

УДК 621.57

А.Н. РАДЧЕНКО, Н.И. РАДЧЕНКО, А.В. КОНОВАЛОВ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ И НАДДУВОЧНОЙ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ГАЗОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Проанализировано влияние температуры воздуха на входе турбокомпрессора и газозвушной смеси после него на работу газопоршневого двигателя тригенерационной установки автономного энергообеспечения. Показана невозможность эффективной работы двигателя в теплое время в случае охлаждения наддувочной газозвушной смеси системой оборотного охлаждения с градирней сухого типа. Обоснована целесообразность охлаждения наддувочной газозвушной смеси и воздуха на входе турбокомпрессора газопоршневого двигателя абсорбционным термотрансформатором, использующим сбросную теплоту двигателя.

Ключевые слова: газопоршневой двигатель, охлаждение, наружный воздух, наддувочная газозвушная смесь, утилизация тепла, тригенерация, абсорбционный термотрансформатор.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

В установках автономного энергообеспечения все более широкое применение находят газопоршневые двигатели (ГПД), работающие на природном газе и альтернативных газообразных топливах (биогаз и т.п.) [1–3]. Многие ведущие двигателестроительные фирмы выпускают газовые двигатели (ГД) в когенерационном исполнении – со штатными теплообменниками для получения горячей воды или водяного пара за счет использования теплоты выпускных газов, наддувочного воздуха или газозвушной смеси (ГВС), теплоты охлаждающей рубашки двигателя воды и смазочного масла [1, 2]. Такие когенерационные модули легко интегрируются в системы тепло- и хладоснабжения (соответственно когенерационные и тригенерационные системы) конкретных объектов.

С повышением температуры воздуха на входе турбокомпрессоров (ТК) ГПД термодинамическая эффективность двигателей снижается (КПД уменьшается, удельное потребление топлива возрастает). Поэтому поддержание рациональных входных параметров путем охлаждения воздуха обеспечивает их высокую топливную экономичность и, что особенно важно, при наиболее неблагоприятных климатических условиях эксплуатации – высоких температурах.

С целью снижения температуры воздуха на входе ГПД целесообразно использовать холод, генерируемый термотрансформаторами, в частности, абсорбционного типа – абсорбционными холодильными машинами (АБХМ), использующими в свою

очередь сбросную теплоту когенерационных ГПД. Такая внутрицикловая тригенерация – применение полученного холода для нужд самого ГПД – обеспечивает улучшение его топливной экономичности и увеличение производства электрической энергии, т.е. повышает эффективность функционирования ГПД-генератора по своему целевому назначению.

Особенно остро вопросы охлаждения стоят для ГВС после ТК ГПД, охлаждение которой производится замкнутой системой оборотного охлаждения с отводом ее теплоты в градирнях сухого типа (поверхностных теплообменниках (ТО) типа "вода-воздух"). При повышенных температурах наружного воздуха, например 25...35 °С, и разности температур в градирнях между водой и атмосферным воздухом примерно 10 °С температура охлаждающей воды на входе низкотемпературной ступени охладителя наддувочной смеси (ОНС_{нт}) составляет соответственно 35...45 °С, что не позволяет охлаждать ГВС ниже 45...55 °С (при разности температур в ОНС_{нт} между ГВС и водой в 10 °С). Это значительно выше той температуры, которая поддерживается во впускном ресивере системой автоматического регулирования (САР) подачи газа в ГПД (примерно 40 °С), что становится причиной перехода ГПД на долевые режимы работы (для сохранения теплового состояния двигателя на допустимом уровне) с соответствующим возрастанием удельного расхода топлива по сравнению с номинальным режимом. С целью поддержания температуры смеси во впускном ресивере на уровне требуемых 40 °С и исключения работы ГПД на долевых режимах необходимо дополнительное (к охлаждению в градирне) снижение температуры оборотной воды перед ее подачей в

ОНС_{нт}. Для этого целесообразно задействовать холод, получаемый в АБХМ.

Цель исследования – повышение эффективности охлаждения воздуха на входе и наддувочной газовой смеси ГПД установки автономного энергообеспечения.

2. Изложение основного материала

Решение задачи повышения эффективности охлаждения воздуха на входе и наддувочной ГВС ГПД рассматривалось на примере конкретной тригенерационной установки автономного электро-, тепло- и холодообеспечения завода ООО "Сандора"–"Pepsico Ukraine" (Николаевская обл.). Проектирование и монтаж установки выполнены ЧНПП "СИНАПС"–"GE Energy" (г. Киев) и ООО "Хладотехника" (г. Николаев). Установка включает два когенерационных ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (электрическая мощность одного ГПД 1400 кВт, тепловая мощность 1500 кВт), сбросная теплота которых используется в АБХМ для производства холода на технологические нужды и для центральных кондиционеров, обеспечивающих кондиционирование воздуха в машинном отделении (МО), откуда он поступает на всасывание ТК ГПД. Отвод теплоты от охлаждающей воды ГВС ГПД осуществляется системой оборотного охлаждения с градирнями сухого типа, а от АБХМ – градирнями пленочного (контактного) типа.

Схема существующей системы охлаждения приточного воздуха МО в АБХМ приведена на рис. 1, на котором охладитель приточного воздуха МО условно показан вне корпуса кондиционера.

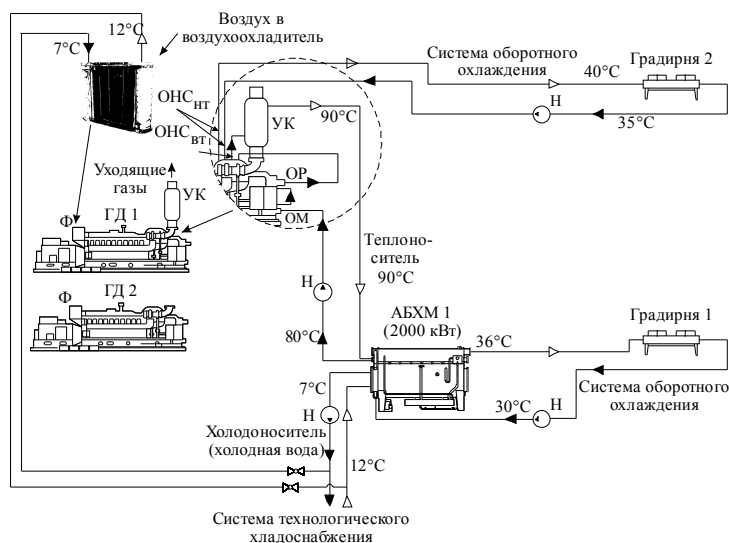


Рис. 1. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК ГПД в АБХМ с использованием теплоты, отводимой от уходящих газов и наддувочной ГВС, рубашки двигателя и смазочного масла и охлаждением наддувочной ГВС системой оборотного охлаждения: ОМ – охладитель масла; ОР – охладитель рубашки двигателя; ОНС_{нт} и ОНС_{вт} – низкотемпературная и высокотемпературная ступени охладителя наддувочной ГВС; УК – утилизационный котел; Ф – фильтр на всасывании турбокомпрессора; Н – насос

Охлажденная в АБХМ вода с температурой около 7 °С используется в качестве хладоносителя для технологических нужд охлаждения (при пастеризации соков) и воздухоохладителей (ВО) двух центральных кондиционеров, расположенных на платформе второго уровня МО, от выходных диффузоров которых охлажденный воздух подается в машинное отделение (МО) когенерационных ГПД, откуда – на всасывание ТК двигателей (к приемным фильтрам ГПД).

Охладитель наддувочной смеси состоит из высокотемпературной (утилизационной) ступени ОНС_{вт}, которая размещена первой по ходу ГВС после ТК и в которой охлаждение ГВС сопровождается нагревом воды, являющейся теплоносителем для АБХМ, и собственно охлаждающей низкотемпературной ступени ОНС_{нт}, в которой теплота ГВС отводится системой оборотного охлаждения с градирней сухого типа.

Ниже приведены некоторые результаты обработки данных автоматизированного мониторинга ГПД: температуры наружного воздуха $t_{нв}$ и воздуха $t_{вх}$ на всасывании ТК – во всасывающем тракте ТК после фильтра (рис. 2), объемный расход газа V_e и электрическая мощность N_e (рис. 3) в течение суток (июль 2011).

Как видно, температура воздуха на входе ТК ГПД довольно высокая (25...30 °С) и немного ниже температуры наружного воздуха: $t_{нв} - t_{вх} = t_2 - t_1 = 5...7$ °С. Еще выше его температура и хуже циркуляция в более удаленной зоне цилиндрического блока ГПД, что существенно ухудшает отвод от него теплоты и не обеспечивает поддержание теплового состояния ГПД на требуемом уровне.

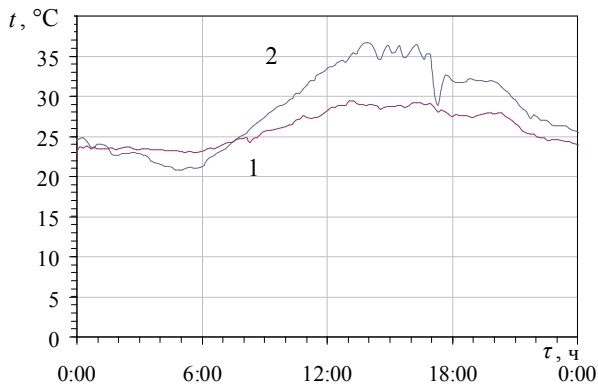


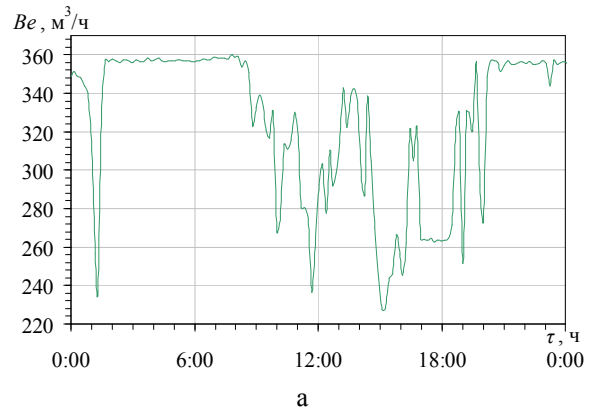
Рис. 2. Изменение температуры воздуха t в течение суток (июль 2011): 1 – $t_{вх}$, воздуха на входе ТК ГПД (после фильтра); 2 – $t_{нв}$, наружного воздуха

Поэтому подача охлажденного в кондиционерах воздуха в МО на значительном удалении от ГПД крайне неэффективна. Воздух необходимо подавать прямо к фильтрам и в зону цилиндрического блока ГПД, что сводит к минимуму потери холода и напора и обеспечивает надежную циркуляцию воздуха в зоне интенсивного тепловыделения.

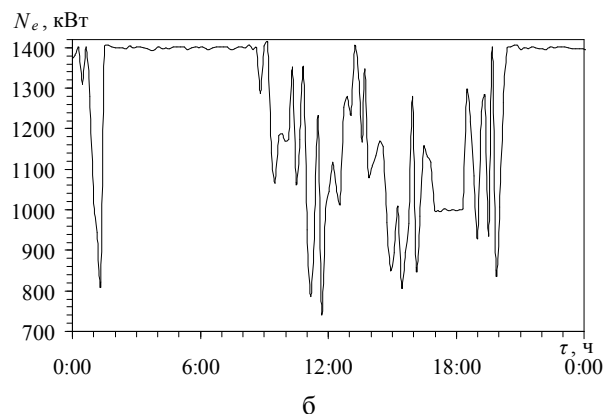
В ночные и утренние часы ($\tau = 0 \dots 8$ -00 ч., рис. 2) температуры воздуха на входе ТК, $t_{вх} = t_1$, и наружного воздуха, $t_{нв} = t_1$ ниже 25°C , тогда как в промежутке $\tau = 9 \dots 20$ ч. наружная температура $t_{нв}$ высокая: $t_{нв} = 30 \dots 35^\circ\text{C}$ и выше. При высоких температурах $t_{нв}$ наружного воздуха, обдувающего теплообменные поверхности градирен, и соответственно температуры охлаждаемой в них воды, которая примерно на 10°C выше $t_{нв}$, т.е. $40 \dots 45^\circ\text{C}$, система обратного охлаждения не справляется с поддержанием температуры ГВС на уровне 40°C , на которую настроена САР подачи газа в ГПД, в результате подача газа в ГПД (рис. 3,а) и его нагрузка (рис. 3,б) уменьшаются.

Работа ГПД на долевых режимах нагрузок ($\tau = 9 \dots 20$ ч.) сопровождается возрастанием удельного расхода газа b_e на $(20 \dots 30) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$, т.е. на $8 \dots 12\%$ по сравнению с работой ГПД на полной нагрузке при температурах $t_{нв}$ и $t_{вх}$ ниже 25°C (промежуток времени $\tau = 2 \dots 9$ ч, рис. 2), что следует из рис. 4.

Свести к минимуму работу ГПД на долевых режимах (на участке $\tau = 9$ -00...21-00 ч, рис. 3) и тем самым уменьшить удельный расход газа b_e можно путем более глубокого охлаждения воздуха на входе ТК (подводом охлажденного в кондиционере воздуха воздуховодом непосредственно к приемному фильтру на всасывании ТК, а не из МО) и стабилизируя температуру смеси t_e во впускном ресивере ГПД на уровне 40°C при повышенных температурах наружного воздуха $t_{нв}$ на входе в градирни системы обратного охлаждения ГВС.



а



б

Рис. 3. Изменение объемного расхода газа b_e (а) и электрической мощности N_e ГПД (б) в соответствии с регулированием САР подачи газа (июль 2011)

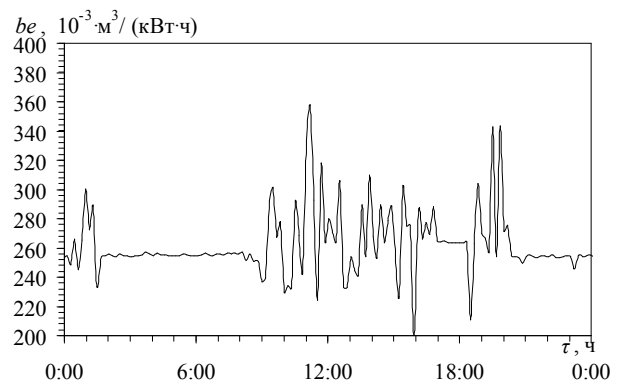


Рис. 4. Изменение удельного объемного расхода газа b_e при изменении температуры наружного воздуха и воздуха на всасывании ТК на рис. 2

Для снижения температуры воды в системе обратного охлаждения ГВС можно использовать холод, производимый в АБХМ. При этом хладосититель, температура которого $t_x = 7^\circ\text{C}$, направляют из АБХМ в пластинчатый ТО, в котором дополнительно охлаждают воду, поступающую от градирни, перед ее подачей на охлаждение ГВС в ОНС_{ит} (рис. 5).

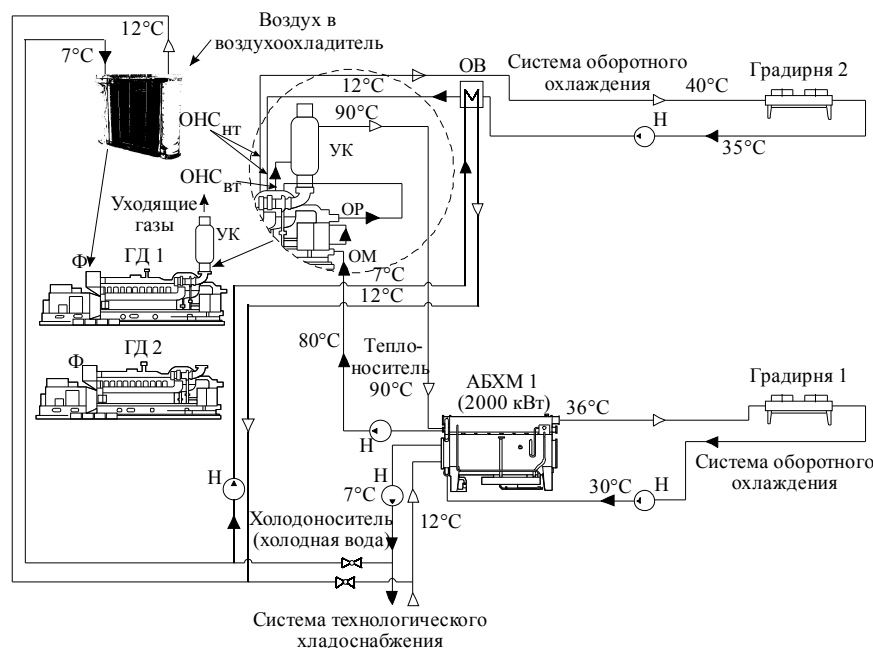


Рис. 5. Схема системы охлаждения воздуха на входе ТК ГД и наддувочной ГВС низкотемпературной ступени охладителя ОНС_{нт} в АБХМ: ОМ – охладитель масла; ОР – охладитель рубашки двигателя; ОНС_{нт} и ОНС_{вт} – низкотемпературная и высокотемпературная ступени охладителя наддувочной ГВС; УК – утилизационный котел; Ф – фильтр на всасывании турбокомпрессора; ОВ – охладитель оборотной воды; Н – насос

Стабилизация теплового состояния ГПД достигается охлаждением воздуха на входе ТК и воды системы оборотного охлаждения ГВС до параметров, которые имеют место в прохладное время года, когда ГПД эксплуатируется при номинальной нагрузке. При этом удельные расходы газа $b_e \approx 250 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$ против $b_e = (260 \dots 280) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$ без дополнительного охлаждения воды системы оборотного охлаждения (рис. 6).

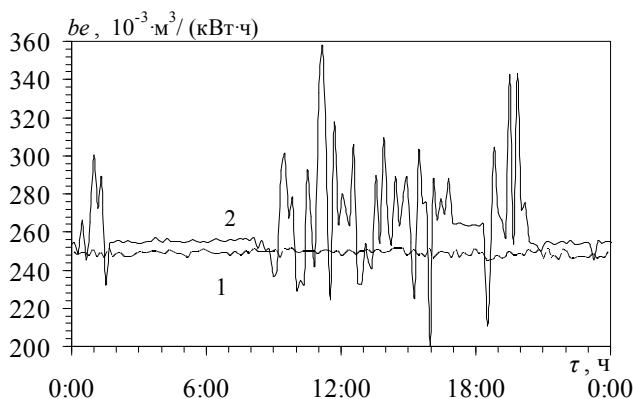


Рис. 6. Удельный объемный расход газа b_e :
1 – нижний график при охлаждении ГВС холодной водой (температура смеси $t_c \approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$);
2 – верхний график при охлаждении ГВС оборотной водой от градирни

Следует отметить, что при достаточно глубоком охлаждении воздуха (с осушением) на входе ТК ГПД сокращается также тепловая нагрузка на охладители наддувочной ГВС и, соответственно, системе оборотного охлаждения.

Выводы

Проанализировано влияние температуры воздуха (на входе турбокомпрессора и газовой смеси после него) на работу газопоршневого двигателя тригенерационной установки автономного энергообеспечения. Показана невозможность эффективной работы двигателя в теплое время в случае охлаждения наддувочной газовой смеси системой оборотного охлаждения с градирней сухого типа. Обоснована целесообразность охлаждения наддувочной газовой смеси и воздуха на входе турбокомпрессора газопоршневого двигателя абсорбционным термотрансформатором, использующим сбросную теплоту двигателя.

Литература

1. *Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations [Электронный ресурс] // GE Jenbacher Company Overview. – June 13, 2007. – 39 p. – Режим доступа: <http://cambodia.usembassy.gov/media2/>*

pdf/economic_utilization_of_biomass_and_municipal_waste_for_power_generation.pdf. – 23.10.2012 г.

2. Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications [Text] / T. Elsenbruch [статья]. – 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.

Поступила в редакцию 23.10.2012

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.А. Голиков, Одесская национальная морская академия.

ОХОЛОЖДЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ТА НАДДУВНОЇ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ ГАЗОПОРШНЕВОГО ДВИГУНА УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

А.М. Радченко, М.І. Радченко, А.В. Коновалов

Проаналізовано вплив температури повітря на вході турбокомпресора та газоповітряної суміші після нього на роботу газопоршневого двигуна тригенераційної установки автономного енергозабезпечення. Показана неможливість ефективної роботи двигуна в теплий час у випадку охолодження наддувної газоповітряної суміші системою оборотного охолодження з градирнею сухого типу. Обґрунтована доцільність охолодження наддувної газоповітряної суміші та повітря на вході турбокомпресора газопоршневого двигуна абсорбційним термотрансформатором, що використовує скидку теплоту двигуна.

Ключові слова: газопоршневий двигун, охолодження, зовнішнє повітря, наддувна газоповітряна суміш, утилізація тепла, тригенерація, абсорбційний термотрансформатор

COOLING OF INTAKE AIR AND CHARGED GAS-AIR MIXTURE OF RECIPROCATING GAS ENGINE FOR INTEGRATED ENERGY SYSTEM

A.N. Radchenko, N.I. Radchenko., A.V. Kononov

The influence of temperature of intake air and gas-air mixture after the turbocharger upon the performance of reciprocating gas engine of trigeneration plant of integrated energy system is analyzed. The impossibility of efficient performance of gas engines in hot time with cooling of charged gas-air mixture by closed water chilling system with towers of dry type is shown. The rationality of cooling of charged gas-air mixture and air at the inlet of reciprocating gas engine turbocompressor by absorption thermotransformer utilizing the waste heat of the engine has been proved.

Key words: reciprocating gas engine, cooling, ambient air, compressed gas-air mixture, heat utilization, trigeneration, absorption thermotransformer.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Коновалов Андрей Викторович – аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев, Украина, e-mail: konovalov.aua@gmail.com.