Р.А. ДУМАНЯН

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Предложена методика оценки энергоэффективности линейных участков магистральных газопроводов, позволяющая установить источники пониженной энергоэффективности в линейной части газопроводов для последующей разработки организационных и технических мероприятий по их устранению; оценить энергосбережение от внедрения отдельно взятого или комплекса различных мероприятий; контролировать энергоэффективность линейных участков в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность, газопровод, гидравлические потери, эксэргия, энергоресурсы.

При сравнительном анализе энергоэффективности линейных участков магистральных газопроводов обычно ориентируются на величину разности или разности квадратов давлений газа в начале (p_1) и конце участка (p_2). Но это может привести к ошибочным выводам. Во-первых, потому, что величина $(p_1 - p_2)$ не отражает цель (эффект), обеспечение которой требует преодоления сопротивления участка; во-вторых, эта величина не дает оценку гидравлических потерь, возникающих из-за несовершенства участка.

Например, если на первом участке $p_1 = 5,5$ и $p_2 = 4$ МПа, а на втором участке $p_1 = 5$ и $p_2 = 3,5$ МПа, то при $p_1 - p_2 = 1,5$ МПа=*idem* отношение p_1/p_2 на первом участке (1,375) оказывается существенно меньше, чем на втором (1,428). Так как полезная (политропная) работа, передаваемая на компрессорных станциях (КС) газовому потоку, оценивается в пропорциональной зависимости от степени повышения давления газа в нагнетателях [1], то о гидравлических потерях неправомерно судить по величине $(p_1 - p_2)$ или $p_1^2 - p_2^2$.

Для расчета гидравлических потерь приходится использовать уравнение энергии, которое при отсутствии технической работы носит название обобщенного уравнения Бернулли [2]:

$$-dL_{тр} = vdp + wdw + gdh, \quad (1)$$

где $dL_{тр}$ – работа сил трения (гидравлические потери), приходящаяся на единицу массы газа; v – удельный объем газа; w – скорость газа; h – нивелирная высота центра тяжести массы; g – ускорение силы тяжести.

Однако практическое использование (1) осложнено трудностями вычисления его интеграла, связанными с незнанием закона изменения состояния газа $-v = v(p)$ на участках с учетом путевого охлаждения

газа. Для преодоления этих трудностей остановимся на анализе теоретических возможностей вычисления работы сил трения иным способом, не требующим знания указанной закономерности.

Воспользуемся с этой целью понятием эксэргии (работоспособности).

Изменение физической эксэргии единицы массы газа определяют из уравнения, следующего из теории термодинамических потенциалов:

$$-de = di - T_0 ds, \quad (2)$$

где di и ds – изменения энтальпии (i) и энтропии газа (s) в системе координат, движущейся с рассматриваемой массой газа; T_0 – температура окружающей среды, переменная вдоль газопровода.

Обращает на себя внимание двойное влияние T_0 на de : через di и ds , которые зависят от температуры газа T и, следовательно, от T_0 ; температура T_0 входит в (2) и в явном виде, в качестве множителя; в силу ее переменности она обуславливает дополнительное изменение эксэргии газа. Очевидно, что это изменение при расчете гидравлических потерь должно быть исключено из рассмотрения, как не связанное с физическим процессом, происходящим в трубопроводе. С этой целью можно ввести понятие условной окружающей среды (единой для всех линейных участков), задавая постоянной ее температурой T_y , равной, например, 288 К, и барометрическим давлением $B_y = 0,1013$ МПа (имеется в виду, что при этом влияния фактических T_0 и B_0 на de учитываются через di и ds).

Тогда

$$-de = di - T_y ds. \quad (3)$$

Здесь, согласно уравнению энергии и второму закону термодинамики,

$$ds = (-dq + dq_r) / T = (di - vdp) / T, \quad (4)$$

где общее количество тепла, участвующее в теплообмене, складывается из двух составляющих – отводимой наружу (dq) и подводимой газу изнутри (dq_r).

Если заменить в (3) значение ds из (4) и иметь в виду, что

$$pv = zRT, \quad (5)$$

где z – коэффициент сжимаемости газа; R – газовая постоянная, получим

$$-de = de_p + de_T. \quad (6)$$

$$\text{В (6) } de_p = z_y R T_y \frac{dp}{p} \quad (7)$$

изменение механической составляющей эксэргии (МСЭ) газа, происходящее за счет потенциала давления, где $z_y = z_y(p, T_y)$ – значение z при $T = T_y$ и абсолютном давлении p , рассчитываемом с учетом B_0 ;

$$de_T = \frac{T - T_y}{T} di \quad (8)$$

изменение термической составляющей эксэргии (ТСЭ) газа.

В рассматриваемой системе координат уравнение теплосодержания имеет вид

$$di = -dq. \quad (9)$$

Поэтому значение

$$-de_T = \frac{T - T_y}{T} dq \quad (10)$$

численно равно максимальной работе, которая может быть получена по элементарному циклу С.Карно, с КПД, равным $(T - T_y)/T$, за счет теплоты изобарного охлаждения газа до температуры T_y . С учетом (4) и (10) уравнение (3) можно переписать в виде

$$-de = vdp + de_T + \frac{T - T_y}{T} dq_r. \quad (11)$$

Здесь следует принять, что располагаемая работа теплоты dq_r

$$\frac{T - T_y}{T} dq_r = 0, \quad (12)$$

так как, согласно (9), наличие внутреннего "подогрева" газа за счет трения не приводит к изменению теплосодержания газа; изменение ТСЭ газа, происходящее в том числе от изменения температуры газа за счет эффекта Джоуля-Томсона, учитывается целиком в de_T .

Уравнение (12) отражает суть "потерь энергии" при эквивалентном преобразовании работы сил трения в теплоту dq_r , которая выражается в обесценении энергии в смысле потерь ее качества (работоспособности).

Сравнение (6) и (11) с учетом (12) показывает, что

$$vdp = de_p = z_y RT_y \frac{dp}{p}, \quad (13)$$

т.е. в движущейся вместе с газом системе координат на работу трения расходуется МСЭ газа:

$$-dL_{тр} = z_y RT_y \frac{dp}{p}. \quad (14)$$

В неподвижной системе координат получим окончательно

$$-dL_{тр} = z_y RT_y \frac{dp}{p} + wdw + gdh. \quad (15)$$

В отличие от (1), для вычисления интеграла (15) не требуется знания закона изменения состояния газа в трубопроводе.

На линейных участках газопроводов изменением кинетической энергии газа ($w dw$) пренебрегают по сравнению с первой слагаемой (1); погрешность – не более 0,2(0,3%. В большинстве случаев без существенного проигрыша в точности расчетов пренебрегают также изменением h (при разности высотных отметок начала и конца участка не более 200 м [3]). Тогда для расчета гидравлических потерь можно использовать уравнение (14); его интегрирование приводит к формуле

$$L_{\text{тр}} = \bar{z}_y R T_y \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (16)$$

где $\bar{z}_y$ – значение z при $T = T_y$ и среднем давлении газа на участке.

Давления p_1 и p_2 в (16) предполагаются заданными: на газопроводах фактические их значения контролируются штатными измерениями; при заданном p_1 давление p_2 можно оценить расчетным путем на основе известной формулы [3]:

$$p_1^2 - p_2^2 = k Q^2, \quad (17)$$

где

$$k = \frac{\Delta T_{\text{cp}} z_{\text{cp}} x}{(\alpha \varphi E \cdot 17 \cdot 10^{-6} d^{2,6})^2}. \quad (18)$$

Здесь p_1 и p_2 выражены в МПа; Q – коммерческий объем (приведенный к давлению 0,1013 МПа и температуре 293 К) транспортируемого газа, млн·м³/сут, d – диаметр газопровода, см; x – длина участка, км; Δ – относительная плотность газа по воздуху; T_{cp} – средняя температура газа на участке, К; z_{cp} – среднее значение z в интервале от p_1 до p_2 при $T = T_{\text{cp}}$; E – коэффициент гидравлической эффективности участка, учитывающий состояние внутренней поверхности труб ($E=0,9(1,1)$); α и φ – коэффициенты, учитывающие отклонение режима течения от квадратичного и наличие в газопроводе подкладных колец соответственно.

Расчеты показывают, что на линейных участках газопроводов доля потерь МСЭ газа в (6) составляет 94(98%.

Перейдем к определению энергоэффективности линейного участка. В качестве "эффекта" при транспортировании газа принято рассматривать совершение товаро-транспортной работы (кубокилометров), равной произведению Q на дальность транспорта. Придерживаясь данного "эффекта", понятие энергоэффективности линейного участка может быть построено на определении удельных гидравлических потерь, следующих из (16):

$$\ell = \frac{96 z_y T_y}{x} \ln \frac{p_1}{p_2} \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{млн} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{км}. \quad (19)$$

Имеется в виду, что общие гидравлические потери составляют

$$\bar{L}_{\text{тр}} = \ell Q x \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{сут.}$$

Данное определение позволяет исключить влияние x на ℓ : несложные преобразования (19) с учетом (17) приводят к сокращению x .

При наличии на участке путевых поступлений – отборов газа, имеем

$$\ell = \frac{\left(\sum_{j=1}^{\bar{j}} N_j - \sum_{i=1}^{\bar{i}} N_i \right) \cdot 24 \cdot 10^3}{\sum_{\gamma=1}^{\bar{\gamma}} Q_{\gamma} x_{\gamma}}, \quad (20)$$

где, согласно (7), мощности потоков МСЭ газа (МВт):

$$N_j = 0,004 z_{y_j} T_y Q_j \ln \frac{p_j}{B_y}; \quad (21)$$

$$N_i = 0,004 z_{y_i} T_y Q_i \ln \frac{p_i}{B_y}; \quad (22)$$

$\bar{j}, \bar{j}$ и $\bar{i}, \bar{i}$ – соответственно индексы и количества потоков газа, поступающих на участок и покидающих его; γ и $\bar{\gamma}$ – индекс и количество линейных отрезков участка с постоянными по их длине значениями потоков Q .

Формула (19) следует из (20).

Рассмотрим некоторые результаты расчета ℓ по диспетчерским данным. На первом участке $p_1 = 6,58$; $p_2 = 5,15$ МПа; $x = 101$ км; на втором участке того же газопровода: $p_1 = 7,2$; $p_2 = 5,65$ МПа; $x = 111$ км. Перепад давления на первом участке (1,43 МПа) меньше, чем на втором (1,55); меньше и разность квадратов давлений (16,77 против 19,92). Если об энергоэффективности судить по этим показателям, то второй участок оказывается хуже. Расчеты по (19) приводят к обратному результату – хуже первый участок: ℓ_1 на 10% больше, чем ℓ_2 (74 против 67 кВт·ч/млн·м³·км). Это связано с тем, что при близких p_1/p_2 длина первого участка меньше на 10%.

Величина ℓ (19) связана с технологическими показателями участка, входящими в (17):

$$\ell = \frac{96 z_y T_y}{x} \ln \left(1 - \frac{k Q^2}{p_1^2} \right)^{-0,5}. \quad (23)$$

Формула (23) позволяет оценить изменение энергоэффективности линейного участка от внедрения отдельно взятого или комплекса различных энергосберегающих мероприятий. Например, снижение ℓ от повышения p_1 на 0,1 МПа может составлять на реальных участках более 5%. Столь существенное влияние изменения давления p_1 на ℓ

показывает, что, за исключением концевых линейных участков, ликвидация энергетически "узких мест" в линейной части газопровода требует прежде устранения причин, сдерживающих увеличение этого давления (дефекты труб, другие ограничения на повышение давления нагнетания КС). В числе мероприятий, обеспечивающих уменьшение произведения kQ^2 и, следовательно, ℓ относятся: очистка полости труб одним из известных способов; снижение Q за счет возможного перераспределения газопотоков в газотранспортной системе и пр. Из (23) следует, что если на данном линейном участке происходят одновременные изменения загрузки по потоку (Q), коэффициента гидравлической эффективности (E), давления p_1 и пр., то наличие постоянства $kQ^2 = p_1^2 - p_2^2$ или перепада ($p_1 - p_2$) не может являться основанием для вывода о неизменности энергоэффективности участка; следует ориентироваться на постоянство отношения давлений p_1/p_2 (19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рис В.Ф.** Центробежные компрессорные машины. Изд. 2-е. – М.; -Л.: Машиностроение, 1964. – 335 с.
2. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
3. Справочник работника магистрального газопровода. – Л.: Недра, 1974. - 432 с.

Ин-т "Армгазпроект". Материал поступил в редакцию 11.05.1999.

Ռ.Հ. ԴՈՒՄԱՆՅԱՆ ՄԱՅՐԱԳԾԱՅԻՆ ԳԱԶԱՄՈՒՂՆԵՐԻ ԳԾԱՅԻՆ ՏԵՂԱՄԱՍԵՐԻ ԷՆԵՐԳԱԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Առաջարկվում է մայրագծային գազամուղների գծային տեղամասերի էներգաարդյունավետության գնահատման մեթոդ, որը հնարավորություն է ընձեռում գազամուղների գծային մասում որոշել ցածր էներգաարդյունավետության աղբյուրները՝ վերջիններիս վերացման տեխնիկական և կազմակերպչական միջոցառումներ մշակելու համար, գնահատել էներգախնայողությունն ըստ տարբեր միջոցառումների, վերահսկել գծային տեղամասերի էներգաարդյունավետությունը շահագործման ընթացքում:

R.A. DUMANYAN LINE SECTION POWER EFFECTIVENESS ESTIMATION OF MAIN GAS PIPELINES

Line section power effectiveness estimation methods of gas transportation through piping system is proposed. This allows to establish low power effectiveness sources in the linear part of the pipeline for further development of organizational and technical procedures for their elimination, evaluate the power supply after implementing a separate or a set of different procedures, control the line section power effectiveness during the service.