

УДК 621.438-714:621.57

doi: 10.32620/aktt.2020.4.03

А. М. РАДЧЕНКО<sup>1</sup>, Б. С. ПОРТНОЙ<sup>1</sup>, С. А. КАНТОР<sup>2</sup>,  
А. І. ПРЯДКО<sup>1</sup>, І. В. КАЛІНІЧЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна

<sup>2</sup> ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна

<sup>3</sup> Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,  
Херсонська філія, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГТД ХОЛОДИЛЬНИМИ МАШИНАМИ ШЛЯХОМ АКУМУЛЯЦІЇ ХОЛОДУ

Досліджено ефективність охолодження повітря на вході газотурбінних двигунів тепловикористовуючими холодильними машинами, які трансформують теплоту відпрацьованих газів газотурбінних двигунів в холод, при змінних кліматичних умовах експлуатації. Розглянуто застосування комбінованої абсорбційно-ежекторної тепловикористовуючої холодильної машини зі ступеневим принципом охолодження повітря на вході газотурбінних двигунів: попереднім до 15°C – абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною (АБХМ), яка використовується у якості високотемпературного ступеня охолодження повітря, і подальшим охолодженням до 10°C – хладоновою ежекторною холодильною машиною (ЕХМ) як низькотемпературним ступенем охолодження. Виявлено резерви скорочення проектної (встановленої) холодопродуктивності холодильних машин шляхом акумуляції надлишку холоду при знижених поточних теплових навантаженнях з його використанням при підвищених теплових навантаженнях. При цьому проектну (встановлену) холодопродуктивність холодильних машин визначали двома методами: перший – виходячи з близького до максимального скорочення річного споживання палива, другий – за максимальним темпом приросту скорочення річного споживання палива. Запропонована схема системи охолодження повітря на вході газотурбінних двигунів з використанням резерву холодопродуктивності АБХМ, яка забезпечує попереднє охолодження зовнішнього повітря на вході газотурбінних двигунів у бустерному ступені з використанням накопиченого надлишку холодопродуктивності АБХМ. Надлишок холодопродуктивності АБХМ, який утворюється при знижених теплових навантаженнях на повітроохолоджувачі на вході газотурбінних двигунів, накопичується у холодоакумуляторі та витрачається при підвищених теплових навантаженнях. Результати моделювання показують доцільність застосування системи охолодження повітря на вході газотурбінного двигуна з використанням накопиченого надлишку холодопродуктивності АБХМ, що дозволяє зменшити проектну (встановлену) холодопродуктивність АБХМ приблизно на 40%.

**Ключові слова:** охолодження повітря; тепловикористовуюча холодильна машина; теплова потужність; резерв холодопродуктивності; скорочення споживання палива.

### 1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Охолодження повітря на вході газотурбінних двигунів (ГТД) тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), які утилізують скидку теплоту відхідних газів, є одним з основних напрямів підвищення їх паливної ефективності [1]. В найбільш поширених абсорбційних бромистолітєвих холодильних машинах (АБХМ) охолодження повітря можливе до 15°C [2]. Більше зниження його температури до 10°C забезпечують хладонові ежекторні холодильні машини (ЕХМ). Проте їх тепловий коефіцієнт  $\zeta_{\text{ЕХМ}} = 0,2 \dots 0,3$  [3] значно нижчий ніж у АБХМ  $\zeta_{\text{АБХМ}} = 0,7 \dots 0,8$  [4]. Тому була запропонована комбінована абсорбційно-ежекторна холодильна

машина (АЕХМ) для двоступеневого охолодження повітря: до 15°C з використанням АБХМ і до 10°C – ЕХМ [5]. Охолодження повітря на вході ГТД при змінних упродовж року кліматичних умовах експлуатації супроводжується значними коливаннями теплового навантаження на ТХМ, передусім АБХМ.

**Мета** дослідження – підвищення ефективності охолодження повітря на вході ГТД шляхом акумуляції надлишку холодопродуктивності АБХМ при знижених теплових навантаженнях з подальшим його використанням при підвищених навантаженнях.

### 2. Результати дослідження

Принципові схеми традиційного із застосуванням АБХМ та запропонованого двоступеневого

охолодження повітря на вході ГТД комбінованою АЕХМ з накопиченням надлишку холодопродуктивності АБХМ та подальшим його використанням при підвищених теплових навантаженнях подано на рис. 1.

Проектну холодопродуктивність холодильних машин визначають за питомим (при  $G_n = 1$  кг/с) річним скороченням споживання палива  $\Sigma(\Delta b_e \cdot \tau)$ . Для кліматичних умов експлуатації ГТД на Південнобузькій компресорній станції (КС) при охолодженні повітря до  $15^\circ\text{C}$  за раціональну приймають проектну питому холодопродуктивність АБХМ

$q_{0.15\text{рац}} = 24$  кДж/кг, при якій темп нарощування питомої річної економії палива  $\Sigma(\Delta b_e \cdot \tau)$  зберігається високим, а при охолодженні до  $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$  в АЕХМ –  $q_{0.10\text{рац}} = 34$  кДж/кг (рис. 2, а). Проте, раціональна проектна холодопродуктивність, очевидно, залежить, оскільки упродовж більшої частини року вона вище за поточні теплові навантаження на ПО. Тому доцільно визначити проектну холодопродуктивність, яка забезпечує максимальний темп прирощення скорочення річного споживання палива (рис. 2, б).

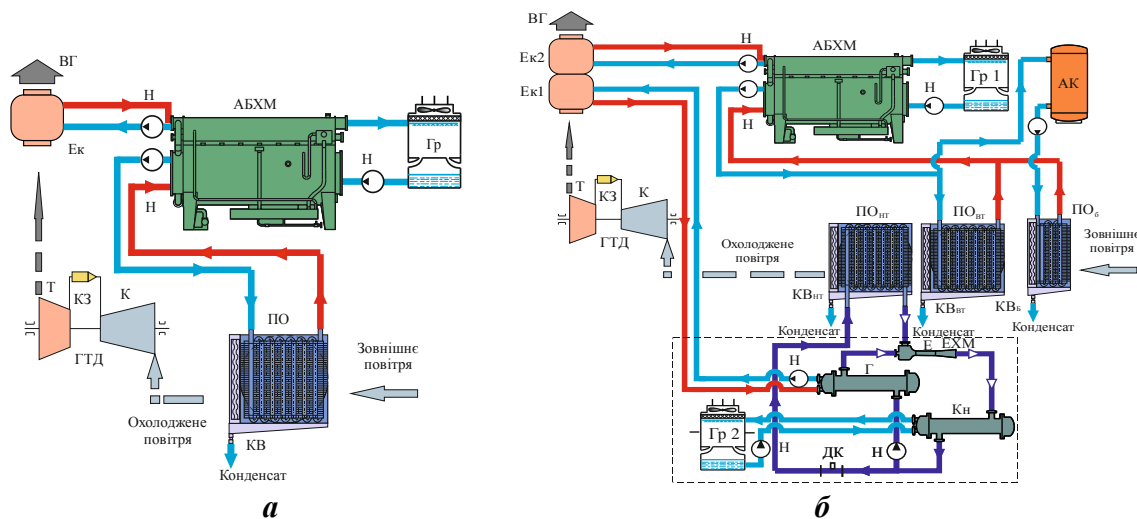


Рис. 1. Принципові схеми традиційного із застосуванням АБХМ (а) та запропонованого двоступеневого охолодження повітря на вході ГТД комбінованою АЕХМ з використанням накопиченого надлишку холодопродуктивності АБХМ у бустерному ступені ПОБ (б): ВГ – відпрацьовані газы; Ек – економайзер нагріву води; К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння; Н – насос; Гр – градирня охолодження оборотної води; АК – акумулятор холоду; ПОБ, ПОВТ (ПО), ПОНТ – бустерний, високо- та низькотемпературний повітроохолоджувачі; КВБ, КВВТ (КВ), КВНТ – бустерний, високо- та низькотемпературний краплевідокремлювачі; Г – генератор ЕХМ; Е – ежектор; Кн – конденсатор; ДК – дросельний клапан

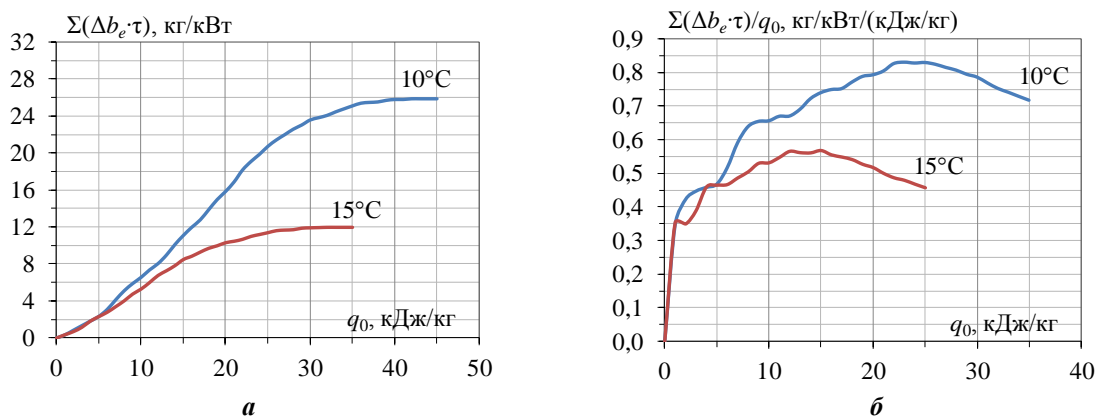


Рис. 2. Значення питомого річного скорочення споживання палива  $\Sigma(\Delta b_e \cdot \tau)$  в залежності від проектної питомої холодопродуктивності  $q_0$  (а) та річного скорочення споживання палива  $\Sigma(\Delta b_e \cdot \tau) / q_0$ , віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності  $q_0$ , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності  $q_0$  при температурах охолодженого повітря 10 і  $15^\circ\text{C}$  за 2017 р. для кліматичних умов Південнобузької КС

Для досліджуваних кліматичних умов експлуатації ГТД при охолодженні повітря до 15 °С максимальний темп приросту питомого річного скорочення споживання палива забезпечує проектна холодопродуктивність АБХМ  $q_{0.15\text{опт}} = 14$  кДж/кг, а при охолодженні до 10 °С в АЕХМ –  $q_{0.10\text{опт}} = 24$  кДж/кг. Оскільки необхідна холодо-продуктивність ЕХМ при охолодженні повітря від 15 °С до 10 °С за обома методами дорівнює  $q_{0.ЕХМ} = q_{0.10} - q_{0.15} = 10$  кДж/кг, то вона обирається проектною. А для АБХМ проектною обирається та, яка забезпечує максимальний темп приросту питомого річного скорочення споживання палива  $q_{0.АБХМ} = 14$  кДж/кг, тоді як залишок проектної холодопродуктивності, у порівнянні з раціональною  $q_{0.15\text{рац}} = 24$  кДж/кг, реалізується у бустерному ступені  $q_{0.Б} = q_{0.15\text{рац}} - q_{0.АБХМ} = 10$  кДж/кг з використанням надлишку холодопродуктивності АБХМ. Таким чином, при охолодженні повітря на вході ГТД до 10 °С загальна проектна холодопродуктивність забезпечує раціональну величину  $q_{0.10\text{рац}} = 34$  кДж/кг.

Результати моделювання охолодження повітря на вході ГТД UGT 10000 ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" (потужність  $N_e = 10$  МВт, витрата повітря  $G_n = 40$  кг/с) для кліматичних умов Південнобузької КС, Миколаївська обл., упродовж 3 діб (19-21.07.2017) наведено на рис. 3.

Як видно з рис. 3, використання надлишку холодопродуктивності забезпечує охолодження

повітря до 15 °С при проектній холодопродуктивності АБХМ  $Q_{0.ВТпр} = q_{0.АБХМ} \cdot G_n = 14 \cdot 40 = 560$  кВт, що менше ніж її раціональна величина  $q_{0.15\text{рац}} \cdot G_n = 24 \cdot 40 = 960$  кВт приблизно на 40%. При цьому основну частину часу бустерний ПОБ не працює, що доводить доцільність зменшення проектної холодопродуктивності АБХМ  $Q_{0.ВТпр}$  навіть в літні місяці. Водночас, необхідно відзначити наявність значного надлишку  $Q_{0.НТн}$  холодопродуктивності ЕХМ ( $Q_{0.НТ} < Q_{0.НТпр}$ ).

На рис. 4 наведені результати розрахунку накопиченого надлишку холодопродуктивності АБХМ  $\Sigma Q_{0.ВТн}$  та ЕХМ  $\Sigma Q_{0.НТн}$ , а також кількість холоду  $\Sigma Q_{0.Б}$ , що використовується бустерним ступенем охолодження повітря ПОБ. Кількість накопиченого надлишку холодопродуктивності АБХМ  $\Sigma Q_{0.ВТн}$ , значно перевищує необхідну кількість холоду  $\Sigma Q_{0.Б}$ , для бустерного ступеня ПОБ, що свідчить про можливість його подальшого використання шляхом зменшення проектної холодопродуктивності АБХМ нижче  $Q_{0.ВТпр} = 560$  кВт та збільшення проектної потужності  $Q_{0.Бпр}$  вище  $Q_{0.Бпр} = q_{0.Б} \cdot G_n = 400$  кВт, тобто перерозподілом теплового навантаження між ступенями. Наявність великого, понад 9 МВт·год, накопиченого за три доби надлишку холодопродуктивності  $\Sigma Q_{0.НТн}$  ЕХМ потребує теж розробки шляхів його використання або уточнення методів визначення проектної холодопродуктивності ЕХМ при охолодженні повітря від 15 °С до 10 °С на вході ГТД.

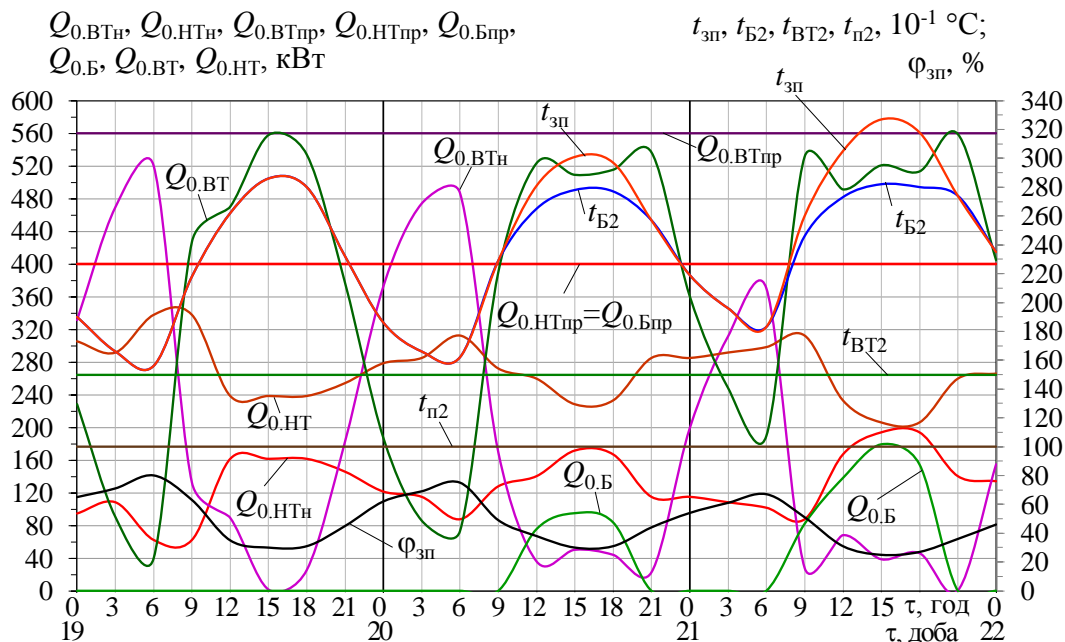


Рис. 3. Поточні значення температури  $t_{зп}$  та відносної вологості  $\phi_{зп}$  зовнішнього повітря, температури повітря на виході з бустерного  $t_{Б2}$ , високотемпературного  $t_{ВТ2}$  та низькотемпературного  $t_{НТ}$  ступенів, проектної холодопродуктивності АБХМ  $Q_{0.ВТпр}$ , ЕХМ  $Q_{0.НТпр}$ , а також холодопродуктивності бустерного ступеня охолодження  $Q_{0.Б}$ , поточного теплового навантаження на бустерний  $Q_{0.Б}$ , високотемпературний  $Q_{0.ВТ}$  та низькотемпературний  $Q_{0.НТ}$  ПО, поточний надлишок холодопродуктивності АБХМ  $Q_{0.ВТн}$  та ЕХМ  $Q_{0.НТн}$  при охолодженні повітря упродовж трьох діб (19-21.07.2017)

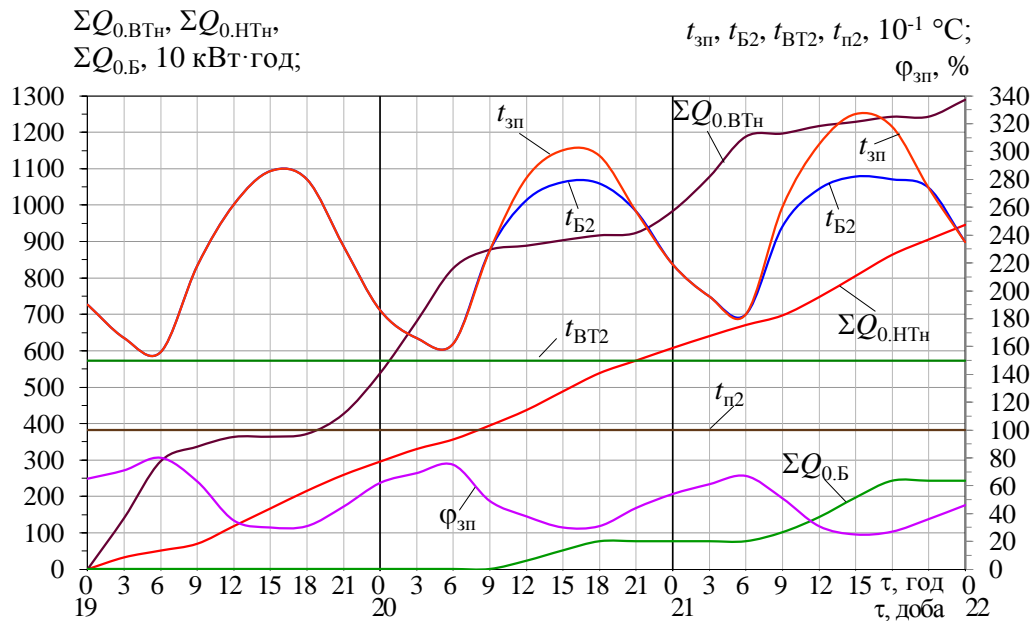


Рис. 4. Поточні показники температури  $t_{зп}$  та відносної вологості  $\phi_{зп}$  зовнішнього повітря, температури повітря на виході з бустерного  $t_{Б2}$ , високо-  $t_{БТ2}$  та низькотемпературного  $t_{п2}$  ступенів, сумарної по накопиченню надлишку холодопродуктивності АБХМ  $\Sigma Q_{0,БТН}$  та ЕХМ  $\Sigma Q_{0,НТН}$ , а також кількості холоду  $\Sigma Q_{0,Б}$ , яка використовується бустерним ступенем ПОБ впродовж трьох днів (19-21.07.2017)

## Висновки

За результатами аналізу встановлено наявність значного надлишку холодопродуктивності ТХМ при охолодженні повітря на вході ГТД. Запропоновано спосіб визначення проектних величин холодопродуктивностей ТХМ з акумуляцією надлишку холодопродуктивності АБХМ при знижених теплових навантаженнях та його використанням у бустерному ступені охолодження повітря, що забезпечує зменшення проектної холодопродуктивності АБХМ приблизно на 40 % в кліматичних умовах Південнобузької КС, Миколаївська обл.

## Література

1. Popli, S. Trigenation 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 // *Appl. Energy*. – 2012. – Vol. 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 // *Appl. Therm. Eng.*. – 2013. – Vol. 50. – P. 918-931.
3. Cizungu, K. Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids [Text] / K. Cizungu, A. Mani, M. Groll // *Appl. Therm. Eng.*. – 2001. – Vol. 21. – P. 585-598.

4. Gomri, R. Investigation of the Potential of Application of Single Effect and Multiple Effect Absorption Cooling Systems [Text] / R. Gomri // *Energ. Convers. Manage.*. – 2010. – Vol. 51. – P. 1629-1636.

5. 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.

## References

1. Popli, S., Rodgers, P., Eveloy, V. Trigenation scheme for energy efficiency enhancement in a natural gas processing plant through turbine exhaust gas waste heat utilization. *Appl. Energy*, 2012, vol. 93, pp. 623-636.
2. Popli, S., Rodgers, P., Eveloy, V. Gas turbine efficiency enhancement using waste heat powered absorption chillers in the oil and gas industry. *Appl. Therm. Eng.*, 2013, vol. 50, pp. 918-931.
3. Cizungu, K., Mani, A., Groll, M. Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids. *Appl. Therm. Eng.*, 2013, vol. 21, pp. 585-598.
4. Gomri, R. Investigation of the Potential of Application of Single Effect and Multiple Effect Absorption Cooling Systems. *Energ. Convers. Manage.*, 2010, vol. 51, pp. 1629-1636.

5. Radchenko, A. N., Radchenko, N. I., Kantor, S. A., Portnoy, B. S. Metodologicheskii podhod k vyboru teplovy nagruzky kombinirovannoy systemy okhlazhdeniya vozdukha na vhode GTU [A

methodological approach of choosing the rational heat load on combined system of GTU intake air cooling]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2016, vol. 6 (133), pp. 55–59.

*Поступила в редакцию 20.05.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГТД ХОЛОДИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ ПУТЁМ АККУМУЛЯЦИИ ХОЛОДА

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

Исследована эффективность охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей теплоиспользующими холодильными машинами, которые трансформируют теплоту отработанных газов газотурбинных двигателей в холод, при переменных климатических условиях эксплуатации. Рассмотрено применение комбинированной абсорбционно-эжекторной теплоиспользующей холодильной машины со ступенчатым принципом охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей: предварительным до 15°C – абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной (АБХМ), которая используется в качестве высокотемпературной ступени охлаждения воздуха, и дальнейшим охлаждением до 10°C – хладоновой эжекторной холодильной машиной (ЭХМ) как низкотемпературной ступени охлаждения. Выявлены резервы сокращения проектной (установленной) холодопроизводительности холодильных машин путём аккумуляции избытка холода при пониженных текущих тепловых нагрузках с его использованием при повышенных тепловых нагрузках. При этом проектную (установленную) холодопроизводительность холодильных машин определяли двумя методами: первый – исходя из близкого к максимальному сокращения годового потребления топлива, второй – по максимальному темпу приращения сокращения годового потребления топлива. Предложена схема системы охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей с использованием резерва холодопроизводительности АБХМ, которая обеспечивает предварительное охлаждение наружного воздуха на входе газотурбинных двигателей, в бустерной ступени с использованием накопленного избытка холодопроизводительности АБХМ. Избыток холодопроизводительности АБХМ, который образуется при пониженных тепловых нагрузках на воздухоохладители на входе газотурбинных двигателей, накапливается в холодоаккумуляторе и используется при повышенных тепловых нагрузках. Результаты моделирования показывают целесообразность применения системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинный двигатель с использованием накопленного избытка холодопроизводительности АБХМ, что позволяет уменьшить проектную (установленную) холодопроизводительность АБХМ приблизительно на 40%.

**Ключевые слова:** охлаждение воздуха; теплоиспользующая холодильная машина; тепловая нагрузка; резерв холодопроизводительности; сокращение потребления топлива.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF THE AIR COOLING AT THE GTE INLET BY CHILLERS WITH ACCUMULATION OF COLD

*A. Radchenko, B. Portnoi, S. Kantor, A. Prjadko, I. Kalinichenko*

The efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine engines by exhaust heat conversion chiller, which transforms the GTE exhaust gases heat into cold, under variable climatic operating conditions, has been investigated. Considered is the use of a combined absorption-ejector exhaust heat conversion chiller with a step-by-step principle of air cooling at the gas turbine engines inlet: preliminary down to 15°C – by an absorption lithium-bromide chiller (ACh), which is used as a high-temperature air cooling stage, and further cooling down to 10°C – by a refrigerant ejector chiller (ECh) as a low-temperature cooling stage. Reserves have been identified for reducing the design (installed) refrigeration capacity of chillers by accumulating excess cold at reduced current heat loads with its use at increased heat loads. In this case, the design (installed) refrigeration capacity of chillers was determined by two methods: the first – based on the close to the maximum reduction in annual fuel consumption, the second – according to the maximum rate of increase in the reduction in annual fuel consumption. A scheme of the air cooling system at the gas turbine engines inlet using the refrigeration capacity reserve of the ACh, which provides preliminary cooling of the ambient air at the gas turbine engines inlet, in the booster stage, using the ACh accumulated excess refrigeration capacity has been proposed. The ACh excess refrigerating capacity, which is formed at decreased heat loads on the air coolers at the gas turbine engines inlet, is accumulated in the cold

accumulator and is used at increased heat loads. The simulation results show the advisability of using the air cooling system at the gas turbine engine inlet with using the ACh accumulated excess refrigeration capacity, which allows reducing the ACh design (installed) refrigeration capacity by approximately 40%.

**Keywords:** air cooling; exhaust heat conversion chiller; heat load; refrigeration capacity reserve; reduction of fuel consumption.

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

**Портной Богдан Сергійович** – аспірант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

**Прядко Олександр Ігорович** – асистент, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Калініченко Іван Володимирович** – канд. техн. наук, доц., Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

**Andrii Radchenko** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Ship Electroenergetic Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

**Bohdan Portnoi** – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: bodya1184@yandex.ru.

**Sergiy Kantor** – Candidate of Technical Science, PJSC "Zavod"Ekvator", Mykolaiv, Ukraine.

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

**Ivan Kalinichenko** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: kiv26@ukr.net.