

УДК 621.57.046

Б. С. ПОРТНОЙ¹, А. М. РАДЧЕНКО¹, Р. М. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР²¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ВИКОРИСТАННЯ РЕЗЕРВУ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ АБСОРБЦІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТУ

Проаналізовано процеси охолодження повітря на вході газотурбінної установки (ГТУ) абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною. Для моделювання процесів охолодження були використані комп'ютерні програми фірм-виробників теплообмінних апаратів. Виявлено резерви холодопродуктивності тепловикористовуючої холодильної машини, що утворюються протягом кожних 3 діб протягом липня місяця і кліматичних умов Миколаївської області при знижених поточних теплових навантаженнях, та досліджено їх використання при підвищених теплових навантаженнях з метою зменшення проектної (встановленої) потужності абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини. В ході аналізу холодопродуктивності, необхідна для охолодження повітря на вході ГТУ, порівнювалася з проектним навантаженням абсорбційної холодильної машини при поточних теплових навантаженнях на протязі липня 2017 року.

Запропоновано схему системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резерву потужності абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини. Досліджувана система забезпечує попереднє охолодження повітря на вході ГТУ в бустерному ступені охолодження за рахунок резерву холодопродуктивності абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини. Для цього застосовується акумулятор холоду, в якому накопичується надлишковий холод абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини, що утворюється при зменшених поточних теплових навантаженнях на повітроохолоджувач на вході ГТУ при знижених тепловологічних параметрах зовнішнього повітря. Результати моделювання процесів охолодження повітря на вході ГТУ з акумулюванням надлишкового холоду упродовж кожних 3 діб протягом липня місяця і кліматичних умов Миколаївської області показують доцільність використання надлишку холодопродуктивності абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини для його попереднього охолодження. Застосування запропонованої системи охолодження повітря на вході ГТУ забезпечує зменшення проектної (встановленої) потужності і, відповідно, вартості абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини приблизно на 30%.

Ключові слова: охолодження, тепловикористовуюча холодильна машина, повітря, теплове навантаження, резерв холодопродуктивності.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Використання тепловикористовуючих холодильних машин (ТХМ), що трансформують в холод теплоту, наприклад, відпрацьованих газів дозволяє підвищити ефективність газотурбінних установок (ГТУ) при високих температурах зовнішнього повітря на вході $t_{\text{нв}}$ [1–3]. Абсорбційні бромистолітєві холодильні машини (АБХМ) забезпечують охолодження повітря до температури близько 15 °С [1, 2].

Зменшити встановлену (проектну) холодильну потужність АБХМ, а отже і її вартість, можна шляхом накопичення надлишку холоду, який утворюється при знижених поточних температурах зовнішнього повітря на вході ГТУ, та його використання для попереднього охолодження повітря при його підвищених температурах.

Мета дослідження – аналіз співвідношення поточного теплового навантаження та резерву холодопродуктивності АБХМ, який утворюється при зменшених теплових навантаженнях на ПО на вході ГТУ й акумулюється за певний період часу (наприклад 3 доби), та використовується для попереднього охолодження повітря при його підвищених температурах.

2. Результати дослідження

Схема системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резервної холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПО₆ попереднього охолодження показана на рис. 1.

Резерв холодопродуктивності АБХМ, а відтак і скорочення її встановленої (проектної) величини, визначається співвідношенням проектного тепло-

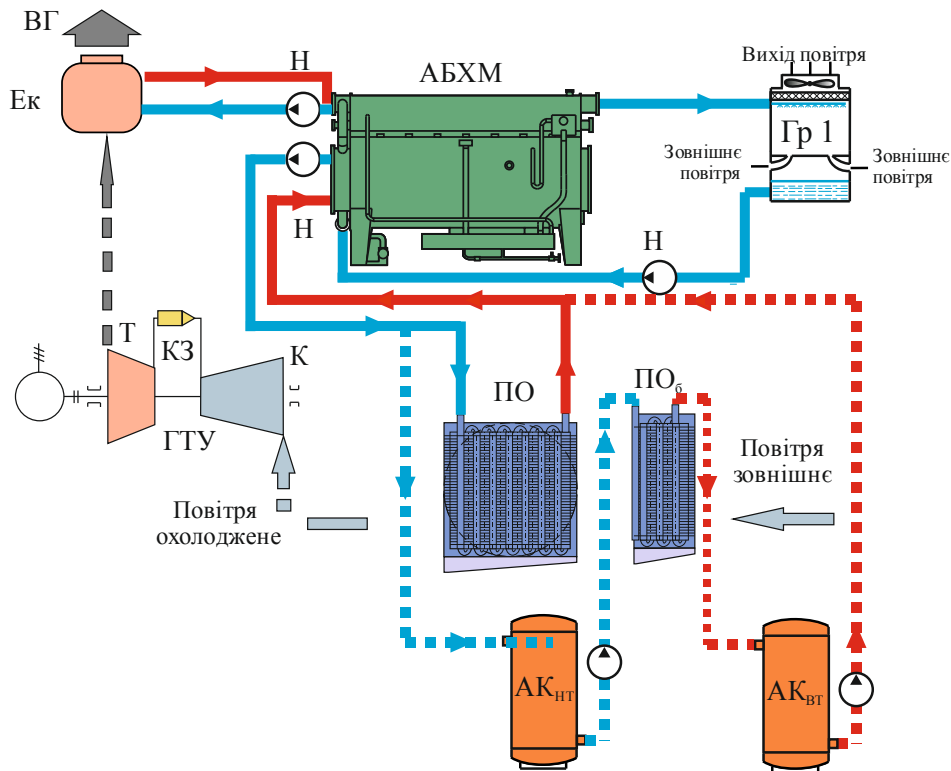


Рис. 1. Принципова схема системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резервної холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПО_б: К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; ВГ – відпрацьовані газы; Ек – економайзер нагріву води для АБХМ; ПО і ПО_б – основний і бустерний ПО; АК_{нт} і АК_{вт} – акумулятори холоду низько- і високотемпературний відповідно подачі в ПО_б і в зворотну лінію АБХМ

вого навантаження повітроохолоджувача (ПО) на вході ГТУ і поточного відповідно до параметрів зовнішнього повітря. Попередньо приймають питома (при витраті повітря $G_{п} = 1$ кг/с) теплове навантаження ПО (встановлену питому холодопродуктивність АБХМ) заниженим $q_{016пр} = 16$ кВт/(кг/с) порівняно з $q_{024пр} = 24$ кВт/(кг/с), необхідним для охолодження зовнішнього повітря до температури 15°C , з урахуванням того, що решта покривається за рахунок використання резерву холодопродуктивності у бустерному ступені ПО_б повітроохолоджувача.

Питома теплове навантаження обох повітроохолоджувачів ПО і ПО_б прийняте $q_{024пр} = 24$ кВт/(кг/с), виходячи з максимального річного ефекту від охолодження (річної економії палива) при зниженні температури повітря на вході ГТУ в АБХМ до $t_{в2} \approx 15^{\circ}\text{C}$ [3]. Тоді повне проектне теплове навантаження на ПО визначають як $Q_{016пр} = q_{016пр} \cdot G_{п} = 16 \cdot 40 = 640$ кВт, де $G_{п} = 40$ кг/с – витрата повітря через ПО.

При визначенні резерву холодопродуктивності АБХМ проектне теплове навантаження $Q_{016пр} = q_{016пр} \cdot G_{п} = 640$ кВт, де $q_{016пр} = 16$ кВт/(кг/с), порівнюють з поточним тепловим навантаженням, необхідним для охолодження зовнішнього повітря

на вході ГТУ в АБХМ до температури $t_{в2} \approx 15^{\circ}\text{C}$ відповідно до поточних параметрів зовнішнього повітря.

Зменшення теплового навантаження основного ступеня повітроохолоджувача ПО з відповідним скороченням встановленої холодопродуктивності АБХМ можливе лише тоді, коли необхідні поточні витрати на охолодження повітря в обох ПО і ПО_б до температури $t_{в2} \approx 15^{\circ}\text{C}$ на вході ГТУ менше ніж проектне теплове навантаження основного ПО (встановлена холодопродуктивність АБХМ). Відповідно, надлишок (резерв) холодопродуктивності АБХМ визначають як $Q_{016изб} = Q_{016пр} - Q_{024} = 640 - Q_{024}$, кВт, а її дефіцит відповідно: $Q_{016д} = Q_{024} - Q_{016пр} = Q_{024} - 640$, кВт, де Q_{024} – поточне теплове навантаження обох ПО і ПО_б. Баланси співпадають, якщо вдало вибрано проектне теплове навантаження основного ПО з урахуванням того, що решта покривається за рахунок використання резерву холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПО_б попереднього охолодження повітря.

При цьому необхідно приймати до уваги конкретні кліматичні умови і періоди, прийняті для розрахунку (наприклад 3 доби), від яких залежить накопичення резерву холодопродуктивності. Розподіл теплових навантажень ступенів охолодження повіт-

ря визначається поступовою (наприклад упродовж кожних 3 діб) витратою резерву холодопродуктивності на попереднє охолодження повітря у бустерному ступені ПО₆, про що свідчить зближення її надлишку та дефіциту для основного ПО та бустерного ступеня ПО₆ за прийнятий період часу.

Результати реалізації запропонованого підходу до визначення ефекту від попереднього охолодження повітря у бустерному ступені ПО₆ у вигляді зменшення встановленої (проектної) холодопродуктивності АБХМ для кліматичних умов м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл., упродовж липня 2017 р. представлено на рис. 2, 3.

На рис. 2 наведено поточні витрати холодопродуктивності (поточне теплове навантаження на ПО) Q_{024} на охолодження зовнішнього повітря до температури $t_{в2} \approx 15^\circ\text{C}$ на вході ГТУ (без використання резерву холодопродуктивності АБХМ), проектне теплове навантаження на основний ПО $Q_{016пр} = 640$ кВт (занижене з урахуванням викори-

стання резерву холодопродуктивності АБХМ на покриття решти поточного теплового навантаження), а також значення сумарного за накопиченням надлишку (резерву) $\Sigma Q_{016изб}$ і дефіциту $\Sigma Q_{016д}$ проектного теплового навантаження (встановленої холодопродуктивності АБХМ) $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним тепловим навантаженням на Q_{024} без використання резерву холодопродуктивності АБХМ, надлишку (резерву) $\Sigma Q_{0Ак16изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним тепловим навантаженням Q_{024} при використанні резерву холодопродуктивності АБХМ в бустерному повітроохолоджувачі ПО₆ упродовж липня 2017 р., м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.

Як видно з рис. 2, сумарний за липень 2017 р. надлишок (резерв) холодопродуктивності АБХМ $\Sigma Q_{016изб}$, утворений при знижених теплових навантаженнях, значно перевищує її дефіцит $\Sigma Q_{016д}$ при підвищених теплових навантаженнях.

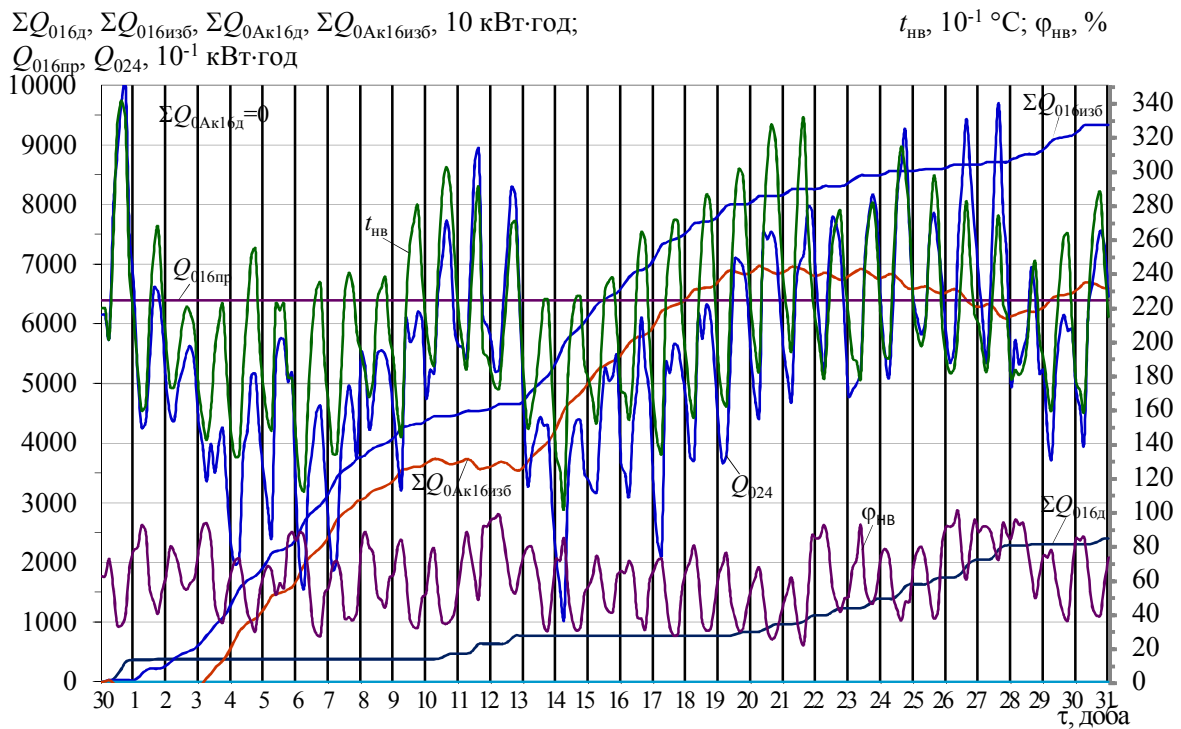


Рис. 2. Поточні значення температури $t_{вв}$ і відносної вологості $\phi_{вв}$ навколишнього повітря, витрат холодопродуктивності (поточне теплове навантаження) Q_{024} на охолодження зовнішнього повітря до температури $t_{в2} \approx 15^\circ\text{C}$ на вході ГТУ, а також сумарного за накопиченням надлишку (резерву) $\Sigma Q_{016изб}$ і дефіциту $\Sigma Q_{016д}$ проектного теплового навантаження (встановленої холодопродуктивності АБХМ) $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним тепловим навантаженням на Q_{024} без використання резерву холодопродуктивності АБХМ, надлишку (резерву) $\Sigma Q_{0Ак16изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним тепловим навантаженням Q_{024} при використанні резерву холодопродуктивності АБХМ в бустерному повітроохолоджувачі ПО₆ упродовж липня 2017 р., м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.

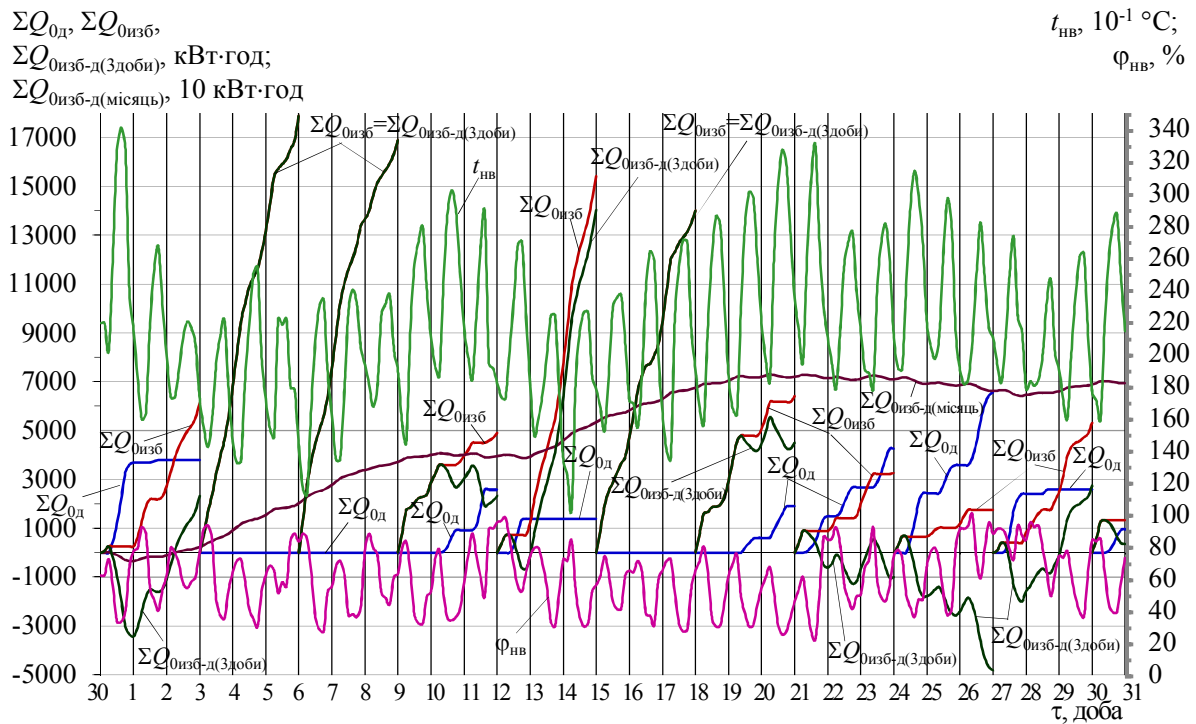


Рис. 3. Поточні значення температури $t_{нв}$ і відносної вологості $\phi_{нв}$ навколишнього повітря, сумарного дефіциту $\Sigma Q_{0д}$ та резерву $\Sigma Q_{0изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним, різниці $\Sigma Q_{0изб-д(3доби)}$ між резервом та дефіцитом холодопродуктивності при використанні резерву холодопродуктивності кожні три доби, залишку резерву холодопродуктивності $\Sigma Q_{0изб-д(місяць)}$ на кінець місяця після його використання на покриття дефіциту упродовж липня 2017 р., м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.

При цьому стійкий ріст дефіциту холодопродуктивності АБХМ $\Sigma Q_{016д}$ має місце, починаючи з 20.07.2017 р., що обумовлено постійним перевищенням значень поточного теплового навантаження Q_{024} (без акумуляції і використання резерву холодопродуктивності АБХМ) проектного навантаження $Q_{016пр} = 640$ кВт, прийнятого з погляду застосування акумуляції і використання резерву холодопродуктивності АБХМ.

Використання резерву холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПО_б забезпечує скорочення встановленої холодопродуктивності АБХМ на величину проектного теплового навантаження $Q_{0.8пр} = q_{0.8пр} \cdot G_{п} = 8 \cdot 40 = 320$ кВт, тобто приблизно на 30 % порівняно з базовим $Q_{024пр} = q_{024пр} \cdot G_{п} = 24 \cdot 40 = 960$ кВт.

На рис. 3 наведені результати розрахунку сумарних за накопиченням дефіциту $\Sigma Q_{0д}$ та резерву $\Sigma Q_{0изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{016пр} = 640$ кВт порівняно з поточним, різниці $\Sigma Q_{0изб-д(3доби)}$ між резервом та дефіцитом при використанні резерву холодопродуктивності упродовж кожних трьох діб. Як видно, накопичуваного резерву холодопродуктивності упродовж кожних трьох діб вистачає для покриття її дефіциту.

Доволі значний надлишок холодопродуктивності АБХМ на кінець місяця $\Sigma Q_{0изб-д(місяць)}$ свідчить про можливість його подальшого використання шляхом зменшення встановленої холодопродуктивності АБХМ менше $Q_{016пр} = 640$ кВт з її заміщенням резервом холодопродуктивності, тобто перерозподілом теплового навантаження між ступенями охолодження в бік збільшення навантаження на бустерний ступінь попереднього охолодження.

Висновки

Охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резерву холодопродуктивності АБХМ, який утворюється при знижених теплових навантаженнях, для попереднього охолодження повітря у бустерному ступені повітроохолоджувача забезпечує зменшення на 30 % встановленої холодопродуктивності, відповідно і вартості АБХМ.

Література

1. Popli, S. Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization

[Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Eveloy // *Applied Energy*. – 2012. – № 93. – P. 623–636.

2. Popli, S. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry [Text] / Sahil Popli, Peter Rodgers, Valerie Eveloy // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – № 50. – P. 918–931.

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. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, Valerie. Trigenation scheme for energy efficiency enhance-

ment in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization. *Applied Energy*, 2012, no. 93, pp. 623–636.

2. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, Valerie. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Applied Thermal Engineering*, 2013, no. 50, pp. 918–931.

3. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Metod vybora racionalnoy teplovoy nagruzky 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]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.

Поступила в редакцию 5.06.2018, рассмотрена на редколлегии 19.06.2018

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗЕРВА ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТУ

Б. С. Портной, А. Н. Радченко, Р. Н. Радченко, С. А. Кантор

Проанализированы процессы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки (ГТУ) абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной. Для моделирования процессов охлаждения были использованы компьютерные программы фирм-производителей теплообменных аппаратов. Выявлены резервы холодопроизводительности теплоиспользующей холодильной машины, образующиеся в течение каждых 3 суток в течение июля месяца и климатических условий Николаевской области при пониженных текущих тепловых нагрузках, и исследовано их использование при повышенных тепловых нагрузках с целью уменьшения проектной (установленной) мощности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. В ходе анализа холодопроизводительность, необходимая для охлаждения воздуха на входе ГТУ, сравнивалась с проектной нагрузкой абсорбционной холодильной машины при текущих тепловых нагрузках в течение июля 2017.

Предложена схема системы охлаждения воздуха на входе ГТУ с использованием резерва мощности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. Исследуемая система обеспечивает предварительное охлаждение воздуха на входе ГТУ в бустерной ступени охлаждения за счет резерва холодопроизводительности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины. Для этого применяется аккумулятор холода, в котором накапливается избыточный холод абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины, образующийся при уменьшенных текущих тепловых нагрузках на воздухоохладитель на входе ГТУ при пониженных тепловлажностных параметрах наружного воздуха. Результаты моделирования процессов охлаждения воздуха на входе ГТУ с аккумулярованием избыточного холода в течение каждых 3 суток в течение июля месяца и климатических условий Николаевской области показывают целесообразность использования избытка холодопроизводительности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины для его предварительного охлаждения. Применение предложенной системы охлаждения воздуха на входе ГТУ обеспечивает уменьшение проектной (установленной) мощности и, соответственно, стоимости абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины примерно на 30%.

Ключевые слова: охлаждение, теплоиспользующая холодильная машина, воздуха, тепловая нагрузка, резерв холодопроизводительности.

**USING THE RESERVE OF ABSORPTION CHILLER REFRIGERATION CAPACITY
FOR COOLING AIR AT THE INLET OF GTU***B. S. Portnoi, A. N. Radchenko, R. N. Radchenko, S. A. Kantor*

The processes of air cooling at the gas turbine unit inlet by absorption lithium-bromide chiller have been analyzed. The computer programs of firms-producers of heat exchangers were used for the gas turbine unit inlet air cooling processes simulation. The absorption lithium-bromide chiller refrigeration capacity reserve (the design heat load excess over the current heat loads) generated at the reduced current heat loads on the air coolers at the gas turbine unit inlet in accordance with the lowered ambient air parameters has been considered. The absorption lithium-bromide chiller refrigeration capacity reserve is expedient to use at increased heat load on the air cooler. To solve this problem the refrigeration capacity required for cooling air at the gas turbine unit inlet has been compared with the excessive absorption lithium-bromide chiller refrigeration capacity exceeding current heat loads during July 2017.

The scheme of gas turbine unit inlet air cooling system with using the absorption lithium-bromide chiller refrigeration capacity reserve has been proposed. The proposed air cooling system provides gas turbine unit inlet air precooling in the air cooler booster stage by using the absorption lithium-bromide chiller excessive refrigeration capacity. The absorption chiller excessive refrigeration capacity generated during decreased heat loads on the gas turbine unit inlet air cooler is accumulated in the thermal storage. The results of simulation show the expediency of the gas turbine unit inlet air cooling by using the absorption lithium-bromide chiller refrigeration capacity reserve, which is generated at reduced thermal loads, for the air precooling in the air cooler booster stage. This solution provides the absorption lithium-bromide chiller installed (designed) refrigeration capacity and cost reduction by almost 30%. The solution to increase the efficiency of gas turbine unit inlet air cooling through using the absorption chiller excessive refrigeration potential accumulated in the thermal storage has been proposed.

Keywords: cooling, waste heat recovery chiller, air, heat load, refrigeration capacity reserve.

Портной Богдан Сергійович – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail:

Радченко Андрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

Кантор Сергій Анатолійович – канд. техн. наук, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна, e-mail: s_kantor@mail.ru.

Portnoi Bohdan Sergeevich – PhD student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail:

Radchenko Andrey Nikolaevich – PhD, Assistant Professor of Dept. of Ship Electroenergetic Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Radchenko Roman Nikolaevich – PhD, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

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