

УДК 621.438.1:621.5.011:621.57

doi: 10.32620/akt.2018.4.07

А. М. РАДЧЕНКО

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА ЗА МАКСИМАЛЬНИМ ТЕМПОМ ПРИРОЩЕННЯ ТЕРМОЧАСОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ

Обґрунтовано можливість застосування розробленого автором методу термочасового потенціалу охолодження для визначення встановленої (проектної) холодопродуктивності термотрансформатора (холодильної машини) за максимальним його прирощенням відповідно до поточних кліматичних умов за певний період експлуатації. Оскільки ефект від охолодження повітря, зокрема на вході ГТУ, залежить від тривалості та глибини охолодження, то запропоновано його визначення термочасовим потенціалом Π_{Σ} , °C·год, який представляє собою добуток зниження температури Δt_b повітря та тривалості τ експлуатації ГТУ при зниженій температурі: $\Pi_{\Sigma} = \sum(\Delta t_b \cdot \tau)$, і певною мірою відображає теплове навантаження на системи охолодження. Показано, що виходячи з різного темпу прирощення річного термочасового потенціалу охолодження зі збільшенням встановленої холодопродуктивності термотрансформатора, обумовленого зміною теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов упродовж року, необхідно вибирати таке проектне теплове навантаження на термотрансформатор охолодження повітря (його встановлену холодопродуктивність), яке забезпечує досягнення максимального або близького до нього річного термочасового потенціалу охолодження при відносно високих темпах його прирощення. З метою визначення встановленої холодопродуктивності, яка забезпечує максимальний темп нарощування річного термочасового потенціалу охолодження, проаналізовано залежність річного термочасового потенціалу охолодження, віднесеного до встановленої холодопродуктивності термотрансформатора, від встановленої холодопродуктивності термотрансформатора. За результатами досліджень запропоновано метод визначення проектного теплового навантаження (встановленої холодопродуктивності) термотрансформатора за максимальних темпів його прирощення, що стало подальшим розвитком розробленої автором методології раціонального проектування термотрансформаторів охолодження повітря на вході теплових двигунів на основі термочасового потенціалу.

Ключові слова: термотрансформатор, термочасовий потенціал, темп прирощення, охолодження, холодопродуктивність.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Термодинамічна ефективність теплових двигунів, насамперед газотурбінних, знижується з підвищенням температури зовнішнього повітря $t_{3п}$ на вході. Тому попереднє охолодження циклового повітря газотурбінних установок тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), або термотрансформаторами, що утилізують теплоту відпрацьованих газів, є одним з основних напрямів енергозбереження в енергетиці.

Найбільш поширеного застосування набули абсорбційні бромистолітєві термотрансформатори (АБТТ), в яких повітря охолоджують до температури $t_{п2} \approx 15$ °C, причому з високою ефективністю трансформації скидної теплоти в холод: їх тепловий коефіцієнт $\zeta = 0,7 \dots 0,8$ [1]. В ежекторних термотрансформаторах (ЕТТ) можливе більш глибоке охолодження повітря до температури $t_{п2} = 7 \dots 10$ °C, однак за значно нижчих теплових коефіцієнтів: $\zeta = 0,2 \dots 0,3$. В роботі [2] запропоновано двоступеневе охолодження повітря на вході ГТУ в ступінчастому абсорбційно-ежекторному термотрансформаторі (АЕТТ): в АБТТ – до $t_{п2} = 15 \dots 20$ °C, в ЕТТ – до $t_{п2} = 7 \dots 10$ °C.

Оскільки при експлуатації ГТУ мають місце як сезонні, так і добові коливання температур, то проектне теплове навантаження термотрансформаторів необхідно визначати відповідно до кліматичних умов експлуатації.

Ефективність охолодження повітря на вході ГТУ зручно оцінювати річним термочасовим потенціалом Π_{Σ} , °C·год, який представляє собою добуток зниження температури Δt_b повітря на вході ГТУ та тривалості τ експлуатації ГТУ при зниженій температурі упродовж року $\Pi_{\Sigma} = \sum(\Delta t_b \cdot \tau)$ [3, 4].

Мета дослідження – розробка методу визна-

чення раціонального теплового навантаження термотрансформатора охолодження повітря, зокрема на вході ГТУ, за максимальним прирощенням термочасового потенціалу.

2. Результати дослідження

Теплові характеристики термотрансформаторів і теплообмінних апаратів охолодження повітря зручно представляти у відносних величинах, що припадають на одиницю витрати повітря: $G_n = 1$ кг/с. Так, теплові навантаження повітроохолоджувачів систем охолодження (холодопродуктивність термотрансформаторів) доцільно визначати як питома теплове навантаження, або ж питома холодопродуктивність термотрансформатора: $q_0 = Q_0/G_n$, де Q_0 – повна холодопродуктивність, кВт; G_n – витрата повітря, кг/с.

Питома холодопродуктивність розраховують як $q_0 = \xi c_{вл} (t_{зп} - t_{п2})$, кВт/(кг/с), де ξ – коефіцієнт вологовипадіння; $t_{зп}$ – поточна температура зовнішнього повітря, °С; $t_{п2}$ – температура охолодженого повітря, °С; $c_{вл}$ – питома теплоємність вологого повітря, кДж/(кг·К).

Для визначення встановленої (проектної) питомої холодопродуктивності термотрансформатора необхідно проаналізувати залежність річного термочасового потенціалу охолодження Π_{Σ} від неї.

На рис. 1 наведені значення річного термочасового потенціалу охолодження Π_{Σ} в залежності від (проектної) питомої холодопродуктивності термотрансформатора q_0 (при $G_n = 1$ кг/с) при температу-

рах повітря $t_{п2} = 15$ °С, охолодженого в АБТТ, та $t_{п2} = 7$ і 10 °С для ступінчастого АЕТТ та глибокого охолодження повітря до $t_{п2} = 7$ і 10 °С за 2017 р. в різних регіонах України.

Як видно з рис. 1, для кліматичних умов експлуатації ГТУ при охолодженні повітря на вході до температури $t_{п2} = 7$ і 10 °С раціональною можна вважати питому холодопродуктивність термотрансформатора АЕТТ (для $G_n = 1$ кг/с) $q_0 \approx 40 \dots 43$ та $35 \dots 37$ кВт/(кг/с), при якій темп нарощування річного охолоджувального потенціалу Π_{Σ} зберігається достатньо високим, а при охолодженні повітря до $t_{п2} = 15$ °С в АБТТ – відповідно $q_0 \approx 24$ кВт/(кг/с). Виходячи з раціональної питомої холодопродуктивності визначають повну встановлену холодопродуктивність термотрансформатора відповідно до витрати повітря G_n через ГТУ: $Q_0 = G_n \cdot q_0$, кВт.

Зменшення темпу нарощування річного термочасового потенціалу охолодження Π_{Σ} при високій холодопродуктивності термотрансформатора свідчить про наявність надлишку холоду. То ж доцільно визначити холодопродуктивність, яка забезпечує максимальний темп нарощування Π_{Σ} .

Для визначення встановленої холодопродуктивності термотрансформатора (питомої q_0 та повної $Q_0 = q_0 \cdot \tau$), яка забезпечує максимальний темп нарощування річного термочасового потенціалу Π_{Σ} , необхідно проаналізувати залежність річного термочасового потенціалу Π_{Σ} , віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності q_0 термотрансформатора, Π_{Σ}/q_0 від встановленої питомої холодопродуктивності термотрансформатора q_0 (рис. 2).

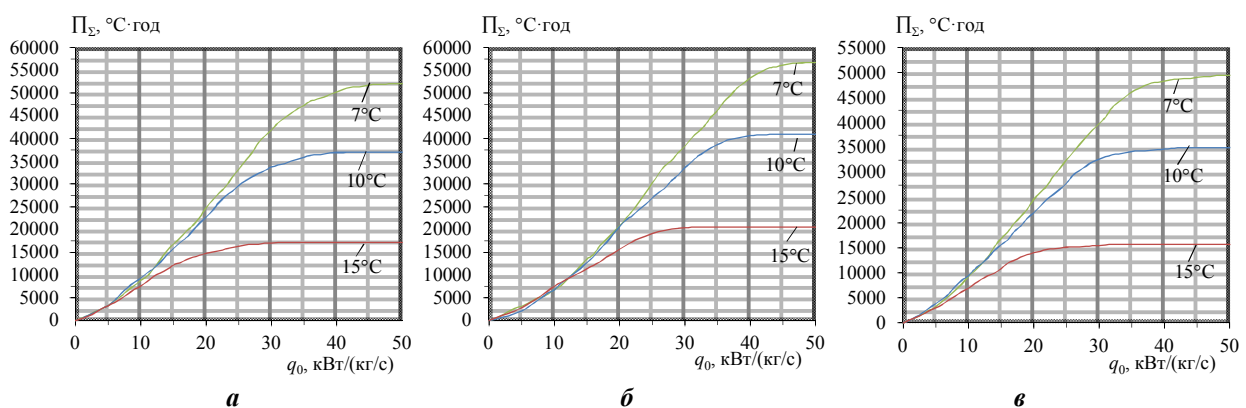


Рис. 1. Значення річного термочасового потенціалу охолодження Π_{Σ} в залежності від проектної питомої холодопродуктивності термотрансформатора q_0 (при $G_n = 1$ кг/с) при різних температурах охолодженого повітря $t_{п2} = 7, 10$ і 15 °С за 2017 р.: **а** – м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл., **б** – Тарутине, Одеська обл., **в** – Ставище, Київська обл.

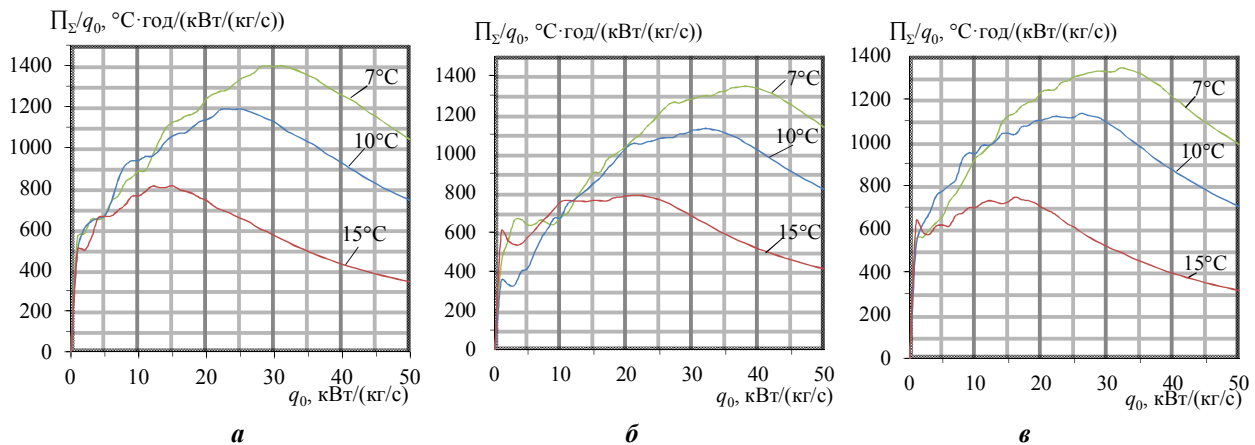


Рис. 2. Значення річного термочасового потенціалу P_{Σ}/q_0 , віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності q_0 термотрансформатора, в залежності від встановленої питомої холодопродуктивності термотрансформатора q_0 при температурах охолодженого повітря $t_{п2} = 7, 10$ і 15 °С за 2017 р.: **а** – м. Южноукраїнськ, Миколаївська обл., **б** – Тарутине, Одеська обл., **в** – Ставище, Київська обл.

Як видно з рис. 2, для розглянутих кліматичних умов експлуатації ГТУ за 2017 р. максимальний темп прирощення річного термочасового потенціалу P_{Σ}/q_0 охолодження повітря (екстремуми графіків) до температури $t_{п2} = 15$ °С в АБТТ має місце при проектній питомій холодопродуктивності $q_0 = 12 - 16$ кВт/(кг/с), при охолодженні до $t_{п2} = 10$ °С в ступінчастому АЕТТ $q_0 = 22 - 26$ кВт/(кг/с), а до $t_{п2} = 7$ °С в АЕТТ $q_0 = 30 - 37$ кВт/(кг/с). Відповідні повні встановлені холодопродуктивності термотрансформатора АБТТ і АЕТТ, $Q_0 = G_{п} \cdot q_0$, кВт, забезпечують максимальний темп прирощення річного термочасового потенціалу охолодження.

Оскільки величини встановленої питомої холодопродуктивності термотрансформатора q_0 , які забезпечують максимальний темп прирощення річного термочасового потенціалу P_{Σ}/q_0 охолодження повітря (рис. 2), менше їх величин, визначених відповідно до максимального потенціалу P_{Σ} охолодження на рис. 1, то при підвищених температурах зовнішнього повітря $t_{зп}$ матиме місце дефіцит холодопродуктивності, тоді як при знижених температурах повітря $t_{зп}$, навпаки, її надлишок. То ж надлишок холоду, який утворюються в періоди знижених теплових навантажень, доцільно накопичувати в акумуляторі холоду та використовувати під час збільшених теплових навантажень або ж використовувати для охолодження конденсатора ЕТТ нижнього ступеня термотрансформатора з підвищенням його теплового коефіцієнта ζ , тобто переходити на каскадний АЕТТ.

Висновки

За результатами аналізу річного термочасового потенціалу охолодження повітря на вході ГТУ та його величини, віднесеної до встановленої (проектної) холодопродуктивності термотрансформатора, в залежності від встановленої холодопродуктивності термотрансформатора розроблено метод визначення раціональної встановленої (проектної) холодопродуктивності термотрансформатора за максимальним прирощенням річного термочасового потенціалу, відповідно до змінних кліматичних умов експлуатації упродовж року.

Література

1. Bortmany, J. N. Assessment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air [Text] / J. N. Bortmany // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.
2. Радченко, А. Н. Методологический подход к рациональному проектированию комбинированной теплоиспользующей системы охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 4(121). – С. 76–79.
3. Радченко, А. Н. Оценка потенциала охлаждения воздуха на входе газотурбинных установок трансформацией теплоты отработанных газов в теплоиспользующих холодильных машинах [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 4 (111). – С. 56–59.

4. 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. Bortmany, J. N. Assesstment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air. *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*, Paper GT-2002-30657. 12 p.

2. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Metodologicheskiy podkhod k ratsional'nomu proyektirovaniyu kombinirovannoy teploispol'zuyushchey sistemy okhlazhdeniya vozdukha na vkhode gazoturbinnoy ustanovki [Methodological approaches of rational designing of combined waste heat recovery system for gas turbine unit intake air cooling]. *Avi-*

acijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology, 2015, no. 4 (121), pp. 76–79.

3. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Otsenka potentsiala okhlazhdeniya vozdukha na vkhode gazoturbinnnykh ustanovok transformatsiya teploty otrabotannykh gazov v teploispol'zuyushchikh kholodil'nykh mashinakh [Evaluation of cooling potential of gas turbine unit intake air by transforming the exhaust gas heat in waste heat recovery cooling machines]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2014, no. 4 (111), pp. 56–59.

4. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Metod vybora ratsional'noy teplovoy nagruzki absorbtionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vkhode regenerativnykh GTU kompressornykh stantsiy [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 11.05.2018, рассмотрена на редколлегии 7.08.2018

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ТЕМПУ ПРИРАЩЕНИЯ ТЕРМОЧАСОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

А. Н. Радченко

Обосновано возможность применения, разработанного автором метода термочасового потенциала охлаждения для определения установленной (проектной) холодопроизводительности термотрансформатора (холодильной машины) по максимальному его приращению в соответствии с текущими климатическими условиями за определённый период эксплуатации. Поскольку эффект от охлаждения воздуха, в частности, на входе ГТУ, зависит от продолжительности и глубины охлаждения, то предложено его определение термочасовым потенциалом $\Pi_{\Sigma}, ^\circ\text{C}\cdot\text{ч}$, который представляет собой произведение снижения температуры $\Delta t_{\text{в}}$ воздуха и продолжительности τ эксплуатации ГТУ при пониженной температуре: $\Pi_{\Sigma} = \sum(\Delta t_{\text{в}} \cdot \tau)$, и в определенной степени отражает тепловую нагрузку на системы охлаждения. Показано, что исходя из разного темпа приращения годового термочасового потенциала охлаждения с увеличением установленной холодопроизводительности термотрансформатора, обусловленного изменением тепловой нагрузки в соответствии с текущими климатическими условиями в течение года, необходимо выбирать такую проектную тепловую нагрузку на термотрансформатор охлаждения воздуха (его установленную холодопроизводительность), которая обеспечивает достижение максимального или близкого ему годового термочасового потенциала охлаждения при относительно высоких темпах его приращения. С целью определения установленной холодопроизводительности, которая обеспечивает максимальный темп приращения годового термочасового потенциала охлаждения, проанализировано зависимость годового термочасового потенциала охлаждения, отнесенного к установленной холодопроизводительности термотрансформатора, от установленной холодопроизводительности термотрансформатора. По результатам исследований предложено метод определения проектной тепловой нагрузки (установленной холодопроизводительности) термотрансформатора по максимальным темпам его приращения, что стало дальнейшим развитием разработанной автором методологии рационального проектирования термотрансформаторов охлаждения воздуха на входе тепловых двигателей на основе термочасового потенциала.

Ключевые слова: термотрансформатор, термочасовой потенциал, темп приращения, охлаждение, холодопроизводительность.

**METHOD OF DEFINING THE REFRIGERATION CAPACITY
OF THERMOTRANSFORMER WITH MAXIMUM RATE
OF INCREASING THERMOHOUR POTENTIAL OF COOLING AIR**

A. M. Radchenko

It is proved a possibility of using the thermohour cooling potential method, developed by the author, for defining the installed (design) refrigeration capacity of term transformer (refrigeration machine), providing a maximum rate of thermo-hour cooling potential increasing according to the current climatic conditions for a definite period of operation.

It is proposed to define the effect, gained due to cooling air, in particular at the inlet of GTU, depends on duration and depth of cooling, by thermohour potential $\Pi_{\Sigma}, ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, as air temperature decrease Δt_a multiplied by duration τ of GTU operation at decreased temperature: $\Pi_{\Sigma} = \sum(\Delta t_a \cdot \tau)$, which to some extent characterizes heat load on the cooling system.

It is shown that taking into consideration a different rate of annual thermohour cooling potential arising with increasing the installed refrigeration capacity of term transformer, caused by changing the heat load according to current climatic conditions during a year, it is necessary to choose such design heat load on the air cooling system (refrigeration capacity of term transformer) that provides a maximum value of annual thermohour cooling potential or close it with relatively high rates of its increasing.

To define the installed refrigeration capacity, providing a maximum rate of annual thermohour cooling potential increasing, it is analyzed the dependence of annual thermohour cooling potential related to the installed refrigeration capacity of term transformer, from the installed refrigeration capacity of term transformer. As a result of the investigation, it is proposed the method of defining the design heat load (installed refrigeration capacity) of term transformer with maximum rates of increasing thermohour cooling potential, as a further development of methodology of rational designing of them transformers for combustion engine inlet air cooling on the base of thermohour potential, developed by author.

Keywords: thermotransformer, thermohour potential, rate of increment, cooling, refrigeration capacity.

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

Radchenko Andrii Mykolaiovych – 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.