

**А.И. Пятничко\*, С.П. Крушевич\*\***

Институт газа НАН Украины, ул. Дегтярёвская, 39, г. Киев, Украина, 03113

\*e-mail: aipkiiev@ukr.net,

\*\*e-mail: admin@sergeyk.kiev.ua

## ЭФФЕКТИВНАЯ ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГРС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ ГАЗА

Газотранспортная система Украины по газопроводам высокого давления обеспечивает транзит природного газа через свою территорию в объёме до 110 млрд. м<sup>3</sup> в год. Подача газа различным потребителям внутри страны производится по газопроводам низкого давления в количестве 62 млрд. м<sup>3</sup> в год. Отбор из магистральных газопроводов с одновременным снижением давления выполняется на газораспределительных станциях (ГРС). При расширении газа в турбодетандерной установке на ГРС с 4 до 0,6 МПа можно выработать 47 кВтч электроэнергии с каждой 1000 м<sup>3</sup> газа. На 54-х ГРС в Украине можно в год произвести до 2 млрд. кВтч электроэнергии. Расширение газа в турбодетандерной установке приводит к понижению его температуры до -100 °С. Для обеспечения температуры газа после установки не ниже 10 °С его температуру приходится повышать с помощью огневого подогревателя, расходуя при этом часть природного газа. Анализ показал, что более выгодно из этого газа производить электроэнергию с помощью газотурбинного двигателя (ГТД), а теплоту его отходящих газов использовать для подогрева основного потока газа перед турбодетандером. Оценка топливно-экономической эффективности позволила установить, что прибыльным является вариант комплекса с ГТД мощностью 1 МВт и турбодетандером.

**Ключевые слова:** Природный газ. Магистральный газопровод. Газораспределительная станция. Турбодетандер. Газотурбинный двигатель. Электрическая энергия. Эффективность.

**A.I. Pyatnichko, S.P. Krushnevich**

## EFFICIENT POWER GENERATION ON GDS USING GAS PRESSURE DIFFERENTIAL

Ukraine's gas transport system of high pressure gas pipeline provides natural gas transit through its territory of up to 110 billion m<sup>3</sup> per year. A gas supply to various consumers inside the country is on the low-pressure gas pipelines in the amount of 62 billion m<sup>3</sup> per year. The selection from the main gas pipelines with the simultaneous decrease in pressure is performed at gas distribution stations (GDS). When the gas expansion in expansion turbine unit on GDS at 4 up to 0,6 MPa can be developed to 47 kWh of electricity with each 1000 m<sup>3</sup> of gas. On the 54 GDS in Ukraine can be produce up to 2 billion kWh of electricity per year. The gas expansion in the expansion turbine unit leads to a reduction its temperature is minus 100 °C. To provide temperature of the gas after the installation does not below 10 °C have to raise its temperature by using a heater firing, consuming a portion of natural gas. The analysis showed that the more profitable from this gas to produce electricity by using a gas turbine engine (GTE), and the warmth of its waste gases use for heating the main stream gas before the turbo expansion. Evaluation of fuel and economic efficiency has allowed to establish that a profitable version of the complex with a GTE 1 MW and turbo expander.

**Keywords:** Natural gas. Main gas pipeline. Gas distribution station. Turbo expander. Gas turbine engine. Electrical energy. Efficiency.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Существующая газотранспортная система Украины может обеспечить транзит газа через свою территорию в объёме до 170 млрд.м<sup>3</sup>/год по газопроводам высокого давления с общей протяженностью 33 тыс. км. В

последние годы потоки природного газа через Украину существенно снизились до уровня 104-110 млрд.м<sup>3</sup>/год при планируемом потреблении газа на внутренние нужды в 2012 году в объёме 62 млрд.м<sup>3</sup>/год.

Подача газа потребителям осуществляется газопроводами низкого давления. Отвод газа к потребите-

лю от магистрального газопровода и снижение его давления происходит на газораспределительных станциях (ГРС) и пунктах (ГРП), при этом энергия расширения газа безвозвратно теряется.

На ГРС давление газа снижают до 1,2-1,6 МПа и затем на ГРП — 0,1-0,3 МПа [1]. Расчеты показывают, что при использовании перепада давления на ГРС из каждой 1000 м<sup>3</sup> природного газа при расширении в турбодетандерных установках от 4,0 до 0,6 МПа можно выработать 47 кВтч электрической энергии и примерно столько же холода на уровне -100 °С.

Решением ДК «Укртрансгаз», НАК «Нафтогаз Украины» и в соответствии с Энергетической стратегией Украины на период 2006-2010 гг. предусматривалось создание 54-х утилизационных турбодетандерных электростанций на ГРС с суммарной мощностью 300 МВт. Необходимые капитальные затраты оценивались в 725 млн. грн. Ожидаемая экономия природного газа могла составить 0,8 млрд.м<sup>3</sup>/год при производстве электроэнергии в объеме 1,5...2,0 млрд. кВтч. Работы пока не начаты.

В статье ставится задача оценки суммарного энергетического потенциала и целесообразности использования для этого перепада давлений на ГРС.

## 2. АНАЛИЗ СХЕМ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ГРС

Упрощенная схема ГРС (ГРП) представлена на рис. 1. На ней показано, что газ из магистрального газопровода отбирается с высоким давлением, подается на дросселирующее устройство, в котором природный газ расширяется до нужного давления. В результате расширения его температура снижается (рис. 2), и для подачи потребителю газ нагревается с помощью огневого подогревателя до +10 °С.

Нами рассматривается возможность выработки электрической энергии на ГРС «Белая Церковь» за счёт расширения природного газа со следующими исходными данными:  $P_n=4$  МПа;  $P_k=0,3; 0,6, 1,2$  МПа;  $t_n=t_k=+10$  °С;  $Q_n=Q_k=22000$  ст.м<sup>3</sup>/ч, где  $n, k$  — начальное и конечное значения параметров газа, отбираемого из магистрального газопровода в газопровод потребителя;  $P_n, P_k$  — давления;  $t_n, t_k$  — температуры;  $Q_n, Q_k$  — расходы газа.

Механическая энергия на перепаде давлений вырабатывается с помощью турбодетандерной установки. В связи с тем, что расширение с помощью детандера приводит к более существенному снижению температуры газа, то для экономического сравнения в расчётах указывается расход топливного газа для обеспечения им подогревателя с тепловым КПД 0,4. В дальнейшем природный газ, который подается потребителю, будем называть «транзитным газом», а используемый для его подогрева — «топливным».

На рис. 3 показаны возможные схемы комплексов, создаваемых на ГРС, для производства электроэнергии при срабатывании в турбодетандере перепада давлений. При использовании турбодетандеров применялись два варианта нагрева газа: после детандера (рис. 3, а) и перед ним (рис. 3, б).

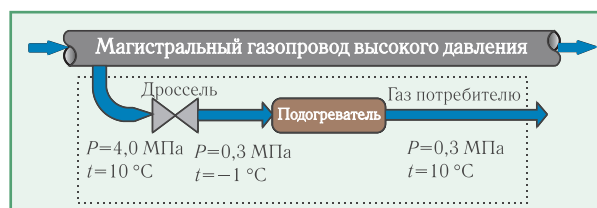


Рис. 1. Упрощенная схема ГРС



Рис. 2. Обмерзание трубопровода после дросселя

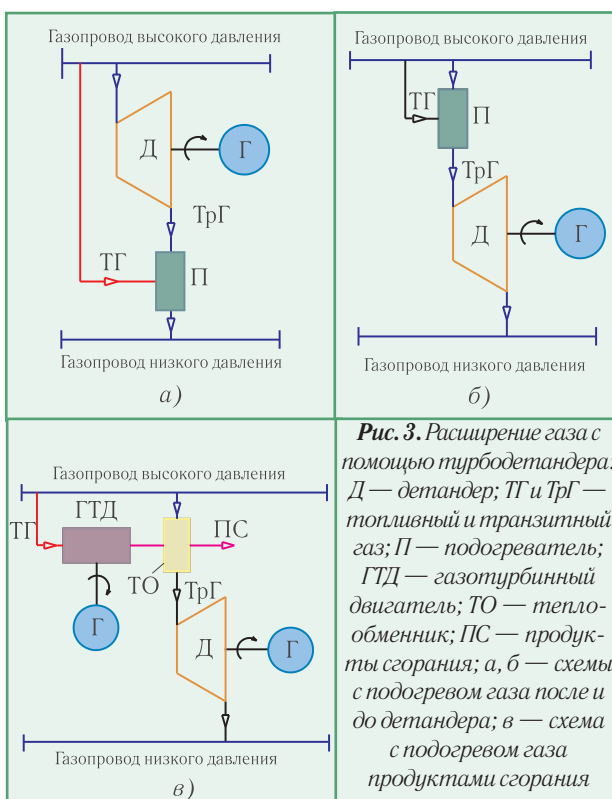


Рис. 3. Расширение газа с помощью турбодетандера: Д — детандер; ТГ и ТрГ — топливный и транзитный газ; П — подогреватель; ГТД — газотурбинный двигатель; ТО — теплообменник; ПС — продукты сгорания; а, б — схемы с подогревом газа после и до детандера; в — схема с подогревом газа продуктами сгорания

Все расчёты выполнялись с использованием программного модуля свойств газов «ГазКондНефть» [2]. Результаты сведены в табл. 1. Для схем с детандером представлены два варианта расчётов. В таблице приведены также данные расчётов для случая, когда транзитный поток дросселируется на ГРС. Как видно из результатов расчётов, при расширении газа в детандере температура транзитного газа на его выходе в десять раз ниже, чем при дросселировании, что приводит к повышенному расходу топливного газа в огневом подогревателе.

Рис. 4 иллюстрирует изменения мощности детандера и снижения температуры  $\Delta t$  на его выходе при варьировании степени расширения газа в турбодетандере при различных способах подогрева транзитного газа. Изотропный КПД детандера принимался равным 0,8.

**Таблица 1.** Сравнение параметров при расширении природного газа в дросселе и турбодетандере

Тип	Параметр	Давление газа на выходе, МПа		
		0,3	0,6	1,2
Дроссель, (рис. 1)	Температура транзитного газа после дросселя, °С	-11,3	-9,4	-5,8
	Количество тепла для подогрева транзитного газа после дросселя ( $t_k=10\text{ °С}$ ), кДж/ч (кВт)	693 098 (192,5)	639 767 (177,7)	532 631 (148,0)
	Затраты топливного газа на подогрев транзитного газа после дросселя ( $\eta=0,4$ ), $\text{м}^3/\text{ч}$	52	48	40
Детандер (нагрев после него), (рис. 3, а)	Температура транзитного газа после детандера, °С	-106,7	-83,6	-55,5
	Мощность детандера, кВт	836	663	460
	Количество тепла для подогрева транзитного газа после детандера ( $t_k=10\text{ °С}$ ), кДж/ч (кВт)	3 700 791 (1 028)	3 027 515 (841)	2 186 638 (607)
	Затраты топливного газа на подогрев транзитного газа после детандера ( $\eta=0,4$ ), $\text{м}^3/\text{ч}$	277	227	164
Детандер (нагрев перед ним), (рис. 3, б)	Температура транзитного газа перед детандером, °С	165,9	125,4	85,0
	Мощность детандера, кВт	1460	1028	624
	Количество тепла для подогрева транзитного газа перед детандером ( $t_k=10\text{ °С}$ ), кДж/ч (кВт)	5 948 932 (1 652)	4 341 993 (1 206)	2 795 832 (776)
	Затраты топливного газа на подогрев транзитного газа после детандера ( $\eta=0,4$ ), $\text{м}^3/\text{ч}$	446	325	209

Подогрев транзитного газа перед детандером увеличивает производимую мощность на 60-70 %, но одновременно с этим приводит к возрастанию расхода топливного газа на 60-80 %.

По данным ДК «Укртрансгаз» в 2011 году транспорт природного газа для потребителей в Украине составил 51686,9 млн.м<sup>3</sup> [3]. Исходя из полученных выше данных, при принятом среднем давлении в магистральном газопроводе 4 МПа и конечном давлении 0,6 МПа с помощью детандера при предварительном подогреве транзитного газа и электромеханическом КПД генератора 0,95 можно выработать следующее количество электрической энергии: 46,7273 МВтч/млн.ст.м<sup>3</sup> · 51686,9 млн.ст.м<sup>3</sup> = 2415 ГВтч мех. работы = 2294 ГВтч эл. энергии.

Затраты топливного газа для подогрева транзитного газа после дросселирования с помощью дроссельного устройства при КПД огневого подогревателя  $\eta=0,4$  составят в год: 0,00218 [млн.ст.м<sup>3</sup>(топливный газ)/млн.ст.м<sup>3</sup> (транзитный газ)] · 51686,9 млн.ст.м<sup>3</sup> = 112,77 млн.ст.м<sup>3</sup>.

Годовой расход топливного газа для подогрева транзитного газа перед детандером ( $\eta=0,4$ ): 0,0148 [млн.ст.м<sup>3</sup> (топливный газ)/млн.ст.м<sup>3</sup> (транзитный газ)] · 51686,9 млн.ст.м<sup>3</sup> = 763,56 млн.ст.м<sup>3</sup>.

Учитывая высокие затраты топливного газа на обес-

печение работы огневых подогревателей транзитного газа, рационально установить газотурбинный двигатель (ГТД) малой мощности для выработки электрической энергии и использования тепла уходящих газов для предварительного подогрева транзитного газа перед детандером (схема представлена на рис. 3, в). В расчётах учитывались два двигателя мощностью 1 МВт (ЭГ-1000 производства «Мотор-Січ» [4]) и 3 МВт (UGT3000 производства «Зоря»-«Машпроект» [5]) с характеристиками, приведенными в табл. 2.

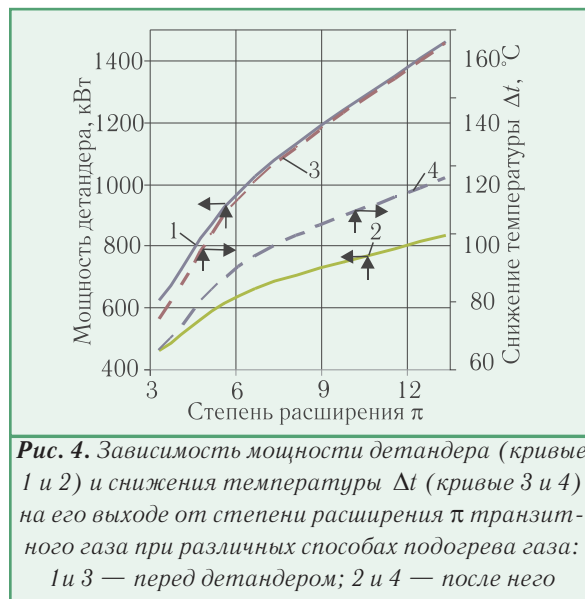
При расчётах характеристик комплекса, включающего указанные ГТД, использовалась схема, соответствующая рис. 3, в. Результаты расчётов представлены в табл. 3.

Для сравнения различных способов выработки электрической энергии на ГРС выполнен топливно-экономический анализ. Для этого были приняты следующие тарифы: на природный газ 3,369 грн/м<sup>3</sup> и электрическую энергию 0,7 грн/кВтч.

Результаты расчётов для сравнения представлены в табл. 4. Знак «+» указывает на прибыль, «-» — убыток.

Из сравнения топливно-экономической эффективности различных способов утилизации энергии перепада давления на ГРС (табл. 4) следует, что при нынешних тарифах на электрическую энергию и природный газ использование

турбодетандера будет убыточным во всех случаях. Прибыльным является только комплекс по производству электроэнергии с турбодетандером и ГТД мощностью 1 МВт при снижении давления транзитного газа до 0,3 МПа.



**Таблица 2.** Основные характеристики ГТД

Параметр	UGT3000	ЭГ-1000
Мощность, МВт	3,36	1
КПД	0,31	0,24
Расход топлива, нм <sup>3</sup> /ч	1088,6	450,7
Расход продуктов сгорания, кг/с	15,5	7,6
Температура продуктов сгорания, °С	420	—
Тепловая мощность продуктов сгорания, кВт	—	1870

**Таблица 3.** ГТД как источник тепла для подогрева транзитного газа

Параметр	Давление газа на выходе, МПа		
	0,3	0,6	1,2
<b>UGT 3000</b>			
Мощность ГТД, кВт	3360		
Температура газа перед детандером, °С	165,9	125,4	85,0
Суммарная мощность, кВт	4820	4388	3984
Температура выхлопных га-зов на выходе теплообмен-ника, °С	326	343	376
Затраты топливного газа, нм <sup>3</sup> /ч	1088,6	1088,6	1088,6
<b>ЭГ-1000</b>			
Мощность ГТД, кВт	1000		
Суммарная мощность, кВт	2460	2028	1624
Затраты топливного газа, нм <sup>3</sup> /ч	450,7	450,7	450,7

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное сравнение различных схем справедливо при сложившемся уровне цен на природный газ и электрическую энергию и при отсутствии возможности использования внешнего дешевого источника теплоты и потребителя холода.

Анализ традиционных схем производства работы при срабатывании перепада давлений на ГРС показывает, что прибыльным из них является комплекс, включающий турбодетандер и газотурбинный двигатель. В нём тепло продуктов сгорания используется для повышения температуры потока транзитного газа перед его расширением в детандере.

На основании данных табл. 4, можно утверждать, что при производстве электроэнергии на ГРС «Белая Церковь» по предложенной схеме годовая прибыль составит 1632 тыс. грн.

Внедрение предложенного комплекса на ГРС Украинны позволит получить значительное количество электрической энергии.

**Таблица 4.** Сравнение топливно-экономической эффективности различных комплексов по производству электроэнергии на ГРС, грн/ч

Параметр	Давление газа на выходе, МПа		
	0,3	0,6*	1,2
Подогрев газа после дросселя	-175	-162	-135
Подогрев ПГ после детандера	-933	—	-553
Выработка эл. эн. с помощью детандера	+585	—	+322
<b>Прибыль:</b>	<b>-348</b>	<b>—</b>	<b>-231</b>
Подогрев ПГ перед детандером	-1503	—	-704
Выработка эл. эн. с помощью детандера	+1022	—	+437
<b>Прибыль:</b>	<b>-481</b>	<b>—</b>	<b>-267</b>
ГТД 3МВт (UGT3000)	-3667	-3667	-3667
Выработка эл. эн. с помощью детандера	+1022	—	+437
Выработка эл. эн. с помощью ГТД	+2352	—	+2352
<b>Прибыль:</b>	<b>-293</b>	<b>—</b>	<b>-878</b>
ГТД 1 МВт (ЭГ-1000)	-1518	-1518	-1518
Выработка эл. эн. с помощью детандера	+1022	+720	+437
Выработка эл. эн. с помощью ГТД	+700	+700	+700
<b>Прибыль:</b>	<b>+204</b>	<b>-98</b>	<b>-381</b>

**Примечание:** \*) Для давления 0,6 МПа сравнение выполнялось только для случая, когда используется ГТД с мощностью 1 МВт.

Приближенная оценка показывает, что предусмотренные капитальные затраты в 725 млн. грн. на совершенствование производства энергии на ГРС могут окупиться в относительно небольшие сроки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Черных А.П. Использование перепада давления газа, редуцируемого на ГРС и ГРП для получения электроэнергии и тепла // Вісник інженерної академії України. — 2009. — № 1. — С. 251 — 256. ([www.nbu.gov.ua/portal/natural/Viau/2009\\_1/pdi/ISPOLZ.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Viau/2009_1/pdi/ISPOLZ.pdf)).
2. Программная система термодинамических свойств «Газ-КондНефть» // ([www.gascondoil.com](http://www.gascondoil.com)).
3. Україна в 2011 році протранспортувала майже 157 млрд.куб.метрів природного газу: [www.utg.ua/uk/press](http://www.utg.ua/uk/press).
4. ЭГ-1000: [w.powercity.ru/site/ru/catalog/48.html](http://w.powercity.ru/site/ru/catalog/48.html).
5. Газотурбинные двигатели для использования в газотранспортных сетях. — Николаев: «Зоря» — «Машпроект», 2007. — 16 с.