

УДК 621.438-714

А. М. РАДЧЕНКО¹, Р. М. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР²,
Б. С. ПОРТНОЙ¹, В. С. ТКАЧЕНКО²¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² ПАТ "Завод "Екватор", Україна**ОХОЛОЖДЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТУ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗЕРВУ
ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ АБСОРБЦІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ
В БУСТЕРНОМУ ПОВІТРООХОЛДЖУВАЧІ**

Досліджено процеси охолодження повітря на вході газотурбінної установки абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною, що використовує скидну теплоту відпрацьованих газів, отримано дані з поточних витрат і резерву холодопродуктивності, який утворюється при знижених теплових навантаженнях на повітроохолоджувач. За результатами аналізу отриманих даних з поточних теплових навантажень на повітроохолоджувач обґрунтовано доцільність використання резерву холодопродуктивності для попереднього охолодження повітря в бустерному ступені при підвищених теплових навантаженнях на повітроохолоджувач з метою скорочення встановленої холодопродуктивності абсорбційної холодильної машини.

Ключові слова: охолодження, повітря, теплове навантаження, бустерний повітроохолоджувач, абсорбційна холодильна машина.

**1. Аналіз проблеми і постановка
мети дослідження**

Охолодження повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), що трансформують в холод теплоту відпрацьованих газів, є одним з основних напрямів підвищення їх ефективності. В найбільш поширених абсорбційних бромистолітєвих холодильних машинах (АБХМ) повітря можна охолоджувати до температури $t_{в2} \approx 15^\circ\text{C}$ з високою ефективністю трансформації скидної теплоти в холод: їх тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,7 \dots 0,8$ [1, 2]. Більш глибоке охолодження повітря до температури $t_{в2} = 10^\circ\text{C}$ і нижче можливе в ежекторних холодильних машинах (ЕХМ), ефективність трансформації скидної теплоти в холод в яких значно менше: $\zeta = 0,2 \dots 0,3$ [3]. То ж доцільним є двоступеневе охолодження повітря на вході ГТУ: до $t_{в2} = 15 \dots 20^\circ\text{C}$ в АБХМ, а до $t_{в2} = 7 \dots 10^\circ\text{C}$ в ЕХМ. Відповідно до поточних тепловологічних параметрів зовнішнього повітря суттєво змінюється теплове навантаження на повітроохолоджувачі (ПО), відповідно й витрати холодопродуктивності перш за все АБХМ і лише при низькій температурі навколишнього повітря $t_{вв} \leq 10^\circ\text{C}$ ще й ЕХМ. При знижених теплових навантаженнях утворюється резерв холодопродуктивності передусім АБХМ (надлишок порівняно зі встановленою-проектною), який доцільно використовувати для покриття її дефіциту при підвищених нава-

нтаженнях, завдяки чому зменшити встановлену холодопродуктивність і вартість АБХМ.

Мета дослідження – аналіз даних з резерву холодопродуктивності АБХМ при знижених теплових навантаженнях на ПО на вході ГТУ та його використання у бустерному ступені попереднього охолодження повітря зі скороченням встановленої холодопродуктивності АБХМ.

2. Результати дослідження

Резерв встановленої (проектної) холодопродуктивності АБХМ, який утворюється при знижених теплових навантаженнях, визначають як її надлишок порівняно з поточним сумарним тепловим навантаженням базового високотемпературного ступеня $ПО_{вТ}$ і бустерного ступеня $ПО_{б}$ попереднього охолодження повітря за рахунок резерву холодопродуктивності АБХМ, тобто теплообмінника " $ПО_{вТ} + ПО_{б}$ ".

Проектне теплове навантаження на $ПО_{вТ}$ визначають як $Q_{0.вТ17пр} = q_{0.вТ17пр} \cdot G_n = 17 \cdot 40 = 680$ кВт, виходячи з прийнятого питомого (при витраті повітря $G_n = 1 \cdot \text{кг/с}$) теплового навантаження $ПО_{вТ}$ $q_{0.вТ17пр} = 17$ кВт/(кг/с); $G_n = 40$ кг/с – витрата повітря через $ПО_{вТ}$. При цьому проектне теплове навантаження на $ПО_{вТ}$ з бустерним $ПО_{б}$ визначають як $Q_{0.вТ24пр} = q_{0.вТ24пр} \cdot G_n = 24 \cdot 40 = 960$ кВт, де $q_{0.вТ24пр} = 24$ кВт/(кг/с) – загальне питоме теплове навантаження обох повітроохолоджувачів

ПО_{ВТ} і ПО_б, прийняте виходячи з досягнення максимального ефекту від охолодження (наприклад річної економії палива) при охолодженні повітря на вході ГТУ до температури $t_{в2} \approx 15^\circ\text{C}$ в АБХМ [3].

При визначенні резерву холодопродуктивності АБХМ поточне теплове навантаження на ПО_{ВТ} з бустерним ПО_б порівнюють з проектним тепловим навантаженням $Q_{0.ВТ24пр} = q_{0.ВТ24пр} \cdot G_{п} = 24 \cdot 40 = 960$ кВт, де $q_{0.ВТ24пр} = 24$ кВт(кг/с).

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

Заміщення (часткове) високотемпературного ступеня ПО_{ВТ} з відповідним скороченням встановленої холодопродуктивності АБХМ можливе за наявності резерву холодопродуктивності, який перевищує її витрати на попереднє охолодження повітря на вході високотемпературного ступеня повітроохолоджувача ПО_{ВТ}. Відповідно до цього надлишок (резерв) холодопродуктивності АБХМ визначають як $Q_{0.ВТ17изб} = Q_{0.ВТ17пр} - Q_{0.ВТ24} = 680 - Q_{0.ВТ24}$, кВт, а її

дефіцит відповідно: $Q_{0.ВТ17д} = Q_{0.ВТ24} - Q_{0.ВТ17пр} = Q_{0.ВТ24} - 680$, кВт. Ці баланси співпадають за умови правильно підбраного проектного сумарного теплового навантаження ПО_{ВТ} і бустерного ступеня ПО_б попереднього охолодження повітря за рахунок резерву холодопродуктивності АБХМ. Однак сама величина резерву холодопродуктивності залежить від конкретних кліматичних умов і проміжку часу, взятого для його визначення. То ж мова може йти про вибір умовно раціональної її величини, виходячи з надлишку (резерву) холодопродуктивності, накопиченого упродовж певного періоду. Про наближення до неї свідчить зближення надлишку холодопродуктивності з його дефіцитом для охолодження повітря в ПО_{ВТ} і бустерному ступені ПО_б, тобто в теплообмінниках "ПО_{ВТ}+ПО_б".

Приклад реалізації зазначеного підходу до визначення ефекту від застосування бустерного ступеня ПО_б попереднього охолодження у вигляді зменшення встановленої холодопродуктивності АБХМ, по суті – визначення проектного теплового навантаження бустерного ступеня ПО_б, для кліма-

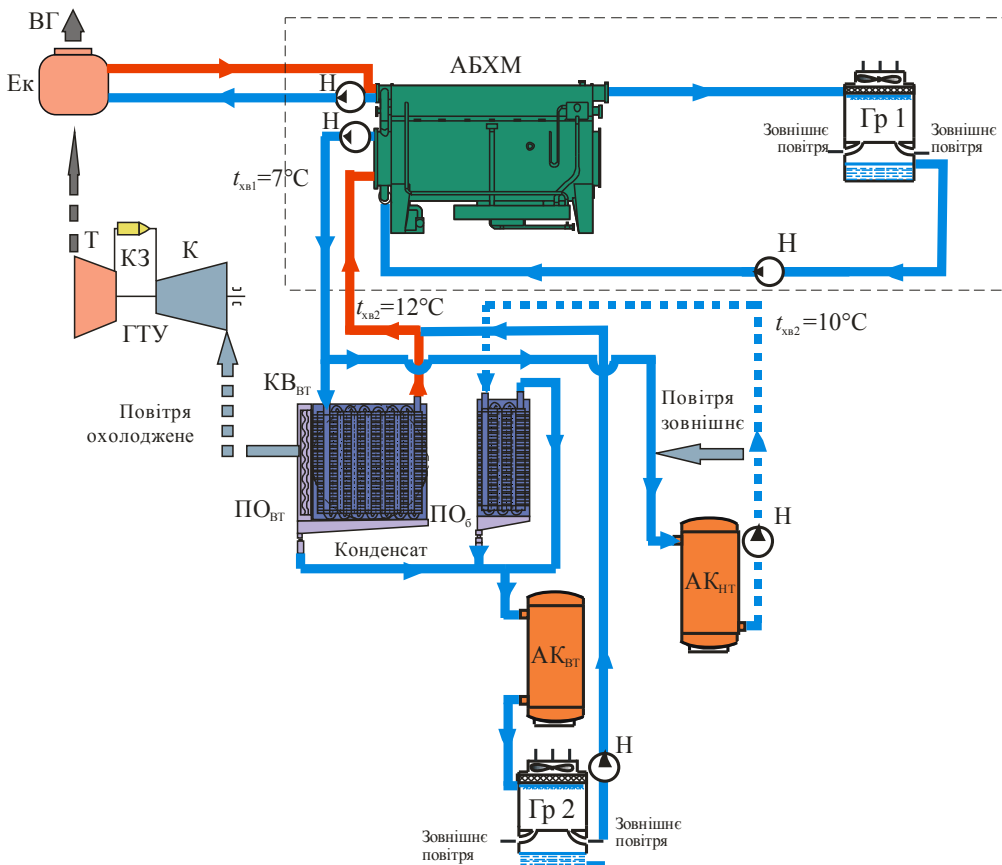


Рис. 1. Принципова схема системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резервної холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПО_б: К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; ВГ – відпрацьовані газы; Ек – економайзер нагріву води для АБХМ; ПО_{ВТ} і ПО_б – високотемпературний і бустерний ПО; АК_{ВТ} і АК_{НТ} – високо- і низькотемпературний акумулятори конденсату

тичних умов м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл., упродовж 10 діб (1–10.07.2015) наведено на рис. 2, 3.

При цьому на рис. 2 наведено поточні теплові навантаження $Q_{0.BT24}$ на $ПО_{BT}$ з бустерним $ПО_6$, а також відповідні надлишок (резерв) $Q_{0.BT17изб}$ і дефіцит $Q_{0.BT17д}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт на $ПО_{BT}$ порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.BT24}$ та відповідні сумарні по нарощуванню за 10 діб надлишок (резерв) $\Sigma Q_{0.BT17изб}$ і дефіцит $\Sigma Q_{0.BT17д}$ проектного теплового навантаження без використання резерву холодопродуктивності АБХМ в бустерному $ПО_6$.

Як видно з рис. 2, сумарний за 10 діб (1–10.07.2015) надлишок (резерв) холодопродуктив-

ності АБХМ $\Sigma Q_{0.BT.17изб}$, утворений при знижених теплових навантаженнях на $ПО_{BT}$ і $ПО_6$, значно перевищує її дефіцит $\Sigma Q_{0.BT.17д}$ при підвищених теплових навантаженнях. При цьому помітний дефіцит холодопродуктивності АБХМ має місце, починаючи з 6.07.2015, коли поточні теплові навантаження $Q_{0.BT24}$ більше $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт.

Як видно, використання резерву холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені $ПО_6$ забезпечує скорочення встановленої холодопродуктивності АБХМ на величину проектного теплового навантаження $Q_{0.7пр} = q_{0.7пр} \cdot G_{п} = 7 \cdot 40 = 280$ кВт, тобто на 25...30% порівняно з базовим $Q_{0.BT24пр} = q_{0.BT24пр} \cdot G_{п} = 24 \cdot 40 = 960$ кВт на $ПО_{BT}$ з $ПО_6$.

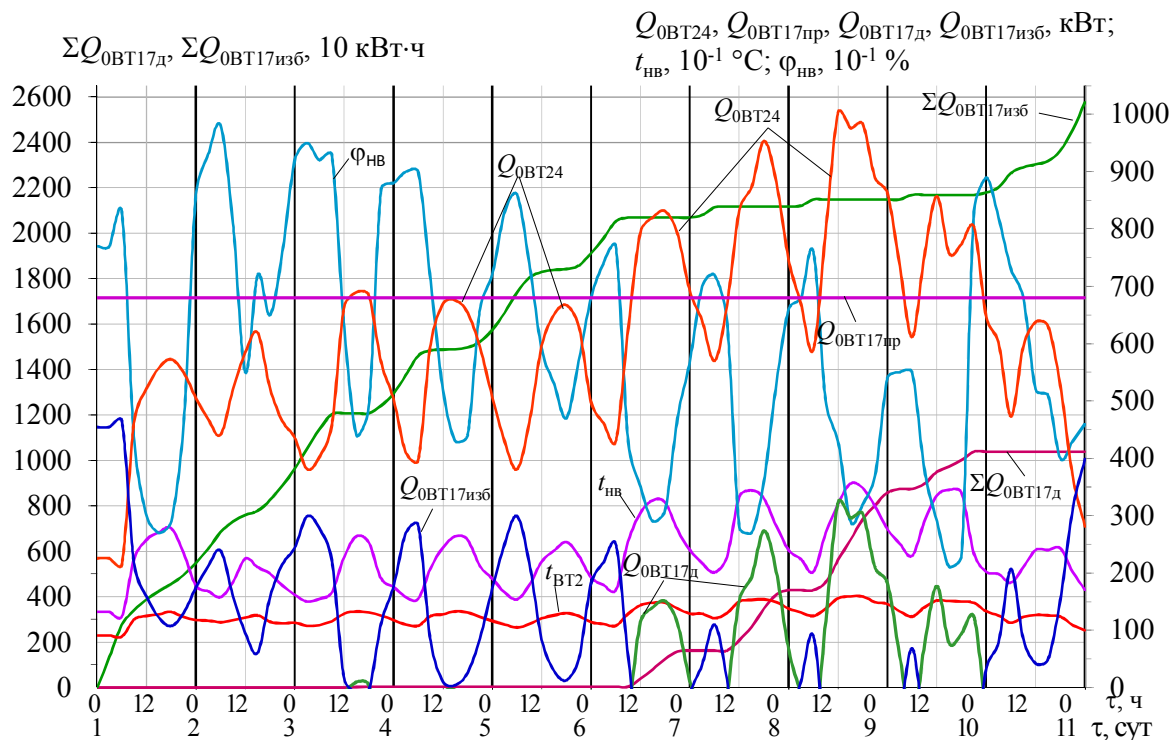


Рис. 2. Поточні значення температури $t_{нв}$ і відносної вологості $\phi_{нв}$ навколишнього повітря, температури повітря t_{BT2} на виході з $ПО_{BT}$, поточне теплове навантаження $Q_{0.BT24}$ на $ПО_{BT}$ з бустерним $ПО_6$ (витрати холодопродуктивності АБХМ без використання її резерву в бустерному $ПО_6$), надлишок (резерв) $Q_{0.BT17изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт на $ПО_{BT}$ порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.BT24}$ на $ПО_{BT}$ з бустерним $ПО_6$ (без акумуляції і використання резерву холодопродуктивності АБХМ), дефіцит $Q_{0.BT17д}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт на $ПО_{BT}$ порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.BT24}$, сумарні по нарощуванню за 10 діб надлишок (резерв) $\Sigma Q_{0.BT17изб}$ і дефіцит $\Sigma Q_{0.BT17д}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт на $ПО_{BT}$ порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.BT24}$ на $ПО_{BT}$ з бустерним $ПО_6$ без акумуляції і використання резерву холодопродуктивності АБХМ (витрата повітря 40 кг/с) упродовж 10 діб (1–10.07.2015, м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.)

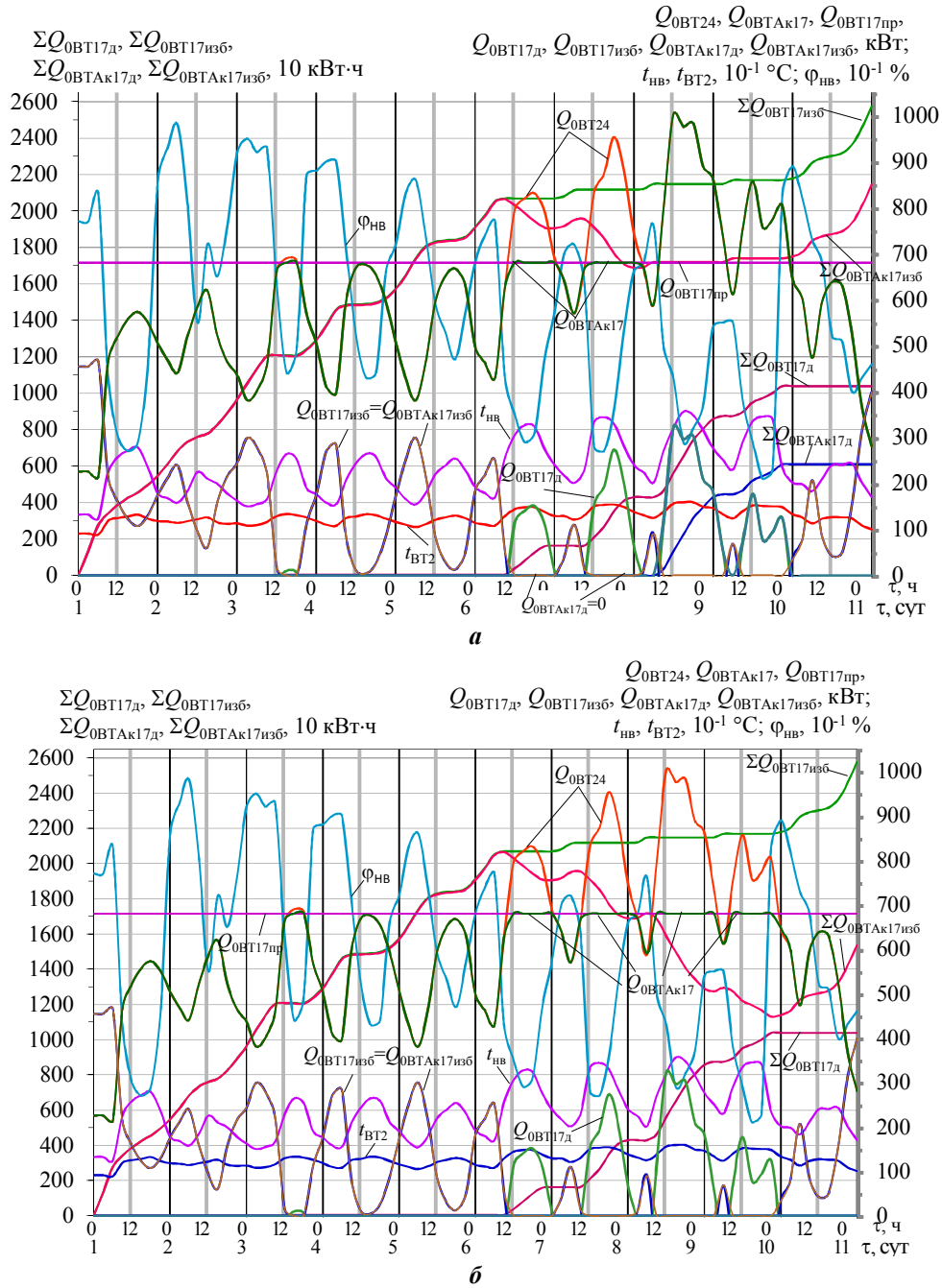


Рис. 3. Поточні значення температури $t_{нв}$ і відносної вологості $\phi_{нв}$ навколишнього повітря, температури повітря $t_{вТ2}$ на виході ПО_{ВТ}, поточні теплові навантаження $Q_{0.ВТ24}$ на ПО_{ВТ} з бустерним ПО_б і теплові навантаження $Q_{0.ВТАк17}$ на ПО_{ВТ} (без врахування бустерного ПО_б, який використовує резерв закумуляованої холодопродуктивності АБХМ); надлишок (резерв) $Q_{0.ВТ17изб}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.ВТ17пр} = 680$ кВт порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.ВТ24}$ на ПО_{ВТ} з бустерним ПО_б (без акумуляції і використання резерву холодопродуктивності АБХМ) і надлишок $Q_{0.ВТАк17изб}$ (з урахуванням його зменшення на використання резерву холодопродуктивності АБХМ в ПО_б), дефіцит $Q_{0.ВТ17д}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.ВТ17пр} = 680$ кВт на ПО_{ВТ} порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.ВТ24}$ на ПО_{ВТ} з бустерним ПО_б, сумарні по нарощуванню за 10 діб надлишок (резерв) $\Sigma Q_{0.ВТ17изб}$ і дефіцит $\Sigma Q_{0.ВТ17д}$ проектного теплового навантаження $Q_{0.ВТ17пр} = 680$ кВт на ПО_{ВТ} порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0.ВТ24}$ на ПО_{ВТ} з бустерним ПО_б без використання резерву холодопродуктивності АБХМ в ПО_б та надлишок (резерв) $\Sigma Q_{0.ВТАк17изб}$ і дефіцит $\Sigma Q_{0.ВТАк17д}$ з урахуванням їх зменшення на використання резерву холодопродуктивності АБХМ в ПО_б (витрата повітря 40 кг/с) упродовж 10 діб (1–10.07.2015, м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл.): **а** – 3, 6 і 7.07.2015 р.; **б** – 3, 6-9.07.2015 р. ($Q_{0.ВТАк17д} = 0$; $\Sigma Q_{0.ВТАк17д} = 0$)

Як видно з порівняння даних на рис. 3,а і б, по мірі використання резерву холодопродуктивності АБХМ в бустерному ступені ПО_б послідовно 6,7,8 і 9.07.2015 усувається сумарний дефіцит $\sum Q_{0.ВТАк17д}$, тобто встановленої холодопродуктивності АБХМ $Q_{0.ВТ17пр} = 680$ кВт стає достатньо для покриття поточних теплових навантажень. При цьому відповідно зменшується й надлишок встановленої холодопродуктивності АБХМ $\sum Q_{0.ВТАк17изб}$ від 2600 кВт (рис.2) до 1500 кВт (рис.3,б). Наявність все ж значного надлишку холодопродуктивності АБХМ свідчить про можливість його подальшого скорочення шляхом зменшення встановленої холодопродуктивності АБХМ з її заміщенням закумуляованим охолоджувальним потенціалом, тобто перекиданням її теплового навантаження на бустерний ступінь попереднього охолодження.

Висновки

Обґрунтовано доцільність застосування бустерного ступеня попереднього охолодження повітря на вході ГТУ шляхом використання резерву холодопродуктивності АБХМ, який завдяки адаптації до поточних кліматичних умов забезпечує зменшення на 25...30% встановленої холодопродуктивності, відповідно і вартості АБХМ.

Литература

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 Evely // *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 Evely // *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., Evely, Valerie. *Trigeneration scheme for energy efficiency enhancement 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., Evely, 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 teplovooy 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]. Avitsionno-kosmicheskaya tehnik i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.

Поступила в редакцию 17.12.2017, рассмотрена на редколлегии 14.02.2018

ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗЕРВА ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ В БУСТЕРНОМ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕ

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

Исследованы процессы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной, использующей сбросную теплоту отработавших газов, получены данные по текущим расходам и резерву холодопроизводительности, который образуется при пониженных тепловых нагрузках на воздухоохладитель. В результате анализа полученных данных по текущим тепловым нагрузкам на воздухоохладитель обоснована целесообразность использования резерва холодопроизводительности для предварительного охлаждения воздуха в бустерной ступени при повышенных тепловых нагрузках на воздухоохладитель с целью сокращения установленной холодопроизводительности абсорбционной холодильной машины.

Ключевые слова: охлаждение, воздух, тепловая нагрузка, бустерный воздухоохладитель, абсорбционная холодильная машина.

GAS TURBINE UNITE INLET AIR COOLING BY USING AN EXCESSIVE REFRIGERATION CAPACITY OF ABSORPTION CHILLER IN BUSTER AIR COOLER

A. N. Radchenko, R. N. Radchenko, S. A. Kantor, B. S. Portnoy, V. S. Tkachenko

The processes of gas turbine unit inlet air cooling by absorption lithium-bromide chiller utilizing the turbine exhaust gas waste heat as a thermotransformer has been analyzed for hour-by-hour changing ambient air temperatures and changeable heat loads on the air cooler as consequence. The computer programs of the firms-producers of heat exchangers were used for gas turbine unit inlet air cooling processes simulation. It is shown that at decreased heat loads on the air cooler an excessive refrigeration capacity of the absorption lithium-bromide chiller exceeding current heat loads is generated which can be used for covering increased heat loads on the air cooler and to reduce the refrigeration capacity of the absorption lithium-bromide chiller applied. To solve this task the refrigeration capacity required for gas turbine unit inlet air cooling is compared with an excessive refrigeration capacity of the absorption lithium-bromide chiller exceeding current heat loads summarized during 10 days of July 2015.

The system of gas turbine unit inlet air cooling with a buster stage of precooling air and a base stage of cooling air to the temperature of about 15 °C by absorption lithium-bromide chiller has been proposed. An excessive refrigeration capacity of the absorption chiller generated during decreased heat loads on the gas turbine unit inlet air cooler that is collected in the thermal accumulator is used for gas turbine unit inlet air precooling in a buster stage of air cooler during increased heat loads on the air cooler. The results of gas turbine unit inlet air cooling processes simulation proved the reduction of refrigeration capacity of the absorption lithium-bromide chiller applied by 30-40 % due to the use of a buster stage of precooling air at the expense of an excessive absorption chiller refrigeration capacity served in the thermal accumulator. So the conclusion has been made about the efficient use of a buster stage of gas turbine unit inlet air cooler for precooling air by using an excessive refrigeration potential of absorption lithium-bromide chiller coolant saved in the thermal accumulator.

Keywords: cooling, air, heat load, buster air cooler, absorption chiller.

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

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц., Національний університет 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.

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

Ткаченко Веніамін Сергійович – інженер, ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.

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.

Portnoy Bogdan Sergeevich – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: Tkachenko Veniamin Sergeevich – Engineer, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.