

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

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² Женьзяньський університет науки і технологій, КНР

³ ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ЭФЕКТИВНІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ В УМОВАХ ПОМІРНОГО І СУБТРОПІЧНОГО КЛІМАТУ

Досліджено охолодження повітря на вході газотурбінної установки при змінних упродовж року кліматичних умовах експлуатації. Для охолодження повітря запропоновано застосування тепловикористовуючих холодильних машин, що трансформують в холод теплоту відпрацьованих газів газотурбінної установки. Досліджено ефективність охолодження повітря на вході газотурбінної установки до різних температур: до 15°C в абсорбційній бромистолітєвій холодильній машині та до 10°C у двоступінчастій абсорбційно-ежекторній холодильній машині. При цьому абсорбційна бромистолітєва холодильна машина використовується в якості першого високотемпературного ступеня попереднього охолодження зовнішнього повітря від його поточних температур до 15°C, а хладонова ежекторна машина як другий низькотемпературний ступінь. Хладонова ежекторна холодильна машина вибрана як конструктивно найбільш проста і надійна в експлуатації.

Ефективність охолодження повітря проаналізована для експлуатації в умовах помірно континентального (південь України) і субтропічного клімату (на прикладі м. Нанкін, Китай). В якості показника використано річну економію палива. Показано, що загалом охолодження повітря на вході газотурбінної установки для субтропічного клімату забезпечує у 1,6...1,8 рази більшу економію палива порівняно з умовами помірного клімату. Однак більш глибоке охолодження повітря на вході газотурбінної установки до температури 10°C в абсорбційно-ежекторній холодильній машині порівняно з температурою охолодження повітря 15°C в абсорбційній бромистолітєвій холодильній машині забезпечує більш значне збільшення річної економії палива для умов помірного клімату (майже вдвічі) ніж для субтропічного клімату (понад півтора рази). Якщо для умов помірного клімату (півдня України) контактне охолодження повітря забезпечує річну економію палива близьку до її величини при охолодженні до температури 15°C в абсорбційній бромистолітєвій холодильній машині, то для субтропічного вологого клімату воно недоцільне. Показано, що більш глибоке охолодження повітря на вході газотурбінної установки до температури 10°C в абсорбційно-ежекторній холодильній машині забезпечує поточне зменшення питомої витрати палива на 7...15 г/(кВт·год) для помірних кліматичних умов і децю більше для субтропічного клімату – на 7...17 г/(кВт·год), проте охолоджувальний сезон триває відповідно 6 і майже 9 місяців.

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

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Ефективність роботи газотурбінних установок (ГТУ) суттєво залежить від температури зовнішнього повітря $t_{зп}$ на вході: з її підвищенням на 10 °C питома витрата палива зростає на 5...8 г/(кВт·год), а потужність зменшується на 5...8 % [1, 2]. Погіршення показників ефективності ГТУ з підвищенням температури повітря $t_{зп}$ на вході та висока температура відпрацьованих газів (450...500 °C) роблять доцільним охолодження повітря на вході ГТУ тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), що утилізують скидну теплоту газів.

Кліматичні умови різних регіонів суттєво відрізняються за температурою $t_{зп}$ та відносною вологістю $\varphi_{зп}$ зовнішнього повітря, що позначається на ефективності охолодження повітря.

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

2. Результати дослідження

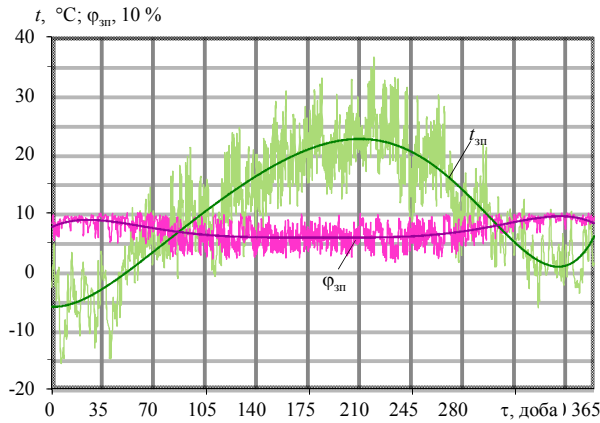
Проаналізовано ефективність охолодження повітря на вході ГТУ до різних температур $t_{п2}$, відповідно й у ТХМ різного типу: до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ – абсорб-

ційною-бромистолітійевою холодильною машиною (АБХМ), а до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ і нижче – двоступінчастою абсорбційно-ежекторною холодильною машиною (АЕХМ) з АБХМ у якості високотемпературного ступеня попереднього охолодження повітря до температури $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ та хладоною ежекторною холодильною машиною (ЕХМ) більш глибокого охолодження до 10°C і нижче) [3].

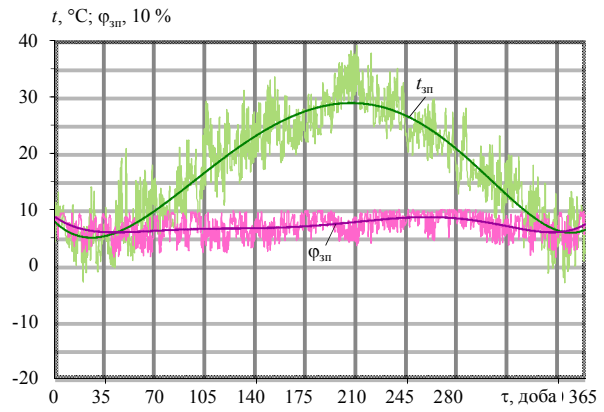
При експлуатації ГТУ мають місце суттєві зміни тепловолігисних параметрів (температури $t_{зп}$ та відносної вологості $\varphi_{зп}$) зовнішнього повітря упродовж року і залежно від типу клімату. Як приклад, на рис. 1 наведено зміну температури $t_{зп}$ і відносної вологості $\varphi_{зп}$ зовнішнього повітря упродовж 2017 року для умов помірного клімату (м. Вознесеньк, південь України) та субтропічного клімату (м. Нанкін, КНР). Особливістю останнього є висока відносна вологість повітря $\varphi_{зп}$ при водночас висо-

ких його температурах $t_{зп}$ (рис. 1, б). Це особливо помітно для періоду з кінця липня по жовтень ($\tau = 210 \dots 280$ доба) і свідчить про великі теплові навантаження на системи охолодження повітря на вході ГТУ через значні витрати холоду на конденсацію водяної пари з вологого повітря.

Про поточне упродовж року зменшення питомої витрати палива Δb_{e15} за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ на величину Δt_{15} в АБХМ та сумарну за накопиченням ΣB_{e15} економію палива за 2017 рік для умов помірного клімату (м. Вознесеньк, південь України) та субтропічного клімату (м. Нанкін, КНР) можна тлумачити за рис. 2. Розрахунки проведені для ГТУ UGT 10000 ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект" потужністю 10 МВт, для яких зниження температури повітря $\Delta t_{п}$ на 1°C приводить до зменшення питомої витрати палива Δb_e на $0,7 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$.

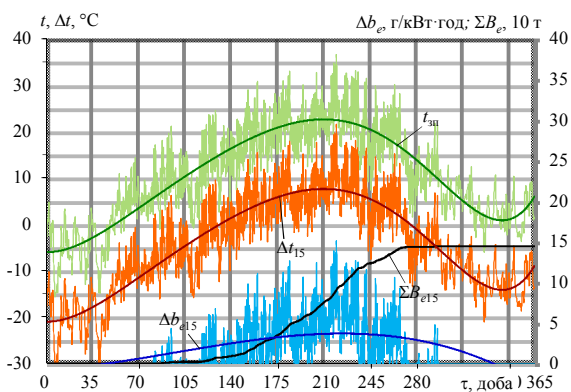


a

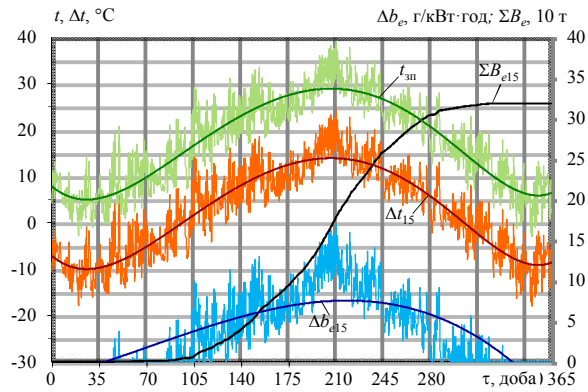


б

Рис. 1. Поточні значення температури $t_{зп}$ та відносної вологості $\varphi_{зп}$ зовнішнього повітря за 2017 рік: **a** – м. Вознесеньк, Україна; **б** – м. Нанкін, КНР



a



б

Рис. 2. Поточні значення температури $t_{зп}$ зовнішнього повітря, зниження температури Δt_{15} зовнішнього повітря при його охолодженні до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ, відповідного зменшення питомої витрати палива Δb_{e15} та сумарна за накопиченням ΣB_{e15} економія палива за 2017 рік:

a – м. Вознесеньк, Україна; **б** – м. Нанкін, КНР

Як видно з рис. 2, охолодження повітря на вході UGT 10000 від поточної температури зовнішнього повітря $t_{зп}$ до 15°C в АБХМ забезпечує річну економію палива ΣB_{e15} близько 140 т для умов помірного клімату (м. Вознесеньськ, рис. 2, *a*), тоді як для субтропічного клімату (м. Нанкін, КНР, рис. 2, *б*) понад 320 т. В той же час більш глибоке охолодження повітря абсорбційно-ежекторною холодильною машиною (АЕХМ) до 10°C дає змогу отримати значно більшу економію палива за рік ΣB_{e10} : 270 т і понад 500 т відповідно для умов помірного (рис. 3, *a*) і субтропічного клімату (рис. 2, *б*). Звертає на себе увагу більш значне збільшення річної економії палива ΣB_{e10} за рахунок більш глибокого охолодження повітря на вході ГТУ в АЕХМ до $t_{п2} = 10^{\circ}\text{C}$ порівняно з його охолодженням в АБХМ до $t_{п2} = 15^{\circ}\text{C}$: 270 т проти 140 т, тобто майже вдвічі. Варто зазначити, що реальна економія палива буде

дещо меншою через витрати потужності ГТУ, відповідно й палива, на подолання аеродинамічного опору повітроохолоджувача на вході.

Як видно, більш глибоке охолодження повітря на вході ГТУ до температури $t_{п2} = 10^{\circ}\text{C}$ в АЕХМ забезпечує поточне зменшення питомої витрати палива Δb_{e10} на 7...15 г/(кВт·год) для помірних кліматичних умов (рис. 3, *a*) і дещо більше для субтропічного клімату – на 7...17 г/(кВт·год), проте охолоджувальний сезон триває відповідно 6 і майже 9 місяців.

Економія палива B_e помісячно та за 2017 рік для ГТУ UGT 10000 (потужністю 10МВт) за рахунок охолодження повітря на вході від поточної температури зовнішнього повітря $t_{зп}$ до різних кінцевих температур $t_{п2}$ для умов помірного клімату (м. Вознесеньськ) та субтропічного клімату (м. Нанкін, КНР) наведена на рис. 4.

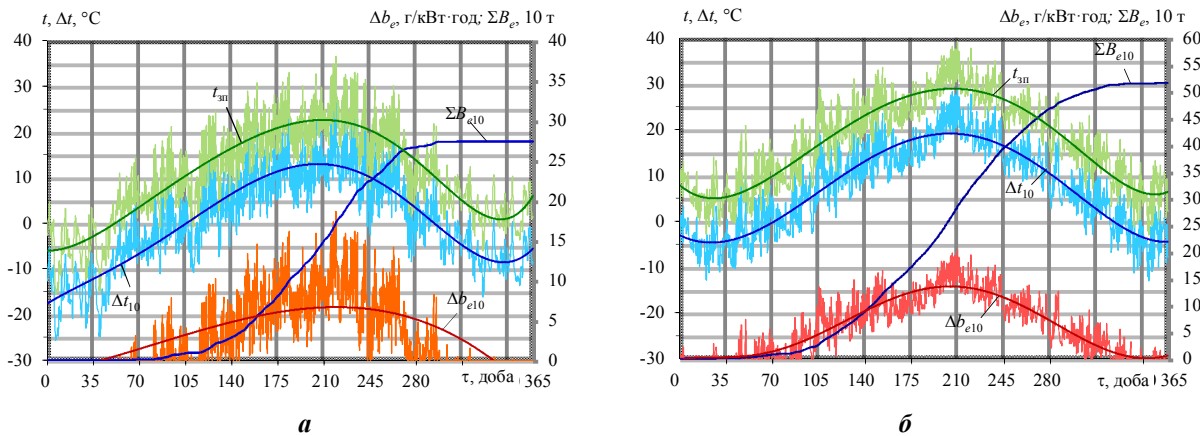


Рис. 3. Поточні значення температури $t_{зп}$ зовнішнього повітря, зниження температури Δt_{10} зовнішнього повітря при його охолодженні до $t_{п2} = 10^{\circ}\text{C}$ в АЕХМ, відповідного зменшення питомої витрати палива Δb_{e10} та сумарна за накопиченням ΣB_{e10} економія палива за 2017 рік:
a – м. Вознесеньськ, Україна; *б* – м. Нанкін, КНР

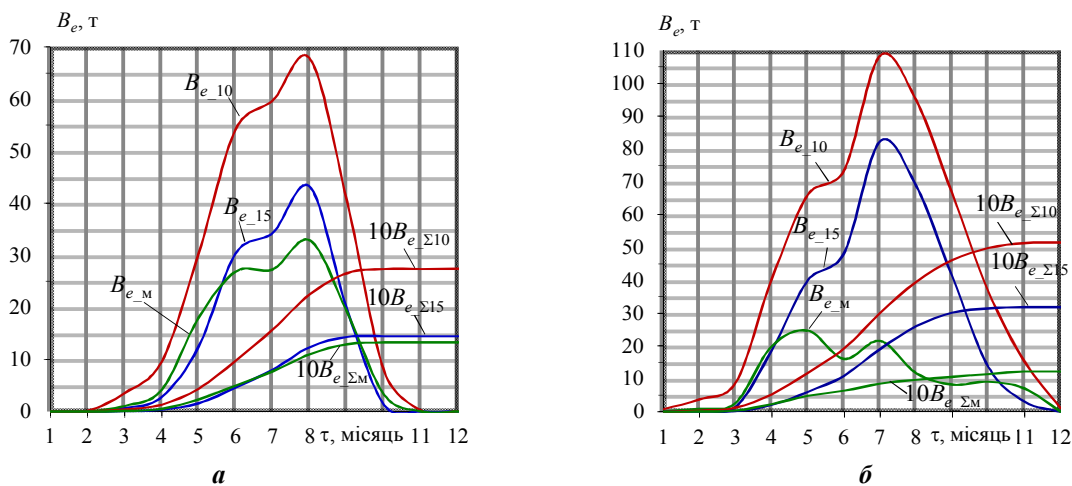


Рис. 4. Значення щомісячної B_e і загальної річної $B_{e\Sigma}$ економії палива при різних температурах охолодженого повітря $t_{п2}$: 10°C – АЕХМ; 15°C – АБХМ, м – контактне охолодження повітря до температури мокрого термометра упорскуванням води за 2017 р.;
a – м. Вознесеньськ, Україна; *б* – м. Нанкін, КНР

З рис. 4 видно, що якщо для умов помірного клімату (м. Вознесенськ, рис. 4, *a*) контактне охолодження повітря забезпечує річну економію палива $B_{e_{\Sigma M}}$ близьку до її величини $B_{e_{\Sigma 15}}$ завдяки охолодженню до $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ, то для субтропічного вологого клімату (м. Нанкін, КНР, рис. 4, *b*) воно недоцільне. Цілком очікувано, що максимальна місячна економія палива за рахунок охолодження повітря припадає на літні місяці.

Висновки

Досліджено ефективність охолодження повітря на вході ГТУ до різних температур $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ і $t_{n2} = 10^\circ\text{C}$ в АЕХМ для умов помірного клімату (на прикладі м. Вознесенськ, південь України) та субтропічного клімату (м. Нанкін, КНР).

Показано, що в цілому охолодження повітря на вході ГТУ для субтропічного клімату забезпечує у 1,6...1,8 рази більшу економію палива порівняно з умовами помірного клімату. Однак більш глибоке охолодження повітря на вході ГТУ до температури $t_{n2} = 10^\circ\text{C}$ в АЕХМ порівняно з $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ забезпечує більш значне збільшення річної економії палива $\Sigma B_{e_{10}}$ для умов помірного клімату (майже вдвічі) ніж для субтропічного клімату (понад півтора рази). Якщо для умов помірного клімату (півдня України) контактне охолодження повітря забезпечує річну економію палива близьку до її величини при охолодженні до 15°C в АБХМ, то для субтропічного вологого клімату воно недоцільне.

Поступила в редакцію 15.11.2018, рассмотрена на редколлегии 12.12.2018

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО И СУБТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА

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

Исследовано охлаждение воздуха на входе газотурбинной установки при переменных в течение года климатических условиях эксплуатации. Для охлаждения воздуха предложено применение теплоиспользующих холодильных машин, которые трансформируют в холод теплоту отработавших газов газотурбинной установки. Исследована эффективность охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки до разных температур: до 15°C в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине и до 10°C в двухступенчатой абсорбционно-эжекторной холодильной машине. При этом абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина используется в качестве первой высокотемпературной ступени предварительного охлаждения наружного воздуха от его текущих температур до 15°C , а хладоновая эжекторная машина – как вторая низкотемпературная ступень. Хладоновая эжекторная холодильная машина выбрана как конструктивно наиболее простая и надежная в эксплуатации.

Эффективность охлаждения воздуха проанализирована для эксплуатации в условиях умеренно континентального (юг Украины) и субтропического климата (на примере г. Нанкин, Китай). В качестве показателя использовано годовую экономию топлива. Показано, что в целом охлаждение воздуха на входе газотурбинной установки для субтропического климата обеспечивает в 1,6...1,8 раза большую экономию топлива по сравнению с условиями умеренного климата. Однако более глубокое охлаждение воздуха на входе газотур-

Література

1. De Sa, Ashley. Gas turbine performance at varying ambient temperature [Text] / Ashley De Sa, Sarim Al Zubaidy // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – № 31. – P. 2735–2739.
2. Parametric analysis of combined cycles equipped with inlet fogging [Text] / R. Bhargava, M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2003-38187. – 12 p.
3. Радченко, А. Н. Метод выбора рациональной тепловой нагрузки абсорбционно-эжекторного термотрансформатора охлаждения воздуха на входе регенеративных ГТУ компрессорных станций [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 5(122). – С. 61 – 64.

References

1. De Sa, A., Al Zubaidy, S. Gas turbine performance at varying ambient temperature. *Applied Thermal Engineering*, 2011, no. 31, pp. 2735–2739.
2. Bhargava, R., Bianchi, M., Melino, F., Peretto, A. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging. *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*, Paper GT-2003-38187. 12 p.
3. Radchenko A. N., Kantor, S. A. Metod vybora racionalnoy teplovooy nagruzhky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompressornyh stanciy [The method of evaluation of rational heat load on absorption-ejector thermotransformer for cooling regenerative GTU intake air of compressor stations]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61 – 64.

бинной установки до температуры 10 °С в абсорбционно-эжекторной холодильной машине по сравнению с температурой охлаждения воздуха 15 °С в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине обеспечивает более значительное увеличение годовой экономии топлива для условий умеренного климата (почти вдвое), чем для субтропического климата (более чем в полтора раза). Если для условий умеренного климата (юга Украины) контактное охлаждение воздуха обеспечивает годовую экономию топлива, близкую ее величины при охлаждении до температуры 15 °С в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине, то для субтропического влажного климата оно нецелесообразно. Показано, что более глубокое охлаждение воздуха на входе газотурбинной установки до температуры 10°С в абсорбционно-эжекторной холодильной машине обеспечивает текущее снижение удельного расхода топлива на 7...15 г/(кВт·ч) для умеренных климатических условий и несколько больше для субтропического климата - на 7...17 г/(кВт·ч), однако охлаждающий сезон длится соответственно 6 и почти 9 месяцев.

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

THE EFFICIENCY OF AIR COOLING AT THE INLET OF GAS TURBINE UNIT UNDER CONDITIONS OF MODERATE AND SUBTROPICAL CLIMATE

A. N. Radchenko, Y. Zongming, S. A. Kantor, B. S. Portnoi

Air cooling at the gas turbine unit inlet was investigated under conditions of climate change during the year. It was proposed the application of heat conversing chillers, which transform the heat of gas turbine exhaust unit into the cold for air cooling. The efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine unit to various temperatures was analyzed: down to 15 °С in absorption lithium-bromide chiller and down to 10 °С in a two-stage absorption-ejector chiller. The absorption lithium-bromide chiller is applied as the first high-temperature pre-cooling stage of ambient air from its current temperatures to 15 °С, and the refrigerant ejector chiller is applied as the second low-temperature stage. The refrigerant ejector chiller is chosen as the most simple and reliable in operation.

The efficiency of air cooling is analyzed for operation under conditions of moderate continental (southern Ukraine) and subtropical climate (Nanjing, China). The annual fuel conservation is applied as an indicator. It is shown that the cooling of the air at the inlet of gas turbine unit for a subtropical climate provides in 1.6...1.8 times more fuel conservation in comparison with the temperate climate. However, a deeper cooling of the air inlet of gas turbine unit to the temperature of 10 °С in an absorption-ejector chiller in comparison with the air cooling temperature of 15 °С in an absorption lithium-bromide chiller provides a more significant increase in annual fuel conservation for temperate climate (almost twice), than for subtropical climate (more than one and a half times). If under the conditions of temperate climate (southern Ukraine), contact cooling of the air provides annual fuel conservation close to its value when cooled to the temperature of 15 °С in absorption lithium-bromide chiller, then for a subtropical humid climate it is inexpedient. It is shown that a deeper cooling of the air at the inlet of gas turbine unit to the temperature of 10 °С in absorption ejector chiller provides a current reduction in specific fuel consumption by 7...15 g/(kW·h) for moderate climatic conditions and slightly more for a subtropical climate – by 7...17 g/(kW·h), however, the cooling season lasts, respectively, 6 and almost 9 months.

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

Радченко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Зонмін Ян – доцент, Жензяньський університет науки і технології, Жензянь, 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 Andrii Mykolayovych – PhD, Assistant Professor of Dept. of Ship Electroenergetic Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.
ORCID Author ID: 0000-0002-8735-9205.

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.
ORCID Author ID: 0000-0001-5050-5937.

Portnoi Bohdan Sergiyovych – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: bodya1184@yandex.ru.