

УДК 621.438.1:621.57:004.94

А. М. РАДЧЕНКО¹, М. І. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР²,
Б. С. ПОРТНОЙ¹, О. І. ПРЯДКО¹¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² ПАТ "Завод "Екватор", Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ БРОМИСТОЛІТІЄВОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗЕРВУ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ У БУСТЕРНОМУ ПОВІТРООХОЛДЖУВАЧІ

Шляхом комп'ютерного моделювання процесів 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 повітроохолоджувачі. За результатами аналізу отриманих даних обґрунтовано доцільність використання резерву холодопродуктивності для попереднього охолодження повітря в бустерному ступені при підвищених теплових навантаженнях на повітроохолоджувачі та скорочення встановленої холодопродуктивності абсорбційної бромистолітєвої холодильної машини.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, охолодження повітря, теплове навантаження, резерв холодопродуктивності, бустерний повітроохолоджувач, бромистолітєва холодильна машина.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Охолодження повітря на вході газотурбінних установок (ГТУ) абсорбційними бромистолітєвими холодильними машинами (АБХМ), що використовують теплоту відпрацьованих газів – перспективний напрям підвищення їх ефективності при високих температурах зовнішнього повітря [1–4].

При знижених теплових навантаженнях на повітроохолоджувачі (ПО) відповідно до параметрів зовнішнього повітря утворюється резерв холодопродуктивності АБХМ (надлишок порівняно зі встановленою), який доцільно використовувати для покриття її дефіциту при підвищених навантаженнях.

Мета дослідження – отримання шляхом комп'ютерного моделювання даних з резерву холодопродуктивності АБХМ та його використання у бустерному ступені попереднього охолодження повітря.

2. Результати дослідження

За базовий прийнято ПО, який включає два ступеня ПО_{НТ} і ПО_{ВТ}, в які підводиться холодна вода з температурою $t_x = 7^\circ\text{C}$ від АБХМ при проектному тепловому навантаженні обох ступенів (холодопродуктивності АБХМ) $Q_{0,ВТ24пр} = 960$ кВт

без використання резервного холоду. При цьому ступінь ПО_{ВТ} підлягає заміщенню бустерним ступенем попереднього охолодження повітря ПО_{ВТ,АК} з використанням резервного холоду.

Обґрунтування вибору для моделювання програми провідної фірми-розробника ПО "Guntner" [5] серед програм інших виробників ПО [6, 7] та алгоритм розробленої авторами допоміжної управляючої програми подано в [4]. Поточні параметри зовнішнього повітря обчислювали за програмою "meteomanz" [8]. Похибка не перевищувала 3%. Розрахунки за програмою "Guntner" [5] показали, що сумарна за 3 доби кількість резервного холоду АБХМ, який утворюється при знижених поточних теплових навантаженнях на базовий ПО, близько 17 МВт·год, тоді як його дефіцит при високих навантаженнях лише 250 кВт·год. Це свідчить про необхідність акумулювання резервного холоду АБХМ і його використання у бустерному ступені ПО_{ВТ,АК}, за рахунок чого зменшити встановлену (проектну) холодопродуктивність АБХМ і відповідно вартість.

З метою підтвердження цієї гіпотези було проведено моделювання процесів двоступеневого охолодження повітря: в ПО_{НТ}, спроектованому на менше теплове навантаження $Q_{0,ВТ17пр} = 680$ кВт, і бустерному ступені ПО_{ВТ,АК}, який використовує холодну воду з акумулятора АК_{НТ}, охолоджену за рахунок резервного холоду АБХМ (схема на рис. 1).

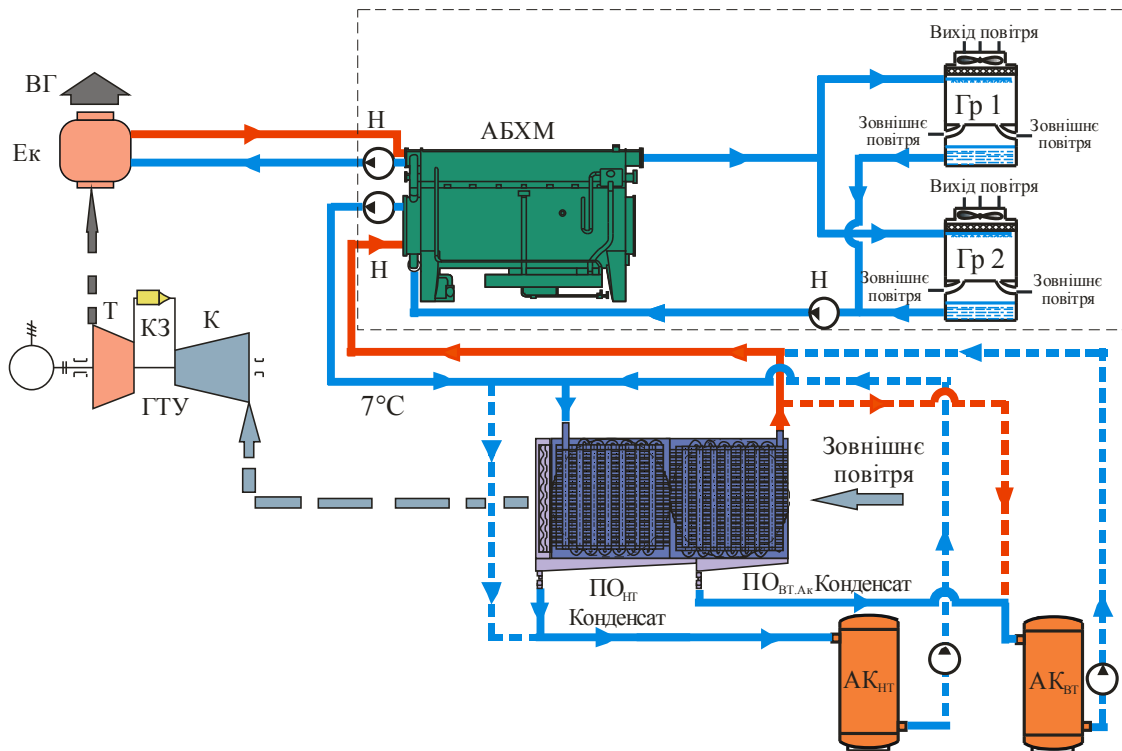


Рис. 1. Принципова схема запропонованої системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резервного охолоджувального потенціалу АБХМ у бустерному високотемпературному ступені двоступеневого повітроохолоджувача: К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; ВГ – відхідні гази; Ек – економайзер нагріву води (теплоносія для АБХМ); ПО_{НТ} – низькотемпературний ступінь повітроохолоджувача (АБХМ); ПО_{ВТ,Ак} – високотемпературний ступінь попереднього охолодження водою з АК_{НТ}; АК_{НТ} – акумулятор конденсату й резервного холоду низькотемпературний; АК_{ВТ} – акумулятор конденсату високотемпературний (для підмішування до зворотної води з її нагрівом $t_{w2} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході АБХМ)

Результати розрахунків теплових навантажень $Q_{0,ВТ17Ак(24)}$ на двоступеневий ПО: ПО_{НТ} і бустерний ступінь ПО_{ВТ,Ак} (проектні холодопродуктивність АБХМ і теплове навантаження на ПО_{НТ} $Q_{0,ВТ17пр} = 680\text{ кВт}$), резерву холоду АБХМ $Q_{0,ВТ17Ак(24)изб}$ (проектного $Q_{0,ВТ17пр} = 680\text{ кВт}$ на ПО_{НТ} порівняно з поточним тепловим навантаженням $Q_{0,ВТ17Ак(24)}$ двоступеневого ПО) і дефіциту холоду АБХМ $Q_{0,ВТ17Ак(24)д}$ (перевищення поточним тепловим навантаженням $Q_{0,ВТ17Ак(24)}$ на двоступеневий ПО проектного $Q_{0,ВТ17пр} = 680\text{ кВт}$ на ПО_{НТ}), по нарощуванню резерву холоду АБХМ $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)изб}$ і дефіциту холоду АБХМ $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)д}$ для двоступеневого ПО (при $Q_{0,ВТ17пр} = 680\text{ кВт}$), температури повітря $t_{ВТ2}$ на виході з базового ПО_{ВТ} (без бустерного ступеня) і $t_{ВТ2Ак}$ на виході з бустерного ступеня ПО_{ВТ,Ак} з акумулятором холоду, наведені на рис. 2.

Надалі всю кількість надлишкового (невикористаного) холоду АБХМ $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)изб}$, накопиченого в акумуляторі АК_{НТ} за 3 доби, витрачали в теплонпружені 15 годин роботи першої доби (9...24 год, 8.07.15 на рис. 2), тобто середньогодинна за цей період часу (15 год) додаткова кількість холоду,

отриманого від акумулятора АК_{НТ}, становила $5300\text{ кВт}\cdot\text{год}/15\text{ год} = 350\text{ кВт}$.

Як видно з рис. 3 нижче, рівномірна витрата всього накопиченого за 3 доби упродовж 9–24 год 8.07.2015 холоду забезпечує різке скорочення дефіциту холодопродуктивності АБХМ $Q_{0,ВТ17Ак(24)д} = Q_{0,ВТ17Ак(24)д} - Q_{0,ВТ17пр} = 50\dots100\text{ кВт}$ (проти $Q_{0,ВТ24} - Q_{0,ВТ17пр} \approx 950 - 650 = 300\text{ кВт}$) і тривалості τ експлуатації розробленого двоступеневого ПО: ПО_{НТ} і ПО_{ВТ,Ак} ($Q_{0,ВТ17пр} = 680\text{ кВт}$) з дефіцитом холодопродуктивності: $\tau = 11\dots19\text{ ч}$ проти $\tau = 9\dots24\text{ ч}$. Видно також, що наявність надлишку холодопродуктивності $Q_{0,ВТ17Ак(24)изб}$ при $\tau = 5\dots11\text{ год}$ і $\tau = 19\dots24\text{ год}$ (8.07.2015) суттєво перекиває її дефіцит, що підтверджує і співвідношення відповідних сумарних за 3 доби величин: $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)изб} \approx 870\text{ кВт}$ проти $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)д} \approx 370\text{ кВт}$ на рис. 3.

Результати перерахунку сумарних надлишку і дефіциту холоду показали скорочення їх різниці $\sum Q_{0,ВТ17Ак(24)изб} - \sum Q_{0,ВТ17Ак(24)д} = 870 - 370 = 500\text{ кВт}\cdot\text{год}$ (порівняно з вихідною базовою її величиною без використання резервного холоду $\sum Q_{0,ВТ(24)изб} - \sum Q_{0,ВТ17Ак(24)д} = 17000 - 250 =$

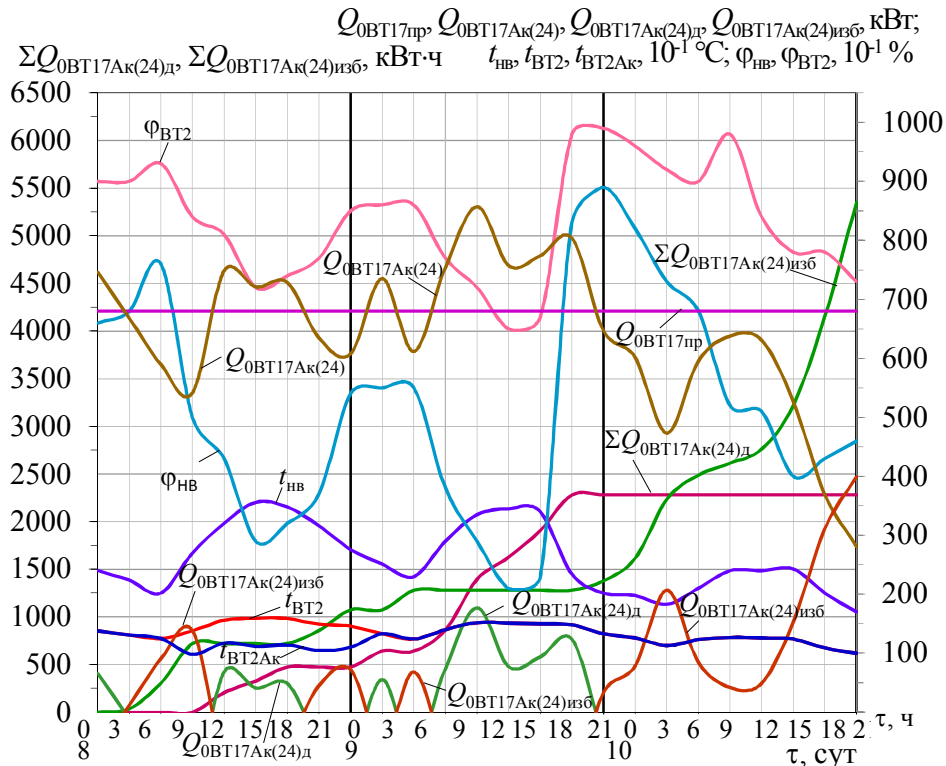


Рис. 2. Поточні значення температури $t_{нв}$ і відносної вологості $\phi_{нв}$ зовнішнього повітря, температури повітря $t_{ВТ2АК}$ на виході з базового $ПО_{ВТ}$ (без акумулятора холоду) і $t_{ВТ2АК}$ на виході з бустерного $ПО_{ВТ,АК}$, його відносної вологості $\phi_{ВТ2(24)}$, теплових навантажень $Q_{0,ВТ17АК(24)}$ на розроблений двоступеневий: $ПО_{НТ}$ і $ПО_{ВТ,АК}$ (при $Q_{0,ВТ17пр} = 680$ кВт), поточних резерву холоду АБХМ $Q_{0,ВТ17АК(24)изб}$ ($Q_{0,ВТ17пр} = 680$ кВт) і дефіциту $Q_{0,ВТ17АК(24)л}$ та по нарощуванню $\Sigma Q_{0,ВТ17АК(24)изб}$ і $\Sigma Q_{0,ВТ17АК(24)л}$ для розробленого двоступеневого $ПО_{НТ}$ і $ПО_{ВТ,АК}$ (витрати повітря 40 кг/с) упродовж 8–10.07.2015, м. Вознесенськ, Миколаївська обл.)

=16750 кВт·год) і наявність резерву холоду $\Sigma Q_{0,ВТ17АК(24)изб} = 500$ кВт·год для подальшого покриття дефіциту холоду упродовж 2-ї і 3-ї доби.

Таким чином, наявність бустерного ступеня додаткового холодопостачання від акумулятора $АК_{НТ}$ завдяки адаптації до поточних кліматичних умов забезпечує отримання ефекту у вигляді економії палива при зменшеній приблизно на 30 % встановленій (проектній) холодопродуктивності АБХМ, відповідно і вартості АБХМ для самих теплонапружених умов експлуатації в літні місяці.

Висновки

В результаті комп'ютерного моделювання процесів двоступеневого охолодження повітря на вході газотурбінної установки абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною, що використовує скидну теплоту відпрацьованих газів, отримано дані з резерву холодопродуктивності при знижених теплових навантаженнях на повітроохолоджувачі з його використанням при підвищених теплових наванта-

женнях у бустерному ступені та наступним охолодженням повітря абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною у другому ступені.

Завдяки використанню резерву холодопродуктивності скорочується встановлена холодопродуктивність АБХМ на 30...40 %, відповідно і вартість 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] / S. Popli, P. Rodgers, V. 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] / S. Popli, P. Rodgers, V. Eveloy // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – № 50. – P. 918–931.

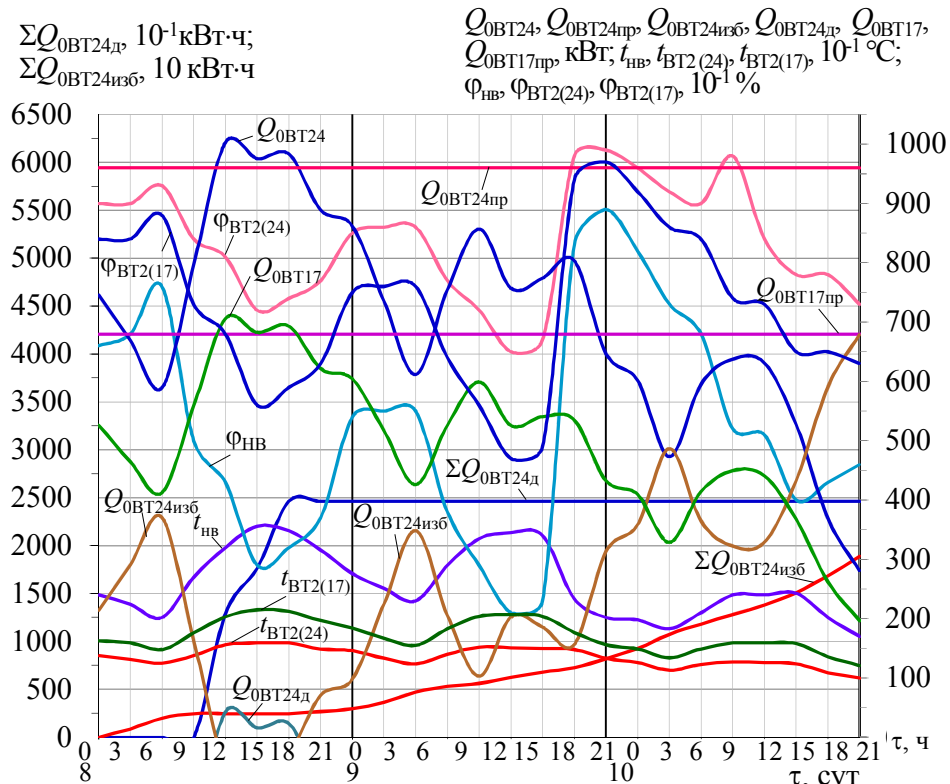


Рис. 3. Поточні значення температури $t_{нв}$ і відносної вологості $\phi_{нв}$ навколишнього повітря, температури повітря $t_{BT2(24)}$ і $t_{BT2(17)}$ на виході з ПОВТ базових варіантів (без бустерного ступеня і акумулятора холоду при $Q_{0.BT24пр} = 960$ кВт і $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт), його відносної вологості $\phi_{BT2(24)}$ і $\phi_{BT2(17)}$, теплових навантажень $Q_{0.BT24}$ і $Q_{0.BT17}$ на базові ПОВТ і ПО_{НТ} ($Q_{0.BT24пр} = 960$ кВт і $Q_{0.BT17пр} = 680$ кВт), надлишку (невикористаної) холодопродуктивності АБХМ $Q_{0BT24изб}$ для базових ПОВТ і ПО_{НТ} ($Q_{0.BT24пр} = 960$ кВт), дефіциту холодопродуктивності АБХМ $Q_{0BT24д}$ для базових ПОВТ і ПО_{ВТ}, а також сумарного по нарощуванню надлишку (невикористаного) холоду АБХМ $\Sigma Q_{0BT24изб}$ для базових ПОВТ і ПО_{ВТ} ($Q_{0.BT24пр} = 960$ кВт), дефіциту холодопродуктивності АБХМ $\Sigma Q_{0BT24д}$ для базових ПОВТ і ПО_{ВТ} (витрата повітря 40 кг/с, витрата холодної води 80 т/год) упродовж 3 діб (8–10.07.2015, м. Вознесенськ, Миколаївська обл.)

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.

4. Моделирование процессов получения конденсата при хлаждении воздуха на входе газотурбинной установки [Текст] / А. Н. Радченко, Б. С. Портной, А. И. Прядко, С. А. Кантор // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2017. – № 3 (83). – С. 62–67.

5. Hans Güntner GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.guntner.de>; <http://www.guentner.de>: Güntner Product Calculator-12.10.2017.

6 Alfa Laval [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alfalaval.ru>: Palladio. – 12.10.2017.

7. Zanotti [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zanotti.com/ru>: Zanotti software. 12.10.2017.

8. Meteomanz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meteomanz.com>: Meteomanz. – 12.10.2017.

References

1. Popli, Sahil., Rodgers, Peter., Eveloy, 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., 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 teplovy nagruzky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompresornykh 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 tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 5 (122), pp. 61–64.

4. Radchenko, A. N., Portnoy, B. S., Prjadko, A. I., Kantor, S. A. Modelirovanie procesov poluchenija kondensata pry okhlazhdenii vozdukha na vhode gazoturbinnoy ustanovky [Simulation of condensate

producing processes during gas turbine unit intake air cooling]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi - Radio-electronic and computer systems*, 2017, no. 3 (83), pp. 62–67.

5. *Hans Güntner GmbH*. Available at: <http://www.guntner.su/>; <http://www.guentner.de/>: Güntner Product Calculator (accessed 12.10.2017).

6. *Alfa Laval*. Available at: <https://www.alfalaval.ru/>: Palladio (accessed 12.10.2017).

7. *Zanotti*. Available at: <http://zanotti.com/ru/>: Zanotti software (accessed 12.10.2017).

8. *Meteomanz*. Available at: <http://www.meteomanz.com/>: Meteomanz (accessed 12.10.2017).

Поступила в редакцию 2.11.2017, рассмотрена на редколлегии 22.11.2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗЕРВА ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В БУСТЕРНОМ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕ

А. Н. Радченко, Н. И. Радченко, С. А. Кантор, Б. С. Портной, А. И. Прядко

Путем компьютерного моделирования процессов 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 воздухоохладители. В результате анализа полученных данных обоснована целесообразность использования резерва холодопроизводительности для предварительного охлаждения воздуха в бустерной ступени при повышенных тепловых нагрузках на воздухоохладители и сокращению установленной холодопроизводительности бромистолитиевой холодильной машины.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, охлаждение воздуха, тепловая нагрузка, резерв холодопроизводительности, бустерный воздухоохладитель, бромистолитиевая холодильная машина.

SIMULATION OF COOLING AIR PROCESSES BY ABSORPTION LITHIUM-BROMIDE CHILLER WITH USING A SURPLUS REFRIGERATION CAPACITY IN BUSTER AIR COOLER

A. N. Radchenko, N. I. Radchenko, S. A. Kantor, B. S. Portnoi, A. I. Prjadko

The heat-humidity processes of gas turbine unit intake air cooling to the temperature of above 15 °C with the use of a cold water at the temperature of about 10 °C as a coolant and the absorption lithium-bromide chiller utilizing the turbine exhaust gas waste heat as a thermotransformer has been analyzed for daily changing ambient air temperatures and changeable heat loads on the air coolers as consequence. The computer programs of the firms-producers of heat exchangers were used for gas turbine unit intake air cooling processes simulation. It is shown that at decreased heat loads on the air cooler a surplus cooling capacity of the absorption lithium-bromide chiller exceeding current heat loads is generated which can be used for covering an increased heat loads on the air cooler and to reduce the cooling capacity of the absorption lithium-bromide chiller applied. To solve this task the cooling capacity required for gas turbine unit intake air cooling are compared with the surplus cooling capacity of the absorption lithium-bromide chiller exceeding current heat loads summarized during some period.

The system of two-stage gas turbine unit intake air cooling with a buster stage of precooling air to the temperature of about 15 °C and a base stage of further cooling air to the temperature of about 15 °C by absorption lithium-bromide chiller as the base stage has been proposed. The water for a buster stage of precooling air is cooled by using the surplus cooling capacity of the absorption lithium-bromide chiller during decreased heat loads on the two-stage gas turbine unit intake air cooler and is collected in the thermal accumulator for the use during increased heat loads on the air cooler. The results of gas turbine unit intake air cooling processes simulation proved the reduction of cool-

ing capacity of the absorption lithium-bromide chiller applied by 30-40 % due to the use of a buster stage of pre-cooling air at the expense of the surplus cooling capacity of absorption lithium-bromide chiller saved in the thermal accumulator. So the main conclusion has been made about the efficient use of such a two-stage air cooling with a buster stage of precooling air by surplus cooling capacity from the thermal accumulator and a base stage for further cooling air to the temperature of about 15 °C by an absorption lithium-bromide chiller as a perspective approach in refrigeration.

Keywords: computer simulation, heat load, surplus cooling capacity, buster air cooler, absorption lithium-bromide chiller.

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

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., 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:

Прядко Олександр Ігорович – аспірант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: clubmania@mail.com.

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

Radchenko Nikolai Ivanovich – Doctor of Technical Science, 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:

Prjadko Alexandr Igorevich – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: clubmania@mail.com.