

УДК 621.438.13:621.57

А. Н. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР²¹ *Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина*² *ПАО "Завод "Экватор", Украина*

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК ТРАНСФОРМАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ В ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИНАХ

Выполнен анализ целесообразности применения охлаждения циклового воздуха на входе газотурбинных установок (ГТУ) теплоиспользующими холодильными машинами, утилизирующими теплоту отработанных газов. Оценка эффективности предварительного охлаждения циклового воздуха ГТУ трансформацией сбросной теплоты газов в холод базируется на потенциале охлаждения воздуха на входе ГТУ, который зависит от типа холодильной машины и климатических условий. Особенностью метода оценки потенциала охлаждения является возможность определить рациональные тип и установленную мощность холодильной машины, обеспечивающие достижение максимального эффекта в конкретных климатических условиях эксплуатации ГТУ.

Ключевые слова: газотурбинная установка, теплоиспользующая холодильная машина, трансформация теплоты, цикловой воздух, отработанные газы, экономия топлива.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

С повышением температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе газотурбинных установок (ГТУ) термодинамическая эффективность снижается. Так, для ГТУ производства ГП НПКГ "Зоря-Машпроект" с повышением температуры $t_{\text{нв}}$ на 10 °С уменьшается КПД на 0,8...1,0 % в абсолютных величинах или на 2,7...2,8 % в относительных величинах, причем меньшая величина соответствует двигателю ДЖ59 ($\eta_e = 30,7\%$ при $t_{\text{нв}} = 15\text{ °C}$), а большая – ДН70 ($\eta_e = 35,9\%$). Удельный расход топлива ГТУ при этом возрастает на 7...8 г/(кВт·ч).

Повысить эффективность ГТУ и за счет этого сократить расход газообразного топлива при высоких температурах $t_{\text{нв}}$ воздуха на входе можно путем его предварительного охлаждения теплоиспользующими холодильными машинами (ТХМ), утилизирующими тепло отработанных газов [1, 2].

Цель исследования – оценка эффективности применения охлаждения воздуха на входе ГТУ теплоиспользующими холодильными машинами с учетом глубины и продолжительности охлаждения в конкретных климатических условиях эксплуатации.

2. Результаты исследования

При эксплуатации ГТУ имеют место как сезонные, так и суточные изменения климатических ус-

ловий. На рис. 1 приведено изменение температуры $t_{\text{нв}}$, относительной влажности ϕ и влагосодержания d наружного воздуха в течение июля 2011 г. для с. Любашевка, Николаевская обл., где расположена Южнобугская компрессорная станция (КС).

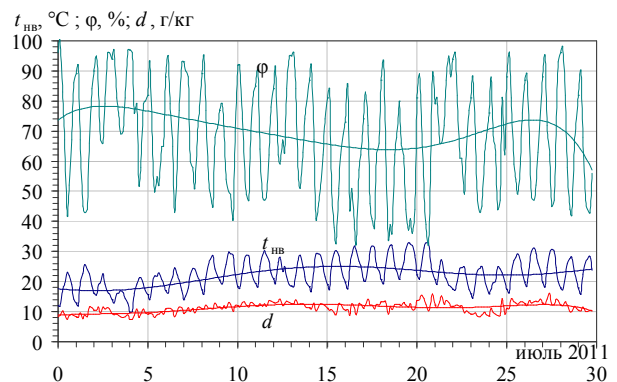


Рис. 1. Изменение температуры $t_{\text{нв}}$, относительной влажности ϕ и влагосодержания d наружного воздуха на протяжении июля 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

Для оценки текущего (часового) потенциала П охлаждения воздуха на входе ГТУ целесообразно использовать такой простой показатель, как снижение температуры воздуха Δt от текущей наружной температуры $t_{\text{нв}}$ до конечной $t_{\text{в2}}$ в течение 1 часа, т.е. $P = \Delta t \tau$, °С·ч, где $\tau = 1\text{ ч}$ [3]. Тогда потенциал

охлаждения воздуха на входе ГТУ суммарный – за какой-либо период времени τ (месяц, год) – представляет собой сумму произведений: $\Pi = \Sigma(\Delta t \tau)$, °С·ч.

Показатель охлаждения (эквивалентные градусы-часы охлаждения – Equivalent Cooling Degree Hours "ECDH") был предложен в работе [4]. Однако его применение ограничивалось оценкой потенциала охлаждения воздуха на входе ГТУ увлажнением до состояния насыщения (до температуры воздуха по мокрому термометру t_m). Использование потенциала Π открывает возможности не только для оценки эффекта от охлаждения воздуха в разных климатических условиях эксплуатации за определенное время, например, за год, $\Pi = \Sigma(\Delta t \tau)$, но и для выбора рационального типа ТХМ (по соответствующей температурой t_{b2} охлажденного в ТХМ воздуха), обеспечивающего максимальное значение потенциала охлаждения Π , и установленной холодильной мощности (холодопроизводительности) Q_0 , соответственно и капитальных затрат на ТХМ [3].

Глубина охлаждения воздуха (снижение температуры воздуха) $\Delta t = t_{нв} - t_{b2}$ и, следовательно, значение потенциала $\Pi = \Sigma(\Delta t_b \tau)$ зависят помимо температуры наружного воздуха $t_{нв}$ еще и от температуры t_{b2} охлажденного в ТХМ воздуха, которая определяется температурой хладоносителя t_x (рабочего тела ТХМ), т.е. зависит от конкретного типа ТХМ. Так, в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ) возможно охлаждение воздуха до $t_{b2} = 15...18$ °С ($t_x = 7...10$ °С), в абсорбционных водоаммиачных (ВАХМ) либо эжекторных хладоновых (ЭХМ) холодильных машинах – до более низких $t_{b2} = 7...10$ °С ($t_x = 2...5$ °С).

Значения текущего потенциала охлаждения воздуха на входе ГТУ, $\Pi = \Delta t \tau$, и суммарного (по

нарастающей) потенциала, $\Pi = \Sigma(\Delta t \tau)$, а также соответствующего снижения температуры воздуха Δt от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до конечной $t_{b2} = 10$ °С (ВАХМ или ЭХМ) и 15 °С (АБХМ) для климатических условий эксплуатации ГТУ КС (с. Любашевка, Николаевская обл.) приведены на рис. 2 для суток (7.07.2011), а на рис. 3 – июля 2011 г.

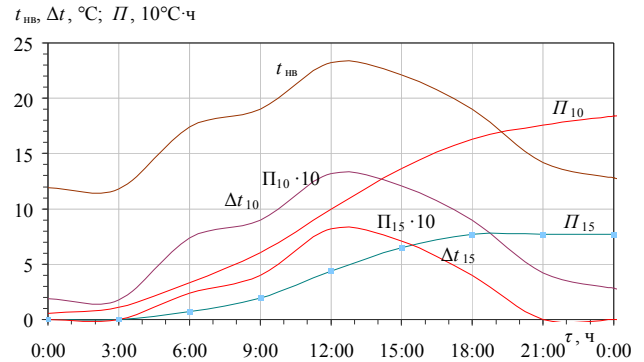


Рис. 2. Текущие значения температуры наружного воздуха $t_{нв}$, снижения температуры воздуха Δt_{10} и Δt_{15} от текущей наружной температуры $t_{нв}$ соответственно до $t_{b2} = 10$ °С (в АВАХМ или ЭХМ) и $t_{b2} = 15$ °С (в АБХМ), а также соответствующие значения суммарного (по нарастающей) потенциалов охлаждения Π_{10} и Π_{15} на протяжении июля 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

Текущие часовые значения потенциала охлаждения $\Pi = \Delta t_b \tau$, °С·ч, где $\tau = 1$ ч, численно совпадают с величинами снижения температуры воздуха Δt_b , °С, в результате его охлаждения.

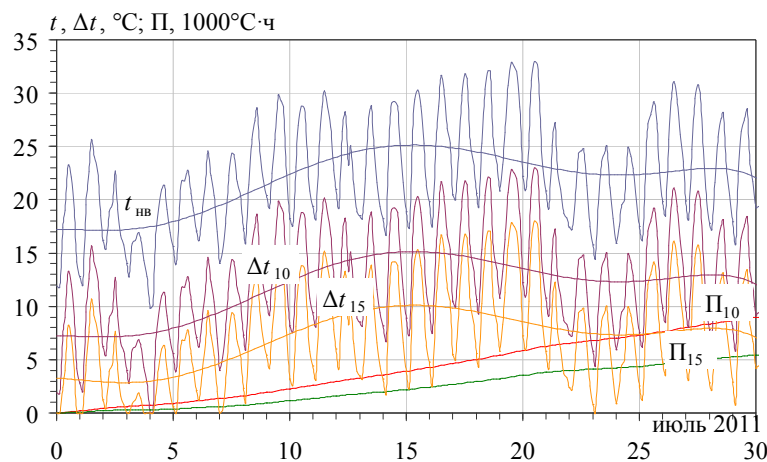


Рис. 3. Значения текущего часового и суммарного (по нарастающей) потенциалов Π охлаждения воздуха на входе ГТУ и соответствующего снижения температуры воздуха Δt от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до $t_{b2} = 10$ °С (в АВАХМ или ЭХМ) и $t_{b2} = 15$ °С (в АБХМ) в течение июля 2011 г.: Δt_{10} и Π_{10} – при $t_{b2} = 10$ °С; Δt_{15} и Π_{15} – $t_{b2} = 15$ °С

Как видно из рис. 2 и 3, изменение $t_{нв}$ обуславливает соответствующее изменение $\Delta t_{в}$, т.е. текущих часовых потенциалов охлаждения $\Pi = \Delta t_{в} \tau$, и, следовательно, темпов возрастания их суммарной величины $\Pi = \Sigma(\Delta t_{в} \tau)$ за сутки и месяц.

Аналогичные данные по текущим ежемесячным и их суммарным (по нарастающей) потенциалам Π охлаждения воздуха на входе ГТУ от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до конечной $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ) и 15°C (в АБХМ) в течение 2011 г. приведены на рис. 4 (с. Любашевка, Николаевская обл.). Ежемесячные потенциалы охлаждения представляют собой сумму суточных потенциалов за каждый соответствующий месяц: $\Pi_{\text{мес}} = \Sigma(\Delta t_{в} \tau)_{\text{сут}}$, а годовой потенциал – сумму 12-ти ежемесячных потенциалов: $\Pi_{\text{год}} = \Sigma \Pi_{\text{мес}}$.

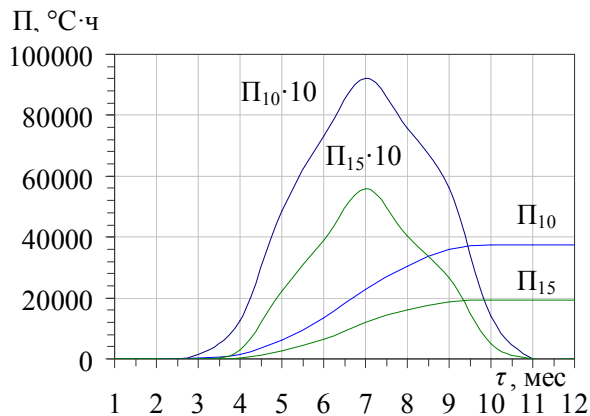


Рис. 4. Значения текущих ежемесячных и их суммарного потенциалов охлаждения Π воздуха на входе ГТУ от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до конечных $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (ВАХМ или ЭХМ) и 15°C (АБХМ) в течение 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

Как видно, максимальные значения текущего ежемесячного потенциала охлаждения Π воздуха на входе ГТУ приходятся на теплые июль–август месяцы. Наибольшим текущим потенциалам охлаждения Π соответствуют максимальные темпы наращивания суммарного потенциала – наиболее крутой характер графической зависимости $\Pi = \Sigma(\Delta t_{в} \tau) = f(\tau)$.

При этом упрощается расчет эффекта в виде экономии топлива, для чего необходимо знать зависимость расхода топлива, удельного b_e или общего $V_{т}$, от температуры воздуха на входе ГТУ. Для расчета годовой экономии топлива в результате охлаждения воздуха на входе ГТУ, например, в ВАХМ или ЭХМ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ достаточно умножить годовой потенциал охлаждения $\Pi_{10} = 36000^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$ (согласно рис. 4 при $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$) на величину уменьшения удельного расхода топлива Δb_e , приходящуюся

на 1°C снижения температуры воздуха на входе ГТУ, и на мощность ГТУ.

При снижении температуры воздуха на входе ГТУ, например ДН70 мощностью 10 МВт, на каждый 1°C удельный расход топлива уменьшается на величину $\Delta b_e = 0,7 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. С учетом этого при охлаждении воздуха на входе ГТУ ДН70 в АБХМ ($\Pi_{15} = 20000^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$ при $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$) годовая экономия природного газа составляет $V_{т,15} = 140 \text{ т}$, тогда как в ВАХМ или ЭХМ ($\Pi_{10} = 36000^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$ при $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$) – $V_{т,10} = 250 \text{ т}$, т.е. в 1,8 раза больше.

Выводы

Предложен метод оценки эффективности применения охлаждения воздуха на входе ГТУ в ТХМ, который базируется на потенциале охлаждения воздуха, зависящем от типа холодильной машины и климатических условий эксплуатации. Особенностью метода является возможность определить рациональные тип и установленную мощность ТХМ, обеспечивающие достижение максимального эффекта от охлаждения воздуха на входе ГТУ в конкретных климатических условиях эксплуатации.

Показано, что при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ (до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ и ниже) годовая экономия природного газа почти в два раза больше, чем в АБХМ ($t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ и выше).

Литература

1. Радченко, А. Н. Испарительное охлаждение воздуха в компрессорах ГТД с предварительным осушением теплоиспользующей холодильной машиной [Текст] / А. Н. Радченко, А. Стахель, Н. И. Радченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8(75). – С. 29–32.
2. Рыжков, С. С. Направления повышения эффективности тригенерационных установок автономного энергообеспечения технологических процессов [Текст] / С. С. Рыжков, А. Н. Радченко, С. Г. Фордуй // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 9 (106). – С. 80–85.
3. Радченко, А. Н. Методология технико-экономического обоснования эффективности применения тригенерации в газотурбинных установках [Текст] / А. Н. Радченко, А. С. Морозова // *Газотурбинные технологии*. – Рыбинск, Россия, 2013. – № 3 (114). – С. 42–45.
4. Chaker, M. Inlet fogging of gas turbine engines: climatic analysis of gas turbine evaporative cooling potential of international locations [Text] / M. Chaker, S. B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2002-30559.

Поступила в редакцию 25.05.2014, рассмотрена на редколлегии 10.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А. С. Титлов, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса

**ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ
НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ТРАНСФОРМАЦІЄЮ
ТЕПЛОТИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ В ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧИХ
ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИНАХ**

А. М. Радченко, С. А. Кантор

Проведено аналіз доцільності застосування охолодження циклового повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) тепловикористовуючими холодильними машинами, що утилізують теплоту відпрацьованих газів. Оцінка ефективності попереднього охолодження циклового повітря ГТУ трансформацією скидної теплоти газів в холод базується на розрахунку потенціалу охолодження повітря на вході ГТУ, який залежить від типу холодильної машини і кліматичних умов. Особливістю методу оцінки потенціалу охолодження є можливість визначити раціональні тип і встановлену потужність холодильної машини, що забезпечують досягнення максимального ефекту в конкретних кліматичних умовах експлуатації ГТУ.

Ключові слова: газотурбінна установка, тепловикористовуюча холодильна машина, трансформація теплоти, циклове повітря, відпрацьовані гази, економія палива.

**EVALUATION OF COOLING POTENTIAL OF GAS TURBINE UNIT INTAKE AIR
BY TRANSFORMING THE EXHAUST GAS HEAT IN WASTE HEAT RECOVERY
COOLING MACHINES**

A. N. Radchenko, S. A. Kantor

The rationality of application of gas turbine unit (GTU) intake cyclic air cooling by waste heat recovery cooling machines utilizing the heat of exhaust gases has been analyzed. The evaluation of the efficiency of precooling of GTU cyclic air by transforming the exhaust gas heat into a cold is based on the calculation of cooling potential of GTU intake air, that depends on the type of cooling machine and climate conditions. The peculiarity of the method of cooling potential evaluation is the possibility to determine a rational type and cooling machine power installed, those provide achieving the maximal effect in concrete climate conditions of GTU performance.

Key words: gas turbine unit, waste heat recovery cooling machine, transforming of heat, cyclic air, exhaust gases, fuel saving.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., доц., Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Кантор Сергей Анатольевич – инженер-механик, ПАО "Завод "Экватор", Николаев, Украина, e-mail: s_kantor@mail.ru.