



ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Определение термомеханической эксергии газообразного топлива и потенциала энергосбережения в системах газоснабжения

Степанов В. С., доктор техн. наук

Иркутский государственный технический университет

Степанова Т. Б., доктор техн. наук

Ангарская государственная техническая академия

Описана методика определения термомеханической эксергии природного газа в системах газоснабжения. Рассчитаны значения эксергии сжатого газа в зависимости от его давления. Дана оценка потенциала энергосбережения в системах обеспечения газом потребителей внутри страны. Предложено использование газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ) для выработки электроэнергии вместо дросселирования газа перед подачей его в распределительные сети.

Ключевые слова: природный газ, энергетический потенциал, эксергетический метод, термомеханическая эксергия.

В настоящее время одной из основных тенденций развития экономики всех стран является ресурс- и энергосбережение. В связи с этим необходим поиск путей и технических средств для осуществления соответствующей перестройки экономики и определения возможных резервов экономии энергоресурсов в различных сферах. Об актуальности проблемы свидетельствуют публикации в научно-технической литературе [1 – 4]. Большинство из них посвящено решению частных задач, определению резервов экономии энергоресурсов в конкретных процессах и установках, оценке эффективности отдельных энергосберегающих мероприятий, однако отсутствует общий методический подход к ее решению.

У одних авторов исследования базируются на энергетическом балансе технического объекта, построенном на первом начале термодинамики, позволяющем суммировать потоки энергии неодинакового качества [1, 3]. Другие учитывают ограниченную превратимость некоторых форм энергии в работу как следствие второго начала термодинамики [2, 4]. Признание качественного различия означает, что суммирование разных форм энергии неправомерно. Для того чтобы они были сопоставимыми, нужна единая мера, позволяющая количественно оценить энергию с учетом качественных характеристик. Такой мерой служит *эксергия*, понятие которой было предложено более 50 лет назад [5 – 7]. Обычно различают следующие виды эксергии:

термомеханическую (физическую), которая объединяет эксергию неподвижного тела e_V и эксергию вещества в потоке e_p ;

химическую e_x ;

концентрационную e_0 .

Эти понятия в полной мере могут и должны быть использованы для термодинамического анализа процессов, установок и предприятий разных отраслей с целью выявления мест и причин возникновения неоправданных потерь эксергии и оценки потенциала энергосбережения. Рассмотрим одну из самых мощных отраслей экономики России — газовую, осуществляющую добычу, очистку, транспортировку и распределение природного газа. Известно, что энергетическая ценность (энергетический потенциал) газообразных топлив складывается из двух составляющих. Первая определяется химическим (компонентным) составом топлива, вторая зависит от физических параметров поступающего газа.

Истинный (теоретический) энергетический потенциал газообразного топлива как смеси различных химических веществ может быть определен только на основе его химической энергии и эксергии. Методы расчета этих показателей для любых химических веществ, топлив и нетопливных материалов разработаны давно [4, 8, 9]. Известно также, что существующая в нашей стране практика оценки энергетического потенциала топлив по нижней теплоте сгорания необоснованно завышает КПД энергетических и технологических

агрегатов, а значит, не позволяет правильно оценить потенциал энергосбережения в них. Но все эти проблемы относятся к сфере других отраслей, которые потребляют газообразное топливо.

Что касается физической составляющей потенциала природного газа, то он определяется термомеханической эксергией и может быть использован в самой газовой отрасли. Настоящая статья посвящена методам оценки энергетического потенциала газообразного топлива, определяемого его физическими параметрами, прежде всего — давлением. При этом важно в первую очередь уточнить термины, применяемые на практике, но не всегда правильно характеризующие реальные процессы, происходящие в газе.

Технологические процессы газовой отрасли реализуются при давлениях, изменяющихся в широком диапазоне. В частности, при перемещении газа по магистральным газопроводам его давление вследствие потерь на преодоление аэродинамического сопротивления снижается до определенного уровня. Для повышения давления до расчетного устанавливаются промежуточные компрессорные станции (ПКС). Таким образом, перемещаемый по газопроводам газ постоянно подвергается сжатию и расширению. Однако о том, какие энергетические преобразования происходят при этом с ним, как изменяется его энергетический потенциал, у специалистов нет единого мнения.

В научной и специальной технической литературе часто можно встретить выражения “энергия сжатого газа”, “потери энергии сжатого газа” и др. Нетрудно показать, что использование такой терминологии не соответствует действительной картине энергетических превращений при осуществлении процессов сжатия и расширения газов.

Уравнения энергетического и эксергетического балансов обратимых процессов сжатия и расширения для единицы массы любого газообразного топлива имеют вид:

$$l = h_2 - h_1 + q; \quad (1)$$

$$l = e_2 - e_1 + e_q = e_2 - e_1 + q\tau_e, \quad (2)$$

где $\tau_e = T - T_0/T$ — коэффициент работоспособности теплоты; T — произвольная температура; T_0 — температура окружающей среды.

Процессы могут происходить при разном соотношении температур T и T_0 . Интерес представляет случай сжатия при $T = T_0$, когда $e_q = 0$. Тогда $l = e_2 - e_1$, т. е. работа изотермического сжатия (расширения) при температуре окружающей среды равна разности значений эксергии газа в начальном и конечном состояниях.

Из уравнения (1) следует, что изменение энергии газа (в поточном процессе энергия газа измеряется энтальпией) равно разности затраченной работы l и отведенной теплоты q :

$$h_2 - h_1 = l - q. \quad (3)$$

Для идеального газа эта величина равна нулю, поскольку его эксергия не зависит от давления, и отведенная в процессе сжатия теплота q равна затраченной работе l .

Для реального газа в общем случае $q \neq l$, и разность $h_2 - h_1$ определяется значением и знаком изотермического эффекта Джоуля — Томсона рассматриваемого газа Δh_T при данной температуре, т. е.

$$\Delta h_T = h_1 - h_2. \quad (4)$$

Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества эффект Джоуля — Томсона свидетельствует о наличии в газе сил межмолекулярного взаимодействия. Действительно, при взаимном притяжении молекул внутренняя энергия u газа включает как кинетическую энергию молекул, так и потенциальную энергию их взаимодействия. Расширение газа в условиях энергетической изоляции не изменяет его внутреннюю энергию, но приводит к росту потенциальной энергии взаимодействия молекул, поскольку расстояния между ними увеличиваются. Это увеличение происходит за счет уменьшения кинетической энергии, что в свою очередь приводит к замедлению теплового движения молекул и снижению температуры расширяющегося газа.

Значение и знак эффекта Джоуля — Томсона определяются соотношением между работой газа и работой сил внешнего давления, а также свойствами самого газа, в частности, размером молекул и их взаимодействием. Для таких газов, как воздух, кислород, азот, при T_0 и давлениях до 30 МПа значения $\Delta h_T > 0$ (положительный эффект Джоуля — Томсона) и, следовательно, $q > l$. Это означает, что энергия таких сжатых газов меньше, чем несжатых, т. е. $h_2 < h_1$ (рис. 1). Для других газов (гелий, неон, водород) при T_0 значения $\Delta h_T < 0$ (отрицательный эффект Джоуля — Томсона) и $q < l$, при этом энергия сжатого газа на несколько процентов больше, чем расширенного. Однако эта разница очень мала по сравнению с работой, затрачиваемой на сжатие газа.

Для процессов в замкнутом объеме действительны те же выводы, только вместо h в уравнениях (1) — (4) должна использоваться внутренняя энергия u .

Таким образом, энергия сжатого газа незначительно отличается от энергии несжатого

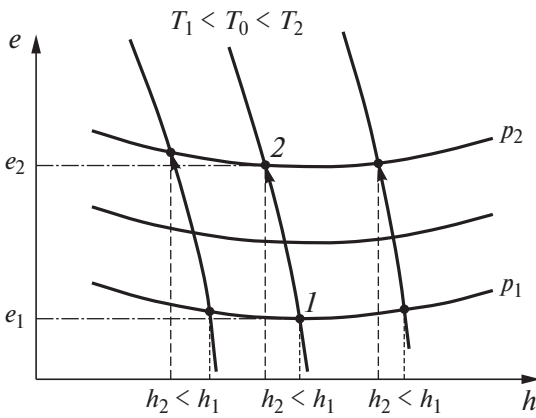


Рис. 1. Процесс изотермического сжатия при $T = T_0$ на $e-h$ -диаграмме для газов с положительным эффектом Джоуля – Томсона

газа и в большинстве случаев меньше нее. Следовательно, речь должна идти не об энергии сжатого газа, а о термомеханической эксергии, которая и определяет его энергетический потенциал, т. е. о величине, способной совершать работу. Это относится и к потере энергии при дросселировании газа (в клапанах, дроссельных и других устройствах). При адиабатическом дросселировании энергия газа не изменяется ($h = idem$) и никаких потерь ее не происходит. В этом случае речь также должна идти о потерях работоспособности сжатого газа (т. е. о его эксергии), значение которых действительно отражает физическую суть данного процесса.

Корни такого рода неточностей, на наш взгляд, кроются в неверном понимании термина “энергия” как способности производить работу. Как с физической, так и с термодинамической точки зрения такое представление некорректно.

Когда изотермическое сжатие происходит при $T \neq T_0$, значение e_q в уравнении (2) не равно нулю.

В общем случае энергетический баланс процесса сжатия можно записать в виде

$$l = q - \Delta h_T, \quad (5)$$

а эксергетический баланс —

$$l = e_2 - e_1 + e_q = \Delta e + q\tau_e. \quad (6)$$

Подставляя значение q из уравнения (5) в уравнение (6) и раскрывая значение τ_e , получаем:

$$l = \Delta e \frac{T}{T_0} + \Delta h_T \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0} - \Delta h_T; \quad (7)$$

$$q = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0}. \quad (8)$$

Как отмечалось выше, для идеального газа изотермический эффект Джоуля – Томсона $\Delta h_T = 0$. При этом выражения (7) и (8) сводятся к формуле

$$l = q = \Delta e \frac{T}{T_0}. \quad (9)$$

Выражения (7) и (8) справедливы только в случае, когда процессы сжатия (расширения) реализуются при $T > T_0$. При $T < T_0$ коэффициент работоспособности теплоты q должен определяться из выражения $\tau_e = (T_0 - T)/T_0$ [10]. Тогда, подставляя значение q в уравнение (6), получаем формулу для определения работы:

$$l = \Delta e \frac{T_0}{T} + \Delta h_T \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T_0}{T} - \Delta h_T, \quad (10)$$

а для теплоты

$$q = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T_0}{T}. \quad (11)$$

В этом случае для идеального газа

$$l = q = \Delta e \frac{T_0}{T}. \quad (12)$$

Для оценки энергетического потенциала природного газа при разных его давлениях нами были выполнены расчеты значений эксергии 1000 м³ природного газа (метана) при разных давлениях. В расчетах принимали, что эксергия газа равна работе адиабатического сжатия в идеальном компрессоре.

Минимальная работа сжатия в идеальном компрессоре определяется из выражения

$$L_{сж} = \int_1^2 V dp, \quad (13)$$

где V — объем рабочей среды; dp — изменение давления.

Из уравнения адиабаты $p_1 V_1^k = p V^k$ следует, что $V = V_1 \frac{p_1^{1/k}}{p^{1/k}}$, где $k = \frac{c_p}{c_V}$ — показатель адиабаты; c_p и c_V — изобарная и изохорная теплоемкости газа. Подставив зависимость $V(p)$ в выражение (13), после интегрирования получим:

$$L_{сж} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (14)$$

Используя выражение (14), можно рассчитать значение термомеханической эксергии любого газа при разных его давлениях. Нами были выполнены расчеты работы адиабатического сжатия метана для широкого диапазо-

на давлений при следующих исходных данных: объем газа $V_1 = 1000 \text{ м}^3$, начальное давление $p_1 = p_0 = 101,325 \text{ кПа}$, показатель адиабаты $k = c_p/c_v = 1,314$.

Результаты расчетов для диапазонов давлений от 0,2 до 1,2 МПа и от 1 до 6 МПа приведены на рис. 2, из которого следует, что каждая 1000 м^3 природного газа помимо химической эксергии в зависимости от давления может дать от 76 до 700 МДж (от 20 до 195 кВт·ч) термомеханической эксергии.

Полученные данные о термомеханической эксергии метана были использованы для оценки потенциала энергосбережения в системах обеспечения газом потребителей внутри страны. При этом учитывали, что системы газоснабжения региона, крупного города строятся по иерархическому принципу и обычно включают в себя газопроводы низкого давления (до 5 кПа), среднего (от 5 кПа до 0,3 МПа), высокого давления II категории (от 0,3 до 0,6 МПа) и I категории (от 0,6 до 1,2 МПа).

В сети высокого давления I категории газ поступает из магистрального газопровода через газораспределительные станции (ГРС). Из этих сетей через газорегуляторные пункты (ГРП) он подается в сети среднего давления и высокого давления II категории, из которых подают газ через ГРП и местные газорегуляторные установки (ГРУ) в газопроводы промышленных и коммунальных предприятий, а также в сети низкого давления, обеспечивающие подачу газа в жилые и общественные здания, предприятия бытового обслуживания и др.

Связь между газопроводами разного давления осуществляется через ГРС и ГРП. При этом система газоснабжения разделяется на несколько иерархических уровней, на каждом из которых автоматически поддерживается максимально допустимое давление газа. Переход на более низкий уровень происходит путем дросселирования газа в регуляторах давления, обеспечивающих постоянное и соответствующее нормам давление. Таким образом, система газоснабжения регионов, крупных городов включает в себя несколько ГРС, осуществляющих связь сети высокого давления I категории с магистральным газопроводом и обеспечивающих путем дросселирования перепад давления от 2,5–3,5 до 1,2 МПа. В системе имеются: ГРП, связывающие сети высокого давления I и II категорий с перепадом давлений в них Δp от 1,2 до 0,6 МПа; ГРП, обеспечивающие связь газопроводов высокого давления II категории с сетью среднего давления, перепад давления в

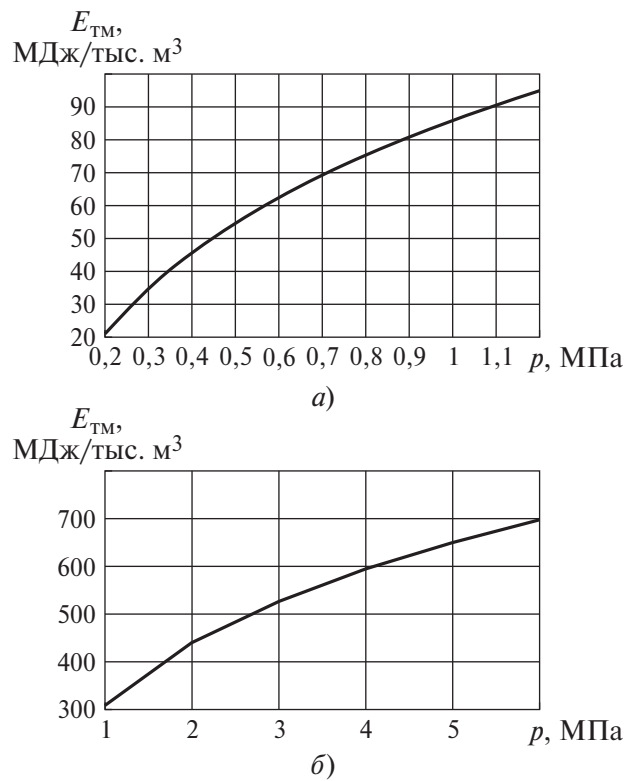


Рис. 2. Зависимости термомеханической эксергии природного газа от давления в диапазонах от 0,2 до 1,2 МПа (а) и от 1 до 6 МПа (б)

которых составляет от 0,6 до 0,3 МПа; ГРП, соединяющие сеть среднего давления с сетью низкого давления с перепадом давления от 0,3 МПа до 5 кПа.

Значения эксергии газа для разных давлений позволяют определить энергетический потенциал, бесполезно сбрасываемый при его дросселировании на ГРС и ГРП. Он вычисляется как разница эксергий при соответствующих давлениях: $\pi_{\phi} = e_2 - e_1$. Расчеты показали, что удельный энергетический потенциал, теряемый при дросселировании 1000 м^3 газа, составляет:

на ГРС ($\Delta p = 3,0 - 1,2 \text{ МПа}$): $\pi_{\phi} = 527,532 - 341,63 = 185,002 \text{ МДж}$;

на ГРП-1 ($\Delta p = 1,2 - 0,6 \text{ МПа}$): $\pi'_{\phi} = 341,63 - 225,354 = 116,276 \text{ МДж}$;

на ГРП-2 ($\Delta p = 0,6 - 0,3 \text{ МПа}$): $\pi''_{\phi} = 225,354 - 126,761 = 98,593 \text{ МДж}$;

на ГРП-3 ($\Delta p = 0,3 - 0,11 \text{ МПа}$): $\pi'''_{\phi} = 126,761 - 9,816 = 116,945 \text{ МДж}$.

Для определения суммарного потенциала энергосбережения в системах газоснабжения необходимо знать общий объем природного газа, реализуемого внутри страны, а также объемы его потребления из сетей разного давления. По данным [11], общий объем внутреннего потребления природного газа в

России составляет примерно 400 млрд м³ в год. Условно можно принять, что из сети высокого давления I категории потребляется 100 % этого объема, из сети высокого давления II категории — 40 %, из сети среднего давления — 35 %, а остальное количество газа потребляется из сети низкого давления — 25 %. Это позволяет определить суммарный потенциал энергосбережения на объектах системы газоснабжения. Он составляет:

на ГРС: $P_{\Sigma} = 185,002 \cdot 400 \cdot 10^6 = 74360,8 \times 10^6$ МДж (20655,778 · 10⁶ кВт · ч);

на ГРП-1: $P'_{\Sigma} = 116,276 \cdot 0,4 \cdot 400 \cdot 10^6 = 18604,16 \cdot 10^6$ МДж (5167,822 · 10⁶ кВт · ч);

на ГРП-2: $P''_{\Sigma} = 98,543 \cdot 0,35 \cdot 400 \cdot 10^6 = 13803,02 \cdot 10^6$ МДж (3834,172 · 10⁶ кВт · ч);

на ГРП-3: $P'''_{\Sigma} = 116,945 \cdot 0,25 \cdot 400 \cdot 10^6 = 11694,5 \cdot 10^6$ МДж (3248,472 · 10⁶ кВт · ч).

Итого: 118462,48 · 10⁶ МДж (32906,244 × 10⁶ кВт · ч).

Оценка потенциала энергосбережения в системах газоснабжения — весьма важная задача. Однако помимо этого необходимы разработка способов и устройств для его практического использования и определение энергосберегающего эффекта, который может быть при этом достигнут.

Опыт утилизации избыточного давления доменных газов с использованием газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ) показывает, что их установка экономически целесообразна на объектах с давлением, превышающим атмосферное на 0,1 МПа и более. Себестоимость производства 1 кВт · ч электроэнергии на расширительных станциях доменных печей, оборудованных ГУБТ с электрогенераторами на валу, почти вдвое (на 55 %) ниже себестоимости ее получения на традиционных ТЭЦ, использующих в качестве топлива доменный газ [4].

Мы считаем, что этот опыт утилизации энергии избыточного давления может быть полезен при разработке схем использования энергетического потенциала природного газа в системах газоснабжения. Установка энергоблоков ГУБТ + электрогенератор на ГРС и ГРП при достигнутом объеме потребления газа внутри страны позволила бы дополнительно без затрат топлива получить около 25 млрд кВт · ч электроэнергии в год, что сопоставимо с годовой выработкой электростанции мощностью 3000 МВт.

Выводы

1. Результаты расчетов показывают, что системы газоснабжения на своих ГРС и ГРП

располагают значительными резервами потенциальной энергии, которые, как правило, не используются. Вместо этого на ГРС осуществляется дросселирование газа перед подачей его в распределительные сети. Одна из причин этого, на наш взгляд, — отсутствие экономической заинтересованности газоснабжающих организаций в том, чтобы устанавливать на ГРС бескомпрессорные турбины и получать дополнительно еще один продукт — электроэнергию.

2. Энергетический потенциал газа, определяемый его физическими параметрами (давлением), несопоставим с потенциалом, зависящим от его химического состава. Однако в условиях, когда в стране объявлен курс на энергосбережение, не использовать его было бы недальновидно, особенно с учетом того, что уже имеется техническое решение по его реализации в черной металлургии. Это позволило бы при не слишком больших затратах получить значительное количество электроэнергии без сжигания топлива и негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. **Зубков А.** Пути энергосберегающего развития экономики европейских стран СЭВ. — Вопросы экономики, 1984, № 10.
2. **Степанов В. С.** Анализ энергетического совершенства технологических процессов. — Новосибирск: Наука, 1984.
3. **Литвак В. В.** Основы регионального энергосбережения (научно-технические и производственные аспекты). — Томск: Изд-во НТЛ, 2002.
4. **Степанов В. С., Степанова Т. Б.** Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.
5. **Rant Z.** Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit". — Forsch. Ing. Wes., 1956, Bd. 22, No 1.
6. **Бродянский В. М.** Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973.
7. **Эксергетические** расчеты технических систем: Справочное пособие / Под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. — Киев: Наукова думка, 1991.
8. **Степанов В. С.** Химическая энергия и эксергия веществ. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.
9. **Степанов В. С., Степанова Т. Б.** Эффективность использования энергии. — Новосибирск: ВО "Наука". Сиб. издат. фирма, 1994.
10. **Степанов В. С., Степанова Т. Б.** Определение эксергии в приложении к процессам, реализуемым при температурах ниже температуры окружающей среды. — В кн.: Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012.
11. **Сендеров С. М.** Методология и практика исследования проблем энергетической безопасности России с выделением роли газовой отрасли. — Автореф. дисс. на соиск. учен. степени доктора техн. наук. Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2008.