

10. Копп, А. М. Об одном подходе к решению задачи оптимизации структуры бизнес-процессов предприятия [Текст]: сб. науч. тр. / А. М. Копп, Д. Л. Орловский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – 2015. – № 58. – С. 102–108.

11. GitHub – andrei1293/bizagi-dfd-analysis-tool [Electronic resource]. – Available at: <https://github.com/andrei1293/bizagi-dfd-analysis-tool>

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Гамаюн І. П.
Дата надходження рукопису 25.10.2017*

Копп Андрій Михайлович, аспірант, кафедра програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: korr93@gmail.com

Орловський Дмитро Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра програмної інженерії та інформаційних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: ordm@kpi.kharkov.ua

УДК: 620.93: 66.083.4

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.118793

ПОКРИТТЯ ШКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА РАХУНОК УТИЛІЗАЦІЇ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ НА ГРС

©С. П. Крушневич, О. І. П'ятничко, Г. В. Жук, М. А. Солтаниберешне

Зниження тиску природного газу на газорозподільчих станціях та пунктах відбувається з втратою енергії. Встановлення детандера для утилізації перепаду тиску дозволяє використати цю енергію, але внаслідок значного зниження температури газу після детандера потрібно збільшувати кількість паливного газу для попереднього підігріву. Автори виконали паливно-економічний розрахунок для порівняння балансу між затратами та виробництвом енергії у грошовому еквіваленті

Ключові слова: ГРС, ГРП, ГТС, виробництво електрики, утилізація енергії, перепад тиску, природний газ

1. Вступ

Існуюча газотранспортна система України може забезпечити транзит природного газу через свою територію в обсязі до 170 млрд. м³/рік по газопроводах високого тиску загальною довжиною 33 тис. км.

Подача газу споживачам забезпечується газопроводами низького тиску. подача газу до споживача від магістрального газопроводу і зниження його тиску відбувається на газорозподільних станціях (ГРС) та пунктах (ГРП), при цьому енергія від розширення газу безповоротно втрачається. На ГРС тиск газу знижують до 1,2–1,6 МПа, потім на ГРП – до 0,1–0,3 МПа [1]. Розрахунки показують, що при розширенні природного газу в турбодетандерних установках на ГРС з 4,0 до 0,6 МПа можна виробити 47 кВт·год електричної енергії і приблизно стільки ж холоду на рівні –100 °С на кожні 1000 н.м³ газу.

2. Літературний огляд

Рішенням НАК «Нафтогаз України», ДК «УкрТрансГаз» і відповідно до «Енергетичної стратегії України на період 2006–2010 років» передбачалося створення 54 утилізаційних турбодетандерних електростанцій на ГРС сумарною потужністю 300 МВт, проте ці роботи не були розпочаті. Необхідні капітальні витрати, на той час, оцінювалися в 725 млн. грн. Очікувана економія природного газу могла сягнути

0,8 млрд. м³/рік, при виробництві електроенергії в обсязі 1,5...2,0 млрд. кВт·год.

Питання особливостей установки детандера на ГРС розглядався в літературі неодноразово. У роботі [2] приділено увагу особливостям розрахунку детандера в умовах ГРС і показано, що прийняття в якості робочого тіла повітря, замість природного газу вносить суттєву похибку в результати розрахунків. В роботі [3] представлено конструкцію кількох детандерів, які можуть бути використані в складі ГРС, представлено межі ймовірності утворення гідратів та показано термін окупності у 4,5–8 років, але не приведено інформацію по економічному балансу між виробленою електричною енергією та затратами на підігрів газу.

В роботах [4] та [5] демонструються результати розрахунків по можливому впровадженню детандера на кількох ГРС у Бангладеші [4] та Ірані [5], показано необхідність у попередньому підігріві природного газу для уникнення гідратуутворення. Порівняння балансу затрат на природний газ для підігріву та виробленої електричної енергії не проводиться у обох роботах. Додатково, у роботі [5] наведено коливання річного споживання природного газу через ГРС та відповідна зміна витрати паливного газу. В роботі [6] запропонована ідея використання паливних елементів в якості джерела теплоти для попереднього підігріву природного газу, показано річне ко-

ливання температури природного газу на вході в ГРС Ірану, але також не проведено порівняння вартості отриманої та затраченої енергії, що викликає певну недовіру з точки зору реальної економії ресурсів в масштабі країни.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження даної роботи стало порівняння роботи, яку можна отримати в результаті роботи детандера та природного газу, який потрібно використати для попереднього підігріву у одних одиницях – грошовому еквіваленті з врахуванням тарифів в Україні.

Для досягнення мети, враховуючи данні з літературного огляду, були поставлені наступні задачі:

1. За допомогою програми моделювання теплофізичних характеристики побудувати модель ГРС з дроселем та детандером;

2. Визначити параметри природного газу після його розширення за допомогою дроселя та детандера.

Визначення необхідної потужності попереднього підігрівача газу;

3. Визначення витрат паливного газу для забезпечення потрібної теплової потужності;

4. Приведення виробленої електричної енергії та затрат паливного газу до однакових одиниць – грошового еквіваленту.

4. Побудова моделі розширення природного газу на ГРС та розрахунок

Спрощена схема ГРС (ГРП) представлена на рис. 1. Газ з магістрального газопроводу під високим тиском, подається на дросель, де розширюється до потрібного тиску. В результаті розширення температура істотно знижується, на фото (рис. 2) показано обмерзання трубопроводу після дроселя влітку. Для запобігання утворенню гідратів в потоці природного газу, газ підігривається за допомогою вогневих, або інших підігривачів до температури на виході гарантовано вищої, ніж точки початку утворення гідратів метану.

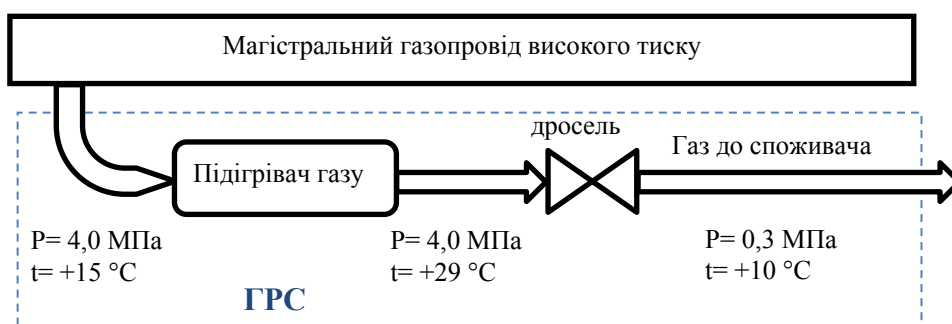


Рис. 1. Спрощена схема ГРС

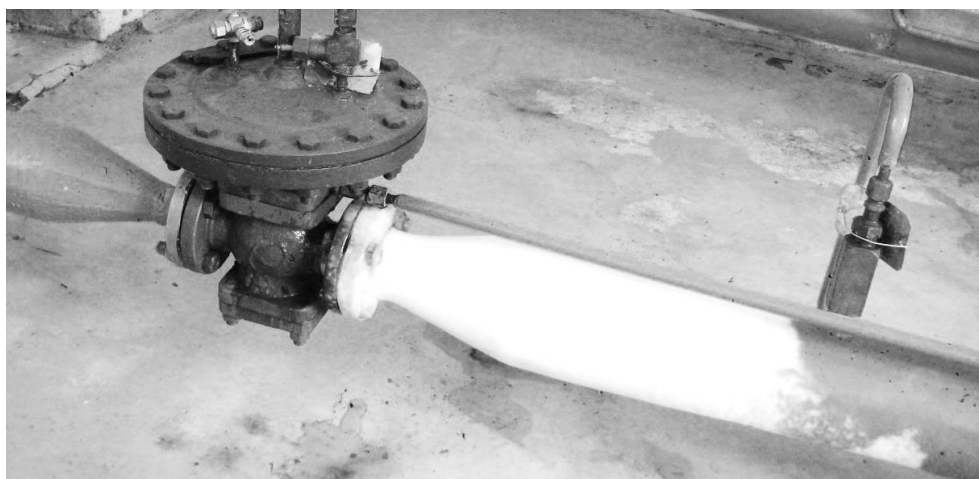


Рис. 2. обмерзання трубопроводу після дроселя

Зазвичай, на території і поблизу ГРС споживачі холоду відсутні, тому вся енергія, що виділяється при розширенні газу, даремно втрачається в навколишнє середовище.

Було проведено дослідження можливості вироблення електричної енергії на прикладі ГРС «Біла Церква» за рахунок енергії розширення природного газу з наступними вихідними параметрами:

$$P_n=4 \text{ МПа}; P_k=0.3; 0.6; 1.2 \text{ МПа}; t_n=+15 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_k=+10 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$Q_n=Q_k=22000 \text{ н.м}^3/\text{год},$$

де n – початкове значення (параметри магістрального газопроводу); k – кінцеве значення (параметри газопроводу споживача).

Отримання механічної енергії на перепаді тисків виконується за допомогою детандерної установки. У зв'язку з тим, що розширення за допомогою детандера призводить до істотного зниження температури газу, то для порівняння економії в розрахунках прийнято витрату паливного газу для вогневого підігривача з тепловим ККД 90 % [7] і прийнята теплотворна здатність цього газу на рівні

31,8 МДж/м³ (згідно ГОСТ 5542-87 та «Кодексу ГТС»). Тут і надалі природний газ, який подається споживачеві, будемо називати «товарний природний газ», а той, що використаний для підігріву товарного газу – «паливний газ».

Розрахунки виконано за допомогою програми термодинамічних розрахунків ГазКондНафта [8], яка дозволяє з високою точністю моделювати процеси стискання-розширення газів заданого складу та початкових умов. Результати представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння параметрів при розширенні природного газу на дроселі та детандері, при витраті 1 000 н.м³/год

Параметр	Тиск газу на виході, МПа		
	0,3	0,6	1,2
Дросель			
Перепад температури, °С	18,6	17,2	14,3
Кількість тепла для підігріву товарного газу, МДж/год	23,0	20,6	15,7
витрати паливного газу на підігрів товарного газу, н.м³/год	0,80	0,72	0,55
детандер			
Перепад температури, °С	155,9	115,4	74,5
Кількість теплоти для підігріву товарного газу, МДж/год	261,9	188,9	118,6
Потужність детандера, кВт	66,34	46,72	28,35
Витрати паливного газу на підігрів товарного газу, н. м³	9,15	6,60	4,14

5. Оцінка результатів розрахунків

Як видно з результатів розрахунків при використанні детандера, перепад температур між його входом та виходом в 5–8 разів вище, ніж при використанні дроселя, що призводить до підвищення витрат паливного газу в вогневому підігрівачі в 7–11 разів.

За даними міністерства енергетики та вугільної промисловості України, за 2015 рік використання природного газу споживачами в Україні склало 33,8 млрд. м³ [9]. Виходячи з отриманих вище даних і прийнявши, що 10 % від цього обсягу буде проходити через ГРС з виробленням електричної енергії, при середньому зниженні тиску з магістрального газопроводу з 4,0 до 0,6 МПа, на детандерах можна отримати наступну потужність за рік:

$$46,72 \frac{\text{кВт}}{\text{тис.н.м}^3} \times 33,8 \cdot 10^6 \text{ тис. н. м}^3 \cdot 10\% = 150 \text{ ГВт ел. енергії } (\eta = 0,95). \quad (1)$$

Витрати паливного газу для підігріву товарного газу перед зниженням тиску за допомогою дросельного пристрою:

$$0,00072 \frac{\text{н.м}^3 (\text{паливний газ})}{\text{н.м}^3 (\text{товарний газ})} \times 33,8 \cdot 10^6 \text{ тис. н. м}^3 \cdot 10\% = 2,43 \text{ млн. н. м}^3 \quad (2)$$

Витрати паливного газу для підігрівання товарного газу перед детандером:

$$0,0066 \frac{\text{н.м}^3 (\text{паливний газ})}{\text{н.м}^3 (\text{товарний газ})} \times 33,8 \cdot 10^6 \text{ тис. н. м}^3 \cdot 10\% = 22,3 \text{ млн. м}^3. \quad (3)$$

Для оцінки доцільності виробництва електричної енергії на ГРС виконаний паливно-економічний аналіз. Для цього були прийняті наступні тарифи, актуальні на лютий 2017 року:

- Електрична енергія, тариф для підприємств: 2.0486 грн/кВт·год [10];
- Природний газ для підприємств: 7.5516 грн/м³ [11].

Результати порівняння представлені в табл. 2. Знак «+» вказує на прибуток, «-» – збиток.

Таблиця 2

Порівняння паливно-економічної ефективності (грн/год), на 1000 н.м³/год

Параметр	Тиск газу на виході, МПа		
	0,3	0,6	1,2
Дросель			
Прибуток:			
детандер. Витрати на підігрів газу	-69,05	-49,82	-31,25
Вироблення ел. ен. за допомогою детандера	+135,90	+95,70	+58,09
Прибуток:	+66,85	+45,88	+26,84

6. Результати дослідження

Як видно з результатів порівняння паливно-економічної ефективності спосіб утилізації енергії перепаду тиску на ГРС з застосуванням детандера, при поточних тарифах на енергоносії, показує свою прибутковість у всіх трьох розглянутих випадках.

Для випадку ГРС «Біла Церква», при зниженні тиску на детандері з 4,0 до 0,6 МПа, при витраті газу через ГРС в обсязі 22000 н.м³/год можна отримати прибуток в розмірі 650,54 грн. за годину, або 5,7 млн. грн. за рік. Звичайно, частина цієї суми піде на технічне обслуговування значно складної установки і

повернення коштів за покупку устаткування, але, тим не менше, навіть без використання «зеленого тарифу» ГРС отримує помітний прибуток.

Якщо врахувати, що велика частина електричної енергії виробляється на теплових електростанціях з ККД 30 %, то затрати природного газу можуть бути знижені ще в 2,5 раз, що дуже позитивно впливає на енергетичну незалежність України та скорочення викидів парникових газів.

Крім того, в зв'язку зі зростанням споживання природного газу в години пік, пропорційно збільшується і виробництво електричної енергії, що в цілому сприятливо позначиться на добовому навантаженні електричних мереж України.

Результати розрахунків показали схожість з практичними результатами впровадження утилізації перепаду тиску в місті Staglieno, Італія, де газорозподільна станція забезпечує природним газом квартал, в якому знаходиться школа, автобусний парк, газова автомобільна заправна станція, пожежна частина та площа Гаветта, на якій розмістилися невеликі одно- і двоповерхові приватні будинки. Навіть з урахуванням добових і річних коливань витрати природного газу, економія від впровадження склала більше 500,000 м³ в рік природного газу, який мав би піти на виробництво електричної енергії [12].

7. Висновки

1. Завдяки комп'ютерної моделі вдалось виконати розрахунки параметрів природного газу в процесі розширення на дроселі та детандері з однаковими початковими умовами та заданим перепадом тиску;

2. В таблиці 2 наведено питомі значення параметрів на 1000 н.м³ природного газу, що дозволяє використати ці результати для інших ГРС з аналогічними початкових та кінцевих параметрів;

3. Результати наведені в таблиці 2 показують, що у всіх варіантах заміни дроселя на детандер є позитивний економічний ефект навіть без застосування «зеленого тарифу», що свідчить про високу енергетичну ефективність природного газу;

4. Вироблення електричної енергії на ГРС залежить від витрати газу, яка в пікові години доби зростає, що дозволяє компенсувати аналогічний пік споживання електричної енергії і тим самим значно підвищити стабільність електричних мереж України в цілому та більш рівномірне розподілення електрогенеруючих потужностей по території країни;

5. Вироблена електрична енергія на ГРС потребує в 2,5 раз менше природного газу, ніж та сама електрична енергія, що буде вироблена на теплової електростанції за допомогою газових турбін простого циклу. Це відповідно скоротить викиди вуглекислого газу у атмосферу.

Література

1. Черных, А. П. Использование перепада давления газа, редуцируемого на ГРС и ГРП для получения электроэнергии и тепла [Текст] / А. П. Черных // Вісник інженерної академії України. – 2009. – № 1. – С. 251–256.
2. Chekardovskiy, M. Upgraded Algorithm for Calculating the Turbo-Expander of Gas Distribution Stations [Text] / M. Chekardovskiy, S. Chekardovskiy, K. Ilyukhin, A. Gladenko // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 73. – P. 01020. doi: 10.1051/mateconf/20167301020
3. Kowala, D. Using the gas pressure potential for electricity generation at Pressure Reduction Stations [Text] / D. Kowala, W. Kostowski. – Gliwice: Silesian University of Technology Institute of Thermal Technology. – 20 p.
4. Rahman, M. M. Power generation from pressure reduction in the natural [Text] / M. M. Rahman // Journal of Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 41, Issue 2. – P. 89–95. doi: 10.3329/jme.v41i2.7472
5. Ardali, E. K. Energy regeneration in natural gas pressure reduction stations by use of gas turbo expander; evaluation of available potential in Iran [Text] / E. K. Ardali, E. Heybatian. – 2008. – Available at: <http://members.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00399.pdf>
6. Darabi, A. Economic assessment of a hybrid turboexpander-fuel cell gas energy extraction plant [Text] / A. Darabi, A. Shariati, R. Ghanaei, A. Soleimani // Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Sciences. – 2016. – Vol. 24. – P. 733–745. doi: 10.3906/elk-1303-7
7. Подогреватели газа [Электронный ресурс]. – Завод нефтегазовых технологий. – Режим доступа: <http://zngt.com.ua/uk/контакты/15-подогреватели-газа>
8. ГазКондНефть – Программная система для компьютерного моделирования технологий промышленного сбора и обработки природного газа и нефти, газоразделения и фракционирования нефти и конденсата [Электронный ресурс]. – Термогаз. – Режим доступа: <http://gascondoil.com/>
9. У 2015 році Україна скоротила використання природного газу на 21 % [Електронний ресурс]. – НАК «Нафтогаз України». – Режим доступу: <http://www.naftogaz.com/>
10. Тарифи на електричну енергію з 1 січня 2016 року [Електронний ресурс]. – Київенерго. – Режим доступу: <http://kyivenergo.ua/ee-company/tarifi>
11. Прейскурант на природний газ з 1 січня 2016 року [Електронний ресурс]. – НАК «Нафтогаз України». – Режим доступу: <http://www.naftogaz.com/files/Information/Naftogaz-gas-prices-Jan-2016.pdf>
12. Borelli, D. Waste Energy Recovery from Natural Gas Distribution Network: CELSIUS Project Demonstrator in Genoa [Text] / D. Borelli, F. Devia, M. Marre Brunenghi, C. Schenone, A. Spoladore // Sustainability. – 2015. – Vol. 7, Issue 12. – P. 16703–16719. doi: 10.3390/su71215841

Дата надходження рукопису 27.10.2017

Крушневич Сергій Петрович, кандидат технічних наук, науковий співробітник, Відділ газових технологій, Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113
E-mail: admin@sergeyk.kiev.ua

П'ятничко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ газових технологій, Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113
E-mail: aipkiev@ukr.net

Жук Геннадій Вилиорович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом Відділ газових технологій, Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113
E-mail: hen_zhuk@ukr.net

Солтаніберешне Мехрзад Алі, аспірант, молодший науковий співробітник, Відділ газових технологій Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113

УДК 515.2

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.117920

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАПУСКУ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

© Л. М. Куценко, О. М. Семків, А. Я. Калиновський, М. М. Пікссасов, О. І. Сухарькова

Розроблено геометричну модель мобільної металевієї установки типу требушет, призначеної для запуску (катапультивання) малих безпілотних літальних апаратів. Конструктивно механізм запуску поєднаний з легковим автомобілем, що сприяє його мобільності. Крім того, сам автомобіль використовується у якості противаги в конструкції требушет. Розрахунки руху механізму запуску виконано з використанням рівнянь Лагранжа другого роду. Наведено тестові розрахунки

Ключові слова: геометрична модель, безпілотний літальний апарат, требушет, лагранжіан, рівняння Лагранжа другого роду

1. Вступ

У наш час широке поширення набули малі безпілотні апарати літакового типу. Вони призначені для виконання великого спектру завдань по моніторингу об'єктів сільського й лісового господарства. Одним із головних моментів при експлуатації таких апаратів у непередбачених польових умовах є запуск у повітря. Для цього використовуються пускові пристрої різних конструкцій типу катапульти [1]. Катапульта повинна забезпечувати надійний пуск літального апарату, причому параметри пуску повинні бути сталими при кожному наступному запуску.

До конструкцій катапульти літальних апаратів невеликої маси (~5–15 кг), які використовують переважно місцеві служби сільського й лісового господарства, приділяють вимоги, серед яких:

– мобільність розгортання і згортання установки, коли старт і приземлення літаків не співпадають на місцевості;

– високі експлуатаційні якості, у тому числі невибагливість до зберігання;

– надійність і працездатність у різних погодних умовах.

Крім того, бажана відсутність у конструкції катапульти деталей з гуми (яка не довговічна, особливо у спеку і морози), а також відсутність пневматики, піропатронів та електроніки (які потребують профілактичних робіт і притаманні для більш дорогих технологій запуску апаратів).

Серед різновидів катапульти, які задовольняють зазначеним вимогам, увагу привертає механізм требушет [2], де об'єкт для метання приєднується до його праці. Стосовно запуску безпілотного літального апа-

рату це виглядатиме так. В результаті спрацювання праці виконується «розгін» апарату до моменту набуття ним необхідної швидкості, після чого, відчепившись від праці, той продовжує політ на власному двигуні.

Для забезпечення ефективної динаміки запуску необхідно розрахувати значення параметрів требушет, що дозволить здійснювати надійні повсякденні старты апарату. Розрахунки доцільно здійснити у рамках механіки Лагранжа [3], де враховуються зміни кінетичної і потенціальної енергії системи. У результаті розв'язання рівняння Лагранжа другого роду необхідно одержати траєкторію переміщення точки центру маси безпілотного літального апарату, приєданого до праці. Це в свою чергу дозволить визначити кут і швидкість вильоту апарату в момент його відокремлення від праці. Ідеалізована геометрична модель є першим етапом дослідження реального пристрою для катапультивання, який після доопрацювання можна використовувати на практиці.

Таким чином можна зробити висновок, що для запуску малого безпілотного літального апарату цікавими будуть дослідження, пов'язані із застосуванням требушет, який задовольняє вимогам до недорогих катапульти. Для забезпечення ефективної динаміки требушет розрахунки необхідно виконати у рамках механіки Лагранжа. Цим обґрунтовується актуальність проведення даних досліджень.

2. Огляд літератури

У найпоширенішій конструкції катапульти для запуску літальних апаратів використовуються лінійні напрямні, по яким розганяється апарат, використовуючи гумові, пружинні, пневматичні або порохові