

УДК 621.593

М.С. БОНДАРЕНКО, М.О. ЧЕПЛЮХА

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв

ГТУ В СКЛАДІ РЕГАЗИФІКАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ LNG-ТЕРМІНАЛУ

Представлені схемні рішення регазифікації скрапленого природного газу з одночасною генерацією електроенергії в газотурбінній установці. Реалізовано цикл прямого дроселювання, в якому гріючим середовищем виступають морська вода та відхідні гази газотурбінного двигуна. За допомогою розробленої математичної моделі регазифікаційного комплексу LNG-терміналу показано, що застосування метанового турбодетандера в якості розширювального пристрою забезпечує збільшення вироблення електроенергії до 20 % в комплексі з ГТУ. Для збільшення ефективного ККД газотурбінної установки запропоновано охолодження повітря на вході до компресора в теплообміннику проміжного контуру «вода–етиленгліколь».

Ключові слова: скраплений природний газ, регазифікація, газотурбінна установка, утилізація теплоти, пряме дроселювання, турбодетандер.

1. Постановка проблеми та огляд останніх публікацій

Тенденція стрімкого зростання споживання скрапленого природного газу (табл. 1), обумовлена вирішенням питання імпортування енергетичних ресурсів на великі відстані не залежно від місця знаходження виробника, без участі транзитних країн, супроводжується зменшенням витрат на будівництво магістральних газопроводів та можливістю регулюванням цінової політики. На сьогоднішній день спостерігається зниження собівартості СПГ на перших етапах виробничого ланцюга (розвідувальні роботи, видобування природного газу та його скраплення) на 20...40 %, але витрати пов'язані з будівництвом приймального регазифікаційного LNG-терміналу залишаються незмінними.

Таблиця 1

Торгівля СПГ та природним газом
2007-2011 р.р., млрд. м³ [1]

Рік	Природний газ, млрд. м ³ /рік	
	СПГ	Трубопровідний
2007	226,41	549,67
2008	226,51	587,26
2009	242,77	633,77
2010	297,63	677,59
2011	330,80	694,60

Велика частка витрат приймального терміналу припадає на зберігання та регазифікацію СПГ. Процес випаровування та нагріву СПГ є досить енерговитратним та потребує великої кількості тепла, проте низька температура газу дозволяє використовувати його в якості охолоджувача для технологічних процесів (зрідження водню чи діоксиду вуглецю, охолодження бутану, поділ повітря на складові та

ін.), а також генерувати електричну енергію в циклі з прямим дроселюванням (рис. 1) за допомогою турбодетандера (ТД).

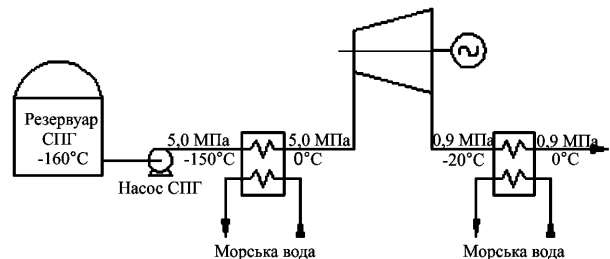


Рис. 1. Принципова схема регазифікації СПГ з прямим дроселюванням для генерування електроенергії

Робота газотурбінного двигуна (ГТД) в складі регазифікаційного LNG-терміналу дозволяє виробляти електроенергію та водночас підвищити ефективність роботи газотурбінної установки (ГТУ) при використанні утилізаційного котла (ГТУ з ТУК) або охолодженні повітря на вході в компресор.

Поширеними способами збільшення теплової ефективності роботи ГТУ можуть виступати зниження температури повітря на вході в компресор і утилізація тепла відхідних газів. До розгляду представлено варіант нагріву СПГ відхідними газами та одночасне охолодження повітря на вході в ГТУ, що входить до складу регазифікаційного комплексу з генеруванням електроенергії.

2. Постановка задачі

За допомогою розробленої математичної моделі регазифікаційного комплексу LNG-терміналу виконати аналіз ефективності застосування метанового турбодетандера в якості розширювального пристрою.

потужністю $2 \times 17,4$ МВт при витраті палива $2 \times 1,14$ кг/с. Середньодобові випари СПГ в криогенних резервуарах при рівномірному споживанні газу складають 2,4 кг/с. Без вторинного скраплення газ можна використовувати як основне паливо ГТУ.

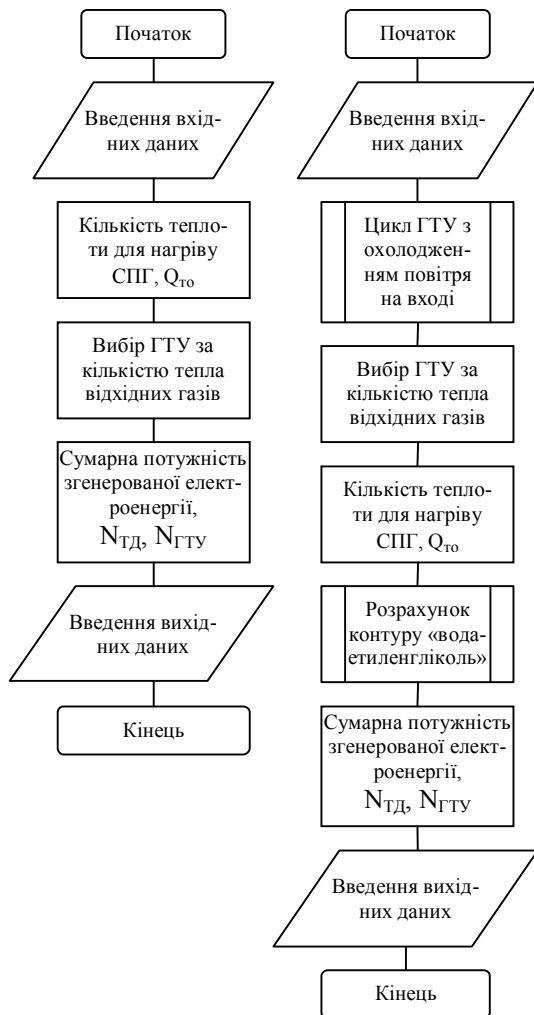


Рис. 3. Алгоритми визначення сумарної згенерованої електроенергії комплексу LNG – терміналу

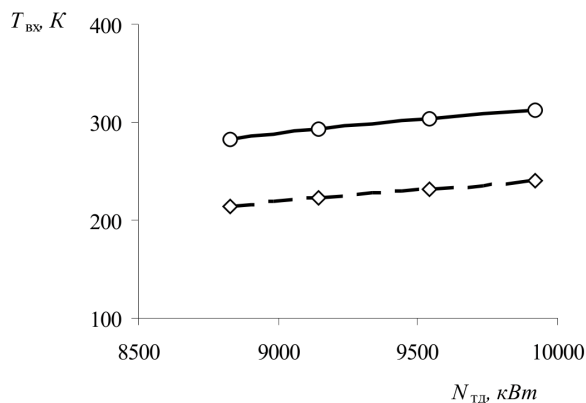


Рис. 4. Залежність потужності ТД від температури газу на вході (верхня крива) та виході (нижня крива)

Вибір та визначення потужності ГТУ з ТУК і проміжним контуром (див. рис. 2, б) залежить від узгодження витрат відхідних газів для нагріву СПГ та охолодженого повітря на вході до компресора при нагріві природного газу контуром «вода–етиленгліколь» на 10 К. Розроблена математична модель визначення потужності ГТУ з урахуванням витрат відхідних газів та кількості тепла наданої проміжним контуром при охолодженні повітря перед компресором від 274 К до 288 К. Нижче приведена регресійна залежність в результаті реалізації цієї моделі:

$$N_{\text{ГТУ}} = 4358,92 + (-1554,86) \cdot \ln(Q_{\text{TO1}}) + 197,94 \cdot \ln(Q_{\text{TO1}})^2 + (-8,52) \cdot \ln(Q_{\text{TO1}})^3 + (-44,17) \cdot \ln(T_1) / (1 + 37,24 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(Q_{\text{TO1}}) + (-1,82 \cdot 10^{-6}) \cdot \ln(Q_{\text{TO1}})^2 + (-368802 \cdot 10^{-6}) \cdot \ln(T_1) + 33933 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(T_1)^2).$$

На рис. 5 зображена залежність потужності ГТУ від температури повітря на вході до компресора при $Q_{\text{to1}} = 2,5$ МВт (при нагріві СПГ від 193 К до 203 К) та ефективного коефіцієнта корисної дії ГТУ.

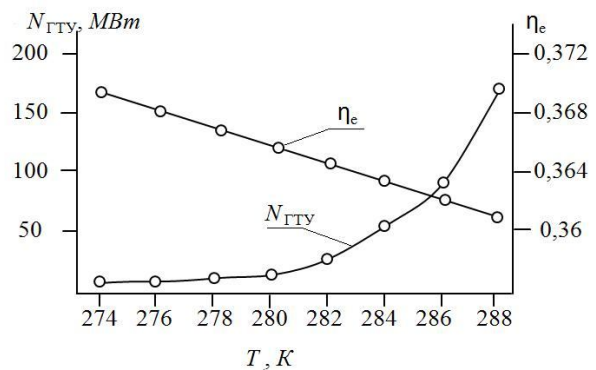


Рис. 5. Вибір ГТУ в залежності від охолодження температури повітря на вході до компресора

При регазифікації СПГ за схемою з проміжним контуром «вода–етиленгліколь» кількість тепла відхідних газів необхідна для нагріву природного газу складає $Q_{\text{to2}} = 27,6$ МВт, що включає дві ГТУ UGT 25000 потужністю $2 \times 26,2$ МВт.

Робота ГТУ в складі регазифікаційного комплексу дозволяє утилізувати тепло відхідних газів та використовувати холод СПГ, результати розрахунків представлені в табл. 2.

Отже, застосування метанового турбодетандера в схемі з прямим дроселюванням забезпечує збільшення вироблення електроенергії на 28 % при роботі ГТУ з ТУК та на 19 % – ГТУ з ТУК і контуром «вода–етиленгліколь».

Таблица 2
Характеристики работы ГТУ в комплексе
регазификационного LNG–терминалу
потужністю 5 млрд. м³

Відповідні характеристики	ГТУ з ТУК	ГТУ з ТУК та пром. контуром
Потужність ГТУ, $N_{\text{е}}$, МВт	2×17,6	2×26,2
Витрата палива, $G_{\text{п}}$, кг/с	2×1,14	2×2,04
Температура повітря на вході до ГТУ, $T_{\text{вх}}$, К	293	280
Температура газу за ГТУ, $T_{\text{вг}}$, К	763	758
Кількість тепла ВГ, $Q_{\text{вг}}$, МВт	30,1	27,6
Кількість тепла ВЕГ, $Q_{\text{вег}}$, МВт	–	2,5

Висновки

Включення до складу комплексу LNG–терминалу ГТУ дозволяє підвищити ефективність регазифікації СПГ в циклі з прямим дроселюванням за допомогою збільшення вироблення електроенергії турбодетандерним агрегатом до 20 %. За рахунок

Поступила в редакцію 23.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевський, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв.

ГТУ В СОСТАВЕ РЕГАЗИФИКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА LNG–ТЕРМИНАЛА

Н.С. Бондаренко, М.А. Чеплюха

Представлены схемные решения регазификации сжиженного природного газа при одновременной генерации электроэнергии в газотурбинной установке. Реализовано цикл прямого дросселирования, в котором греющей средой представлены морская вода и уходящие газы газотурбинного двигателя. С помощью разработанной математической модели регазификационного комплекса LNG–терминала показано, что использование метанового турбодетандера в качестве расширительного устройства позволяет увеличить производство электроэнергии до 20 % в комплексе с ГТУ. Для увеличения эффективного КПД газотурбинной установки предложено охлаждение воздуха на входе в компрессор в теплообменнике промежуточного контура «вода–этиленгликоль».

Ключевые слова: сжиженный природный газ, регазификация, газотурбинная установка, утилизация теплоты, прямое дросселирование, турбодетандер.

THE LNG-TERMINAL REGASIFICATION UNIT WITH GAS-TURBINE FOR ELECTRIC POWER GENERATION

M.S. Bondarenko, M.O. Cheplyukha

The basic technological solutions for the liquefied natural gas regasification with electrical energy generation are presented. The direct throttling technology with usage of the sea water and the gas-turbine engine exhaust gases as heating fluids is suggested. The installation of the methane turbo-expander provides the rise of electrical energy generation up to 20 % as it is shown by dint of mathematical simulation of LNG-terminal regasification complex. The improvement of the gas-turbine installation efficiency is ensured by pre-cooling of the inlet air via the water-ethilenglycol intermediate circuit.

Key words: liquefied natural gas, regasification, gas-turbine engine, utilization of heat losses, direct throttling, turbo-expander.

Бондаренко Микола Степанович – канд. техн. наук, доцент кафедри «Суднові і стаціонарні енергетичні установки» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nik_bond@ukr.net.

Чеплюха Марія Олександрівна – аспірант кафедри «Суднові і стаціонарні енергетичні установки» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: marusichka.nik@gmail.com.

використання холоду СПГ зростає теплова ефективність ГТУ при утилізації тепла відхідних газів та охолодженні повітря на вході в компресор. Розроблена математична модель, що визначає потужність та масогабаритні показники ТД при нагріві газу відхідними газами і потужність ГТУ з ТУК та проміжним контуром «вода–етиленгліколь».

Литература

1. BP Statistical Review of World Energy June 2008 – 2012 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.bp.com>. – 12.03.2013.

2. Пятничко, А.И. Анализ эффективности производства работы при регазификации СПГ [Текст] / А.И. Пятничко, Л.Р. Онопа, Г.К. Лавренченко // Технические газы. – 2010. – № 3. – С. 20 – 25.

3. Eisentrou, B. Study focuses on six LNG regasification system [Electronic resource] / B. Eisentrou, S. Wintercorn, B. Weber// LNG journal. – July-August 2006. – P. 21–22. – Access mode: http://www.cbi.com/images/uploads/technical_articles/LNGjournalJulAug06.pdf. – 28.07.2006.