

УДК 621.438-714

doi: 10.32620/aktf.2019.6.02

А. М. РАДЧЕНКО¹, Б. С. ПОРТНОЙ¹, С. А. КАНТОР², І. П. ЄСІН¹¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТУ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧИМИ ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ

Значні коливання поточної температури і відносної вологості зовнішнього повітря призводять до суттєвих змін теплового навантаження на систему охолодження повітря на вході газотурбінної установки, що гостро ставить проблему вибору їхнього проектного теплового навантаження, а також оцінки ефективності роботи системи охолодження повітря за певний період часу. Досліджено ефективність глибокого охолодження повітря на вході газотурбінних установок при змінних упродовж липня місяця 2015–2018 років для кліматичних умов експлуатації на компресорній станції Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна). Для охолодження повітря запропоновано застосування тепловикористовуючих холодильних машин, що 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 (з використанням хладоногового низькотемпературного повітроохолоджувача у якості другого ступеня охолодження повітря).

Оцінка ефекту від охолодження повітря була виконана шляхом порівняння збільшення виробництва механічної енергії завдяки зростанню потужності газотурбінної установки та зекономленого палива за накопиченням упродовж липня місяця для 2015–2018 років. 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 більший приріст корисної потужності та економію палива. Показано, що через незначну розбіжність між результатами, отриманими для 2015–2018 років, попередню оцінку ефективності охолодження повітря на вході газотурбінних установок можна проводити для одного року.

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

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

З ростом температури повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) збільшується їх витрата палива, а ефективність і вихідна потужність зменшуються [1]. Поширеним методом підвищення ефективності ГТУ є застосування тепловикористовуючих холодильних машин (ТХМ), що перетворюють тепло відхідних газів у холод, для охолодження припливного повітря ГТУ. Традиційно використовуються абсорбційні бромистолітєві холодильні машини (АБХМ) з високим тепловим коефіцієнтом $\zeta = 0,7 \dots 0,8$ [2], які забезпечують охолодження навколишнього повітря до температури близько 15°C. Однак більш глибоке охолодження повітря на вході ГТУ порівняно з 15°C, очевидно, призведе до більшого росту ефективності. Для охолодження повітря нижче 15°C доцільно використовувати холодильні машини (ХМ), що працюють на низькокиплячих

робочих тілах. Прикладом таких ХМ є ежекторна холодильна машина (ЕХМ), проте вона має значно нижчий тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,2 \dots 0,25$ [3]. Тому раціонально використовувати двоступеневе охолодження повітря на вході ГТУ: до 15°C з охолодженням повітря в АБХМ, в якості високотемпературного ступеня охолодження та до 10°C – в ЕХМ (як низькотемпературний ступінь). Проте, необхідно оцінити ефективність глибокого охолодження повітря на вході ГТУ для фактичних кліматичних умов експлуатації.

Метою дослідження є оцінка ефективності більш глибокого охолодження вхідного повітря ГТУ порівняно з традиційним охолодженням до 15°C для конкретних кліматичних умов експлуатації.

2. Результати дослідження

Параметри навколишнього повітря значно змінюються під час роботи ГТУ. Зміна температури

повітря $t_{зп}$ та відносної вологості $\varphi_{зп}$ за різні роки (2015–2018 рр.) протягом липня [4] для компресорної станції (КС) Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна) представлені на рис. 1.

Характерним показником для визначення необхідної проектної потужності холодильних машин є питома річна скорочення споживання палива $\Sigma\Delta b_e$, завдяки охолодженню повітря на вході повітря від температури навколишнього середовища до 15°C та 10°C холодильними машинами з різною проектною питомою холодною потужністю q_0 (рис. 2).

Для кліматичних умов експлуатації ГТУ у розглянутому регіоні України при охолодженні повітря до 15°C раціонально можна вважати проектну питому холодною потужність АБХМ $q_0 = 26\text{кДж/кг}$, при якій темп нарощування питомої річної економії палива $\Sigma\Delta b_e$ зберігається достатньо високим, а при охолодженні повітря до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ в ЕХМ – відповідно $q_0 = 36\text{кДж/кг}$.

Поточні значення збільшення потужності ГТУ $\Delta N_{e,15}$ та відповідних витрат питомої холодопродук-

тивності ТХМ $q_{0,15}$, значення зростання виробництва механічної енергії ГТУ $\Sigma N_{e,15}$ та витрат холодопродуктивності ТХМ $\Sigma Q_{0,15}$ за накопиченням при охолодженні повітря на вході ГТУ від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ, а також значення $\Delta N_{e,10}$, $q_{0,10}$ і $\Sigma N_{e,10}$ та $\Sigma Q_{0,10}$, при охолодженні повітря $t_{зп}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ послідовно у АБХМ і ЕХМ, подано на рис. 3 та 4.

Розрахунки зроблені для ГТУ ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" UGT 10000 (NeISO = 10,5 МВт), для якого зниження температури повітря Δt_a на 1°C призводить до зменшення питомої витрати палива Δb_e на $0,7\text{г/(кВт}\cdot\text{год)}$ і збільшення вихідної потужності ΔN_e на 90кВт [5].

Порівнюючи значення питомих теплових навантажень при охолодженні навколишнього повітря до 15°C $q_{0,15}$ та до 10°C $q_{0,10}$ на рис. 4, можна побачити, що питома теплове навантаження на повітроохолоджувачі ЕХМ при охолодженні повітря від 15°C до 10°C , що визначається як різниця теплового навантаження, буде практично постійною, тому що

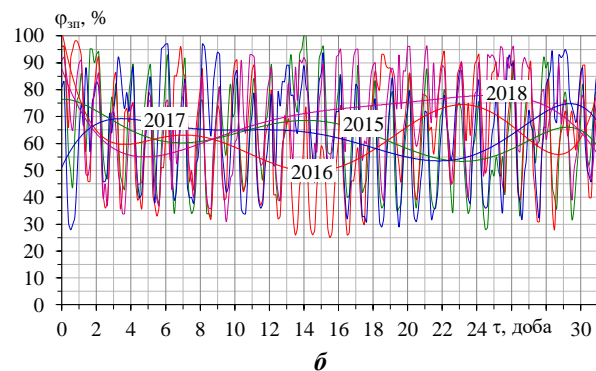
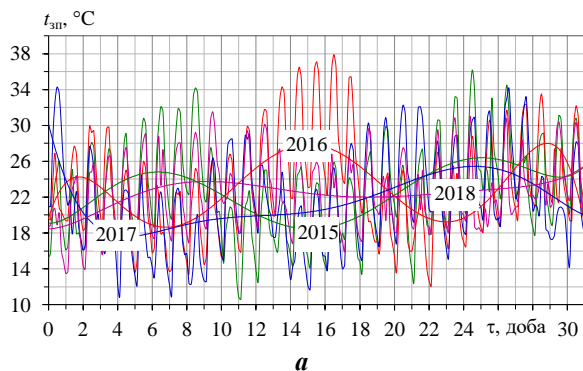


Рис. 1. Поточні значення температури $t_{зп}$ (а), відносної вологості $\varphi_{зп}$ (б) зовнішнього повітря впродовж липня 2015–2018 років, компресорна станція Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна)

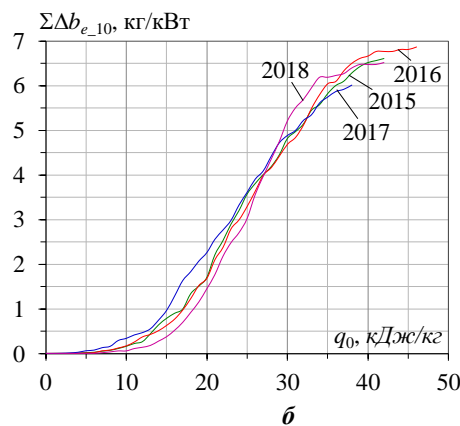
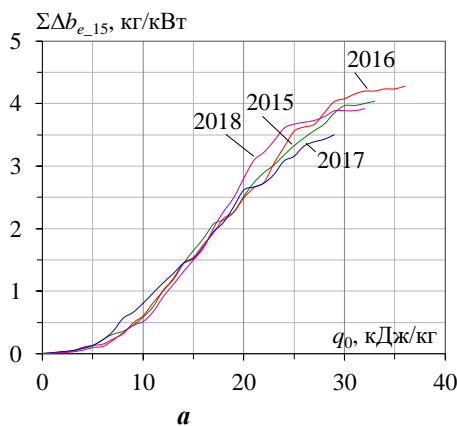


Рис. 2. Значення питомої річної економії палива $\Sigma\Delta b_e$ (при $G_n = 1\text{кг/с}$) в залежності від встановленої (проектної) питомої холодної потужності q_0 (при $G_n = 1\text{кг/с}$) при різних температурах охолодженого повітря $t_{п2}$: 15°C – в АБХМ (а); 10°C – в ЕХМ (б) за 2015–2018 роки, компресорна станція Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна)

коливання параметрів зовнішнього повітря сприймається високотемпературним ступенем охолодження, тоді як другий ступінь працює у більш стабільному режимі.

Як видно з порівняння рис. 3 і 4, охолодження повітря на вході ГТУ до температури 15°C забезпечує місячне зростання виробництва механічної енергії $\Sigma N_{e_{15}}$ приблизно 450–550 МВт-год, тоді як більше охолодження до 10°C забезпечує значно більший приріст $\Sigma N_{e_{10}}$: близько 760–880 МВт-год.

Поточні значення питомого скорочення споживання палива $\Delta b_{e_{15}}$ та його значення по накопиченню $\Sigma B_{e_{15}}$ при охолодженні повітря на вході ГТУ від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 15^{\circ}\text{C}$ в АБХМ, а також значення $\Delta b_{e_{10}}$ та $\Sigma B_{e_{10}}$ при охолодженні повітря від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 10^{\circ}\text{C}$ при двоступеневому охолодженні представлені на рис. 5.

Як показують результати розрахунків, економія палива ΣB_e на місяць в середньому складає близько 40т при охолодженні повітря до 15°C та 65т при охолодженні до 10°C . Однак слід врахувати, що фактичний ефект скорочення споживання палива,

через витрату потужності на подолання аеродинамічного опору повітряного охолоджувача на вході ГТУ, буде дещо меншим.

Висновки

Проаналізовано ефективність глибокого охолодження повітря (до 10°C) на вході ГТУ для кліматичних умов КС Краснопілля, Дніпропетровська обл., за липень у 2015–2018 роках.

Показано, що глибоке охолодження повітря на вході ГТУ до температури 10°C забезпечує збільшення місячного виробництва механічної енергії ГТУ, а також економію палива ΣB_e в 1,6...1,8 рази більші порівняно з традиційним охолодженням до 15°C для кліматичних умов КС Краснопілля, Дніпропетровська обл. (липень, 2015–2018 роки). Показано, що через незначну розбіжність між результатами, отриманими для 2015–2018 років, попередню оцінку ефективності охолодження повітря на вході ГТУ можна проводити за результатами дослідження одного року.

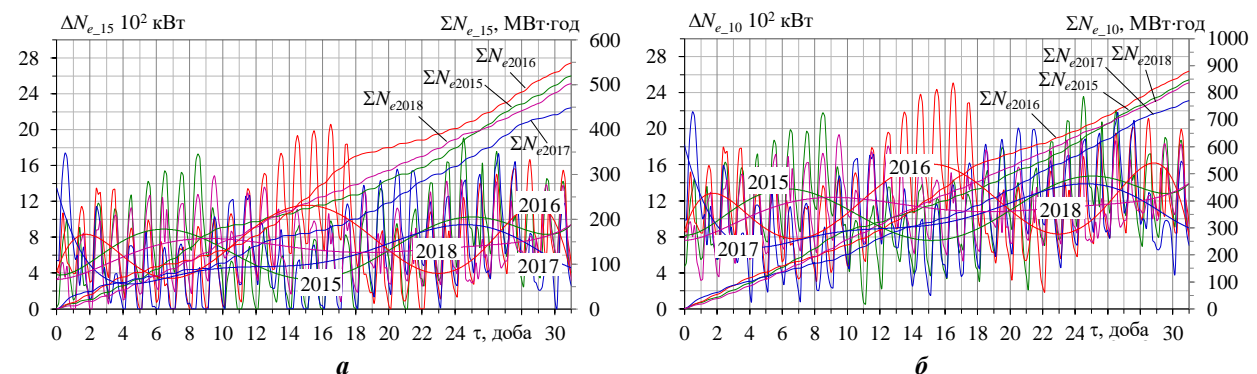


Рис. 3. Значення поточного збільшення потужності $\Delta N_{e_{15}}$ та зростання виробництва механічної енергії по накопиченню $\Sigma N_{e_{15}}$ ГТУ при охолодженні повітря від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 15^{\circ}\text{C}$ в АБХМ (а) і відповідні значення $\Delta N_{e_{10}}$, $\Sigma N_{e_{10}}$ при охолодженні повітря від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 10^{\circ}\text{C}$ при двоступеневому охолодженні (б) за липень 2015–2018 років, компресорна станція Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна)

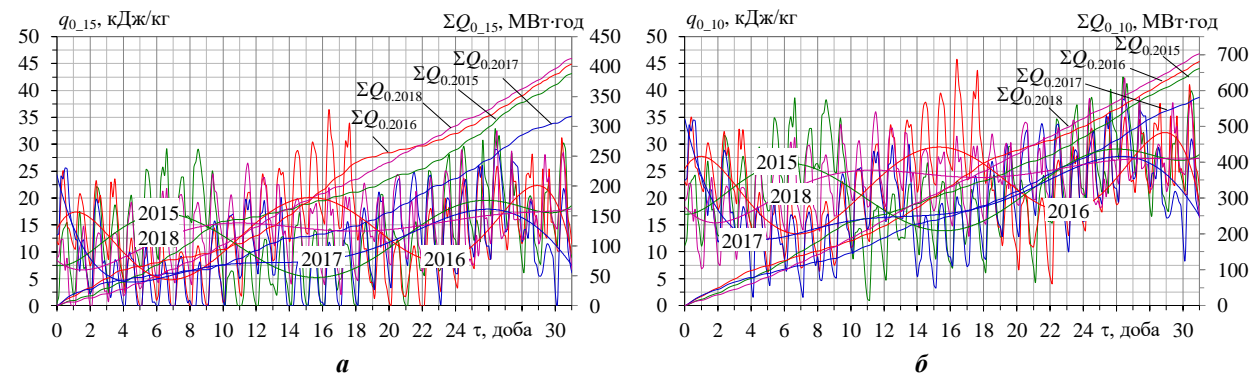


Рис. 4. Значення поточних витрат питомої холодопродуктивності $q_{0_{15}}$ та витрат холодопродуктивності по накопиченню $\Sigma Q_{0_{15}}$ при охолодженні повітря від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 15^{\circ}\text{C}$ в АБХМ (а) та відповідні значення $q_{0_{10}}$ і $\Sigma Q_{0_{10}}$ при охолодженні повітря від $t_{\text{зп}}$ до $t_{\text{п2}} = 10^{\circ}\text{C}$ в при двоступеневому охолодженні (б) за липень 2015–2018 років, компресорна станція Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна)

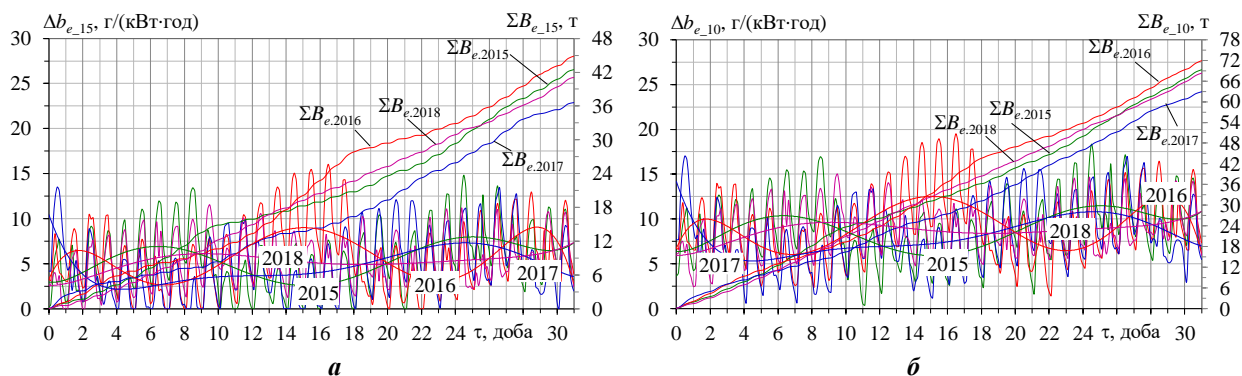


Рис. 5. Поточні Δb_{e-15} та по накопиченню ΣB_{e-15} значення скорочення споживання палива при охолодженні повітря від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ в АБХМ (а) та відповідні значення Δb_{e-10} і ΣB_{e-10} при охолодженні повітря від $t_{зп}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ в при двоступеневому охолодженні (б) за липень 2015–2018 років, компресорна станція Краснопілля, Дніпропетровська область (Україна)

Література

1. Tiwari, Kumar A. Effect of ambient temperature on the performance of a combined cycle power plant [Text] / A. Kumar Tiwari, H. M. Muzaffarul, M. Islam // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. – 2013. – Vol. 37 (4). – P. 1177–1188.
2. Popli, S. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry [Text] / S. Popli, P. Rodgers, V. Eveloy // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – No. 50. – P. 918–931.
3. Методологический подход к выбору тепловой нагрузки комбинированной системы охлаждения воздуха на входе ГТУ [Текст] // А. Н. Радченко, Н. И. Радченко, С. А. Кантор, Б. С. Портной // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 6(133). – С. 55–59.
4. Meteomanz [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.meteomanz.com> : Meteomanz Homepage. – 15.10.2019.
5. Николаевские газовые турбины промышленного применения [Текст]. – Николаев : ГП НПКГТ "Зоря-Машпроект", 2004. – 20 с.

References

1. Tiwari, Kumar, A., Muzaffarul, H. M., Islam, M. Effect of ambient temperature on the performance of a combined cycle power plant. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2013, vol. 37 (4), pp. 1177–1188.
2. Popli, S., Rodgers, P., Eveloy, V. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 50, pp. 918–931.
3. Radchenko, A. N., Radchenko, N. I., Kantor, S. A., Portnoi, B. S. Metodolohycheskyy podkhod k vyboru teplovy nahruzky kombynyrovannoy systemy okhlazhdenyya vozdukha na vkhode GTU [A methodological approach of choosing the rational heat load on combined system of GTU intake air cooling]. *Aviacijnno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2016, no. 6 (133), pp. 55–59.
4. Meteomanz. Available at: <http://www.meteomanz.com> : Meteomanz Homepage. (accessed 15.10.2019).
5. Nikolaevskie hazovye turbynu promushlennoho pryumenenyya [Nikolaev gas turbines of industrial application]. *HP NPKHT "Zorya-Mashproekt", SE SPCGTC "Zorya" – "Mashproekt"* Publ., 2004. 20 p.

Поступила в редакцию 1.11.2019, рассмотрена на редколлегии 10.12.2019

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТУ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ХОЛОДИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

А. Н. Радченко, Б. С. Портной, С. А. Кантор, И. П. Есин

Значительные колебания текущих температуры и относительной влажности наружного воздуха приводят к существенным изменениям тепловой нагрузки на систему охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки, что остро ставит проблему выбора их проектной тепловой нагрузки, а также оценки эффективности работы системы охлаждения воздуха за определённый период времени. Исследована эффективность глубокого охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок при переменных в течении июля месяца 2015–2018 годов климатических условиях эксплуатации на компрессорной станции Краснополье, Днепропетровская область (Украина). Для охлаждения воздуха предложено применение теплоиспользующих холодильных машин, которые трансформируют теплоту выхлопных газов газотурбинных установок в холод. Проанализирована эффективность охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок для различных 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 (с использованием хладонового низкотемпературного воздухоохладителя в качестве второй ступени охлаждения воздуха).

Оценка эффекта от охлаждения воздуха была выполнена путем сравнения увеличения выработки механической энергии в результате роста мощности газотурбинной установки и сэкономленного топлива по накоплению в течении июля месяца для 2015-2018 годов. Более глубокое охлаждение воздуха на входе газотурбинной установки до температуры 10°C в комбинированной абсорбционно-эжекторной холодильной машине, по сравнению с его традиционным охлаждением до 15 °C в абсорбционной бромистолитиевой холодильной машине, обеспечивает больший прирост полезной мощности и экономии топлива. Показано, что из-за незначительного расхождения между результатами, полученными для 2015-2018 годов, предварительную оценку эффективности охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок возможно проводить для одного года.

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

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF DEEP AIR COOLING AT THE INLET OF GTU BY WASTE HEAT RECOVERY CHILLER

A. M. Radchenko, B. S. Portnoi, S. A. Kantor, I. P. Esin

Significant fluctuations in the current temperature and relative humidity of the ambient air lead to significant changes in the heat load on the air cooling system at the inlet of the gas turbine unit, which urgently poses the problem of choosing their design heat load, as well as evaluating the efficiency of the air cooling system for a certain period of time. The efficiency of deep air cooling at the inlet of gas turbine units was studied with a change during July 2015–2018 for climatic conditions of operation at the compressor station Krasnopolie, Dnepropetrovsk region (Ukraine). For air cooling, the use of a waste heat recovery chiller, which transforms the heat of exhaust gases of gas turbine units into the cold, has been proposed. The efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine units for different temperatures has been analyzed: down to 15 °C – an absorption lithium-bromide chiller, which is used as the first high-temperature stage for pre-cooling of ambient air, and down to 10 °C – a combined absorption-ejector chiller (with using a refrigerant low-temperature air cooler as the second stage of air cooling).

The effect of air-cooling was assessed by comparing the increase in the production of mechanical energy as a result of an increase in the power of a gas turbine unit and fuel saved during the month of July for 2015-2018 in accumulating. Deeper air cooling at the inlet of the gas turbine unit to a temperature of 10 °C in a combined absorption-ejector chiller compared to its traditional cooling to 15 °C in an absorption bromine-lithium chiller provides a greater increase in net power and fuel saved. It is shown that due to a slight discrepancy between the results obtained for 2015-2018, a preliminary assessment of the efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine plants can be carried out for one year.

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

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

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

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

Єсін Ігор Петрович – канд. техн. наук, доцент, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Radchenko Andrii Mykolaiovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8735-9205.

Portnoi Bohdan Sergiyovych – Post Graduated Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: bodya1184@yandex.ru, ORCID Author ID: 0000-0002-3142-2148.

Kantor Sergiy Anatoliyovych – Candidate of Technical Science, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru, ORCID Author ID: 0000-0001-5050-5937.

Esin Igor Petrovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.