергии в ЦБН, кВт; N_r – тепловые потери ЦБН в окружающую среду, кВт.

Таким образом, удельный расход топливного газа на сжатие природного газа в ЦБН определяется по формуле

$$q_{\text{тг}} = \frac{N_e}{Q_n \eta_{\text{ГТУ}}} = \frac{N_i}{Q_n \eta_{\text{ГТУ}} \eta_{\text{мех}}} = \frac{N_{\text{пол}}}{Q_n \eta_{\text{ГТУ}} \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{пол}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

где Q_n – объемная низшая теплота сгорания природного газа, кДж/м³; $\eta_{\text{ГТУ}}$ – К.П.Д., ГТУ.

Согласно изложенным выше принципам нормирования расхода топливного газа, норма расхода топливного газа на единицу политропной работы сжатия определяется по формуле

$$H_{\text{тг}}^{\text{ПРС}} = \frac{q_{\text{тг}}}{N_{\text{пол}}} = \frac{1}{Q_n \eta_{\text{ГТУ}} \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{пол}}}, \text{ м}^3/\text{кДж}. \quad (7)$$

Здесь величины низшей теплоты сгорания газа Q_n , К.П.Д. ГТУ $\eta_{\text{ГТУ}}$, механических потерь в ЦБН $\eta_{\text{м}}$ являются величинами квазипостоянными, т. е. незначительно зависящими от изменения режима работы ЦБН (ε , $Q_{\text{ком}}$), тогда как политропный К.П.Д. $\eta_{\text{пол}}$ является величиной переменной, зависящей от режима работы ЦБН (ε , $Q_{\text{ком}}$).

Тогда формула расчета планового количества топливного газа примет вид

$$Q_{\text{тг}} = \int_0^{\tau_{\text{пл}}} [H_{\text{тг}}^{\text{ПРС}}(\eta_{\text{пол}}) N_{\text{пол}}(\eta_{\text{пол}}, \varepsilon)] dt, \text{ м}^3, \quad (8)$$

где $H_{\text{тг}}^{\text{ПРС}}$ – норма расхода топливного газа на единицу произведенной политропной работы сжатия, м³/кДж, – функция, зависящая от политропного К.П.Д. ЦБН, который, в свою очередь, зависит от режима работы агрегата; $N_{\text{пол}}$ – внутренняя мощность ЦБН, работающего по политропному процессу сжатия газа, кВт, переменная функция, зависящая от изменения политропного КПД и степени сжатия ЦБН в зависимости от изменения режима работы агрегата; $\tau_{\text{пл}}$ – плановый период времени, по которому производится расчет потребности в топливном газе, с.

Необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации происходит сдвиг характеристики $\eta_{\text{пол}} = f(Q_{\text{ком}})$. Основными причинами ухудшения технического состояния нагнетателей являются следующие факторы: эрозионный износ рабочих колес нагнетателей (до 70%); увеличение зазоров в уплотнениях нагнетателей (до 20%); эрозионный износ лопаточных диффузоров и загрязнение проточной части нагнетателей (до 10%).

При уменьшении политропного К.П.Д. нагнетателя обеспечение постоянных выходных параметров (степени повышения давления природного газа и коммерческого расхода) сопровождается пропорциональным увеличением потребляемой мощности.

При расчете планового количества топливного газа ГТУ необходимо учитывать также влияние изменения температуры наружного воздуха.

Учет этих обстоятельств производится введением в расчетную формулу (8) соответствующих коэффициентов.

Потребность в топливном газе по КС в отдельности и в целом по предприятию определяется путем суммирования по всем ГПА.

Расчет расхода топливного газа газомотокомпрессорных станций

Нормативная потребность в топливном газе для газомотокомпрессоров определяется по формуле

$$P_{\text{топ}} = H_{\text{ГМК}} N, \text{ кг у.т.}, \quad (10)$$

где $H_{\text{ГМК}}$ – удельная норма на работу сжатия – величина постоянная для данного вида ГМК, кг у.т./(кВтч); N – внутренняя мощность компрессора, определяется по формуле

$$N = H_{\text{пол}} \eta_{\text{пол}} G_n. \quad (11)$$

Расчет потребности в природном газе на работу турбодетандеров при пуске ГПА в работу.

Потребность в природном газе на производство пусков ГПА в работу определяется по формуле

$$Q_{\text{пуск}} = q_{\text{пуск}} n, \text{ м}^3, \quad (12)$$

где $q_{\text{пуск}}$ – расход сжатого природного газа на запуск ГПА, м^3 , принимается по паспортным данным завода-изготовителя агрегата; n – количество пусков ГПА в планируемом периоде.

Расчет расхода газа при продувке нагнетателей при пуске ГПА и ГМК в работу и стравливании газа из полости нагнетателей при остановке агрегатов

Продувка контуров нагнетателей производится всегда только в режиме критического истечения. Количество природного газа, необходимое для проведения одной продувки, не зависит от типа нагнетателя ГПА и вычисляется по формуле

$$Q_{\text{пр}} = 296 S P_1 \tau, \text{ м}^3, \quad (13)$$

где S – площадь сечения трубы, через которую производится продувка контура нагнетателя, P_1 – давление природного газа на входе в нагнетатель, $\text{кг}/\text{см}^2$; τ – время проведения продувки, с, ($\tau \approx 20$ с).

Объем природного газа, стравливаемого из контуров нагнетателей при остановке агрегатов, вычисляется по формуле

$$Q_{\text{стр}} = V_{\text{нагн}} \frac{P_{\text{нагн}} 293,15}{1.0339 T_{\text{нагн}} z}, \quad (14)$$

где $V_{\text{нагн}}$ – геометрический объем контура нагнетателя, м^3 ; P_1 и P_2 , T_1 и T_2 – давления и температуры газа до и после стравливания; $P_{\text{нагн}}$ – среднее абсолютное давление природного газа в контуре нагнетателя на момент остановки агрегата, $\text{кг}/\text{см}^2$ $P_{\text{нагн}} = 0.5(P_1 + P_2)$; $T_{\text{нагн}}$ – средняя температура природного газа в контуре нагнетателя на момент остановки агрегата, К, $T_{\text{нагн}} = 0.5(T_1 + T_2)$; z – коэффициент сжимаемости.

Определение планового расхода природного газа на технологические утечки из полости компрессора при его работе

а) Расчет планового расхода природного газа, стравливаемого через систему газомаслоотделения центробежных нагнетателей производится по следующей формуле:

$$Q_{\text{упл}} = k_{\text{упл}} \tau n, \text{ м}^3, \quad (15)$$

где $k_{\text{упл}}$ – коэффициент (норма) расхода газа через газомасляные уплотнения, ($k_{\text{упл}} \approx 5,0 \text{ м}^3/\text{ч}$); τ – время работы ГПА под нагрузкой, ч; n – количество работающих в запланированном периоде ГПА.

б) Расчет планового расхода природного газа, стравливаемого через уплотнения компрессорных цилиндров ГМК, производится по той же формуле, но с коэффициентом $k_{\text{упл}}$ – коэффициент (норма) расхода газа

Определение плановой потребности в электроэнергии КС

Компрессорные цеха (КЦ), являющиеся составной частью компрессорных станций, оснащенные ГПА, использующие в качестве привода синхронные электродвигатели (ГПА 4000/2 и ГПА 12500) – основные потребители электроэнергии на предприятии. Кроме того, КС оснащены различным вспомогательным энергопотребляющим оборудованием, использующим в качестве основного типа энергии электроэнергию, таким, как системы автоматического сбора данных, системы дистанционного управления, системы водоснабжения, вентиляции, освещения объектов и т. п. Суммарное фактическое потреб-

ление электроэнергии всем вспомогательным оборудованием составляет в среднем $0,7 \div 1,5\%$ от общего потребления электроэнергии объектами предприятия.

Вспомогательное оборудование КС целесообразно разделить на три технологически различающихся группы:

- электрооборудование, непосредственным образом связанное с работой конкретного ГПА (электродвигатели насосов масла смазки, масла уплотнения, аппаратов воздушного охлаждения (АВО) масла, система КИПиА и т. п.);

- электрооборудование, связанное с технологическими процессами, зависящими от режима работы КЦ в целом (АВО газа);

- электрооборудование, не связанное непосредственно с работой ГПА (электрооборудование административных зданий и вспомогательных помещений, циркуляционные насосы вентиляции, компрессоры сжатого воздуха, мастерские, освещение, охранная сигнализация) – так называемая система жизнеобеспечения КС.

Расход электроэнергии по первой группе электропотребителей является составной частью общего расхода электроэнергии ГПА и входит в расчет удельной нормы.

Расход количества необходимой электроэнергии по потребителям второй группы рассчитывается отдельно в зависимости от режима транспорта газа по каждой КС ГТС и средней температуры наружного воздуха (по статистическим данным).

Расход количества необходимой электроэнергии по потребителям третьей группы рассчитывается отдельно по каждой КС в соответствии с конкретным оснащением вспомогательных объектов и производств различным энергопотребляющим оборудованием.

Суммарный расход электроэнергии при компримировании газа на КС состоит из следующих статей:

- расход электроэнергии ГПА компрессорных цехов;
- расход электроэнергии АВО газа, АВО воды компрессорных цехов;
- расход электроэнергии котельными собственными нужд КС;
- расход электроэнергии установками электрохимической защиты;
- потери электроэнергии в сетях и трансформаторах;
- расход электроэнергии на нужды мастерских и другими подразделениями производственного назначения;
- расход электроэнергии на водоснабжение, работу очистных сооружений;
- на внутреннее и внешнее освещение;
- расход электроэнергии на вентиляцию;
- расход электроэнергии системой КИПиА;
- расход электроэнергии на освещение и охранную сигнализацию КС;
- расход электроэнергии на зарядку аккумуляторных батарей.

Расчет суммарной потребности в электроэнергии КС состоит в постатейном определении расхода электроэнергии по КЦ и его последующем суммировании по формуле, т. е.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}, \quad (16)$$

где E_i – расход электроэнергии, определенный по каждой статье расхода.

Расчет расхода электроэнергии ГПА компрессорных цехов

Как и в случае расчета потребления газа на собственные нужды, по результатам расчета оптимального режима транспорта газа на планируемый период времени, т. е. объемов компримируемого газа по каждой КС, температуры газа, плотности газа, газовой постоянной – R , давлений на входе и выходе КЦ и распределения нагрузок по компрессорным цехам КС, производится расчет плановой потенциальной работы сжатия (ПРС). Потребность КЦ в электроэнергии для компримирования газа на планируемый период определяется исходя из нормативов затрат ТЭР на единицу производимой ПРС (нормы расхода ТЭР на единицу работы сжатия).

Необходимая для работы ГПА с заданными параметрами режима транспортировки газа мощность на муфте «привод – нагнетатель» вычисляется по формулам (5–7).

Удельный расход электроэнергии на сжатие природного газа в ЦБН определяется по формуле

$$e_{\text{эл.эн}} = \frac{1}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{пол}}} \cdot 3600, \text{ (кВт ч)/кВт}, \quad (17)$$

где $\eta_{\text{эд}}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Согласно изложенным выше принципам нормирования расхода электроэнергии норма расхода электроэнергии на единицу политропной работы сжатия определяется по формуле

$$H_{\text{эл.эн}}^{\text{ПРС}} = \frac{10^3}{\eta_{\text{эд}} \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{пол}}} \cdot 3600, \text{ (кВт ч)/кДж}. \quad (18)$$

Здесь величины К.П.Д. электродвигателя $\eta_{\text{эд}}$, механических потерь в ЦБН $\eta_{\text{м}}$ являются величинами постоянными, тогда как политропный К.П.Д. $\eta_{\text{пол}}$ является величиной переменной, зависящей от режима работы ЦБН (ε , $Q_{\text{ком}}$).

Потребление электроэнергии на компримирование газа рассчитывается по формуле (10).

Расчет расхода электроэнергии АВО газа компрессорных цехов

Потребность в электроэнергии для работы электродвигателей аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО газа) рассчитывается по формуле

$$E_{\text{АВО}} = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i K_i m_i \tau_i}{\eta_i} \right) \right]_j, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (19)$$

где N_i – номинальная мощность двигателя АВО газа i -го типа, кВт; K_i – коэффициент использования мощности двигателя АВО газа i -го типа; m_i – количество работающих двигателей АВО газа i -го типа на одной КС; τ_i – суммарная продолжительность работы двигателя АВО газа i -го типа в планируемый период времени, ч; η_i – К.П.Д. двигателя АВО газа i -го типа; n – количество применяемых типов двигателей АВО газа на одной КС; m – количество работающих КС, по которым осуществляется планирование расхода электроэнергии.

Определение планового расхода электроэнергии прочими потребителями КС

Расчет плановой потребности прочих потребителей электроэнергии определяется в зависимости от их установленной мощности и суммарного времени работы в запланированном периоде по формуле

$$E_{\text{потр}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i K_i \tau_i}{\eta_i} \right), \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (20)$$

где N_i – номинальная мощность i -го потребителя, кВт; K_i – коэффициент использования мощности i -го потребителя; τ_i – суммарная продолжительность работы i -го потребителя в планируемый период времени, ч; η_i – К.П.Д. i -го потребителя; n – количество применяемых потребителей на КС.

Таким образом, в статье разработаны и приведены основные положения методики расчета планового потребления ТЭР компрессорными станциями. Эта методика является основой нормирования потребления ТЭР. Результаты работы используются при нормировании ТЭР по газотранспортной системе «Белтрансгаз».