

УДК 621.438.13:621.57

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТУ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Выполнен сравнительный анализ эффективности применения охлаждения циклового воздуха на входе газотурбинных установок (ГТУ) теплоиспользующими холодильными машинами, утилизирующими теплоту отработанных газов, а также испарительного охлаждения. Эффективность предварительного охлаждения циклового воздуха ГТУ трансформацией сбросной теплоты газов в холод оценивалась сокращением потребления топлива ГТУ. Показано, что глубина охлаждения воздуха на входе ГТУ, которая зависит от типа холодильной машины и климатических условий, предопределяет эффект от применения разных способов охлаждения.

Ключевые слова: *охлаждение воздуха, газотурбинная установка, теплоиспользующая холодильная машина, цикловой воздух, отработанные газы, экономия топлива.*

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Топливная эффективность ГТУ зависит от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе. С повышением температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе ГТУ их эффективность снижается: удельная работа сжатия компрессора возрастает, а полезная работа турбины уменьшается, поскольку уменьшаются плотность наружного воздуха на входе компрессора и, соответственно, его расход, следствием чего является снижение КПД, увеличение удельного расхода топлива b_e . В частности, для ГТУ типа ДН и ДЖ производства ГП НПКГ "Зоря"-Машпроект с повышением температуры $t_{\text{нв}}$ на 10 °С КПД уменьшается в абсолютных величинах на 0,8...1,0 %, или в относительных – на 2,7...2,8 %. Удельный расход топлива ГТУ при этом возрастает на 7...8 г/(кВт·ч).

Для газотурбокомпрессорного агрегата ГТК-10-4 Южнобугской компрессорной станции (с. Любашевка, Николаевская обл.), при снижении температуры воздуха на входе на 1 °С удельный расход топлива уменьшается на величину $\Delta b_e = 0,7$ 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 [1–3].

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 условий, и прежде всего температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$. Текущие часовые значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_{e10} за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ от $t_{\text{нв}}$ до $t_{b2} = 10$ °С на величину Δt_{10} , соответственно Δb_{e15} – за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в АБХМ до $t_{b2} = 15$ °С на величину Δt_{15} , а также Δb_{em} – при испарительном охлаждении воздуха с понижением его температуры до $t_{b2} = t_m$ [4] в течение июля 2011 г. для климатических условий с. Любашевка, Николаевская обл., где расположена Южнобугская компрессорная станция (КС), приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, изменение $t_{\text{нв}}$ обуславливает изменение Δt_b и соответствующее уменьшение удельного расхода топлива Δb_e за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ. Суммируя текущие часовые значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_{e10} , Δb_{e15} и Δb_{em} за год, получают удельную, приходящуюся на 1 кВт мощности ГТУ, соответственно месячные и годовую удельную экономию топлива $V_{г.1кВт}$, кг/кВт.

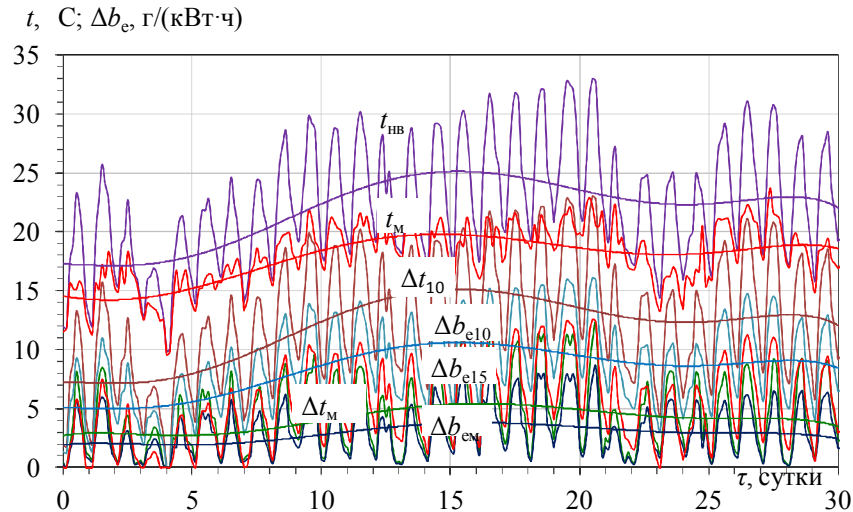


Рис. 1. Текущие значения снижения температуры воздуха Δt в результате его охлаждения от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до конечной $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ), до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (в АБХМ) и до $t_{в2} = t_m$ при испарительном охлаждении воздуха, а также соответствующие текущие значения уменьшения удельного расхода топлива Δb_{e10} , Δb_{e15} и $\Delta b_{см}$ в течение июля 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

Экономия топлива B_T за месяц и год для ГТУ, например мощностью $N_e = 10$ МВт, в результате охлаждения воздуха на входе от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до разных конечных температур $t_{в2}$ получают как $B_{T,10} = B_{T,1кВт} \cdot N_e$ (рис. 2).

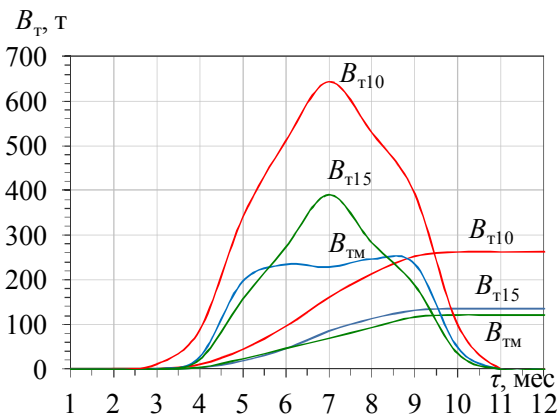


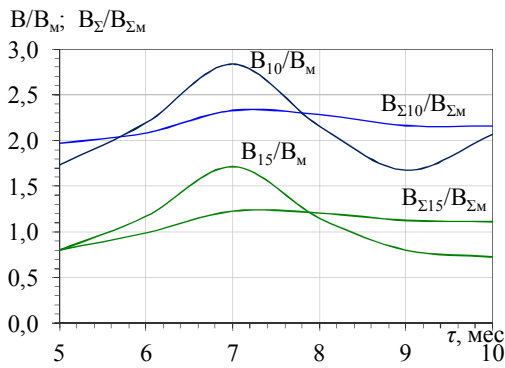
Рис. 2. Значения экономии топлива B_T ежемесячной и суммарной по нарастающей для ГТУ мощностью 10 МВт за счет охлаждения воздуха на входе от $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (ВАХМ или ЭХМ) и $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (АБХМ), а также $t_{в2} = t_m$ (контактное охлаждение воздуха испарением впрыскиваемой воды): B_{T10} – при $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$; B_{T15} – при $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$; $B_{Tм}$ – при $t_{в2} = t_m$ (контактное охлаждение) в течение 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

Как видно из рис. 2, более глубокое охлаждение в ВАХМ или ЭХМ ($t_{в2} = 10^\circ\text{C}$) обеспечивает практически в два раза большую экономию топлива по сравнению с АБХМ ($t_{в2} = 15^\circ\text{C}$) и контактными охлаждением воздуха с испарением впрыскиваемой

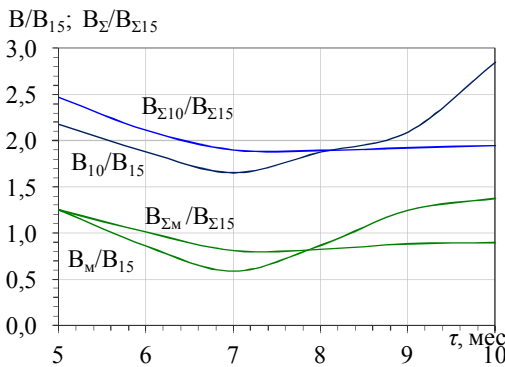
воды и понижением его температуры до $t_{в2} = t_m$: 260 т против 130 т и 120 т соответственно для ГТУ мощностью 10 МВт. Максимальные значения ежемесячной экономии топлива B_T за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ приходятся на самые теплые месяцы (июль-август). О соотношении текущей ежемесячной B/V_m и суммарной $B_{\Sigma}/B_{\Sigma m}$ (по нарастающей) экономии топлива для ГТУ мощностью 10 МВт в результате охлаждения воздуха на входе от текущей наружной температуры $t_{нв}$ до разных $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ) и $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (в АБХМ) по сравнению с ее величиной при контактном охлаждении воздуха до $t_{в2} = t_m$ в течение мая-октября 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.) можно судить по рис. 3,а, а также их величин B/V_{15} и $B_{\Sigma}/B_{\Sigma 15}$ по сравнению с охлаждением воздуха в АБХМ до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ – рис. 3,б.

Как видно из рис. 3,а, при глубоком охлаждении воздуха на входе ГТУ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ) годовая суммарная экономия топлива более чем в два раза превышает ее величину по сравнению с контактными охлаждением воздуха: $B_{\Sigma 10}/B_{\Sigma m} = 2,2$, и даже большим текущем превышении в июле-августе: $B_{10}/B_m \approx 2,5$ (рис. 3,а). Практически двойное приращение экономии топлива имеет место при глубоком охлаждении воздуха до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ) и по сравнению с АБХМ: $B_{\Sigma 10}/B_{\Sigma 15} \approx 1,9$. То обстоятельство, что при этом текущее помесечное приращение оказывается больше в мае и октябре: $B_{10}/B_{15} = 2,0 \dots 2,5$, а не в самые теплые июль-август месяцы, объясняется увеличением не только текущих значений величины снижения температуры

воздуха $\Delta t = t_{нв} - t_{в2}$, но и продолжительности такого охлаждения в периоды умеренных температур наружного воздуха: в рассматриваемом случае при $t_{нв} < 15^\circ\text{C}$.



a



б

Рис. 3. Текущая месячная V/V_M и суммарная $V_Σ/V_ΣM$ (по нарастающей) экономия топлива для ГТУ 10 МВт в результате охлаждения воздуха на входе до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (в ВАХМ или ЭХМ) и $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (в АБХМ) в относительных величинах по сравнению с ее величиной при контактном охлаждении воздуха до $t_{в2} = t_M$ (**a**) и до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (в АБХМ) V/V_{15} и $V_Σ/V_{Σ15}$ (**б**) в течение мая-октября 2011 г. (с. Любашевка, Николаевская обл.)

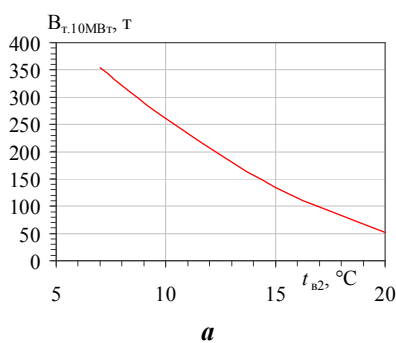
Это также свидетельствует об эффективности применения глубокого охлаждения воздуха для условий умеренных температур наружного воздуха. Для климатических условий Южнобугской КС применение АБХМ дает незначительное (на 10 %) приращение экономии топлива по сравнению с ее величиной при контактном охлаждении воздуха: $V_{Σ15}/V_{ΣM} = 1,1$.

О годовой экономии топлива V_T для ГТУ мощностью 10 МВт за счет охлаждения воздуха на входе разными способами – до разных конечных температур $t_{в2}$ – в абсолютных и относительных величинах по сравнению с традиционными способами охлаждения в АБХМ до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ и контактным методом до $t_{в2} = t_M = 15...20^\circ\text{C}$ (рис. 1) в теплые месяцы можно судить по рис. 4.

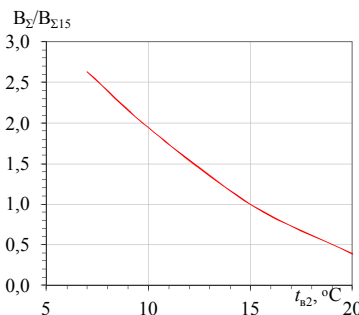
Как видно из рис. 4, **б**, при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ (до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ и ниже) годовая экономия природного газа в два раза больше, чем в АБХМ ($t_{в2} = 15^\circ\text{C}$). Еще более значительная годовая экономия природного газа имеет место по сравнению с испарительным охлаждением (контактным методом) до $t_{в2} = 15...20^\circ\text{C}$ (рис. 4, **в**).

Выводы

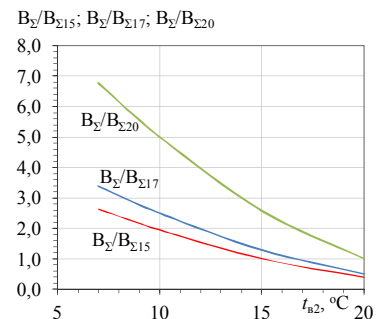
В результате сравнительного анализа эффективности применения разных способов охлаждения воздуха на входе ГТУ для климатических условий Южнобугской КС (с. Любашевка, Николаевская обл.) показано, что при охлаждении воздуха на входе ГТУ в ВАХМ или ЭХМ (до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ и ниже) годовая экономия природного газа практически в два раза превышает ее величину по сравнению с АБХМ и даже больше по сравнению с испарительным охлаждением.



a



б



в

Рис. 4. Значения годовой экономии топлива $V_{T,10MW_T}$ для ГТУ мощностью 10 МВт в результате охлаждения воздуха на входе от текущей $t_{нв}$ до разных конечных температур $t_{в2}$ в абсолютных величинах (**a**), а также в относительных величинах – по сравнению с охлаждением в АБХМ до $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (**б**) и контактным методом до $t_{в2} = 15...20^\circ\text{C}$ (**в**) в 2011 г., с. Любашевка, Николаевская обл.

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. Радченко, А. Н. Оценка потенциала охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок трансформацией теплоты отработанных газов в теплоиспользующих холодильных машинах [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-косми-*

ческая техника и технология. – 2014. – № 4 (111). – С. 56–59.

3. Радченко, Н. И. Повышение эффективности газотурбинных установок рекуперацией теплоты с охлаждением воздуха на входе [Текст] / Н.И. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 5 (112). – С. 95–98

4. Chaker, M. Inlet fogging of gas turbine engines: climatic analysis of gas turbine evaporative cooling potential of international locations [Text] / M. Chaker, C. B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2002-30559.

Поступила в редакцию 8.12.2014, рассмотрена на редколлегии 20.01.2015

ЕФЕКТИВНІСТЬ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТУ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

А. М. Радченко, С. А. Кантор

Виконано порівняльний аналіз ефективності застосування охолодження циклового повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) тепловикористовуючими холодильними машинами, що утилізують теплоту відпрацьованих газів, а також випарного охолодження. Ефективність попереднього охолодження циклового повітря ГТУ трансформацією скидної теплоты газів в холод оцінювалась скороченням споживання палива ГТУ. Показано, що глибина охолодження повітря на вході ГТУ, яка залежить від типу холодильної машини та кліматичних умов, наперед визначає ефект від застосування різних способів охолодження.

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

THE EFFICIENCY OF INTAKE AIR COOLING APPROACHES FOR GTU OF COMPRESSOR STATIONS FOR SITE CLIMATE CONDITIONS

A. N. Radchenko, S. A. Kantor

The comparative analyses of the efficiency of application of gas turbine unit (GTU) intake cyclic air cooling by waste heat recovery cooling machines utilizing the heat of exhaust gases and evaporative cooling has been made. The efficiency of precooling of GTU cyclic air by transforming the exhaust gases heat into a cold was estimated by GTU fuel saving. It was shown that a magnitude of GTU intake air cooling, that depends on the type of cooling machine and climate conditions, predetermines the effect due to the application of different cooling approaches.

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

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, 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.