УДК 621.432-71

doi: 10.32620/aktt.2019.7.10

А. М. РАДЧЕНКО¹, А. А. ЗУБАРЄВ¹, С. Г. ФОРДУЙ²,
В. В. БОЙЧУК¹, В. В. ЦУЦМАН³

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна

³ Pepsico Ukraine – ТОВ "Сандора", Миколаїв, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ГАЗОПОРШНЕВОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Виконано аналіз ефективності охолодження повітря когенераційного газопоршневого модуля установки комбінованого виробництва електричної енергії, тепла і холоду. Установка автономного енергозабезпечення включає два когенераційних газопоршневих двигуна JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher, що виконані у вигляді когенераційних модулів з теплообмінниками для відведення теплоти випускних газів, наддувної газоповітряної суміші, охолоджуючої води рубашки двигуна і мастила на нагрів води. Теплота гарячої води трансформується абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною AR-D500L2 Century в холод, який витрачається на технологічні потреби і для роботи центрального кондиціонера, що охолоджує припливне повітря машинного відділення, звідки воно всмоктується наддувним турбокомпресором двигуна. Температура наддувної газоповітряної суміші на вході в робочі циліндри двигуна підтримується системою оборотного охолодження з відведенням її теплоти у довкілля радіатором. Через значні теплоприпливи від працюючих двигунів та іншого обладнання, а також через огорожі машинного відділення зовні до охолодженого в центральному кондиціонері повітря у машинному відділенні, звідки воно всмоктується наддувним турбокомпресором, температура повітря на вході турбокомпресора доволі висока: 25...30 °С. При підвищених температурах зовнішнього повітря на вході радіатора охолодження газоповітряної суміші та повітря на вході наддувного турбокомпресора паливна економічність двигуна погіршується, що свідчить про необхідність ефективного охолодження повітря. Ефективність охолодження повітря газопоршневого модуля оцінювали за зменшенням витрати газоподібного палива і зростанням електричної потужності двигуна. Для цього були оброблені дані моніторингу паливної ефективності газопоршневого двигуна з сумісного впливу температур зовнішнього повітря на вході радіатора охолодження газоповітряної суміші та повітря на вході турбокомпресора з метою отримання даних з їхнього роздільного впливу та визначення шляхів подальшого вдосконалення системи охолодження повітря газопоршневого модуля.

Ключові слова: установка автономного енергозабезпечення; когенераційний газопоршневий модуль; абсорбційна бромистолітєва холодильна машина; витрата палива; електрична потужність.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Газопоршневі двигуни (ГПД) знаходять широке застосування в установках авто-автономного енергозабезпечення для комбінованого виробництва електроенергії, тепла і холоду. Такі ГПД випускаються у вигляді когенераційних модулів з навішеними на них теплообмінниками для отримання гарячої води, яка використовується для абсорбційних бромистолітєвих холодильних машин (АБХМ) [1-3].

Через значні теплоприпливи до повітря машинного відділення (МВ), звідки воно всмоктується наддувним турбокомпресором (ТК), температура повітря на вході ТК доволі висока: $t_{\text{вх}} = 25...30$ °С

при підвищених температурах зовнішнього повітря $t_{\text{зп}}$, що спричиняє погіршення паливної економічності ГПД.

У процесі моніторингу отримують дані зі спільного впливу температур $t_{\text{зп}}$ і $t_{\text{вх}}$ на паливну економічність ГПД. Тому метою є отримання даних з роздільного впливу температур на паливну економічність ГПД задля визначення шляхів подальшого її підвищення.

2. Результати дослідження

Аналіз ефективності газового двигуна розглянуто на прикладі установки автономного електро-, тепло- і холодозабезпечення заводу ТОВ "Сандора" – "Pepsico Ukraine" (м. Миколаїв, Україна). Устано-

вка включає два когенераційних газових двигуна JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (електрична потужність одного ГД 1400 кВт, тепла потужність 1500 кВт), в яких теплота випускних газів, наддувної газоповітряної суміші, охолоджуючої води рубашки двигуна і мастила використовується для нагріву води. Теплота гарячої води трансформується в АБХМ AR-D500L2 Century в холод (холодильна потужність 2000 кВт), який витрачається на технологічні потреби і для роботи центрального кондиціонера охолодження припливного повітря МВ, звідки воно всмоктується турбокомпресором двигуна (рис. 1).

Всі датчики температури, тиску, лічильник теплоти і витрати газу підключені до комп'ютеризованої системи моніторингу.

Аналіз даних моніторингу газового двигуна JMS 420 GS-N.L показав низьку ефективність традиційного охолодження всього припливного повітря МВ, звідки воно всмоктується ТК двигуна, оскільки при підвищених температурах зовнішнього повітря через значні теплоприпливи з МВ температура повітря на вході ТК доволі висока: 25...30 °С.

Ефект від охолодження повітря ГПД аналізували за зміною електричної потужності N_e і об'ємної витрати газу B_e як показників паливної економічності ГПД. Фірми-виробники ГПД, як правило, не дають в доступних інформаційних джерелах даних зі зміни N_e і B_e в залежності від кліматичних умов експлуатації. Обробка даних зі зміни N_e і B_e , отриманих в процесі моніторингу ГПД, викликає певні

труднощі через сумісний вплив на N_e і B_e температур зовнішнього повітря $t_{зп}$ на вході в радіатор і повітря на вході ТК ГПД $t_{вх}$. Тому була розроблена методика обробки даних по N_e і B_e з урахуванням впливу окремо температур зовнішнього повітря на вході в радіатор $t_{зп}$ і повітря на вході ТК $t_{вх}$.

Результати моніторингу паливної економічності ГПД представляли у вигляді залежності потужності двигуна $N_e = f(t_{вх})$ та об'ємної витрати природного газу $B_e = f(t_{вх})$ від температури повітря $t_{вх}$ на вході ТК ГПД при різних температурах зовнішнього повітря $t_{зп}$ на вході в радіатор охолодження наддувної ГПС (рис. 2 і 3).

Метою обробки даних $N_e = f(t_{вх})$ і $B_e = f(t_{вх})$ є знаходження зміни потужності ГПД dN_e і об'ємної витрати газу dB_e , що припадають на зміну температури $t_{вх}$ повітря на вході ТК на 1 °С, тобто $dN_e/dt_{вх}$ і $dB_e/dt_{вх}$. При цьому окремі масиви даних моніторингу $N_e = f(t_{вх})$ і $B_e = f(t_{вх})$ формувалися при різних, та практично незмінних температурах $t_{зп}$, а коливання температури $t_{зп}$ обмежувалися діапазоном в 1 °С. Це давало можливість досліджувати вплив температури повітря $t_{вх}$ на вході ТК при різних температурах $t_{зп}$ на вході радіаторів (рис. 4...8).

При цьому окремі масиви даних моніторингу $N_e = f(t_{вх})$ і $B_e = f(t_{вх})$ формувалися при різних, та практично незмінних температурах $t_{зп}$, а коливання температури $t_{зп}$ обмежувалися діапазоном в 1 °С. Це давало можливість досліджувати вплив температури повітря $t_{вх}$ на вході ТК при різних температурах $t_{зп}$ на вході радіаторів (рис. 4...7).

Рис. 1. Схема тригенераційної установки автономного енергозабезпечення підприємства "Sandora" – "PepsiCo Ukraine" з трансформацією скидного тепла когенераційного модуля JMS 420 GS в АБХМ: ОМ – охолоджувач мастила; ОР – охолоджувач рубашки двигуна; УК – утилізаційний котел; Г – глушник; ОНП_{ВТ} і ОНП_{НТ} – високо- і низькотемпературний ступені охолоджувача наддувного повітря; Ф – фільтр; Н – насос

Рис. 2. Зміна електричної потужності ГПД N_e в залежності від температури повітря на вході ТК t_{BX} при номінальній потужності $N_e = 1400$ кВт і різних температурах зовнішнього повітря на вході радіатора системи оборотного охолодження наддувної ГПС $t_{3П} = 20...30$ °C: Δ – 20 °C; $\diamond$ – 22 °C; $\blacksquare$ – 24 °C; $\blacktriangle$ – 26 °C; X – 28 °C; ж – 30 °C

Рис. 3. Зміна об'ємної витрати газу ГПД ΔB_e в залежності від t_{BX} при різних температурах $t_{3П}$

Рис. 4. Зміна електричної потужності ГПД dN_e/dt_{BX} , що припадає на зміну температури повітря на вході ТК $dt_{BX} = 1$ °C, в залежності від t_{BX} при різних $t_{3П}$

Як видно з результатів обробки даних моніторингу, при зміні на 1 °C температури повітря на

вході ТК t_{BX} ($dt_{BX} = 1$ °C) електрична потужність ГПД змінюється на величину $dN_e/dt_{BX} = 0,7...1,2$ кВт/°C при $t_{3П} = 25$ °C та на величину $dN_e/dt_{BX} = 1,7...3,5$ кВт/°C при $t_{3П} = 30$ °C і $t_{BX} = 20...30$ °C (рис. 4).

Рис. 5. Зміна об'ємної витрати газу ГПД dB_e/dt_{BX} , що припадає на зміну температури на вході ТК $\Delta t_{BX} = 1$ °C, в залежності від t_{BX} при різних $t_{3П}$

Як видно з результатів обробки даних моніторингу, при зміні на 1 °C температури повітря на вході ТК t_{BX} ($dt_{BX} = 1$ °C) об'ємна витрата газу змінюється на $dB_e/dt_{BX} = (0,15...0,25)$ м³/(год·°C) при $t_{3П} = 25$ °C та на $dB_e/dt_{BX} = (0,4...0,7)$ м³/(год·°C) при $t_{3П} = 30$ °C і $t_{BX} = 20...30$ °C (рис. 5).

Питому об'ємну витрату b_e газу визначали за його об'ємною витратою G_r і потужністю двигуна N_e як $b_e = G_r / N_e$, м³/(кВт·год) (рис. 6).

Рис. 6. Зміна об'ємної питомої витрати газу ГПД b_{ev} в залежності від температури повітря на вході ТК t_{BX} при різних $t_{3П}$

Як видно з результатів обробки даних моніторингу, при зміні температури повітря на вході ТК t_{BX} від 20 °C до 30 °C об'ємна питома витрата газу b_{ev} зростає на величину $\Delta b_{ev} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м³/(кВт·год) при температурі зовнішнього повітря на вході радіатора охолодження наддувної ГПС $t_{3П} = 26$ °C та на величину $\Delta b_{ev} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м³/(кВт·год) при $t_{3П} = 30$ °C і $t_{BX} = 20...30$ °C (рис. 6).

При зміні на 1°C температури $t_{\text{вх}}$ ($\Delta t_{\text{вх}} = 1^\circ\text{C}$) питома витрата газу змінюється на величину $db_{\text{ев}}/dt_{\text{вх}} = (0,01 \dots 0,03) \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C})$ при $t_{\text{зп}} = 25^\circ\text{C}$ і на $db_{\text{ев}}/dt_{\text{вх}} = (0,01 \dots 0,09) \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C})$ при $t_{\text{зп}} = 30^\circ\text{C}$ і $t_{\text{вх}} = 26 \dots 30^\circ\text{C}$ (рис.7).

Рис. 7. Зміна масової питомої витрати газу ГПД $db_e/dt_{\text{вх}}$, що припадає на $\Delta t_{\text{вх}} = 1^\circ\text{C}$, в залежності від $t_{\text{вх}}$ при різних $t_{\text{зп}}$

Висновки

У процесі статистичної обробки результатів моніторингу масиви даних з електричної потужності $N_e = f(t_{\text{вх}})$ і витрати палива $B_e = f(t_{\text{вх}})$ формувалися при різних і практично незмінних температурах зовнішнього повітря на вході $t_{\text{зп}}$ радіатора, а коливання $t_{\text{зп}}$ обмежувались 1°C . Це дало можливість дослідити вплив температури повітря $t_{\text{вх}}$ на вході ТК

при різних $t_{\text{зп}}$ та обґрунтувати необхідність більш глибокого охолодження повітря на вході ТК і подачі охолодженого повітря безпосередньо на вхід ТК, щоб звести до мінімуму теплоприпливи у МВ.

Література

1. Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations [Text]. – GE Jenbacher Company Overview, June 13 2007. 39 p.
2. Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications [Text] / T. Elsenbruch. – București, October 28 2010. – 73 p.
3. GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype [Text] / G. Rouse, M. Czachorski, P. Bishop, J. Patel // GTI Project report 15357/65118. – Gas Technology Institute (GTI), January 2006. – 495 p.

References

1. Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations. GE Jenbacher Company Overview. June 13, 2007. 39 p.
2. Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications. București, October 28, 2010. 73 p.
3. Rouse, G., Czachorski, M., Bishop, P., Patel, J. GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype. GTI Project report 15357/65118: Gas Technology Institute (GTI), January 2006. 495 p.

Поступила в редакцию 12.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА КОГЕНЕРАЦИОННОГО ГАЗОПОРШНЕВОГО МОДУЛЯ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

А. Н. Радченко, А. А. Зубарев, С. Г. Фордуй, В. В. Бойчук, В. В. Цуцман

Выполнен анализ эффективности охлаждения воздуха когенерационного газопоршневого модуля установки комбинированного производства электрической энергии, тепла и холода. Установка автономного энергообеспечения включает два когенерационных газопоршневых двигателя JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher, выполненных в виде когенерационных модулей с теплообменниками для отвода теплоты выходящих газов, наддувочной газозвоздушной смеси, охлаждающей воды рубашки двигателя и смазочного масла на нагрев воды. Теплота горячей воды трансформируется абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной AR-D500L2 Century в холод, который расходуется на технологические нужды и для работы центрального кондиционера охлаждения приточного воздуха машинного отделения, откуда он всасывается наддувочным турбокомпрессором двигателя. Температура наддувочной газозвоздушной смеси на входе в рабочие цилиндры двигателя поддерживается системой оборотного охлаждения с отводом ее теплоты в окружающую среду радиатором. Из-за значительных теплопритоков от работающих двигателей и другого оборудования, а также через ограждения машинного отделения извне к охлажденному в центральном кондиционере воздуху в машинном отделении, откуда он всасывается наддувочным турбокомпрессором, температура воздуха на входе турбокомпрессора довольно высокая: $25 \dots 30^\circ\text{C}$. При повышенных температурах наружного воздуха на входе радиатора охлаждения газозвоздушной смеси и воздуха на входе наддувочного турбокомпрессора топливная экономичность двигателя ухудшается, что свидетельствует о необходимости эффективного охлаждения воздуха. Эффективность охлаждения воздуха газопоршневого модуля оценивали

по сокращению расхода газообразного топлива и возрастанию электрической мощности двигателя. Для этого были обработаны данные мониторинга топливной эффективности газопоршневого двигателя при совместном влиянии температур наружного воздуха на входе радиатора охлаждения газозооной смеси и воздуха на входе турбокомпрессора с целью получения данных по их раздельному влиянию и определения путей дальнейшего совершенствования системы охлаждения воздуха газопоршневого модуля.

Ключевые слова: установка автономного энергообеспечения; когенерационный газопоршневой модуль; абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина; расход топлива; электрическая мощность.

ANALIZING THE EFFICIENCY OF COOLING AIR OF COGENERATION RECIPROCATING GAS COMBUSTION MODULE OF INTEGRATION ENERGY SYSTEM

A. M. Radchenko, A. A. Zubarev, S. G. Forduy, V. V. Boychuk, V. V. Tsutsman

The analysis of the efficiency of cooling air of cogeneration gas-piston module of installations for combined production of electric energy, heat, and cold is performed. The installation for energy supply includes two JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher cogeneration gas-piston engines manufactured as cogeneration modules with heat exchangers for removing the heat of exhaust gases, scavenge gas-air mixture, cooling water of engine and lubricating oil. The heat of hot water is transformed by the absorption lithium-bromide chiller AR-D500L2 Century into the cold, which is spent on technological needs and for the operation of the central air conditioner for cooling the incoming air of the engine room, wherefrom it is sucked by the turbocharger of the engine. The temperature of the scavenge gas-air mixture at the entrance to the working cylinders of the engine is maintained by the system of recirculating cooling with the removal of its heat into surroundings by the radiator. Because of significant heat influx from working engines and other equipment, as well as through the enclosures of the engine room from the outside to the air-cooled in the central air conditioner in the engine room, from where it is sucked by a turbocharger, the air temperature at the inlet of the turbocharger is quite high: 25...30 °C. At elevated temperatures of the ambient air at the inlet of the radiator for cooling scavenge gas-air mixture and the air at the turbocharger inlet the fuel economy of engine is falling, which indicates the need for efficient cooling of air. The efficiency of cooling the air of the gas-piston module was estimated by a reduction in the consumption of gaseous fuel and the increase in electric power of the engine. For this purpose, the data of monitoring on the fuel efficiency of the gas-piston engine with the combined influence of the ambient air temperature at the inlet of the radiator and the air at the turbocharger inlet were processed to obtain data on their separate effects and to determine the ways to further improve the air cooling system of the gas-piston module.

Keywords: integration energy system; cogeneration gas-piston module; absorption lithium-bromide chiller; fuel consumption; electric power.

Радченко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Зубарєв Анатолій Анатолійович – ст. викладач кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Фордуй Сергій Георгійович – канд. техн. наук, технічний керівник напряму енергоресурсів та енергозбереження PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна.

Бойчук Володимир Володимирович – науковий співробітник Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Цуцман Віталій Васильович – інженер, ТОВ "Сандора, Миколаїв, Україна.

Radchenko Andrii Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of the Conditioning and Refrigeration Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8735-9205.

Zubarev Anatolii Anatoliyovych – senior lecturer of the Conditioning and Refrigeration Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: anatoly.zubarev@nuos.edu.ua

Forduy Serhiy Georgiyovych – Candidate of Technical Science, Sr. Engineering manager PepsiCo, Inc., Central Technical Team-Europe and Sub Saharan Africa (CTS ESSA), Kyiv, Ukraine, e-mail: serhiy.forduy@pepsico.com

Boychuk Volodymyr Volodymyrovych – scientific researcher of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: sertan-65@ukr.net.

Tsutsman Vitaliy Vasylyovych – engineer "PepsiCo, Inc. Ukraine" – "Sandora", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: strateg1981@gmail.com