

А. М. РАДЧЕНКО¹, Я. ЗОНМІН², М. І. РАДЧЕНКО¹, С. А. КАНТОР³,
Б. С. ПОРТНОЙ¹, Ю. Г. ЩЕРБАК⁴

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² Цзяньсунський університет науки і технологій, КНР

³ ПАТ "Завод "Екватор", Україна

⁴ Чорноморський національний університет ім. П. Могили, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ХОЛОДОПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ ЗА ПОТОЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Значні коливання поточної температури і відносної вологості зовнішнього повітря призводять до суттєвих змін теплового навантаження на систему охолодження повітря на вході газотурбінної установки (ГТУ), що гостро ставить проблему вибору їх встановленого (проектного) теплового навантаження. Розрахунки процесів охолодження зовнішнього повітря проведено для різних кліматичних умов на прикладі півдня України (м. Миколаїв) та центрального Китаю (м. Пекін). Проаналізовано два методи визначення встановленої (проектної) холодопродуктивності системи охолодження зовнішнього повітря на вході ГТУ за максимальним поточним скороченням споживання палива та максимальним темпом (прирощенням) річного скорочення споживання палива відповідно до збільшення встановленої холодопродуктивності, розрахованого за нарощенням (сумуванням) поточних значень скорочення споживання палива. Показано, що значення встановленої холодопродуктивності системи охолодження повітря на вході ГТУ, визначені за обома методами, достатньо близькі, але суттєво відрізняються для різних кліматичних умов. Перевагою методу обчислення встановленої холодопродуктивності системи охолодження повітря на вході ГТУ за максимальним темпом річного скорочення споживання палива є можливість більш чіткого його визначення завдяки відсутності значних коливань річного скорочення споживання палива, розрахованого сумуванням поточних значень скорочення споживання палива. Оскільки максимальне скорочення споживання палива за рік досягається з деяким зниженням темпу його приросту при високих значеннях проектною питомої холодопродуктивності, необхідних у найбільш спекотні години влітку і надмірних в децю прохолодні періоди (вночі та вранці навіть влітку), то встановленої холодопродуктивності, визначеної за максимальним приростом скорочення споживання палива, буде недостатньо в часи підвищених теплових навантажень понад їх проектну величину. У таких випадках усунення дефіциту холодопродуктивності можливе використанням надлишку холоду, закумуляованого під час знижених теплових навантажень.

Ключові слова: охолодження повітря; встановлена холодопродуктивність; газотурбінна установка; тепловикористовуюча холодильна машина; потужність; витрата палива; клімат.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

З підвищенням температури зовнішнього повітря $t_{\text{вп}}$ на вході ефективність газотурбінних установок (ГТУ) знижується, тому доцільно його охолоджувати тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), які трансформують в холод теплоту відпрацьованих газів [1-4]. Значні коливання поточної температури $t_{\text{вп}}$ і відносної вологості $\varphi_{\text{вп}}$ зовнішнього повітря призводять до суттєвих змін теплового навантаження на системи охолодження повітря на вході ГТУ, що гостро ставить проблему вибору їх встановленого

(проектного) теплового навантаження, тобто холодопродуктивності ТХМ. Розрахунки для кліматичних умов України (на прикладі м. Миколаїв) та КНР (м. Пекін).

Мета роботи – визначення проектною холодопродуктивності системи охолодження повітря на вході ГТУ в різних кліматичних умовах.

2. Результати дослідження

Ефект від охолодження повітря на вході ГТУ до різних температур оцінювали за поточними приростом виробництва електричної (механічної) енергії ΔN_e (відповідно до зростання потужності

ГТУ) та скороченням споживання палива B (рис. 1 і 2 відповідно). При цьому враховували тривалість τ_i роботи ГТУ при різних витратах питомої холодопродуктивності q_0 (віднесеної до витрати циклового повітря ГТУ) на охолодження зовнішнього повітря на вході до температури охолодженого повітря $t_{n2} = 10$ і 15°C .

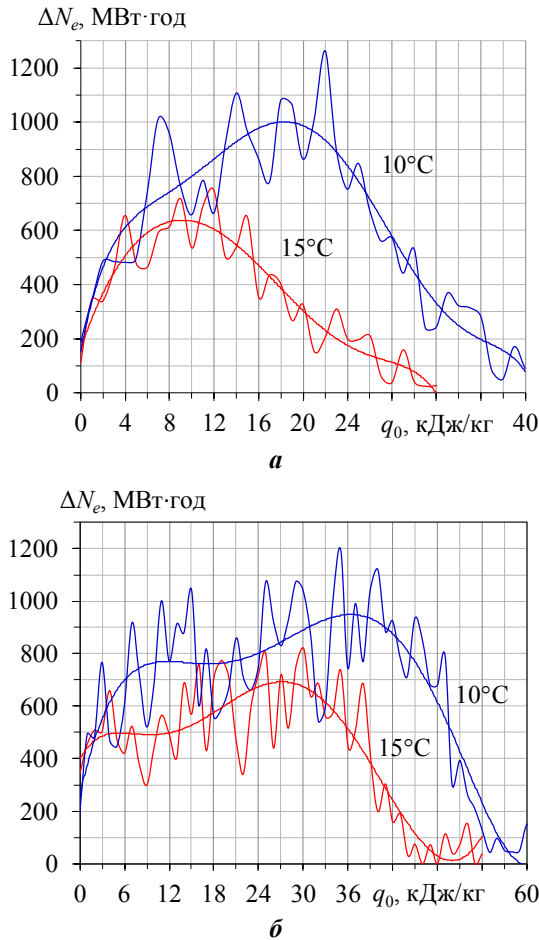


Рис. 1. Поточні значення приросту виробництва електричної ΔN_e для SGT5-4000F при поточних питомих витратах холодопродуктивності q_0 на охолодження зовнішнього повітря на вході до $t_{n2} = 10$ і 15°C упродовж 2017 р.:
 a – м. Миколаїв, Україна; b – м. Пекін, КНР

Розрахунки проведено для ГТУ SGT5-4000F виробництва "Siemens" з номінальною потужністю $N_{elSO} = 291,6$ МВт, для якої зниження температури повітря Δt_n на вході на 1°C приводить до зменшення питомої витрати палива $\Delta b_{e1^\circ\text{C}} = \Delta b_e / \Delta t_n$ на $0,4$ г/(кВт·год) і збільшення потужності на 2050 кВт [5].

Поточне скорочення споживання палива B розраховували як $B = \Delta b_e N_e \tau_i$, в свою чергу поточне зменшення питомої витрати палива $\Delta b_e = \Delta b_{e1^\circ\text{C}} \cdot \Delta t_n$, де $\Delta t_n = t_{n1} - t_{n2}$.

Як видно з рис. 2, при охолодженні повітря на

вході ГТУ до температури $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ для кліматичних умов м. Миколаїв найбільше поточне скорочення споживання палива B спостерігається при питомій холодопродуктивності в діапазоні значень $q_0 = 11 \dots 13$ кДж/кг, а для умов м. Пекін: $q_0 = 24 \dots 30$ кДж/кг, що співпадає з результатами розрахунку і за приростом потужності ГТУ ΔN_e на рис. 1. При більш глибокому охолодженні повітря до температури $t_{n2} = 10^\circ\text{C}$ значення питомої холодопродуктивності лежать в діапазоні $q_0 = 21 \dots 23$ кДж/кг і $34 \dots 36$ кДж/кг відповідно.

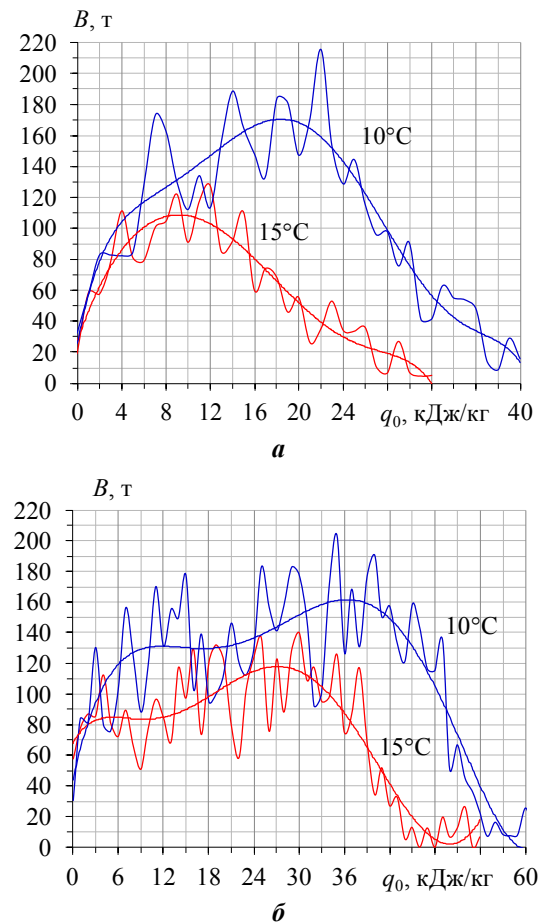


Рис. 2. Поточні значення скорочення споживання палива B для SGT5-4000F при поточних питомих витратах холодопродуктивності q_0 на охолодження зовнішнього повітря на вході до $t_{n2} = 10$ і 15°C упродовж 2017 р.: a – м. Миколаїв, Україна;
 b – м. Пекін, КНР

Найбільше поточне скорочення споживання палива B на рис. 2 свідчить, по суті, про максимальний темп його приросту зі збільшенням питомої холодопродуктивності q_0 , що підтверджують результати розрахунку річного скорочення споживання палива $\Sigma B / q_0$, віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності q_0 , від проектної питомої холодопродуктивності q_0 (рис. 3).

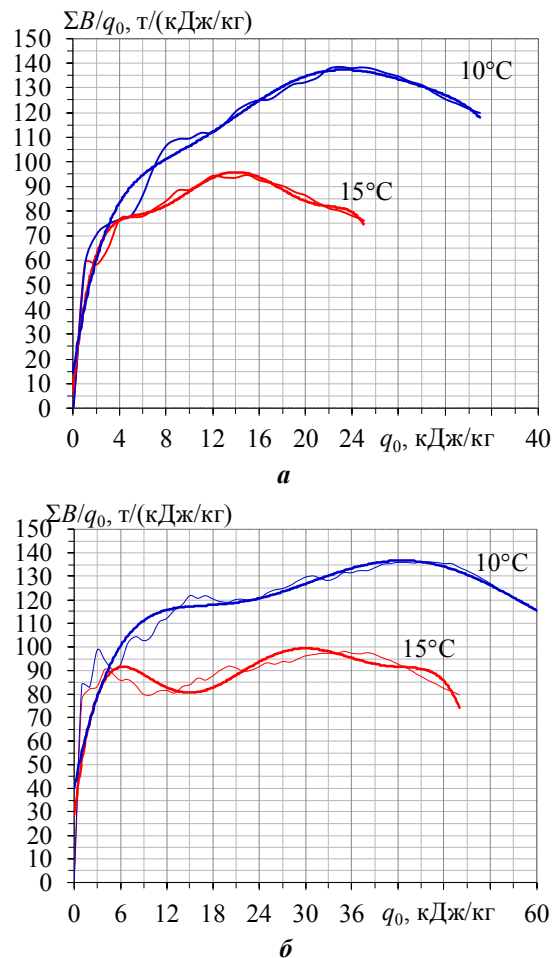


Рис. 3. Річне скорочення споживання палива $\Sigma B/q_0$, віднесене до встановленої (проектної) питомої холодопродуктивності q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності q_0 при охолодженні зовнішнього повітря на вході SGT5-4000F до температур $t_{n2} = 10$ і 15°C за 2017 р.:
а – м. Миколаїв, Україна; **б** – м. Пекін, КНР

З рис. 3 видно, що оптимальні значення проектної питомої холодопродуктивності q_0 при охолодженні повітря на вході ГТУ, отримані за максимальним темпом прирощення скорочення споживання палива $\Sigma B/q_0$, близькі тим, що отримані за максимальним поточним скороченням споживання палива B на рис. 2. При цьому річне скорочення споживання палива відповідно до збільшення встановленої холодопродуктивності розраховували за нарощенням – сумуванням поточних значень скорочення споживання палива, як наслідок – можливість більш чіткого його визначення завдяки відсутності значних коливань річного скорочення споживання палива (див. рис. 3) на відміну від їх поточних величин (див. рис. 2).

Оскільки максимальне скорочення споживання палива ΣB за рік досягається з деяким зниженням темпу його прирощення при високих значеннях

проектної питомої холодопродуктивності, необхідних у найбільш спекотні години влітку і надмірних в дещо прохолодні періоди, наприклад вночі та вранці [6], то встановленої холодопродуктивності q_0 , визначеної за максимальним прирощенням скорочення споживання палива ΣB або $\Sigma B/q_0$ на рис. 2 і 3, буде недостатньо в часи підвищених теплових навантажень понад їх проектну величину. У таких випадках усунення дефіциту холодопродуктивності можливе використання надлишку холоду, закумуляованого під час знижених теплових навантажень.

Висновки

Проаналізовано два методи визначення встановленої (проектної) холодопродуктивності системи охолодження зовнішнього повітря на вході ГТУ за максимальним поточним скороченням споживання палива (див. рис. 2) та максимальним темпом (прирощенням) річного скорочення споживання палива відповідно до збільшення встановленої холодопродуктивності (див. рис. 3), розрахованого за нарощенням (сумуванням) поточних значень скорочення споживання палива.

Показано, що значення встановленої холодопродуктивності системи охолодження повітря на вході ГТУ, визначені за обома методами, достатньо близькі, але суттєво відрізняються для різних кліматичних умов.

Перевагою ж методу обчислення встановленої холодопродуктивності системи охолодження повітря на вході ГТУ за максимальним темпом (прирощенням) річного скорочення споживання палива (див. рис. 3) є можливість більш чіткого його визначення завдяки відсутності значних коливань річного скорочення споживання палива, розрахованого сумуванням поточних значень скорочення споживання палива.

Література

1. Al-Ibrahim, A. M. A review of inlet air-cooling technologies for enhancing the performance of combustion turbines in Saudi Arabia [Text] / A. M. Al-Ibrahim, A. Varnham // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – Vol. 30. – P. 1879–1888.
2. Modeling simple trigeneration systems for the distribution of environmental loads [Text] / M. Carvalho, M. A. Lozano, L. M. Serra, V. Wohlgemuth // *Environmental Modelling & Software*. – 2012. – № 30. – P. 71–80.
3. Obara, S. Distributed energy systems [Text] / S. Obara. – GA, USA: Nova Science Publishers Inc., 2009. – 68 p.

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.

5. Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://new.siemens.com/ru/ru.html> : SGT5–4000F. – 18.01.2019.

6. Ефективність охолодження повітря на вході газотурбінної установки в умовах помірного і субтропічного клімату [Текст] / А. М. Радченко, Я. Зонмін, С. А. Кантор, Б. С. Портной // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 6(150). – С. 34 – 38.

References

1. Al-Ibrahim, A. M., Varnham, A., A review of inlet air-cooling technologies for enhancing the performance of combustion turbines in Saudi Arabia. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 1879–1888.

2. Carvalho, M., Lozano, M. A., Serra, L. M., Wohlgemuth, V., Modeling simple trigeneration

systems for the distribution of environmental loads. *Environmental Modelling & Software*, 2012, no. 30, pp. 71–80.

3. Obara, S. *Distributed energy systems*. GA, USA, Nova Science Publishers Inc., 2009. 68 p.

4. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Metod vybora racionalnoy teplovoy nagruzky absorbcionno-ezhektornogo termotransformatora okhlazhdeniya vozdukha na vhode regenerativnyh GTU kompressornyh stanciy [The method of evaluation of rational heat load on absorption-ejector thermo-transformer 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.

5. Siemens. Available at: <https://new.siemens.com/ru/ru.html>: SGT5–4000F. (Accessed 18.01.2019).

6. Radchenko, A. N., Zongming, Y., Kantor, S. A., Portnoi, B. S. Efektyvnist' okholodzhennya povitrya na vkhodi hazoturbinnoyi ustanovky v umovakh pomirnoho i subtropichnoho klimatu [The efficiency of air cooling at the inlet of gas turbine unit under conditions of moderate and subtropical climate]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 6 (150), pp. 34 – 38.

Поступила в редакцию 20.01.2019, рассмотрена на редколлегии 15.04.2019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВЛЕННОЙ ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПО ТЕКУЩИМ ТЕПЛОВЫМ НАГРУЗКАМ

А. Н. Радченко, Я. Зонмин, Н. И. Радченко,
С. А. Кантор, Б. С. Портной, Ю. Г. Щербак

Значительные колебания текущей температуры и относительной влажности наружного воздуха приводят к существенным изменениям тепловой нагрузки на систему охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки (ГТУ), что остро ставит проблему выбора их установленной (проектной) тепловой нагрузки. Расчеты процессов охлаждения наружного воздуха проведены для различных климатических условий на примере юга Украины (г. Николаев) и центрального Китая (г. Пекин). Проанализированы два метода определения установленной (проектной) холодопроизводительности системы охлаждения наружного воздуха на входе ГТУ по максимальным значениям текущего сокращения потребления топлива и максимальному темпу (приращению) годового сокращения потребления топлива в соответствии с увеличением установленной холодопроизводительности, рассчитанного по наращиванию (суммированию) текущих значений сокращения потребления топлива. Показано, что значения установленной холодопроизводительности системы охлаждения воздуха на входе ГТУ, определенные по обоим методам, достаточно близкие, но существенно отличаются для разных климатических условий. Преимуществом метода вычисления установленной холодопроизводительности системы охлаждения воздуха на входе ГТУ по максимальному темпу годового сокращения потребления топлива является возможность более четкого его определения благодаря отсутствию значительных колебаний годового сокращения потребления топлива, рассчитанного суммированием текущих значений сокращения потребления топлива. Поскольку максимальное сокращение потребления топлива за год достигается с некоторым снижением темпа его приращение при высоких значениях проектной удельной холодопроизводительности, необходимых в наиболее жаркие часы летом и избыточных в несколько прохладные периоды (ночью и утром даже летом), то установленной холодопроизводительности, определенной по максимальному приращению сокращения потребления топлива, будет недостаточно в периоды повышенных тепловых нагрузок сверх проектной величины. В таких случаях устранение дефицита холодопроизводительности возможно использованием избытка холода, аккумулированного при пониженных тепловых нагрузках.

Ключевые слова: охлаждение воздуха; установленная холодопроизводительность; газотурбинная установка; теплоиспользующая холодильная машина; мощность; расход топлива; климат.

DETERMINING THE INSTALLED COOLING CAPACITY OF GAS TURBINE UNITS INLET AIR COOLING SYSTEM BY CURRENT HEAT LOADS

*A. M. Radchenko, Y. Zongming, M. I. Radchenko,
S. A. Kantor, B. S. Portnoi, Y. G. Shcherbak*

Significant fluctuations of the current temperature and relative humidity of the ambient air lead to significant changes in the thermal load on the cooling system at the inlet of gas turbine units (GTU), which acutely raises the problem of choosing their installed (design) thermal load. Calculations of ambient air cooling processes were carried out for different climatic conditions, for example, southern Ukraine (Mykolaiv) and Central China (Beijing). It is analyzed two methods of determination of the installed (design) cooling capacity of the ambient air cooling system at the GTU inlet according to the maximum current reduction of fuel consumption and according to the maximum rate (increase) of annual reduction of fuel consumption following to increasing of the installed cooling capacity, calculated by summarizing the current values of fuel consumption reduction. It is shown that the values of the installed cooling capacity of the air cooling system at the GTU inlet, determined by both methods, are close enough but differ significantly for different climatic conditions. The advantage of the method of calculating the installed cooling capacity of the air cooling system at the GTU inlet according to the maximum rate of annual reduction in fuel consumption is the possibility of a more precise definition of it due to the absence of significant fluctuations in the annual reduction in fuel consumption, calculated by summarizing the current values of fuel consumption reduction. Since the maximum reduction in fuel consumption per year is achieved with some decrease in the rate of its increment at high values of the design cooling capacity, required in the hottest hours in the summer and excessive in somewhat cool periods (at night and in the morning even in the summer), the installed cooling capacity, determined according to the maximum rate of the reduction of fuel consumption, will be insufficient in times of increased thermal loads above their design value. In such cases, the elimination of the deficit in cooling capacity is possible by using an excess of cold accumulated during reduced thermal loads.

Keywords: air cooling; cooling capacity; gas turbine unit; waste heat recovery chiller; power; fuel consumption; climate.

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

Зонмін Ян – доцент, Цзяньсунський університет науки і технологій, Цзеньцзянь, КНР.

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри кондиціювання і рефрижерації, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Портной Богдан Сергійович – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Щербак Юрій Георгійович – канд. техн. наук, доц., Черноморський національний університет ім. П. Могили, Україна.

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.

Zongming Yang – associated Professor, School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, China.

Radchenko Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Science, Professor, a head Conditioning and Refrigeration Dept., Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Kantor Sergiy Anatoliyovych – Candidate of Technical Science, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru.

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

Shcherbak Yurii Georgiyovych – candidate of technical sciences, associate professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.