

М. І. РАДЧЕНКО¹, Я. ЗОНМІН², С. А. КАНТОР³, Б. С. ПОРТНОЙ¹

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² Цзяньсунський університет науки і технологій, КНР

³ ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК В РІЗНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ

Досліджено ефективність глибокого охолодження повітря на вході газотурбінних установок простої схеми при змінних упродовж місяця кліматичних умовах експлуатації. Для охолодження повітря запропоновано застосування тепловикористовуючих холодильних машин, які трансформують теплоту відпрацьованих газів газотурбінних установок в холод. Проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході газотурбінних установок до різних температур: до 15°C – абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною, яка використовується в якості першого високотемпературного ступеня попереднього охолодження зовнішнього повітря, та до 10°C – комбінованою абсорбційно-ежекторною холодильною машиною як другого низькотемпературного ступеня.

Ефективність охолодження повітря порівнюється для різних кліматичних умов на прикладі м. Южноукраїнськ (Україна) та м. Шанхай (КНР). Особливістю клімату м. Шанхай є висока відносна вологість повітря, відповідно, й вологовміст при водночас високих його температурах. В якості показників оцінки ефективності охолодження повітря на вході газотурбінних установок до 15 °C в абсорбційній бромистолітєвій холодильній машині та глибокого охолодження повітря до 10 °C у комбінованій абсорбційно-ежекторній холодильній машині застосовано приріст корисної потужності та зменшення питомої витрати палива. Показано, що, через вкрай різні тепловологісні параметри зовнішнього повітря, його охолодження на вході газотурбінних установок для кліматичних умов України забезпечує поточний приріст корисної потужності на 10...15%, а для кліматичних умов КНР – 18...22%. Проте необхідно зазначити, що більш глибоке охолодження повітря на вході газотурбінної установки до температури 10°C в комбінованій абсорбційно-ежекторній холодильній машині порівняно з його традиційним охолодженням до 15°C в абсорбційній бромистолітєвій холодильній машині забезпечує приріст корисної потужності для помірного клімату України (на прикладі м. Южноукраїнськ) на 70...90%, тоді як для тропічних кліматичних умов КНР (м. Шанхай) – на 30...35%.

Ключові слова: газотурбінна установка; охолодження повітря; холодильна машина; потужність; клімат.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Одним з основних напрямів підвищення ефективності газотурбінних установок (ГТУ) є охолодження повітря на вході тепловикористовуючими холодильними машинами (ГХМ), які перетворюють теплоту відпрацьованих газів у холод [1]. З підвищенням температури зовнішнього повітря $t_{зп}$ на вході на 1 °C потужність зменшується на 0,8 – 0,85 %, а питома витрата палива зростає на 0,6...0,7 г/(кВт·год) [2]. Цілком очевидно, що чим вище температури зовнішнього повітря $t_{зп}$, тим більше ефект від його охолодження на вході ГТУ. В той же час більш глибоке охолодження повітря на вході ГТУ порівняно з традиційним його охоло-

дженням абсорбційною-бромистолітєвою холодильною машиною (АБХМ) до температури 15 °C більшою мірою позначається на помірних кліматичних умовах, для яких температури $t_{зп}$ не на багато перевищують 15 °C, а відтак і ефект від охолодження в АБХМ не такий значний, як для спекотного клімату.

Мета роботи – оцінка ефективності охолодження повітря на вході газотурбінної установки тепловикористовуючими холодильними машинами в різних кліматичних умовах.

2. Результати дослідження

При експлуатації ГТУ присутні значні коливання тепловологісних параметрів зовнішнього по-

вітря (температура $t_{зп}$, відносна вологість $\phi_{зп}$, вологовміст $d_{зп}$). На рис. 1 представлено кліматичні характеристики упродовж липня 2017 року для м. Южноукраїнськ та м. Шанхай, КНР.

Особливістю клімату для м. Шанхай є висока відносна вологість повітря $\phi_{зп}$, відповідно й вологовміст $d_{зп}$ при водночас високих його температурах $t_{зп}$ (рис. 1,б), що свідчить про велику кількість прихованої теплоти водяної пари, а. отже, про великі навантаження на повітроохолоджувачі.

Охолодження повітря на вході ГТУ проводиться ступінчато: до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ – в АБХМ, а нижче $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ – комбінованою абсорбційно-ежекторною холодильною машиною (АЕХМ), в якій АБХМ є високотемпературним ступенем охолодження повітря до температури $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$, а більш глибоке охолодження до 10°C здійснюється хладоною ежекторною холодильною машиною (ЕХМ) [3, 4].

Про поточні упродовж липня значення збільшення поточного приросту корисної потужності ΔN_{e15} в результаті охолодження повітря на вході ГТУ від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ на величину Δt_{15} в АБХМ і ΔN_{e10} при охолодженні повітря від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$

на величину Δt_{10} та відповідне зменшення питомої витрати палива Δb_{e15} і Δb_{e10} для кліматичних умов м. Южноукраїнськ та м. Шанхай, КНР, можна судити за рис. 2 і 3.

Як приклад, розрахунки виконані для ГТУ виробництва ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект UGT 10000 номінальною потужністю 10 МВт, для яких зниження температури повітря $\Delta t_{п}$ на 1°C приводить до приросту корисної потужності ΔN_e приблизно на 0,8 % та до зменшення питомої витрати палива на 0,7 г/(кВт·год).

Як видно з рис. 2 та 3, більш глибоке охолодження повітря на вході ГТУ до температури $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ забезпечує поточні приріст корисної потужності ГТУ ΔN_e на 10...15% та зменшення питомої витрати палива Δb_{e10} на 6...13 г/(кВт·год) для кліматичних умов України (рис.2,а і 3,а) і 18...22% та 14...18 г/(кВт·год) для кліматичних умов КНР (рис.2,б і 3,б). Проте, реальна економія палива буде дещо меншою через витрати потужності ГТУ, відповідно й палива, на подолання аеродинамічного опору повітроохолоджувачів на вході.

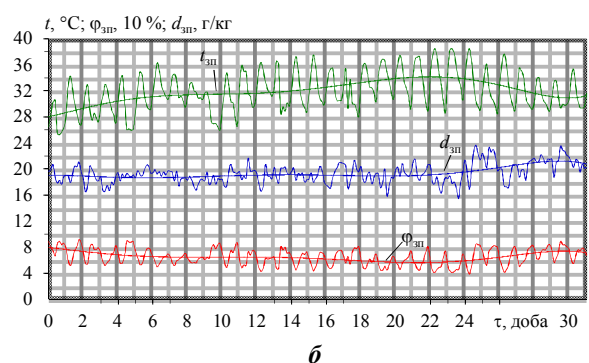
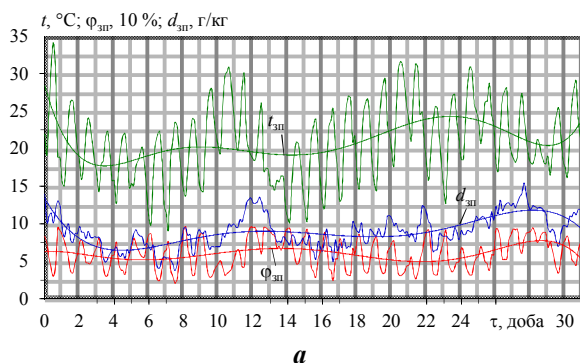


Рис. 1. Поточні значення температури $t_{зп}$, відносної вологості $\phi_{зп}$ та вологовмісту $d_{зп}$ зовнішнього повітря впродовж липня 2017 році: **а** – м. Южноукраїнськ, Україна; **б** – м. Шанхай, КНР

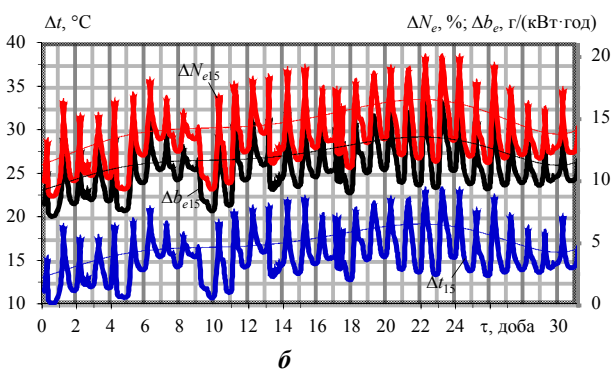
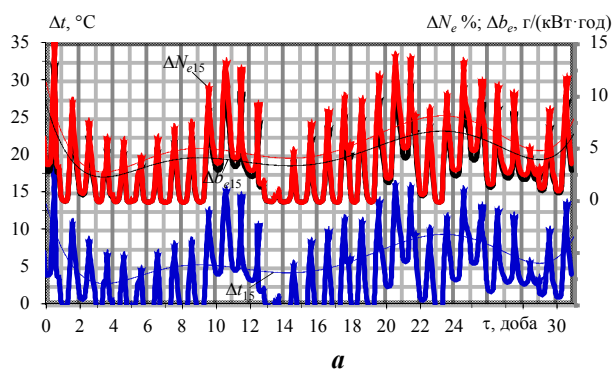


Рис. 2. Поточні значення зниження температури зовнішнього повітря Δt_{15} при його охолодженні до 15°C в АБХМ та відповідних приросту корисної потужності ΔN_{e15} та зменшення питомої витрати палива Δb_{e15} упродовж липня 2017 року: **а** – м. Южноукраїнськ, Україна; **б** – м. Шанхай, КНР

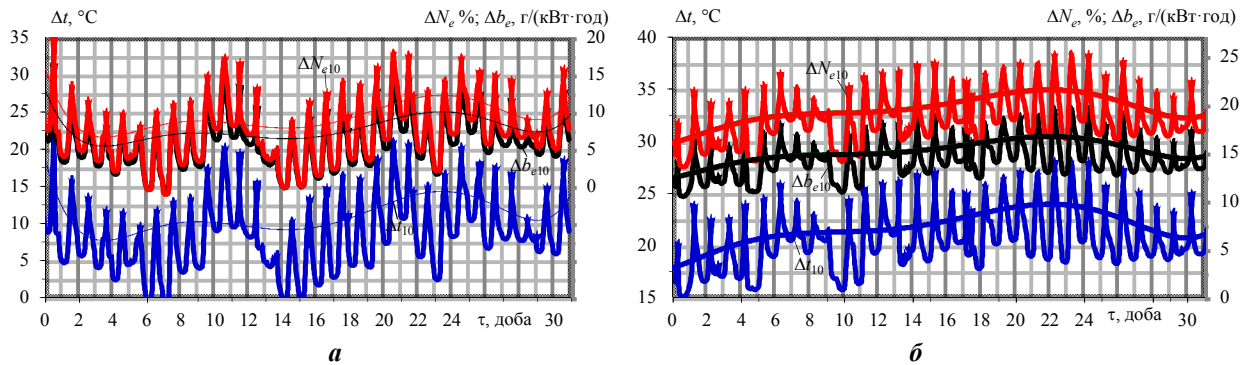


Рис. 3. Поточні значення зниження температури зовнішнього повітря Δt_{10} при його охолодженні до 10°C в комбінованій холодильній машині та відповідних приросту корисної потужності ΔN_{e10} та зменшення питомої витрати палива Δb_{e10} упродовж липня 2017 року: **а** – м. Южноукраїнськ, Україна; **б** – м. Шанхай, КНР

На рис. 4 наведено відношення приросту корисної потужності ΔN_{e10} при охолодженні зовнішнього повітря від температури $t_{н1}$ до $t_{н2} = 10^{\circ}\text{C}$ до приросту корисної потужності ΔN_{e15} при його охолодженні від температури $t_{н1}$ до $t_{н2} = 15^{\circ}\text{C}$ за липень 2017 року.

З рис. 4 видно, що прирощення корисної потужності $\Sigma \Delta N_{e10} / \Sigma \Delta N_{e15}$ за рахунок більш глибокого охолодження повітря на вході ГТУ до $t_{н2} = 10^{\circ}\text{C}$ (порівняно з $t_{н2} = 15^{\circ}\text{C}$ в АБХМ) для умов помірного клімату м. Южноукраїнськ становить 70...90 %, тоді як для тропічного клімату м. Шанхай – 30...35 %.

Висновки

Досліджено ефективність охолодження повітря на вході ГТУ до температур $t_{н2} = 15^{\circ}\text{C}$ в абсорбційній-бромистолітєвій холодильній машині (АБХМ) і $t_{н2} = 10^{\circ}\text{C}$ в комбінованій абсорбційно-ежекторній холодильній машині (АЕХМ) для кліматичних умов м. Южноукраїнськ, Україна, та м. Шанхай, КНР.

Показано, що застосування більш глибокого охолодження повітря до 10°C в АЕХМ у порівнянні з його традиційним охолодженням до 15°C в АБХМ для кліматичних умов України забезпечує отримання поточного прирощення корисної потужності ГТУ на 70...90% більшого порівняно з його величиною при традиційному охолодженні до 15°C в АБХМ, тоді як для тропічного клімату КНР – на 30...35 %.

Отримані результати свідчать про значно більшу ефективність глибокого охолодження повітря на вході ГТУ для умов помірного клімату України (на прикладі м. Южноукраїнськ) у порівнянні з тропічним кліматом (на прикладі м. Шанхай, КНР).

Література

1. Ghaebi, H. Integration of an absorption chiller in a total CHP site for utilizing its cooling production potential based on R-curve concept [Text] / H. Ghaebi, Sh. Karimkashi, M. H. Saidi // International journal of refrigeration. – 2012. – Vol. 35. – P. 1384–1392.

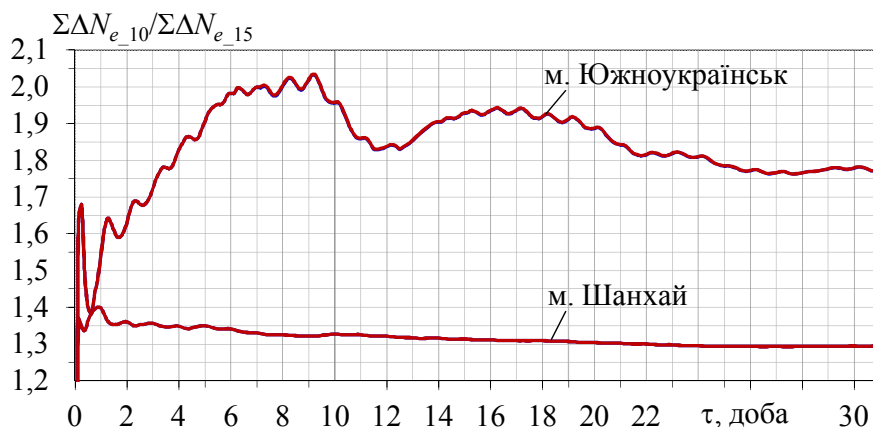


Рис. 4. Значення відношення приросту корисної потужності $\Sigma \Delta N_{e10} / \Sigma \Delta N_{e15}$ при порівнянні охолодження повітря у комбінованій холодильній машині до 10°C та у АБХМ до 15°C за липень 2017 р. для м. Южноукраїнськ, Україна та м. Шанхай, КНР

2. Николаевские газовые турбины промышленного применения [Текст]. – Николаев : ГП НПКГТ "Зоря-Машпроект", 2004. – 20 с.

3. Радченко, А. Н. Эффективность способов охлаждения воздуха на входе ГТУ компрессорных станций в зависимости от климатических условий [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 1(118). – С. 95–98.

4. 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-космическая техника и технология*. – 2014. – № 4 (111). – С. 56–59.

References

1. Ghaebi, H., Karimkashi, Sh., Saidi, M. H., Integration of an absorption chiller in a total CHP site for utilizing its cooling production potential based on

R-curveconcept. *International journal of refrigeration*, 2012, vol. 35, pp. 1384-1392.

2. Nykolaevskye hazovye turbynu promushlennoho pryumenenyya [Nikolaev gas turbines of industrial application]. HP NPKHT "Zorya-Mashproekt", SE SPCGTC "Zorya"–"Mashproekt" Publ., 2004. 20 p.

3. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Effektivnost sposobov okhlazhdeniya vozdukha na vkhode GTU kompressornykh stantsiy v zavisimosti ot klimaticheskikh usloviy [Effective way of cooling the inlet air to the gas turbine compressor stations, depending on climatic conditions]. *Aviacijno-kosmična tehnika i tehnologiâ – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 1 (118), pp. 95-98.

4. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Otsenka potentsiala okhlazhdeniya vozdukha na vkhode gazoturbinykh ustanovok transformatsiyey teploty otrabotannykh gazov v teploispolzuyushchikh kholodilnykh mashinakh [Evaluation the potential of cooling gas turbines inlet air by transforming the heat of exhaust gases in the chillers]. *Aviacijno-kosmična tehnika i tehnologiâ – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 4 (111), pp. 56-59.

Поступила в редакцию 20.01.2019, рассмотрена на редколлегии 14.02.2019

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Н. И. Радченко, Я. Зонмин, С. А. Кантор, Б. С. Портной

Исследована эффективность глубокого охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок простой схемы при переменных на протяжении месяца климатических условиях эксплуатации. Для охлаждения воздуха предложено применение теплоиспользующих холодильных машин, которые трансформируют теплоту отработанных газов газотурбинных установок в холод. Проанализирована эффективность охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок до разных температур: до 15°C – абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной, которая используется в качестве первой высокотемпературной ступени предварительного охлаждения наружного воздуха, и до 10°C – комбинированной абсорбционно-эжекторной холодильной машиной применяемой как второй низкотемпературной ступенью.

Эффективность охлаждения воздуха сравнивается для разных климатических условий на примере г. Южноукраинск (Украина) и г. Шанхай (КНР). Особенностью климата г. Шанхай является высокая относительная влажность воздуха, соответственно, и влагосодержание при одновременно высоких его температурах. В качестве показателей оценки эффективности охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок до 15°C в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине и глубокого охлаждения воздуха до 10°C в комбинированной абсорбционно-эжекторной холодильной машине применен прирост полезной мощности и уменьшение удельного расхода топлива. Показано, что, из-за крайне разных тепловлажностных параметров наружного воздуха, его охлаждение на входе газотурбинных установок для климатических условий Украины обеспечивает текущее приращение полезной мощности на 10...15%, а для климатических условий КНР – 18...22%. Однако, необходимо отметить, что более глубокое охлаждение воздуха на входе газотурбинной установки до температуры 10°C в комбинированной абсорбционно-эжекторной холодильной машине в сравнении с его традиционным охлаждением до 15°C в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине обеспечивает прирост полезной мощности для умеренного климата Украины (на примере г. Южноукраинск) на 70...90%, тогда как для тропических климатических условий КНР (г. Шанхай) – на 30...35%.

Ключевые слова: газотурбинная установка; охлаждение воздуха; холодильная машина; мощность; климат.

**ESTIMATION OF EFFICIENCY OF DEEP AIR COOLING
AT THE INLET OF GAS TURBINE UNITS
IN DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS**

M. I. Radchenko, Y. Zongming, S. A. Kantor, B. S. Portnoi

The efficiency of deep air cooling at the inlet of gas turbine units of a simple scheme has been investigated for changed climatic conditions of operation during the month. For air cooling, the application of waste heat recovery chiller has been proposed, which transform the heat of exhaust gases of gas turbine units into the cold. The efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine units to different temperatures has been analyzed: to 15°C – an absorption lithium-bromide chiller, which is used as the first high-temperature pre-cooling stage of ambient air and down to 10°C – a combined absorption-ejector chiller, which acts as the second low-temperature stage.

The air cooling efficiency is compared for different climatic conditions using the example of Yuzhnoukrainsk (Ukraine) and Shanghai (China). The climate peculiarity of Shanghai is the high relative humidity of the air, respectively, and its moisture contents at the same time its high temperatures. As indicators for assessing the effectiveness of air cooling at the inlet of gas turbine units down to 15°C in an absorption lithium-bromide chiller and deep air cooling to 10°C, in a combined absorption-ejector chiller used an increase in useful power and a reduction in specific fuel consumption. It is shown that, through extremely different thermal and humidity parameters of ambient air, it is cooling at the inlet of gas turbine units for the climatic conditions of Ukraine provides the current increase in useful power by 10...15%, and for the climatic conditions of China – 18...22%. However, it should be noted that deeper air cooling at the inlet of the gas turbine unite to a temperature of 10°C in a combined absorption-ejector chiller compared to its traditional cooling to 15°C in an absorption lithium-bromide chiller provides an increase in useful power for a temperate climate of Ukraine (for example, Yuzhnoukrainsk) by 70...90%, whereas for tropical climatic conditions of China (Shanghai) – by 30...35%.

Keywords: gas turbine unit; air cooling; chiller; power; climate.

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Зонмін Ян – доцент, Цзяньсунський університет науки і технології, Цзеньцзянь, КНР.

Кантор Сергій Анатолійович – канд. техн. наук, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна.

Портной Богдан Сергійович – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Radchenko Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Science, Professor, a head Conditioning and Refrigeration Dept., Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Zongming Yang – associated Professor, School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China.

Kantor Sergiy Anatoliyovych – PhD, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru.

Portnoi Bohdan Sergiyovych – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: .