

УДК 621.438.1:621.57:004.94

А. М. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, С. А. КАНТОР<sup>2</sup>, В. С. ТКАЧЕНКО<sup>2</sup>,  
Б. С. ПОРТНОЙ<sup>1</sup>, О. І. ПРЯДКО<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна<sup>2</sup> ПАТ "Завод "Екватор", Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ З АКУМУЛЯЦІЄЮ ТА ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗЕРВУ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ ЕЖЕКТОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ У БУСТЕРНОМУ ПОВІТРООХОЛДЖУВАЧІ

Шляхом комп'ютерного моделювання процесів двоступеневого охолодження повітря на вході газотурбінної установки хладоною ежекторною холодильною машиною, що використовує скидку теплоту відпрацьованих газів, отримано дані з поточних витрат і резерву холодопродуктивності, який утворюється при знижених теплових навантаженнях на повітроохолоджувачі. Моделювання проведено з використанням комп'ютерних програм фірм-розробників теплообмінного обладнання. За результатами аналізу отриманих даних обґрунтовано доцільність використання резерву холодопродуктивності для попереднього охолодження повітря водою в бустерному ступені при підвищених теплових навантаженнях та скорочення встановленої холодопродуктивності.

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

### 1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Підвищити ефективність газотурбінних установок (ГТУ) при високих температурах навколишнього повітря на вході  $t_{\text{вв}}$  можна шляхом його охолодження тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), що трансформують в холод теплоту відпрацьованих газів [1, 2]. Найпростішими є ежекторні холодильні машини (ЕХМ), в яких можливе глибоке охолодження повітря до температури  $t_{\text{в2}} = 10^\circ\text{C}$  і нижче [3, 4]. Відповідно до поточних параметрів зовнішнього повітря суттєво змінюється теплове навантаження на ПО, а відтак і холодопродуктивність ЕХМ. При знижених теплових навантаженнях утворюється резерв (надлишок порівняно зі встановленою) холодопродуктивності ЕХМ, який доцільно використовувати для покриття її дефіциту при підвищених навантаженнях.

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

### 2. Результати дослідження

За базовий прийнято двоступеневий хладоновый ПО з високотемпературним ПО<sub>ВТ</sub> і низько-

температурним ПО<sub>НТ</sub> хладоновими ступенями (без використання резерву холодопродуктивності ТХМ), з яким порівнювали розроблений варіант хладонового ПО<sub>НТ</sub> з бустерним ступенем ПО<sub>Б</sub> попереднього водяного охолодження повітря, в якому як холодоносій використовують воду з температурою  $t_{\text{в2}} \approx 5 \dots 7^\circ\text{C}$ , яку в свою чергу отримують за рахунок резервної холодопродуктивності ЕХМ (рис. 1).

Програми [5-7] фірм-розробників (зокрема провідної "Guntner" [5]) призначені для проектування і вибору теплообмінників для конкретного теплового навантаження, а не для моделювання їх роботи при змінних кліматичних умовах. То ж було розроблено програму [4] підготовки вихідних даних для цих програм (при змінних поточних параметрах зовнішнього повітря, обчислених за програмою, наприклад "meteomanz" [8]) і обробки результатів розрахунків характеристик процесів охолодження повітря. Похибка розрахунків не перевищувала 3 %.

Значення надлишкової (невикористаної при знижених теплових навантаженнях) питомої (на одиницю витрати повітря  $G_{\text{п}} = 1 \text{ кг/с}$ ) холодопродуктивності ЕХМ визначали як  $q_{0,\text{HT24изб}} = q_{0,\text{HT24пр}} - q_{0,\text{HT24}} = 24 - q_{0,\text{HT24}}$ , кВт/(кг/с), відповідно сумарної по нарощуванню кількості надлишкового (резервного) холоду, генерованого в ЕХМ, сакумульованого й використаного для ПО<sub>ВТ</sub>, що припадає на одиницю

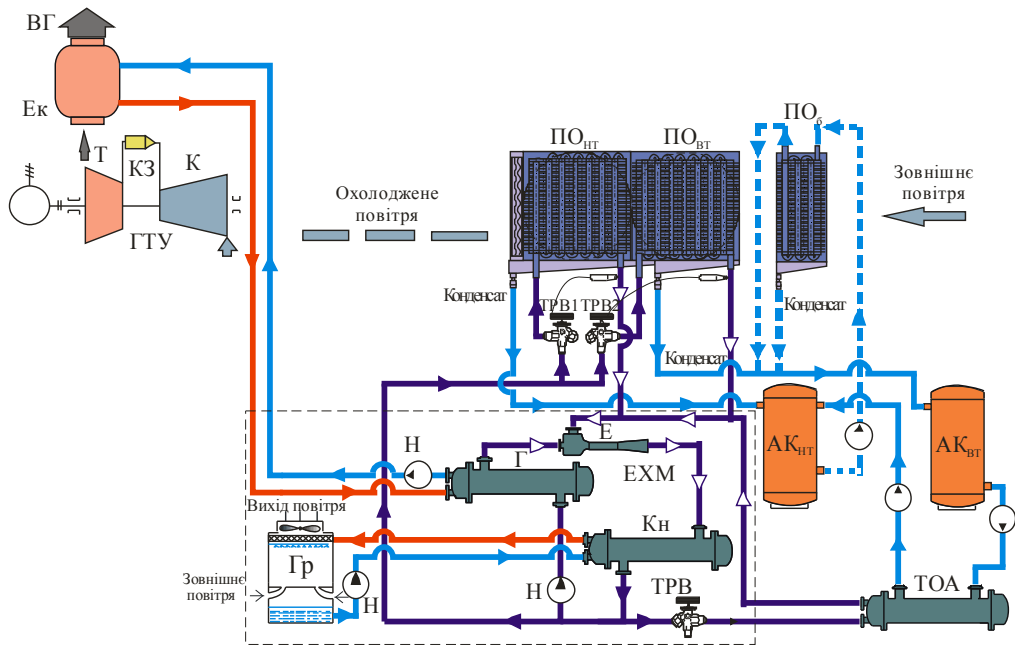


Рис. 1. Принципова схема системи охолодження повітря на вході ГТУ з використанням резервної холодопродуктивності ЕХМ у бустерному ступені двоступеневого ПО: К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; ВГ – відпрацьовані гази; Ек – економайзер нагріву води для ЕХМ; ПО<sub>ВТ</sub> і ПО<sub>НТ</sub> – високо- і низькотемпературний хладонові ступені ПО; ПО<sub>б</sub> – повітроохолоджувач бустерний (охолодженням конденсатом); АК<sub>ВТ</sub> і АК<sub>НТ</sub> – високо- і низькотемпературний акумулятори конденсату; ТОА – теплообмінний апарат; Е – ежектор; Г – генератор; Кн – конденсатор; ТРВ – терморегулюючий вентиль

витрати повітря  $G_{п} = 1 \text{ кг/с}$ , як

$$\sum q_{0.ВТ.АК} = \sum (q_{0.НТ24\text{изб}} \cdot \tau),$$

а сумарних по нарощуванню за 3 доби витрат холоду  $\sum q_{0.ВТ10}$ , необхідного для ПО<sub>ВТ</sub>, як  $\sum q_{0.ВТ10} = \sum (q_{0.ВТ10} \cdot \tau)$ .

Параметри повітря і теплові навантаження при охолодженні повітря в базовому хладоновому двоступеневому ПО і резерви холодопродуктивності поточні  $q_{0.НТ24\text{изб}}$  та їх сумарні  $\sum q_{0.ВТ.АК}$  по нарощенню величини за 3 доби (8–10.07.2015) і витрати холоду ЕХМ на охолодження повітря у хладоновому високотемпературному ступені ПО<sub>ВТ</sub>  $\sum q_{0.ВТ10}$ , який підлягає заміщенню ступенем водяного охолодження з використанням резерву холодопродуктивності  $\sum q_{0.ВТ.АК}$ , наведено на рис. 2.

Як показують результати порівняльного аналізу теплових характеристик розробленого двоступеневого ПО комбінованого типу з бустерним водяним ступенем ПО<sub>ВТ</sub>, який використовує надлишковий холод замість базового хладонового високотемпературного ступеня ПО<sub>ВТ</sub>, та базового хладонового двоступеневого ПО, наведені на рис. 3, сумарний за 3 доби (8–10.07.2015) резерв холодопродуктивності ЕХМ  $\sum q_{0.ВТ.АК}$  перевищує її витрати  $\sum q_{0.ВТ10}$  на попереднє охолодження повітря в хладоновому

ПО<sub>ВТ</sub> для кліматичних умов м. Вознесеньск, Миколаївська обл., при проектних питомих теплових навантаженнях  $q_{0.ВТ.пр} = 10 \text{ кВт/(кг/с)}$  на ПО<sub>ВТ</sub> і  $q_{0.НТ.пр} = 24 \text{ кВт/(кг/с)}$  на ПО<sub>НТ</sub>.

Внаслідок більш глибокого охолодження температура повітря  $t_{ВТ2АК}$  на виході з бустерного водяного ПО<sub>ВТ</sub>, який використовує надлишковий холод, нижче за температуру повітря  $t_{ВТ2}$  на виході з базового хладонового високотемпературного ступеня ПО<sub>ВТ</sub> (без використання резервної надлишкової холодопродуктивності ЕХМ). Відповідно до зниження  $t_{ВТ2АК}$  (на вході ПО<sub>НТ</sub>) зменшується теплове навантаження на ПО<sub>НТ</sub>:  $q_{0.НТ24АК} < q_{0.НТ24}$ .

Таким чином, наявність бустерного ступеня додаткового холодопостачання від акумулятора АК<sub>НТ</sub> 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 хладоною ежекто-

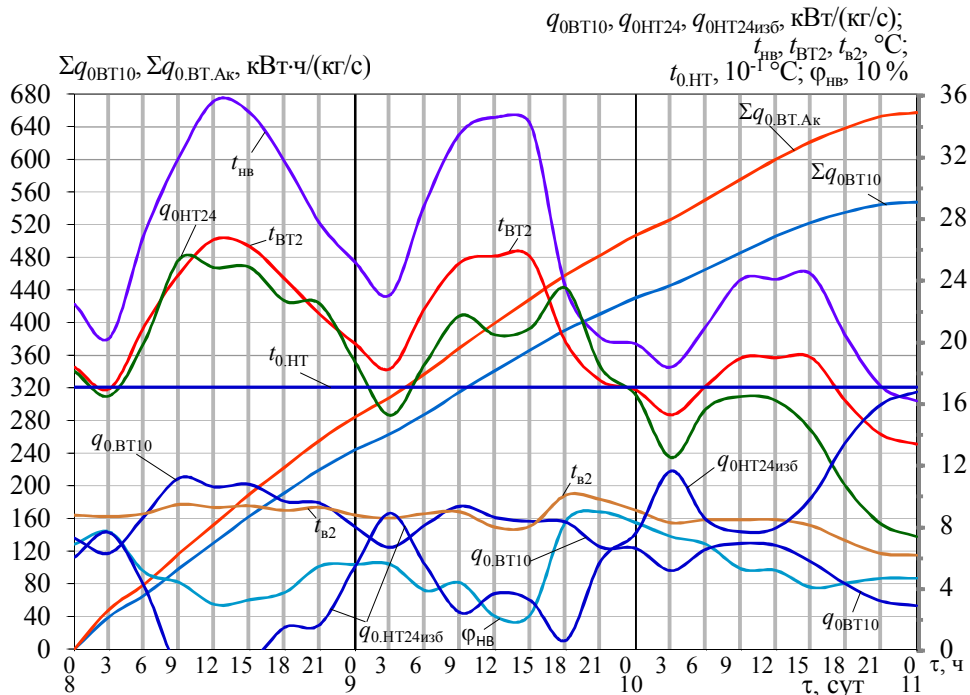


Рис. 2. Поточні значення температури  $t_{\text{нв}}$  і відносної вологості  $\varphi_{\text{нв}}$  навколишнього повітря, температури повітря  $t_{\text{BT2}}$  на виході з базового хладонового ступеня  $\text{ПО}_{\text{BT}}$  і  $t_{\text{B2}}$  на виході з хладонового ступеня  $\text{ПО}_{\text{HT}}$ , киплячого хладоноу  $t_{0,\text{HT}}$  в  $\text{ПО}_{\text{HT}}$  ( $t_{0,\text{BT}}$  в  $\text{ПО}_{\text{BT}}$ ), питомі поточні теплові навантаження  $q_{0,\text{VT10}}$  на  $\text{ПО}_{\text{BT}}$  і  $q_{0,\text{HT24}}$  на  $\text{ПО}_{\text{HT}}$ , резерви невикористаної холодопродуктивності ЕХМ  $q_{0,\text{HT24изб}}$ , сумарні по нарощуванню за 3 доби кількості резервного холоду, генерованого в ЕХМ, для  $\text{ПО}_{\text{BT}}$   $\Sigma q_{0,\text{VT,AK}}$ , витрати холоду  $\Sigma q_{0,\text{VT10}}$ , необхідного для  $\text{ПО}_{\text{BT}}$ , при проектних питомих теплових навантаженнях  $q_{0,\text{BT}} = 10 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{с})$  на  $\text{ПО}_{\text{BT}}$ ,  $q_{0,\text{HT}} = 24 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{с})$  на  $\text{ПО}_{\text{HT}}$  і  $q_0 = 34 \text{ кВт}/(\text{кг}/\text{с})$  на весь базовий хладоновий двоступеневий ПО (витрата повітря  $40 \text{ кг}/\text{с}$ ) упродовж 3 діб (8–10.07.2015, м. Вознесенськ, Миколаївська обл.)

рною 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 навантаженнях у бустерному водяному ступені та глибоким охолодженням повітря в хладоновому ступені.

В результаті заміщення хладонового високо-температурного ступеня  $\text{ПО}_{\text{BT}}$  базового хладонового двоступеневого ПО бустерним водяним ступенем  $\text{ПО}_{\text{BT}}$  вдосконаленого двоступеневого ПО комбінованого типу можна скоротити встановлену (проектну) холодопродуктивність ЕХМ на 30...40 % порівняно з базовою для хладонового двоступеневого ПО, а відтак і вартість ЕХМ.

## 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. 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] / S. Popli, P. Rodgers, V. 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.

4. Моделирование процессов получения конденсата при охлаждении 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.su/>; <http://www.guentner.de/>; Güntner Product Calculator-12.10.2017.

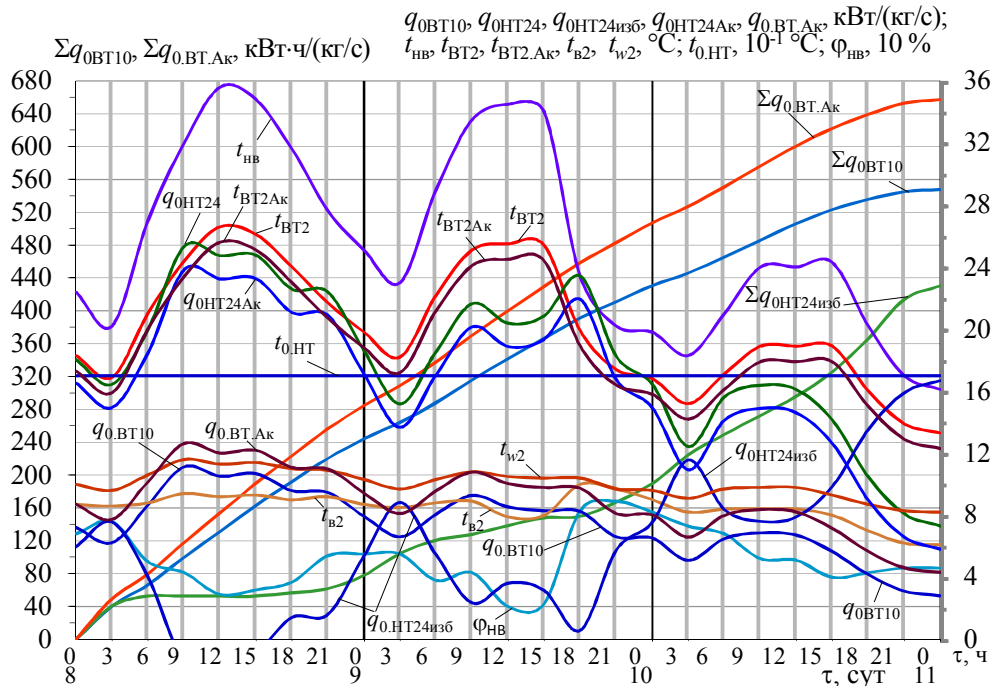


Рис. 3. Поточні значення температури  $t_{нв}$  і відносної вологості  $\varphi_{нв}$  навколишнього повітря, температури повітря  $t_{в2,ак}$  на виході з бустерного водяного високотемпературного ступеня  $ПО_{вТ}$ , який використовує надлишковий холод, та повітря  $t_{в2}$  на виході з базового хладонового високотемпературного ступеня  $ПО_{вТ}$ , температури повітря  $t_{в2}$  на виході з хладонового низькотемпературного  $ПО_{нт}$ , температури киплячого хладоноу  $t_{0,нт}$  в  $ПО_{нт}$ , значення поточних теплових навантажень  $q_{0,вТ,ак}$  на  $ПО_{вТ}$  і  $q_{0,нт,24,ак}$  на  $ПО_{нт}$  (з використанням резервного надлишкового холоду в бустерному  $ПО_{вТ}$ ) та  $q_{0,вТ,10}$  на  $ПО_{вТ}$  і  $q_{0,нт,24}$  на  $ПО_{нт}$  (без використання резервного надлишкового холоду в  $ПО_{вТ}$ ), надлишкової (резервної при знижених теплових навантаженнях) холодопродуктивності ЕХМ  $q_{0,нт,24,изб}$ , сумарної по нарощуванню кількості надлишкового (резервного) холоду, генерованого в ЕХМ, закумуляованого й використаного для  $ПО_{вТ}$   $\Sigma q_{0,вТ,ак}$ , сумарних по нарощуванню за 3 доби витрат холоду  $\Sigma q_{0,вТ,10}$ , необхідного для  $ПО_{вТ}$ , при проектних питомих теплових навантаженнях  $q_{0,вТ} = 10$  кВт/(кг/с) на  $ПО_{вТ}$ ,  $q_{0,нт} = 24$  кВт/(кг/с) на  $ПО_{нт}$  і  $q_0 = 34$  кВт/(кг/с) на весь ПО (витрата повітря 40 кг/с) упродовж 3 діб (8–10.07.2015, м. Вознесенськ, Миколаївська обл.)

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 vozdukh 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 tehnologia - 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 vozdukh 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 редакцію 05.11.2017, рассмотрена на редколлегии 22.11.2017*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА С АККУМУЛЯЦИЕЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗЕРВА ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ В БУСТЕРНОМ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕ

*А. Н. Радченко, С. А. Кантор, В. С. Ткаченко, Б. С. Портной, А. И. Прядко*

Путем компьютерного моделирования процессов двухступенчатого охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки хладоновой эжекторной холодильной машиной, использующей сбросную теплоту отработавших газов, получены данные по текущим расходам и резерву холодопроизводительности, который образуется при пониженных тепловых нагрузках на воздухоохладители. Моделирование проведено с использованием компьютерных программ фирм-разработчиков теплообменного оборудования. В результате анализа полученных данных обоснована целесообразность использования резерва холодопроизводительности для предварительного охлаждения воздуха водой в бустерной ступени при повышенных тепловых нагрузках на воздухоохладители и сокращение установленной холодопроизводительности.

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

## SIMULATION OF COOLING AIR PROCESSES WITH ACCUMULATION AND USING A SURPLUS EJECTOR CHILLER REFRIGERATION CAPACITY IN BUSTER AIR COOLER

*A. N. Radchenko, S. A. Kantor, V. S. Tkachenko, B. S. Portnoi, A. I. Prjadko*

The heat-humidity processes of gas turbine unit intake air deep cooling to the temperature of 10 °C and lower with the use of refrigerant boiling at the temperature of about 4-6 °C as a coolant and the ejector 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 cooler 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 refrigeration capacity of the ejector 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 refrigeration capacity of the ejector chiller applied. To solve this task the refrigeration capacity required for gas turbine unit intake air cooling are compared with the surplus refrigeration capacity of the ejector chiller exceeding current heat loads summarized during some time period.

The system of two-stage gas turbine unit intake air cooling of combined type with a buster water stage of pre-cooling air to the temperature of about 15 °C and refrigerant stage of further deep cooling air to the temperature of about 10 °C by refrigerant ejector chiller as the low temperature cooling stage has been proposed. The water for a buster stage of precooling air is cooled by using the surplus refrigeration capacity of the ejector 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 refrigeration capacity of the ejector chiller applied by 30-40 % due to the use of a buster water stage of precooling air at the expense of the surplus ejector chiller refrigeration capacity served in the thermal accumulator. So the main conclusion has been made about the efficient use of such a two-stage air cooling of combined type with a buster water stage of precooling air by surplus refrigeration capacity from the thermal accumulator and refrigerant stage for further deep cooling air to the temperature of about 10 °C and lower by a refrigerant chiller as the low temperature cooling stage as a perspective approach in refrigeration.

**Keywords:** computer simulation, heat load, surplus refrigeration capacity, buster water air cooler, ejector chiller.

**Радченко Андрій 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.

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

**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 Dept. of Ship Electroenergetic Systems, 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.

**Tkachenko Veniamin Sergeevich** – Engineer, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btd@zavod-ekvator.com.

**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.