

УДК 621.5

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

### ПРИМЕНЕНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Проведен анализ методов вычисления турбодетандерных установок. Наиболее обоснованным методом вычисления является метод с использованием  $h-s$ -диаграмм. Выполненные вычисления показывают энергетическую и экономическую целесообразность применения вторичного энергоресурса – энергии сжатого газа – для производства электроэнергии посредством турбодетандерной установки, выбор которой определяется входными параметрами и диапазоном их изменений.

The Executed analysis of the methods of the calculation parameter expander units. The most valid method of the calculation is a method with use  $h-s$ -diagrams. The Executed calculations show energy and economic practicability of the use the secondary power resource - an energy of the compressed gas - for production of the electric power by means of expander units, which choice is defined input parameter and range of their change.

**Введение.** Компрессорные станции (КС) являются наиболее энергозатратными объектами газовой отрасли, т. к. потенциальная и кинетическая энергии, переданные ими газу, имеют вполне конкретную немалую стоимость. Часть этой энергии, составляющая в среднем 10%, теряется на трение о стенки газопроводов. Основная же доля, являющаяся потенциальной энергией сжатого газа, рассеивается на пунктах редуцирования газа.

**Основная часть.** Процессы расширения газа в турбодетандере близки к изэнтропным, что обеспечивает получение максимальной величины механической энергии. Несомненным достоинством турбодетандерных агрегатов (ДГА) является простота, надежность, низкая металлоемкость конструкций, широкий диапазон режимов, минимальное количество обслуживающего персонала, отсутствие влияния на окружающую среду. Кроме того, турбодетандерные установки можно использовать для одновременного получения электроэнергии и холода; электроэнергии и сжиженного газа.

В результате расширения газа в турбодетандере его температура понижается, что может привести к образованию конденсатов и гидратов в газопроводах и запорно-регулирующей арматуре. Поэтому газ перед поступлением в турбодетандер подогревается до определенной температуры, которая зависит от состава газа, степени его расширения в турбодетандере, степени осушки и т. д. Подогрев газа обычно осуществляется автономными источниками тепла.

Снижение давления газа, транспортируемого по магистральному газопроводу (МГ), происходит в 2 этапа.

Первый этап – это газораспределительная станция (ГРС), где давление газа снижается до 1,2–1,6 МПа. Второй этап – снижение давления газа на газораспределительном пункте

(ГРП) до величины, необходимой потребителю – 0,1–0,3 МПа.

Турбодетандерные установки, как правило, подключаются параллельно ГРС или ГРП. При малых расходах газа через турбодетандер целесообразно иметь повышенную частоту вращения, и тогда между турбодетандером и электрогенератором размещается редуктор. При больших расходах газа турбодетандер и электрогенератор связаны непосредственно.

В соответствии с давлением входа/выхода ДГА разделяются на ДГАВД (высокого давления) и ДГАНД (низкого давления). Схемы их подключения к газопроводу приведены на рис. 1 и 2.

Схема подключения ДГА низкого давления, как правило, на ГРП отличается от схемы подключения ДГА высокого давления только отсутствием котла-подогревателя, который заменяется на теплообменник, где теплота от постороннего источника подводится к газу.

Кроме того, на компрессорных станциях с приводом от газотурбинной установки (ГТУ) целесообразно использовать турбодетандерную установку (ТДУ) для понижения давления топливного газа перед подачей его в камеру сгорания. В верхней части рис. 3 схематично изображена ГТУ и газоперекачивающий агрегат (ГПА), входящие в состав КС. В нижней части рисунка – ТДУ для понижения давления топливного газа перед подачей его в камеру сгорания и производства электроэнергии.

В настоящее время в системе ОАО «Белтрансгаз» работает 235 газораспределительных станций, которые обеспечивают потребителей республики природным газом. Общий годовой расход газа составляет 18–20 млрд. м<sup>3</sup>. Давление газа на входе в ГРС колеблется от 5,5 до 3,0 МПа. Выходное давление изменяется от 1,2 до 0,3 МПа на некоторых ГРС. Производительность ГРС варьируется на один-два порядка.

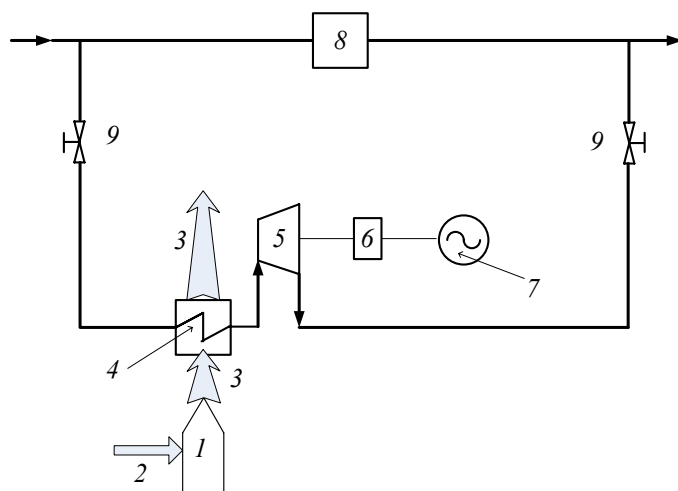


Рис. 1. Схема подключения ДГА ВД: 1 – камера сгорания котла-подогревателя; 2 – подвод топливного газа к котлу-подогревателю; 3 – продукты горения; 4 – теплообменник котла-подогревателя; 5 – турбодетандер; 6 – редуктор; 7 – электрогенератор; 8 – ГРС; 9 – краны

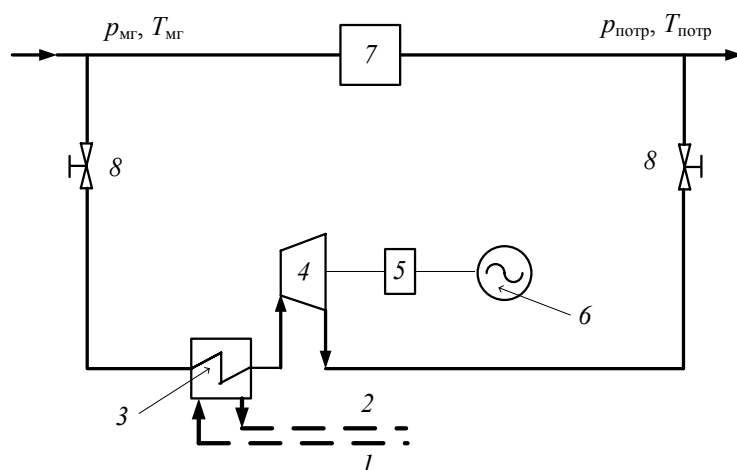


Рис. 2. Схема подключения ДГА НД: 1 – подача горячего теплоносителя в теплообменник; 2 – отвод холодного теплоносителя из теплообменника; 3 – теплообменник подогревателя газа; 4 – турбодетандер; 5 – редуктор; 6 – электрогенератор; 7 – ГРС; 8 – краны

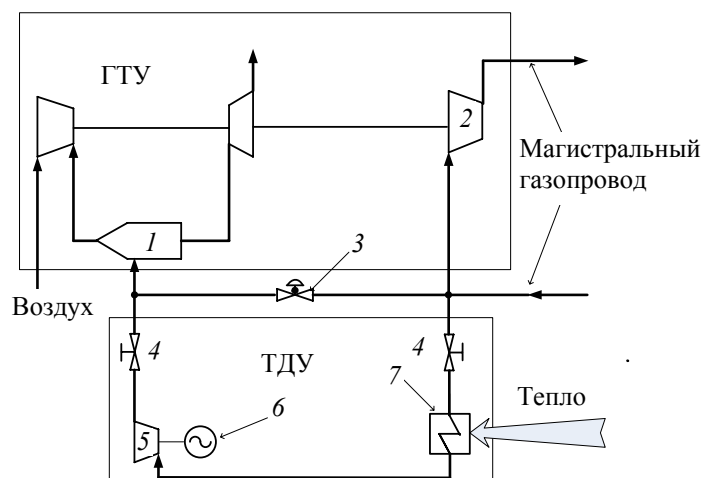


Рис. 3. Схема подключения ТДУ на компрессорных станциях с приводом от ГТУ: 1 – камера сгорания ГТУ; 2 – газоперекачивающий агрегат; 3 – узел редуцирования газа; 4 – краны; 5 – турбодетандер; 6 – электрогенератор; 7 – ГРС; 8 – краны

На единичных ГРС газотранспортной системы установлены турбодетандерные агрегаты, которые в условиях функционирования, существующих газотранспортной системе ОАО «Белтрансгаз», показали высокую эффективность. Так, удельный расход топлива на отпуск электроэнергии, получаемой на установке ДГА-5000 с перепадом давлений от 1,200 до 0,125 МПа, установленной на ГРП Лукомльской ГРЭС, составляет 72 г/(кВт·ч). Для сравнения: на энергоблоках 300 МВт Лукомльской ГРЭС эта величина составляет 316,1 г/(кВт·ч).

#### **Данные для расчета характеристик турбодетандерной установки**

Для расчета характеристик турбодетандерной установки задаются следующие параметры:

$p_{\text{мг}}$  и  $T_{\text{мг}}$  – давление и температура газа в подводящем магистральном газопроводе, МПа и К;

$p_0 = p_{\text{мг}} - \Delta p$  – давление газа на входе в турбодетандер ( $\Delta p$  – потери давления в газопроводящем тракте с учетом потерь давления по длине трубопровода, на местных сопротивлениях и особенно в нагревателях газа);

$p_{\text{к}}$  и  $T_{\text{к}}$  – давление и температура газа на выходе из турбодетандера без учета потерь, равных  $p_{\text{потр}}$  и  $T_{\text{потр}}$  – давлению и температуре в коллекторе потребителя;

$G_0$  – расход газа через турбодетандер, кг/с;

$\tau$  – время работы установки, ч.

1. Методика А. А. Степанца для определения характеристик турбодетандерной установки [1]. Температура газа на входе в турбодетандер приближенно оценивается по выражению

$$T_0 = T_{\text{к}} \left[ 1 - (1 - \delta^{-m}) \eta_{0i} \right]^{-1}, \text{ К}, \quad (1)$$

где  $\delta = p_0 / p_{\text{к}}$  – степень расширения;  $m = (k - 1)$ ;  $k$  – показатель адиабаты;  $\eta_{0i} = 0,7 - 0,8$  – внутренний относительный КПД турбодетандера.

Далее определяется мощность нагревателя газа

$$Q = c_p G_0 (T_0 - T_{\text{мг}}), \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $c_p$  – изобарная теплоемкость газа, кДж/(кг·К).

По заданным  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $p_{\text{к}}$  и  $T_{\text{к}}$  производится оценка мощности турбодетандера

$$N = G_0 c_v T_0 (1 - \delta^{-m}), \text{ кВт}. \quad (3)$$

2. Методика расчета характеристик ДГА в предположении адиабатного расширения газа в турбодетандере. Температура газа на входе в

турбодетандер приближенно оценивается по выражению

$$\frac{T_0}{T_{\text{к}}} = \left( \frac{p_0}{p_{\text{к}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (4)$$

Мощность нагревателя газа определяется по формуле (2)

$$Q = c_p G_0 (T_0 - T_{\text{мг}}), \text{ кВт}. \quad (2^*)$$

По заданным  $p_0$ ,  $T_0$ ,  $p_{\text{к}}$  и  $T_{\text{к}}$  производится оценка мощности турбодетандера

$$N = \frac{RT_{\text{к}}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{к}}}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \text{ кВт}. \quad (5)$$

3. Методика расчета характеристик турбодетандерной установки с использованием  $h$ - $s$ -диаграммы. Поскольку содержание метана в природном газе, поставляемом в Республику Беларусь, ~0,975 мольной доли, то при проведении оценочных расчетов допустимо использование  $h$ - $s$ -диаграммы метана.

При температуре  $T_{\text{к}}$  и давлении  $p_{\text{к}}$  рассчитываются плотность  $\rho_{\text{к}}$ , энтальпия  $h_{\text{к}}$ , энтропия  $s_{\text{к}}$ , теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$ , показатель адиабаты  $k$ .

В предположении, что процесс расширения газа изоэнтропный, по заданным  $p_0$  и  $s_{\text{к}}$  в первом приближении вычисляются плотность  $\rho_0$ , энтальпия  $h_0$  и остальные параметры состояния. Рассчитываются перепад энтальпий при расширении газа  $\Delta h$  и с учетом внутреннего относительного КПД потери энтальпии на необра- тимост процесс  $\Delta h_{\text{потр}}$

Реальный перепад энтальпий определяется как

$$\Delta h_r = \Delta h - \Delta h_{\text{потр}}, \text{ кДж/кг}, \quad (6)$$

и второе приближение значения энтальпии на входе в турбодетандер

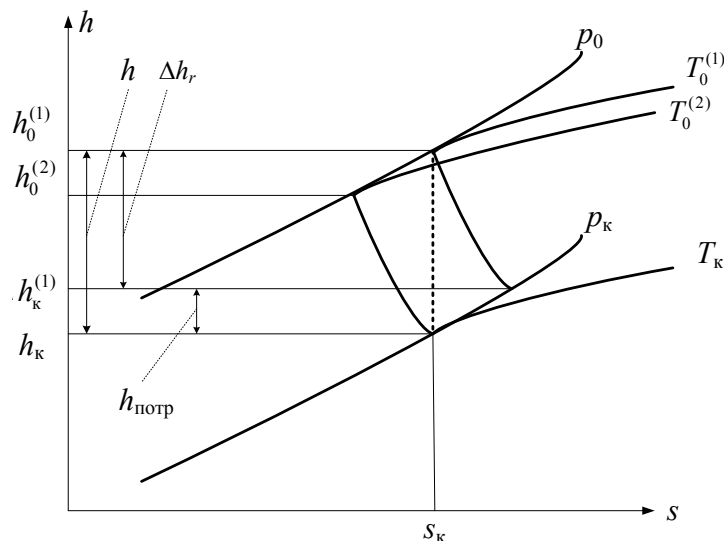
$$h_0^{(2)} = h_{\text{к}} + \Delta h_r, \text{ кДж/кг}. \quad (7)$$

Второе приближение значения температуры газа на входе в турбодетандер  $T_0^{(2)}$  рассчитывается по значениям  $p_0$  и  $h_0^{(2)}$  (рис. 4).

Далее по формуле (2) определяется мощность подогревателя газа перед турбодетандером.

Мощность турбодетандера выражается формулой

$$N = \Delta h_r G_0, \text{ кВт}. \quad (8)$$

Рис. 4. Расчет параметров ДГА по  $h$ - $s$ -диаграмме

Проведенные расчеты показывают энергетическую и экономическую целесообразность использования вторичного энергоресурса – энергии сжатого газа – для производства электроэнергии посредством ДГА.

Мощность ДГА, тепловой поток на подогрев газа линейно зависят от расхода через турбодетандер. Более сложными являются зависимости этих величин от степени понижения давления. Давление, температура перед турбодетандером определяются режимом работы газотранспортной системы; давление, температура после турбодетандера и расход газа определяются режимом работы потребителя и поэтому, особенно расход, могут варьироваться в достаточно широком диапазоне значений.

Система автоматического регулирования работы ДГА с достаточно высокой точностью должна поддерживать:

- давление и температуру после турбодетандера;
- расход газа через турбодетандер;
- частоту вращения ротора турбодетандера при изменении его электрической нагрузки от нуля до максимальной при переменных входных параметрах.

Все это требует индивидуального подхода к выбору не только систем автоматического регулирования, но и самого типа турбодетандерной установки и может сказаться не только на

стоимости ДГА, но и на принципиальной возможности его установки на данном источнике энергии сжатого газа.

#### Расчет энергетического эффекта

Расчет электрической мощности и потока тепловой энергии на подогрев газа перед турбодетандером производился по перечисленным методикам при следующих исходных данных:  $p_{мг} = p_0 = 3,1195$  МПа и  $p_k = p_{потр} = 1,866$  МПа;  $T_{мг} = T_k = T_{потр} = 277$  К;  $G_0 = 1,0173$  млн.  $m^3/сут = 7,92$  кг/с;  $\tau = 8000$  ч = 28 800 000 с.

Результаты расчета мощности ДГА и теплового потока на подогрев газа по каждой из трех методик приведены в табл. 1.

Энергетический эффект рассчитывается в тоннах условного топлива. В предположении, что КПД электрогенератора  $\approx 1$ , годовое количество произведенной электроэнергии рассчитывается так:

$$m_{э} = N_{э} \tau \cdot 0,28, \quad (9)$$

где 0,28 кг у. т./кВт·ч).

Количество тепла на подогрев газа перед турбодетандером  $Q$  определялось по формуле (2) и пересчитывалось в тоннах условного топлива –  $m_Q$

$$m_Q = \frac{Q \tau}{29,3 \cdot 0,93}, \quad (10)$$

где 29,3 МДж/кг – теплота сгорания условного топлива; 0,93 – КПД теплогенератора.

Таблица 1

#### Результаты расчета параметров ДГА и энергетического эффекта

| Методика | $N$ , кВт | $Q$ , кВт | $m_{э}$ | $m_Q$   | $m_{Q'}$ | $m_{Q''}$ | $\Delta m_Q$ | $\Delta m_{Q'}$ | $\Delta m_{Q''}$ |
|----------|-----------|-----------|---------|---------|----------|-----------|--------------|-----------------|------------------|
|          |           |           | т у. т. |         |          |           |              |                 |                  |
| 1        | 1137,5    | –1428,8   | 2548,1  | –1510,1 | –1274,4  | –1105,2   | 1038,0       | 1273,7          | 1443,0           |
| 2        | 916,9     | –1404,3   | 2053,9  | –1484,3 | –1248,5  | –1079,3   | 569,6        | 805,4           | 974,6            |
| 3        | 959,3     | –1390,5   | 2148,8  | –1469,6 | –1233,9  | –1064,6   | 679,2        | 914,9           | 1084,2           |

Таблица 2

**Данные расчета экономического эффекта и простого срока окупаемости  
от установки ДГА на ГРС**

| Капитальные затраты, дол. США | Экономический эффект, дол. США | Простой срок окупаемости, год | Годовая выручка за электроэнергию, дол. США | Затраты на подогрев газа, дол. США | Экономический эффект, дол. США | Простой срок окупаемости, год |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 2 275 106                     | 200761,4                       | 11,3                          | 1 305 261                                   | –153 759                           | 1 151 502                      | 1,98                          |
| 1 833 814                     | 135 596                        | 13,5                          | 1 052 085                                   | –150 160                           | 901 925                        | 2,03                          |
| 1 918 573                     | 150839,6                       | 12,7                          | 1 100 713                                   | –148 124                           | 952 859                        | 2,39                          |

Количество тепла с учетом необратимости процесса расширения газа в ДГА –  $m_Q$

$$m_Q = \frac{(Q/0,93 - \Delta h_{\text{потерь}} G_0) \tau}{29,3}, \quad (11)$$

где  $\Delta h_{\text{потерь}}$  определяется из методики расчета параметров турбодетандерной установки с использованием  $h$ - $s$ -диаграммы.

В случае установки ДГА отпадает необходимость в подогреве дросселируемого газа –  $Q_{\text{дрос}}$ , тогда количество тепла –  $m_{Q''}$

$$m_{Q''} = \frac{(Q - \Delta h_{\text{потерь}} G_0 - Q_{\text{дрос}}) \tau}{29,3}. \quad (12)$$

Значения количества тепла на подогрев газа определялись по формулам (10)–(12). Энергетические эффекты –  $\Delta m_Q$  от установки ДГА на ГРС рассчитывались как разности произведенной электроэнергии и количества тепла на подогрев газа.

**Расчет экономического эффекта и простого срока окупаемости**

Экономический эффект от использования турбодетандерной установки на ГРС с приведенными выше параметрами рассчитывался по значению энергетического эффекта. Предполагалось, что стоимость 1 тыс. м<sup>3</sup> природного газа составит 160 дол. США, стоимость установленного 1 кВт ДГА – 2000 дол. США.

Капитальные затраты на установку ДГА, номинальные мощности которых рассчитаны по каждой из трех методик, экономический эффект, полученный пересчетом энергетического эффекта  $\Delta m_Q$  в долларах США, и простой срок окупаемости приведены в табл. 2.

Во втором случае годовой экономический эффект рассчитывался как разность между выручкой за проданную электроэнергию, произведенную ДГА, и затратами на покупку топливного газа. Экономический эффект и простой срок окупаемости приведены в табл. 2.

Согласно постановлению [2], к стоимости электроэнергии, производимой в Республике Бе-

ларусь из нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, при ее продаже концерну «Белэнерго» применяется коэффициент 1,3. С учетом этого коэффициента стоимость электроэнергии на 23.11.2009 г. составила 401,6 руб./(кВт·ч).

**Выводы.** Проведенные расчеты показывают энергетическую и экономическую целесообразность использования вторичного энергоресурса – энергии сжатого газа – для производства электроэнергии посредством турбодетандерных агрегатов. Мощность ДГА, тепловой поток на подогрев газа линейно зависят от расхода через турбодетандер. Более сложные зависимости этих величин от степени понижения давления – степенные функции с переменным значением степени. Давление, температура перед турбодетандером определяются режимом работы газотранспортной системы, расход газа зависит от режима работы потребителя и поэтому может варьироваться в достаточно широком диапазоне значений.

Все это требует индивидуального подхода к выбору типа турбодетандерной установки, способу получения электроэнергии, определению регулируемых параметров, схеме резервной подачи природного газа потребителю. Набор выбранных параметров сказывается не только на стоимости установки, но и на принципиальных возможностях ДГА на данном источнике энергии сжатого газа.

**Литература**

1. Степанец, А. А. Энергосберегающие турбодетандерные установки / А. А. Степанец. – М.: Недра, 1999. – 258 С.
2. О тарифах на электрическую энергию, производимую в Республике Беларусь юридическими лицами, не входящими в состав Белорусского государственного энергетического концерна, и индивидуальными предпринимателями и отпускаемую энергоснабжающим организациям данного концерна: постановление Министерства экономики Респ. Беларусь, 31 мая 2006 г., № 91, п. 11. – Режим доступа: [www.levonevski.net](http://www.levonevski.net).

Поступила 31.03.2010