

УДК 621.57

Н.И. РАДЧЕНКО, РАМИ ЭЛЬГЕРБИ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Проанализирована величина снижения температуры воздуха на входе газотурбинных установок и соответствующее уменьшение удельного расхода топлива с учетом климатических условий разных регионов Ливии с применением безмашинного (испарительного) и машинного (теплоиспользующей холодильной машины) способов охлаждения. Показано, что наиболее эффективным способом является охлаждение воздуха на входе газотурбинных установок теплоиспользующей холодильной машиной, которое обеспечивает практически в два раза большее снижение температуры воздуха и, соответственно, экономию топлива (сокращение удельного расхода топлива) по сравнению с предварительным испарительным охлаждением воздуха.

Ключевые слова: газотурбинная установка, охлаждение воздуха, теплоиспользующая холодильная машина, температура, влажность.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Электрическая энергия, производимая газотурбинными электростанциями, является основным видом энергии, потребляемой в Ливии [1]. Эффективность электрогенерирующих газотурбинных установок (ГТУ) существенно зависит от температуры наружного воздуха на входе $t_{\text{нв}}$ и резко снижается с ее повышением. Для ГТУ LM2500+ фирмы "General Electric" ($N_e = 27$ МВт при $t_{\text{нв}} = 15$ °С) повышение температуры $t_{\text{нв}}$ на 10 °С вызывает снижение КПД на 2 % и соответствующее возрастание удельного расхода топлива b_e , а для ГТУ LM1600 ($N_e = 15$ МВт) ухудшение КПД и b_e составляет примерно 1,6 % [2]. По данным [1] из-за повышенных температур воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе электрогенерирующие мощности ГТУ оказываются на 20 % ниже установленных, создавая дефицит производства электроэнергии. Поэтому проблема охлаждения воздуха на входе ГТУ стоит в энергетике Ливии остро. Перспективным направлением ее решения является снижение температуры воздуха $t_{\text{нв}}$ на входе безмашинным (использованием естественного охлаждающего потенциала хладоносителя, например воды) и машинными (с помощью холодильных машин) способами охлаждения.

Высокие температуры воздуха (35...45 °С) при остром дефиците пресной воды затрудняют возможность применения безмашинных способов охлаждения воздуха распылением воды в воздушном потоке на всасывании ГТУ в южных регионах с су-

хим жарким климатом, где вследствие малой влажности воздуха эффект от его испарительного охлаждения мог быть весьма существенным. Очевидно, что в таких условиях целесообразно применение поверхностного охлаждения воздуха холодильной машиной теплоиспользующего типа (ТХМ), утилизирующей теплоту выпускных газов ГТУ. В качестве рабочего тела ТХМ применяют озонобезопасные хладагенты R142В и R600 (эжекторные ТХМ), аммиак или вода, кипящая под вакуумом, в абсорбционных водоаммиачных (АХМ) и бромистолитиевых (АБХМ) холодильных машинах.

Цель исследования – оценка эффективности применения испарительного (безмашинного) и теплоиспользующими холодильными машинами способов охлаждения воздуха на входе ГТУ в регионах Ливии с разными климатическими условиями эксплуатации.

2. Результаты исследования

Условия эксплуатации ГТУ в Ливии характеризуются суточными и сезонными колебаниями температуры $t_{\text{нв}}$ и относительной влажности ϕ наружного воздуха на входе, что влияет на термодинамическую эффективность ГТУ (КПД и, соответственно, удельный расход топлива b_e). Изменение температуры $t_{\text{нв}}$, относительной влажности $\phi_{\text{нв}}$ и влагосодержания $d_{\text{нв}}$ наружного воздуха в течение 1.07...15.07.2009 в г. Триполи и Хон (южный регион Ливии с сухим жарким климатом) представлено на рис. 1.

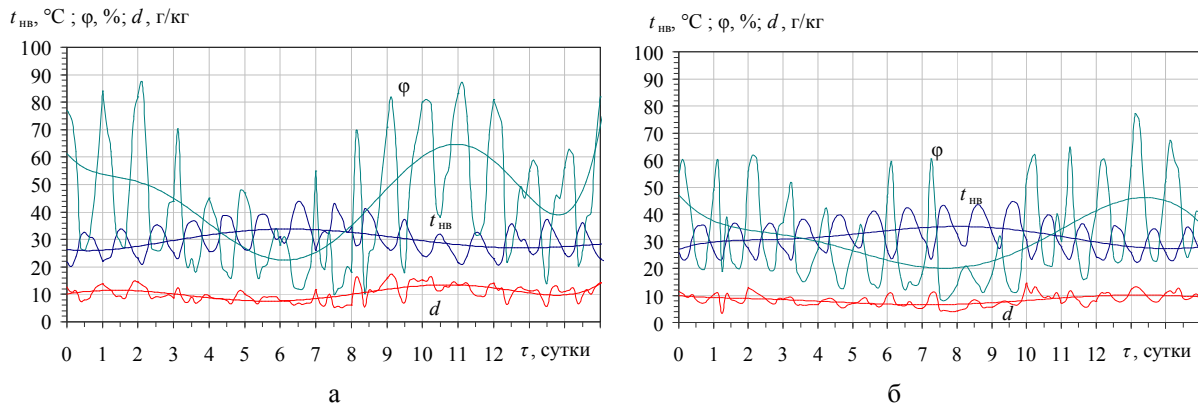


Рис. 1. Изменение температуры $t_{нв}$, относительной влажности ϕ и влагосодержания d наружного воздуха в течение 1.07...15.07.2009: а – Триполи; б – Хон

Как видно, при несколько более высокой температуре наружного воздуха $t_{нв}$ в г. Хон (на 3...5 °С выше, чем в г. Триполи) относительная его влажность ϕ намного ниже, что, с одной стороны, создает благоприятные условия для испарительного охлаждения воздуха его увлажнением до состояния насыщения, а с другой, – из-за острого дефицита пресной воды делает применение испарительного охлаждения весьма проблематичным. В таких условиях приоритетным является поверхностное охлаждение воздуха с помощью ТХМ или же его комбинация с внутренним испарительным охлаждением воздуха (в процессе сжатия воздуха в компрессоре) путем впрыскивания воды непосредственно на всасывание компрессора в уже охлажденный (в поверхностном аппарате) воздушный поток, для чего требуется в два-три раза меньшее количество пресной воды.

Из рис. 1 также видно, что при стабильно высокой среднесуточной температуре $t_{нв}$ наружного воздуха имеют место значительные ее колебания (10...15 °С) в течение суток. Еще большие суточные колебания относительной влажности ϕ воздуха обуславливают наличие дневных и ночных противоположно направленных экстремумов $t_{нв}$ и ϕ : максимум температур соответствуют минимумы влажности днем и наоборот ночью. Их существование создает благоприятные условия для большего снижения температуры воздуха на входе ГТУ днем (в том числе и испарительным охлаждением воздуха благодаря меньшей относительной влажности $\phi_{нв}$), когда имеет место значительное ухудшение термодинамической эффективности ГТУ из-за повышенных температур $t_{нв}$. В ночное же время, когда потребность в охлаждении воздуха на входе ГТУ меньше (ниже $t_{нв}$), а относительная влажность ϕ его, наоборот, высокая, снижение температуры воздуха в охладителе на входе ГТУ сопровождается интенсив-

ной конденсацией водяных паров из воздуха. Отводимый конденсат можно использовать в дневные часы максимальных температур воздуха для испарительного его охлаждения, в частности, при сжатии в компрессоре ГТУ (внутреннее испарительное охлаждение).

Проанализируем прежде всего эффективность применения предварительного (до компрессора) испарительного охлаждения воздуха как наиболее простого безмашинного способа, для реализации которого требуются насос высокого давления и форсунки тонкого распыла, следовательно, минимальные капиталовложения. При этом воздух увлажняется практически до состояния насыщения с понижением его температуры от текущего значения $t_{нв}$ до температуры по мокрому термометру t_m . Недостатком предварительного охлаждения воздуха его увлажнением является ограничение глубины охлаждения температурой t_m .

Глубина предварительного испарительного охлаждения воздуха характеризуется разностью температур $\Delta t_m = t_{нв} - t_m$, которая для климатических условий г. Триполи и Хон составляет $\Delta t_m = 5...15$ °С, а в дневные часы максимальных температур $t_{нв}$ и соответственно минимальной относительной влажности ϕ достигает $\Delta t_m = 15...20$ °С (рис. 2).

Глубина охлаждения воздуха в поверхностном теплообменнике определяется температурой хладоносителя и интенсивностью теплопередачи. Так, при интенсивном теплообмене, обеспечивающем минимальную разность температур между охлаждаемым воздухом и хладоносителем (5...8 °С), возможно охлаждение воздуха до температуры примерно 10 °С в испарителе-воздухоохладителе (И-ВО) абсорбционной водоаммиачной (АХМ) и эжекторной хладоновой (ЭХМ) холодильных машин, а до 15 °С – абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной (АБХМ). На рис. 3 приведены значения

снижения температуры воздуха Δt от текущей наружной температуры воздуха $t_{нв}$ до температуры $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ в поверхностном охладителе АХМ или ЭХМ (соответственно $\Delta t_{(10)}$), до температуры $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ (соответственно $\Delta t_{(15)}$), а также в

результате предварительного испарительного охлаждения воздуха на разность температур $\Delta t_m = t_{нв} - t_m$. Там же нанесены значения соответствующего уменьшения удельного расхода топлива: $\Delta b_{e(10)}$, $\Delta b_{e(15)}$ и $\Delta b_{e,m}$.

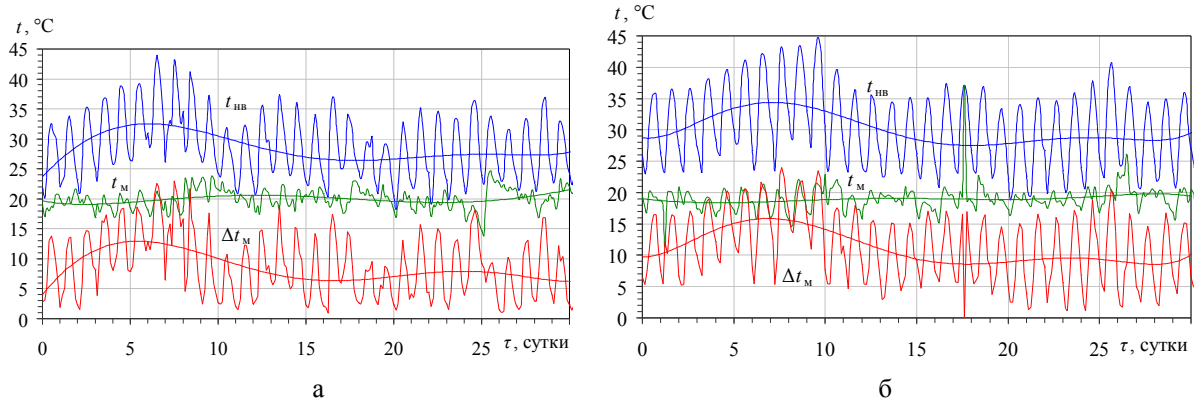


Рис. 2. Температуры наружного воздуха (по сухому термометру) $t_{нв}$, по мокрому термометру t_m и глубина охлаждения воздуха Δt_m путем увлажнения до состояния насыщения (июль 2009 г.): а – Триполи; б – Хон

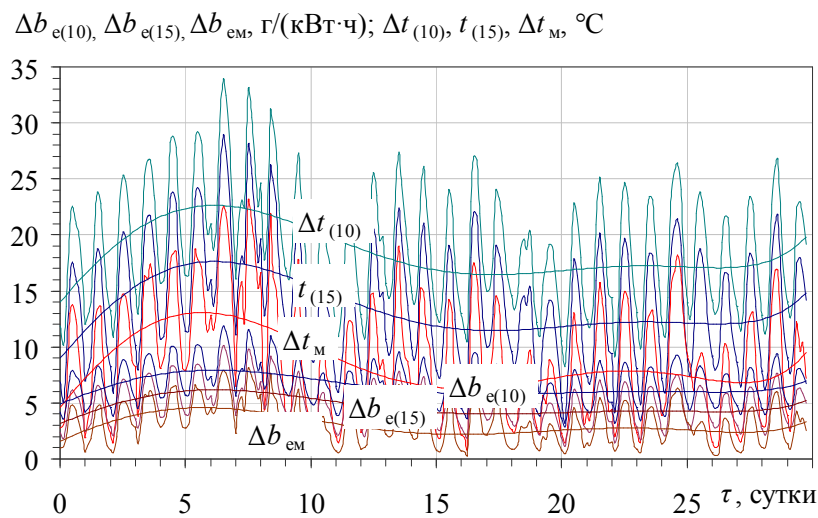


Рис. 3. Снижение температуры наружного воздуха в результате его охлаждения до температуры $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ в АХМ или ЭХМ ($\Delta t_{(10)}$), до температуры $t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ ($\Delta t_{(15)}$), до температуры насыщения t_m (Δt_m), а также соответствующее уменьшение удельного расхода топлива: $\Delta b_{e(10)}$, $\Delta b_{e(15)}$ и $\Delta b_{e,m}$ в течение 1.07...31.07.2009 г. (Триполи)

Как видно, средняя в течение суток глубина охлаждения воздуха Δt в поверхностном охладителе АХМ или ЭХМ $\Delta t_{(10)} = 17...23^\circ\text{C}$ (в дневные часы $\Delta t_{(10)} = 25...30^\circ\text{C}$), т.е. практически в два раза больше, чем при испарительном охлаждении: $\Delta t_m = 7...13^\circ\text{C}$ (днем $\Delta t_m = 15...20^\circ\text{C}$), тогда как в АБХМ – $\Delta t_{(15)} = 12...18^\circ\text{C}$ (в дневные часы $\Delta t_{(15)} = 20...25^\circ\text{C}$). В результате чего удельный расход топлива b_e сокращается соответственно на ве-

личину: $\Delta b_{e(10)} = 5...7 \text{ г/(кВт·ч)}$; $\Delta b_{e(15)} = 4...6 \text{ г/(кВт·ч)}$; $\Delta b_{e,m} = 3...5 \text{ г/(кВт·ч)}$ по сравнению с его значением без охлаждения воздуха на входе.

Об экономии топлива V_T в разные месяцы за счет поверхностного охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт в ТХМ от текущей температуры $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10$ и 15°C (г. Триполи и Хон, 2009 г.) можно судить по рис. 4 и 5.

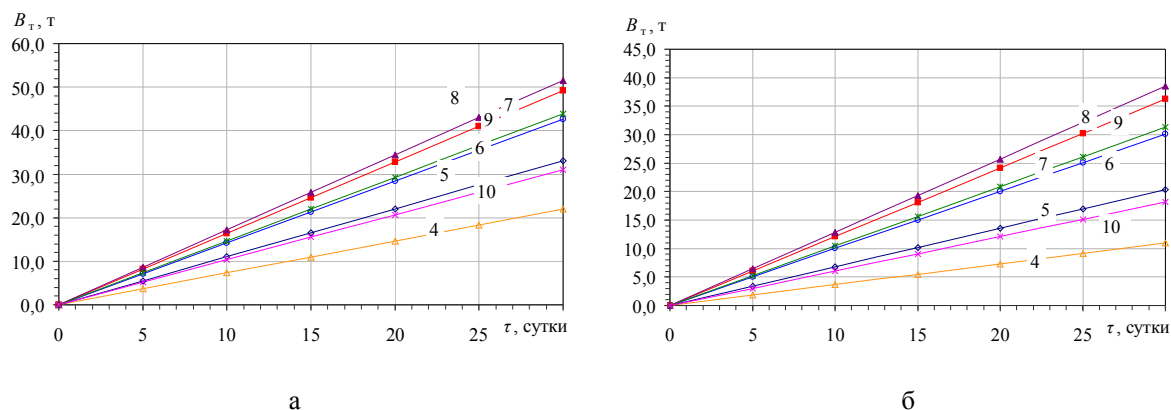


Рис. 4. Экономия топлива B_T , т, по месяцам за счет поверхностного охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт в ТХМ от текущей температуры $t_{нв}$ до $t_{в2}$ (г. Триполи, 2009 г.): а – $t_{в2} = 10$ °С; б – $t_{в2} = 15$ °С; $-\Delta-$ – апрель (4); $-\diamond-$ – май (5); $-\circ-$ – июнь (6); $-\blacksquare-$ – июль (7); $-\blacktriangle-$ – август (8); $-\text{ж}-$ – сентябрь (9); $-\text{х}-$ – октябрь (10)

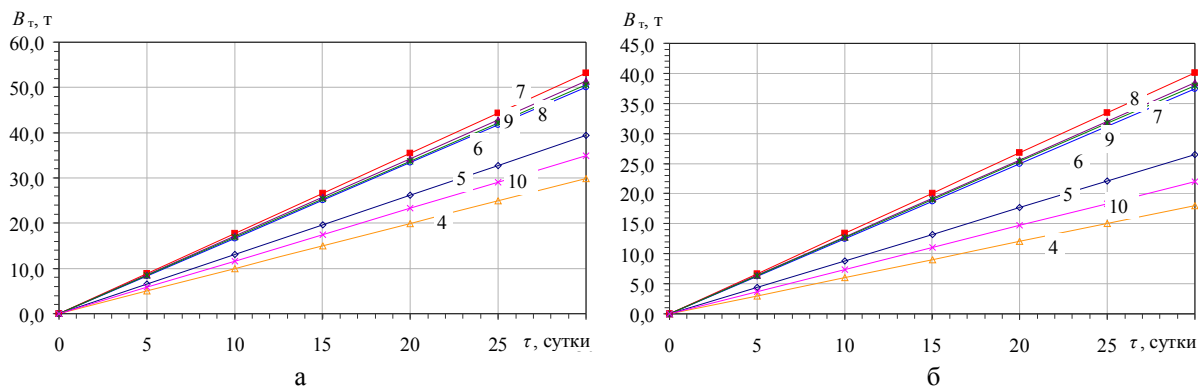


Рис. 5. Экономия топлива B_T , т, по месяцам за счет поверхностного охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт в ТХМ от текущей температуры $t_{нв}$ до $t_{в2}$ (г. Хон, 2009 г.): а – $t_{в2} = 10$ °С; б – $t_{в2} = 15$ °С; $-\Delta-$ – апрель (4); $-\diamond-$ – май (5); $-\circ-$ – июнь (6); $-\blacksquare-$ – июль (7); $-\blacktriangle-$ – август (8); $-\text{ж}-$ – сентябрь (9); $-\text{х}-$ – октябрь (10)

Из сравнения данных на рис. 4,а и 5,а (при $t_{в2} = 10$ °С, ЭХМ, АХМ) с соответствующими на 4,б и 5,б (при $t_{в2} = 15$ °С, АБХМ) видно, что на экономии топлива особенно сильно сказывается температура хладоносителя в воздухоохладителе на входе ГТУ (при одинаковой интенсивности теплопередачи), зависящая в свою очередь от типа ТХМ и определяющая глубину охлаждения воздуха на входе ГТУ. Для рассматриваемых климатических условий снижение температуры $t_{в2}$ до 10 °С, что возможно при использовании в качестве хладоносителя хладона или аммиака (ЭХМ, АХМ), обеспечивает возрастание экономии топлива практически на 25 % для жарких месяцев, когда эффект от охлаждения воздуха на входе ГТУ наибольший.

Об экономии топлива B_T за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт

(г. Триполи, 2009 г.) от текущей $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10$ °С в АХМ или ТХМ и контактным способом с увлажнением воздуха до $t_{в2} = t_m$ можно судить по рис. 6.

Как видно, охлаждение воздуха на входе ГТУ в ТХМ обеспечивает более чем в полтора раза большую экономию топлива B_T по сравнению с испарительным охлаждением, что объясняется намного большей глубиной снижения температуры воздуха на входе ГТУ $\Delta t_{в2} = t_{нв} - 10$ °С по сравнению с ее величиной $\Delta t_m = t_{нв} - t_m$ для контактного способа (рис. 3).

Об эффективности применения разных способов охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт, обеспечивающих разную глубину охлаждения воздуха и, соответственно, экономию топлива B_T можно судить по данным на рис. 7.

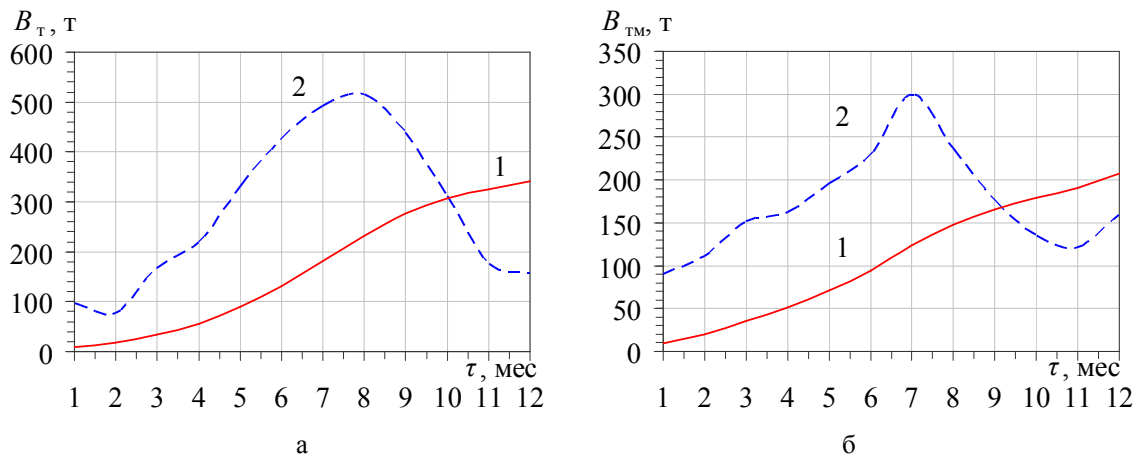


Рис. 6. Экономия топлива B_T за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт (г. Триполи, 2009 г.) от текущей $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ в АХМ или ЭХМ (а) и контактным способом с увлажнением до $t_{в2} = t_m$ (б): 1 – по нарастающей за 2009 г., B_T, T ; 2 – за месяц, $B_T \cdot 10, T$

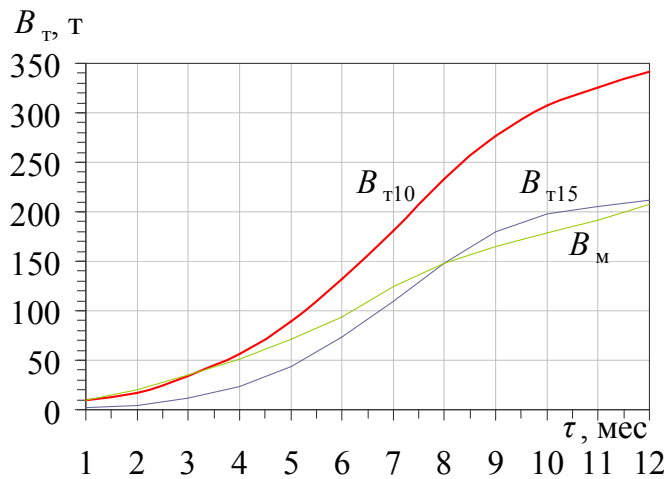


Рис. 7. Экономия топлива B_T за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ мощностью 10 МВт от текущей $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$: $B_{T10} - t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ (ЭХМ, АХМ); $B_{T15} - t_{в2} = 15^\circ\text{C}$ (АБХМ); $B_M - t_{в2} = t_m$ (испарительное охлаждение)

Как видно, наибольшую экономию топлива получают при глубоком охлаждении воздуха на входе ГТУ от текущей $t_{нв}$ до $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$, т.е. при температуре хладоносителя, близкой 0°C , свойственной АХМ и ЭХМ. Экономия же топлива при испарительном охлаждении воздуха на входе ГТУ, равно как и при его охлаждении в АБХМ до температуры $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$, более чем в полтора раза меньшая.

Выводы

Выбор способа охлаждения воздуха на входе ГТУ зависит от климатических условий эксплуатации. Показано, что наиболее эффективным способом является охлаждение воздуха на входе ГТУ в

поверхностных охладителях АХМ или ЭХМ, которое обеспечивает почти в два раза большее снижение температуры воздуха и, соответственно, экономию топлива (сокращение удельного расхода топлива Δb) по сравнению с предварительным испарительным охлаждением воздуха.

Литература

1. *Planning Electrical Power System Studies for Libya (Demand Forecasting & Generation Expansion Planning until 2025) [Text]. – Final Report, 2008: General People’s Committee of Electricity, Water & Gas (GPCoEWG), ICEPCO, 2008. – 193 p.*

2. Bortmany, J.N. *Assesment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air* [Text] / J.N. Bortmany // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.*

Поступила в редакцию 17.10.2012, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, профессор М.Г. Хмельнюк, Одесская государственная академия холода.

ВІБІР СПОСОБУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

М.І. Радченко, Рамі Елгербі

Проаналізовано величину зниження температури повітря на вході газотурбінних установок і відповідне зменшення питомої витрати палива з урахуванням кліматичних умов різних регіонів Лівії із застосуванням безмашинного (випарного) та машинного (тепловикористовуючою холодильною машиною) способів охолодження. Показано, що найбільш ефективним способом є охолодження повітря на вході газотурбінних установок тепловикористовуючою холодильною машиною, яке забезпечує практично вдвічі більше зниження температури повітря і, відповідно, економію палива (скорочення питомої витрати палива) порівняно з випарним охолодженням повітря.

Ключові слова: газотурбінна установка, охолодження повітря, тепловикористовуюча холодильна машина, температура, вологість.

CHOSING THE METHOD OF COOLING THE INTAKE AIR OF GTU DEPENDING ON THE REGIONAL CLIMATIC CONDITIONS

N.I. Radchenko, Rami Elgerbi

The magnitude of air temperature drop at the inlet of gas turbine unites and corresponding decrease in specific fuel consumption taking into account the climate conditions of different regions of Libya by application of methods of non-machine (evaporative) and machine (by waste heat recovery cooling machine) cooling are analyzed. It was shown that cooling the air at the inlet of gas turbine unites by waste heat recovery cooling machine is the most efficient method, that provides practically twice increased air temperature drop and respectively fuel economy (decrease in specific fuel consumption) as compared with evaporative air cooling.

Keywords: gas turbine unit, cooling of air, waste heat recovery cooling machine, temperature, humidity.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. кондиционирования и рефрижерации, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев, e-mail: andrad69@mail.ru.

Ельгерби Рами – аспирант, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев, e-mail: andrad69@mail.ru.