

УДК 621.438 : 66.045.53

doi: 10.32620/akt.2018.5.03

А. М. РАДЧЕНКО¹, Є. І. ТРУШЛЯКОВ¹, С. А. КАНТОР², Б. С. ПОРТНОЙ¹¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ГРАДИРЕНЬ ВІДВЕДЕННЯ ТЕПЛОТИ У ПРОЦЕСАХ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Процеси кондиціювання (тепловологісної обробки) повітря на вході енергоустановок тепловикористовуючими холодильними машинами з відведенням від них теплоти градирнями системи оборотного охолодження досліджено на прикладі газотурбінної установки. Розглянуто двоступеневе охолодження повітря із застосуванням двоступінчастої тепловикористовуючої абсорбційно-ежекторної холодильної машини комбінованого типу, що утилізує теплоту відпрацьованих газів газотурбінної установки і до складу якої входять абсорбційна бромистолітєва та хладонова ежекторна холодильні машини як ступені трансформації скидної теплоти в холод. За результатами моделювання роботи всього охолоджувального комплексу газотурбінної установки отримані дані з поточних теплових навантажень на тепловикористовуючі холодильні машини і градирні відповідно до кліматичних умов експлуатації за різного розподілу проектних теплових навантажень на ступені охолодження повітря і, відповідно, трансформації скидної теплоти в холод. Оскільки теплове навантаження на градирні залежить від ефективності трансформації скидної теплоти в холод (теплових коефіцієнтів) абсорбційною бромистолітєвою та хладоною ежекторною холодильними машинами, то за результатами моделювання визначено раціональний розподіл проектних теплових навантажень на абсорбційній та ежекторній ступені тепловикористовуючої холодильної машини комбінованого типу, що забезпечує скорочення теплового навантаження на градирні. Показано, що завдяки такому підходу до визначення раціонального теплового навантаження на градирні системи оборотного охолодження, який полягає в урахуванні перерозподілу теплового навантаження між абсорбційним бромистолітєвим і хладоновим ежекторним ступенями охолодження з різною ефективністю трансформації скидної теплоти (різними тепловими коефіцієнтами) відповідно до поточних кліматичних умов експлуатації, можна звести до мінімуму кількість градирень відведення теплоти від холодильних машин з відповідним скороченням капітальних витрат на комплекс охолодження повітря на вході газотурбінної установки в цілому.

Ключові слова: кондиціювання; теплове навантаження; градирня; система оборотного охолодження; тепловикористовуюча холодильна машина; повітроохолоджувач.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

З підвищенням температури зовнішнього повітря $t_{\text{вп}}$ на вході енергоустановок, зокрема газотурбінних (ГТУ), зменшується їх паливна ефективність [1]. Її покращення можливе шляхом тепловологісної обробки (охолодження з осушенням – кондиціювання) повітря у повітроохолоджувачах (ПО) тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), що утилізують теплоту відпрацьованих газів [2].

Глибоке охолодження повітря до температури $t_{\text{п2}} \approx 10^\circ\text{C}$ і нижче можливе у двоступеневих (ПО): до $t_{\text{п2}} \approx 15^\circ\text{C}$ абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною (АБХМ) з тепловим коефіцієнтом $\zeta_{\text{А}} = 0,7 \dots 0,8$ і до $t_{\text{п2}} \approx 10^\circ\text{C}$ ежекторною (ЕХМ) $\zeta_{\text{Е}} = 0,2 \dots 0,25$ у ступенях $\text{ПО}_{\text{ВТ}}$ і $\text{ПО}_{\text{НТ}}$ відповідно [2]. Тепловий коефіцієнт $\zeta = Q_0 / Q_{\text{Г}}$ – відношення

отриманої холодопродуктивності Q_0 до витрат теплоти $Q_{\text{Г}}$. Теплове навантаження градирень: $Q_{\text{ГР}} = (Q_{0,\text{ВТ}} / \zeta_{\text{А}} + Q_{0,\text{ВТ}}) + (Q_{0,\text{НТ}} / \zeta_{\text{Е}} + Q_{0,\text{НТ}})$, де $Q_{0,\text{ВТ}}$ і $Q_{0,\text{НТ}}$ – теплові навантаження $\text{ПО}_{\text{ВТ}}$ і $\text{ПО}_{\text{НТ}}$.

Мета дослідження – визначення раціонального співвідношення теплових навантажень на ступені охолодження повітря $\text{ПО}_{\text{ВТ}}$ і $\text{ПО}_{\text{НТ}}$ (відповідно АБХМ і ЕХМ), яке забезпечує мінімально можливі теплові навантаження на градирні, та їх кількості.

2. Результати дослідження

В роботі [3] показано, що для кліматичних умов півдня України при охолодженні повітря до температури $t_{\text{п2}} = 10^\circ\text{C}$ раціональною можна вважати проектну питому (при витраті повітря $G_{\text{п}} = 1\text{кг/с}$) холодопродуктивність ТХМ $q_0 = 34\text{кВт/(кг/с)}$. Аналізували варіанти розподілу питомої холодопродук-

тивності між ступенями: $q_{0,ВТ} = 10$ кВт/(кг/с) і $7q_{0,НТ} = 24$ кВт/(кг/с), $q_{0,ВТ} = 24$ кВт/(кг/с) і $q_{0,НТ} = 10$ кВт/(кг/с) при $q_0 = 34$ кВт/(кг/с) (рис. 1).

Як видно, співвідношення теплових навантажень $q_{0,ВТ} = 10$ кВт/(кг/с) і $q_{0,НТ} = 24$ кВт/(кг/с) (рис. 1, а) не раціональне, оскільки зависоке $q_{0,НТ} = 24$ кВт/(кг/с) призводить до різкого збіль-

шення теплового навантаження на градирні $Q_{гр}$ через низькі $\zeta_E = 0,20 \dots 0,25$. Визначення раціонального числа градирень проводилося при проектних теплових навантаженнях $q_{0,ВТ} = 24$ кВт/(кг/с) і $q_{0,НТ} = 10$ кВт/(кг/с) за різної кількості градирень та однакової їх сумарної потужності (рис. 2).

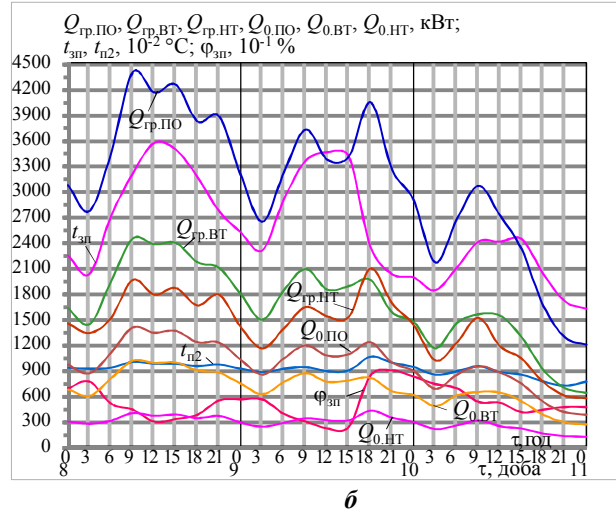
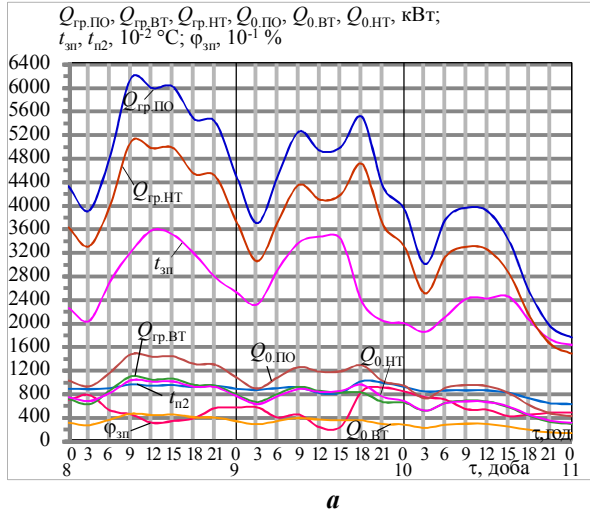


Рис. 1. Поточні значення температури $t_{зп}$ та відносної вологості $\phi_{зп}$ зовнішнього повітря, температури повітря на виході з двоступеневого ПО $t_{п2}$, теплових навантажень $Q_{0,ВТ}$ на ПО_{ВТ}, $Q_{0,НТ}$ на ПО_{НТ} і $Q_{0,ПО}$ – на двоступеневий ПО, теплових навантажень на градирні відведення теплоти: $Q_{гр,ВТ}$ – від АБХМ, $Q_{гр,НТ}$ – від ЕХМ та загального навантаження $Q_{0,ПО}$ – сумарне від обох ТХМ при витраті повітря $G_{п} = 40$ кг/с; а – проектні $q_{0,ВТ} = 10$ кВт/(кг/с); $q_{0,НТ} = 24$ кВт/(кг/с); $q_{0,ПО} = 34$ кВт/(кг/с); б – проектні $q_{0,ВТ} = 24$ кВт/(кг/с); $q_{0,НТ} = 10$ кВт/(кг/с); $q_{0,ПО} = 34$ кВт/(кг/с)

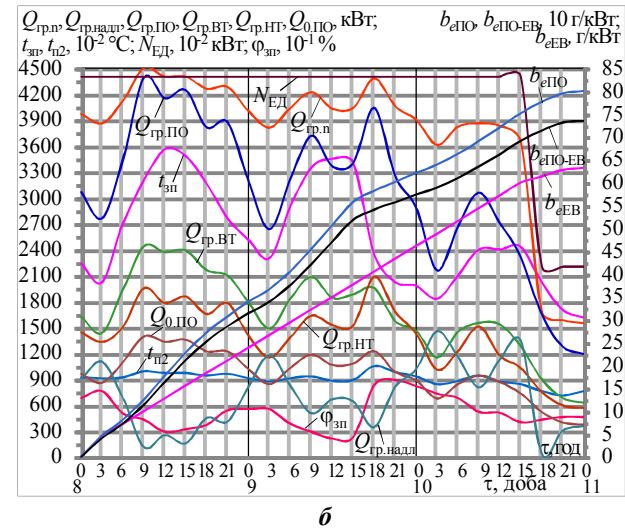
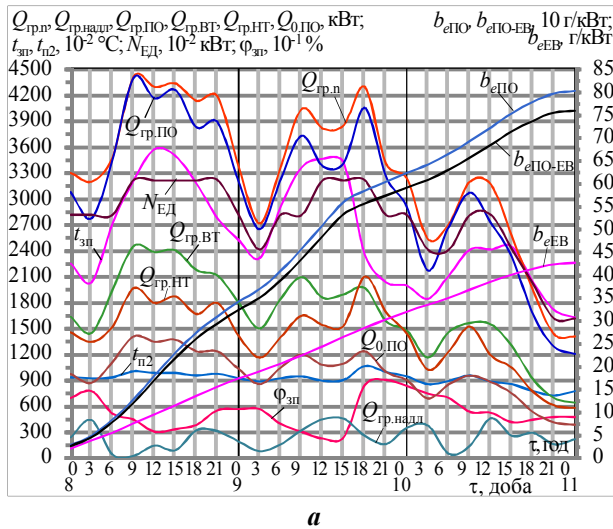


Рис. 2. Поточні значення температури $t_{зп}$ та відносної вологості $\phi_{зп}$ зовнішнього повітря, температури повітря на виході з двоступеневого ПО $t_{п2}$, теплового навантаження $Q_{0,ПО}$ на весь двоступеневий ПО, проектних теплових навантажень на градирні відведення теплоти: $Q_{гр,ВТ}$ – від АБХМ, $Q_{гр,НТ}$ – від ЕХМ та загального навантаження $Q_{0,Гр}$ – від обох ТХМ, теплового навантаження на градирні $Q_{гр,п}$ (з урахуванням їх кількості n), $N_{ЕД}$ – сумарної потужності електровентиляторів циркуляції повітря через градирні, надлишку проектної потужності градирень $Q_{гр,надл}$ порівняно з поточною кількістю теплоти, відведеної від ТХМ, сумарної за накопиченням питомої (на 1кВт потужності ГТУ) витрати палива на привід електровентиляторів градирень $b_{еЕВ}$, сумарної за накопиченням питомої (на 1кВт потужності ГТУ) економії палива за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ $b_{еПО}$, а також сумарної за накопиченням питомої економії палива з урахуванням витрати палива на привід електровентиляторів градирень $b_{еПО-ЕВ}$: а – 8 градирень, номінальна потужність кожної 500 кВт; б – 2 градирні, номінальна потужність кожної 2000 кВт

Як видно з результатів моделювання (див. рис. 2), обидва варіанти розрахунку свідчать про приблизно однакові показники питомої економії палива $b_{\text{ЕПО-ЕВ}}$. При цьому варіант з двома градирнями, потужністю 2000 кВт кожна, можна вважати раціональним.

Висновки

За результатами моделювання процесів двоступеневого охолодження повітря на вході ГТУ в АБХМ і ЕХМ визначено раціональні теплові навантаження на градирні відведення теплоти від ТХМ і їх кількість з урахуванням перерозподілу теплового навантаження між ступенями охолодження відповідно до поточних кліматичних умов експлуатації.

Література

1. Bhargava, R. *Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging [Text] / R. Bhargava, C. B. Meher-Homji // Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30560. – 15 p.*
2. Радченко, А. Н. *Эффективность способов охлаждения воздуха на входе ГТУ компрессорных станций в зависимости от климатических условий [Текст] / А. Н. Радченко, С. А. Кантор // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 1(118). – С. 95–98.*
3. *Метод визначення теплового навантаження системи кондиціонування повітря за максималь-*

ним темпом прирощення холодопродуктивності (на прикладі кондиціонування повітря енергетичного призначення) [Текст] / М. І. Радченко, Є. І. Трушляков, С. А. Кантор, Б. С. Портной, А. А. Зубарев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 4(148). – С. 44 – 48.

References

1. Bhargava, R., Meher-Homji, C. B. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging. *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002. – Paper GT-2002-30560. – 15 p.*
2. Radchenko, A. N., Kantor, S. A. Effektivnost' sposobov okhlazhdeniya vozdukhа na vkhode GTU kompressornykh stantsiy v zavisimosti ot klimaticheskikh uslovij [The efficiency of intake air cooling approaches for GTU of compressor stations for site climate conditions]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2015, no. 1 (118), pp. 95 – 98.
3. Radchenko, M. I., Trushliakov, E. I., Kantor, S. A., Portnoi, B. S., Zubarev, A. A. Metod vyznachennya teplovoho navantazhennya systemy kondytsiyuvannya povitrya za maksymal'nym tempom pryroshchennya kholodoproduktyvnosti (na prykladi kondytsiyuvannya povitrya enerhetychnoho pryznachennya) [Method of determination of thermal load air conditioning systems by maximum cold performance rate (on the example of air conditioning for energy purposes)]. *Avitsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2018, no. 4 (148), pp. 44 – 48.

Поступила в редакцію 12.09.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ГРАДИРЕН ОТВОДА ТЕПЛОТЫ В ПРОЦЕССАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А. Н. Радченко, Е. И. Трушляков, С. А. Кантор, Б. С. Портной

Процессы кондиционирования (тепловлажностной обработки) воздуха на входе энергоустановок теплоиспользующими холодильными машинами с отводом от них теплоты градирнями системы оборотного охлаждения исследованы на примере газотурбинной установки. Рассмотрено двухступенчатое охлаждение воздуха с применением двухступенчатой теплоиспользующей абсорбционно-эжекторной холодильной машины комбинированного типа, которая утилизирует теплоту отработавших газов газотурбинной установки и в состав которой входят абсорбционная бромистолитиевая и хладоновая эжекторная холодильные машины как ступени трансформации сбросной теплоты в холод. По результатам моделирования работы всего охлаждающего комплекса газотурбинной установки получены данные текущих тепловых нагрузок на теплоиспользующие холодильные машины и градирни в соответствии с климатическими условиями эксплуатации при разном распределении проектных тепловых нагрузок на ступени охлаждения воздуха и, соответственно, трансформации сбросной теплоты в холод. Поскольку тепловая нагрузка на градирни зависит от эффективности трансформации сбросной теплоты в холод (тепловых коэффициентов) абсорбционной бромистолитиевой и хладоновой эжекторной холодильными машинами, то, по результатам моделирования, определено рациональное распределение проектных тепловых нагрузок на абсорбционную и эжекторную ступени теплоиспользующей холодильной машины комбинированного типа, которое обеспечивает сокращения тепловой нагрузки на градирни. Показано, что благодаря такому подходу к определению рациональной тепловой нагрузки на градирни системы оборотного охлаждения, который состоит в учёте перераспределения тепловой нагрузки между абсорбционной бромистолитиевой и хладоновой эжекторной ступенями охлаждения с разной эффективностью трансформации сбросной теплоты (разными тепловыми коэффициентами) в соответствии с текущими климатическими условиями эксплуатации, возможно свести к минимуму количество

градиент отведения теплоты от холодильных машин с соответствующим сокращением капитальных расходов на комплекс охлаждения воздуха на входе газотурбинной установки в целом.

Ключевые слова: кондиционирование; тепловая нагрузка; градирня; система оборотного охлаждения; теплоиспользующая холодильная машина; воздухоохладитель.

DETERMINATION OF THE RATIONAL HEAT LOAD OF COOLING TOWERS OF HEAT DISCHARGE IN AIR CONDITIONING PROCESSES AT THE INLET OF ENERGY UNITS

A. N. Radchenko, E. I. Trushliakov, S. A. Kantor, B. S. Portnoi

The air conditioning processes (heat-humidity treatment) at the inlet of energy units by heat-energized refrigeration mechanisms with heat removal cooling towers of the cooling system are studied on the example of a gas turbine unit. Two-stage air cooling is considered applying a two-stage combined type heat-energized refrigeration mechanism, which applies the exhaust gas heat of a gas turbine unit and which includes absorption lithium-bromide and refrigerant ejector refrigeration mechanism as steps to convert waste heat into cold. Based on the results of modeling the operation of the cooling complex of a gas turbine unit, data was obtained on current heat loads on heat-energized refrigeration mechanisms and cooling towers in accordance with the climatic conditions of operation with different distribution of project heat loads on the air cooling stages and, accordingly, on the transformation of waste heat into cold. Due to the fact that the heat load on the cooling towers depends on the efficiency of transformation of waste heat into cold (heat coefficients) by absorption lithium-bromide and refrigerant ejector refrigeration mechanisms, a rational distribution of the project heat loads to the absorption and ejector stages of a combined type heat-energized refrigeration mechanisms that provides reduce heat load on cooling towers. It is demonstrated that due to this approach to determining the rational heat load on the cooling towers of the cooling system, which consists of calculation the redistribution of heat load between the absorption lithium-bromide and refrigerant ejector cooling stages with different efficiency and transformation of waste heat (different heat coefficients) in accordance with current climate conditions, is possible to minimize the number of cooling with a corresponding reduction in capital expenditures on the air conditioning system at the inlet of gas turbine unit.

Keywords: conditioning; heat load; cooling tower; circulating cooling system; waste heat recovery chiller; air cooler.

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

Трушляков Євген Іванович – канд. техн. наук, проф. Національного університету 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 Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail:

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

Trushliakov Eugeny Ivanovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

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

Portnoi Bohdan Sergeevich – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: