

УДК 621.438.13:621.57

doi: 10.32620/aktt.2019.4.02

Є. І. ТРУШЛЯКОВ¹, А. М. РАДЧЕНКО¹, М. І. РАДЧЕНКО¹,
С. А. КАНТОР², В. С. ТКАЧЕНКО²

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² ПАТ "Завод "Екватор", Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНДИЦІОНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ТИПУ

Одним із резервів підвищення енергетичної ефективності систем кондиціювання повітря є забезпечення роботи холодильних компресорів у номінальному або близькому до номінального режима шляхом вибору раціональних проектних теплових навантажень охолодження (холодопродуктивності) та їх розподілу відповідно до характеру зміни теплового навантаження в межах його проектної (встановленої) величини відповідно до поточних змінних кліматичних умов з метою забезпечення близького до максимального річного виробництва холоду (річної холодопродуктивності) відповідно до потреб кондиціювання. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності кондиціювання зовнішнього повітря в системах комбінованого центрально-місцевого типу шляхом раціонального розподілу теплового навантаження – витрат холодопродуктивності – центрального кондиціонера на зони змінного теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов і відносно стабільної його величини, тобто витрат холодопродуктивності на подальше охолодження повітря на вході до системи місцевого кондиціювання рециркуляційного повітря в окремих приміщеннях. За результатами зіставлення значень надлишку виробництва холоду та його дефіциту за кожні 3 доби для раціонального проектного теплового навантаження системи кондиціювання (холодопродуктивності встановленої холодильної машини), яке забезпечує близьке до максимального річне виробництво холоду, та за відповідними величинами надлишку і дефіциту холодопродуктивності відповідно до поточних кліматичних умов по накопиченню за упродовж липня обґрунтована доцільність акумуляції надлишку холодопродуктивності центрального кондиціонера при знижених поточних теплових навантаженнях та її використання для покриття дефіциту холоду при підвищених теплових навантаженнях шляхом попереднього охолодження зовнішнього повітря. Розроблено схему комбінованої центрально-місцевої системи кондиціювання повітря, до складу якої входять підсистеми кондиціювання зовнішнього повітря в центральному кондиціонері та місцевого кондиціювання рециркуляційного повітря в окремих приміщеннях.

Ключові слова: кондиціювання повітря; холодопродуктивність; попереднє охолодження; клімат.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Особливістю роботи систем кондиціювання повітря (СКП) є значні коливання теплового навантаження відповідно до поточних параметрів зовнішнього повітря. Низка досліджень присвячена підвищенню ефективності СКП комбінованого типу – центрально-місцевих, або центрально-рециркуляційних [1–4], у тому числі використанню надлишкової холодопродуктивності, накопиченої при зменшених навантаженнях охолодження, для покриття пікових теплових навантажень або попереднього охолодження зовнішнього повітря [5, 6].

Одним з потужних резервів підвищення енергетичної ефективності СКП є збільшення коефіцієнта використання холодильних машин (ХМ) СКП (тривалості роботи упродовж року при близьких проектному теплових навантаженнях) шляхом ви-

значення раціональної встановленої холодопродуктивності, тобто проектного теплового навантаження СКП, та її раціонального використання відповідно до поточних кліматичних умов, що забезпечує енергетично ефективну роботу СКП при навантаженнях, близьких до номінальних [5, 6].

Метою роботи – є підвищення ефективності кондиціювання зовнішнього повітря системи комбінованого центрально-місцевого типу шляхом раціонального розподілу теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов і відносно стабільної його величини, накопичення надлишку холодопродуктивності та його використання для попереднього охолодження зовнішнього повітря.

2. Результати дослідження

З метою узагальнення і поширення результатів на СКП різної продуктивності – витрати повітря в

повітроохолоджувачі (ПО) – доцільно представляти їх характеристики як питомі, тобто у відносних величинах, віднесених до витрати повітря G_n в ПО.

Про характер зміни питомого річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)$ та річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)/q_0$, віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності (холодильної потужності ХМ) q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності $q_0 = Q_0/G_n$, кДж/кг, встановленої холодильної машини для температури охолодженого повітря $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ та кліматичних умов Миколаївської обл., 2017 рік, можна судити по рис. 1.

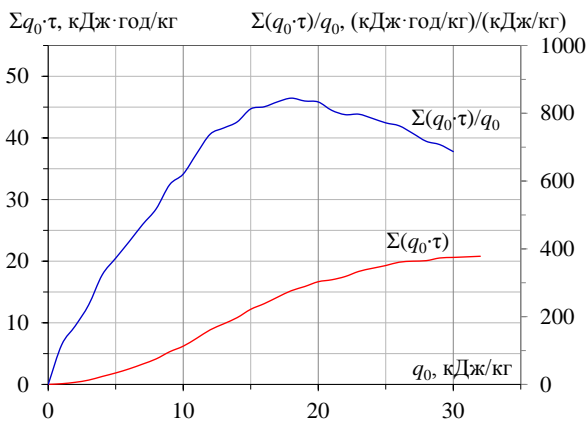


Рис. 1. Значення питомого (при $G_n = 1$ кг/с) річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)$ та річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)/q_0$, віднесеного до питомої холодопродуктивності ХМ СКП q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності q_0

Питоме річне виробництво холоду – витрати холодопродуктивності на кондиціювання повітря одиначної витрати ($G_n = 1$ кг/с) $\sum(q_0 \cdot \tau) = \sum(Q_0 \cdot \tau)/G_n$, кВт·год/(кг/с), або кДж·год/кг, де $\sum(Q_0 \cdot \tau)$ – повне річне виробництво холоду, кВт·год; Q_0 – холодопродуктивність, кВт; τ – період, год.

Як видно з рис. 1, питоме річне виробництво холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)$ на охолодження повітря до $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ при проектній питомій холодопродуктивності $q_{0.15} = 25$ кВт/(кг/с), або кДж/кг, приблизно $\sum(q_0 \cdot \tau)_{15} = 25$ кДж·год/кг і досягається з доволі високим темпом її приросту.

Через падіння темпу приросту $\sum(q_0 \cdot \tau)_{15}$ подальше збільшення проектної питомої холодопродуктивності $q_{0.10}$ не призводить до помітного збільшення річного виробництва холоду. Таким чином, питомому холодопродуктивності $q_{0.15\text{рац}} = 25$ кДж/кг приймають за раціональну, що забезпечує річне виробництво холоду, близьке до максимального.

Значення річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)/q_0$, віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності q_0 дозволяє визначити мінімальну проектну (встановлену) холодопродуктивність, що забезпечує максимальний темп приросту річного виробництва холоду відповідно до збільшення встановленої холодопродуктивності ХМ.

Максимальний темп приросту річного виробництва холоду у вигляді співвідношення $\sum(q_0 \cdot \tau)/q_0$ при охолодженні повітря до $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ досягається при проектній питомій холодопродуктивності $q_{0.\text{опт}} = 17$ кДж/кг (оптимальне значення $q_{0.\text{опт}}$), що значно менше, ніж раціональна $q_{0.15\text{рац}} = 25$ кДж/кг.

Очевидно, що за меншої встановленої питомої холодопродуктивності $q_0 = 17$ кДж/кг максимальне значення річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)_{15} = 20$ кДж·год/кг може бути досягнуто за рахунок використання надлишку холоду, накопичуваного при зменшених поточних теплових навантаженнях, для покриття підвищених потреб охолодження.

Типова схема центрально-місцевої СКП комбінованого типу та схема вдосконаленої комбінованої СКП з використанням надлишку холоду для попереднього охолодження зовнішнього повітря в ПО водяного охолодження показані на рис. 2.

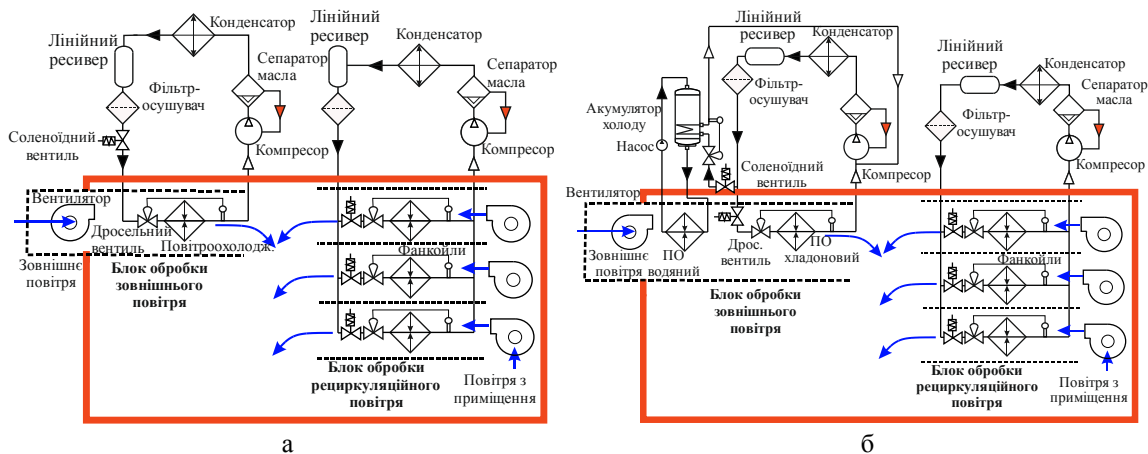


Рис. 2. Типова схема центрально-місцевої СКП (а) та запропонована вдосконалена схема комбінованої СКП з використанням надлишку холоду для попереднього охолодження зовнішнього повітря у водяному ПО (б)

Для обґрунтування підходу до визначення проектного теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов поточні значення питомого теплового навантаження СКП $q_{0.15}$, необхідного для охолодження зовнішнього повітря до $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$, теплового навантаження $q_{0.10-15} = q_{0.10} - q_{0.15}$ подальшого охолодження повітря від $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ для кліматичних умов Миколаївської обл. (липень 2017 р.) представлено на рис.3.

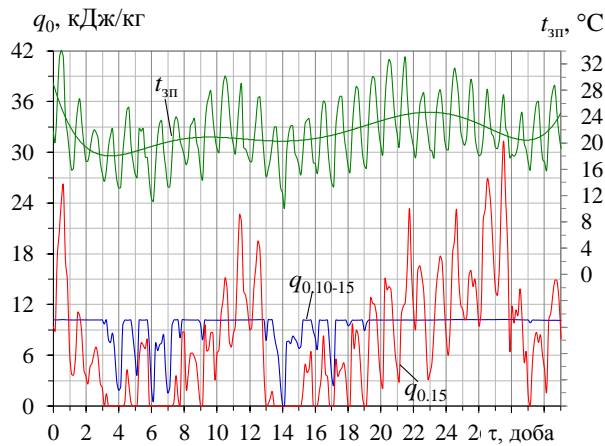


Рис. 3. Поточні значення питомих теплових навантажень на ПО $q_{0.15}$, необхідних для охолодження зовнішнього повітря $t_{зп}$ до температури $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$, теплового навантаження $q_{0.10-15}$ для подальшого охолодження повітря від $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$, температури зовнішнього повітря $t_{зп}$

Як видно з рис. 3, при подальшому охолодженні повітря від $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ коливання теплового навантаження на СКП $q_{0.10-15}$ спрямовані практично в бік їх зменшення. Тож температуру

охолодженого повітря $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ цілком логічно вважати за порогову, подальше охолодження повітря нижче якої проходить за відносно стабільного теплового навантаження $q_{0.10-15} = q_{0.10} - q_{0.15}$.

Як видно, характер теплового навантаження на СКП відмінний: значні зміни теплового навантаження $q_{0.15}$ і порівняно стабільне теплове навантаження $q_{0.10-15}$ подальшого охолодження повітря від $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$.

Оскільки раціональне проектне питоме теплове навантаження $q_{0.15\text{рац}} = 25 \text{ кДж/кг}$ вибране дещо менше необхідного для максимального річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)_{15}$ (див. рис. 1), у найтепліші дні зовнішнє повітря не буде охолоджуватись до температури $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ через дефіцит холодопродуктивності $q_{0.15\text{д.рац}} = q_{0.15} - 25 \text{ кДж/кг}$.

Аналогічно, оскільки оптимальне проектне теплове навантаження $q_{0.15\text{опт}} = 17 \text{ кДж/кг}$, в свою чергу, менше раціонального $q_{0.15\text{рац}} = 25 \text{ кДж/кг}$, питання покриття дефіциту холодильної потужності $q_{0.15\text{д.опт}} = q_{0.15} - 18 \text{ кДж/кг}$ постає ще гостріше, то доцільно використовувати холод, накопичений упродовж знижених теплових навантажень на СКП.

Як показують розрахунки, дефіцит холодопродуктивності $q_{0.15\text{д.рац}}$ (при $q_{0.15\text{рац}} = 25 \text{ кДж/кг}$) практично незначний і має місце тільки упродовж лічних годин в липні для кліматичних умов у Миколаївській області (рис. 4,а). Відсутність практично дефіциту холодильної потужності ХМ доводить, що температура повітря $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$ обрана правильно. Однак при оптимальному проектному теплому навантаженні $q_{0.15\text{опт}} = 17 \text{ кДж/кг}$ дефіцит холодопродуктивності $q_{0.15\text{д.опт}}$ суттєво зростає (рис. 4, б).

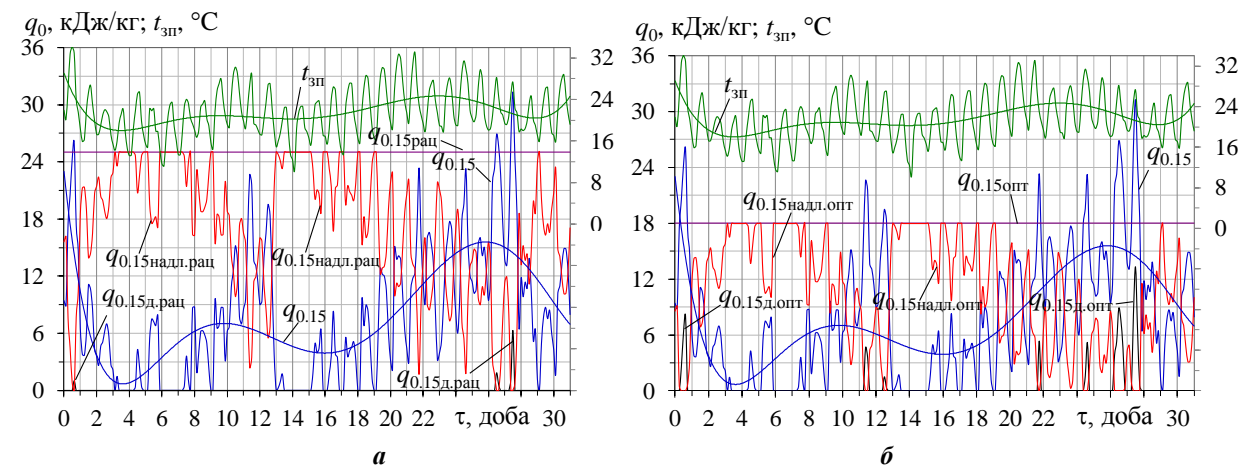


Рис. 4. Поточні значення питомого теплового навантаження $q_{0.15}$, необхідного для охолодження зовнішнього повітря від поточної температури $t_{зп}$ до температури $t_{п2} = 15^\circ\text{C}$, дефіциту $q_{0.15\text{д}}$ і надлишку $q_{0.15\text{надл}}$ для раціонального (а) і оптимального (б) проектного теплового навантаження

Про можливість використання надлишкового холоду, накопиченого при знижених поточних теплових навантаженнях на СКП, для покриття дефіциту при пікових навантаженнях можна тлумачити за розрахованими (для кожних трьох діб) значеннями дефіциту $\sum q_{0.15д_рац}$ і надлишку $\sum q_{0.15надл_рац}$ питомого виробництва холоду за кожні 3 доби для раціонального проектного теплового навантаження $q_{0.15рац}$, яке забезпечує максимальне річне виробництво холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)$, а також їх дефіциту $\sum q_{0.15д_опт}$ та надлишку $\sum q_{0.15надл_опт}$ за кожні 3 доби для оптимального проектного теплового навантаження $q_{0.15опт}$, що забезпечує максимальний темп приросту річного виробництва холоду $\sum(q_0 \cdot \tau)/q_0$, а також за відповідними величинами дефіциту $\sum q_{0м.15д}$ і надлишку $\sum q_{0м.15надл}$ по накопиченню за місяць для кліматичних умов липня 2017 р. Миколаївської області (рис. 5).

Як видно з рис. 5, при зменшенні проектного теплового навантаження від раціонального $q_{0.15рац}$ до оптимального $q_{0.15опт}$ величина сумарного по накопиченню за місяць надлишку $\sum q_{0м.15надл}$ скоротилась з 12,8 МДж/кг до 7,8 МДж/кг, а дефіцит $\sum q_{0м.15д}$, навпаки, виріс приблизно з 33 кДж/кг до 290 кДж/кг, однак загалом величини сумарного накопиченого надлишку холодопродуктивності при знижених теплових навантаженнях значно перевищують її дефіцит. Це свідчить про доцільність накопичення надлишку холодопродуктивності та його використання для попереднього охолодження зовнішнього повітря в підсистемі кондиціонування зовнішнього повітря (у центральному кондиціонері) на вході у підсистему кондиціонування повітря в окремих приміщеннях (місцевого кондиціонування рециркуляційного повітря) у складі комбінованої центрально-місцевої СКП за розробленою схемою (див. рис. 2, б).

Висновки

Обґрунтовано напрям підвищення ефективності кондиціонування зовнішнього повітря в системах комбінованого центрально-місцевого типу шляхом раціонального розподілу теплового навантаження центрального кондиціонера на зони змінного теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов і відносно стабільної його величини на подальше охолодження повітря на вході до системи кондиціонування рециркуляційного повітря в окремих приміщеннях, накопичення надлишку холодопродуктивності центрального кондиціонера та його використання для попереднього охолодження зовнішнього повітря.

Розроблено схему комбінованої центрально-місцевої СКП, до складу якої входять підсистеми кондиціонування зовнішнього повітря в центральному кондиціонері та місцевого кондиціонування рециркуляційного повітря в окремих приміщеннях.

Література

1. Goetzler, W. *Variable Refrigerant Flow Systems [Text]* / W. Goetzler // *ASHRAE Journal*. – 2007. – Vol. 49 (4). – P. 24–31.
2. *Cooling Season Full and Part Load Performance Evaluation of Variable Refrigerant Flow (VRF) System Using an Occupancy Simulated Research Building [Text]* / P. Im, M. Malhotra, J. D. Munk, J. Lee // *Proceedings of the 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, USA, July 11–14, 2016*. – Paper 1788.
3. Khatri, R. *Energy Performance Comparison of Inverter based Variable Refrigerant Flow Unitary AC with Constant Volume Unitary AC [Text]* / R. Khatri, A. Joshi // *Energy Procedia*. – 2017. – No. 109. – P. 18–26.

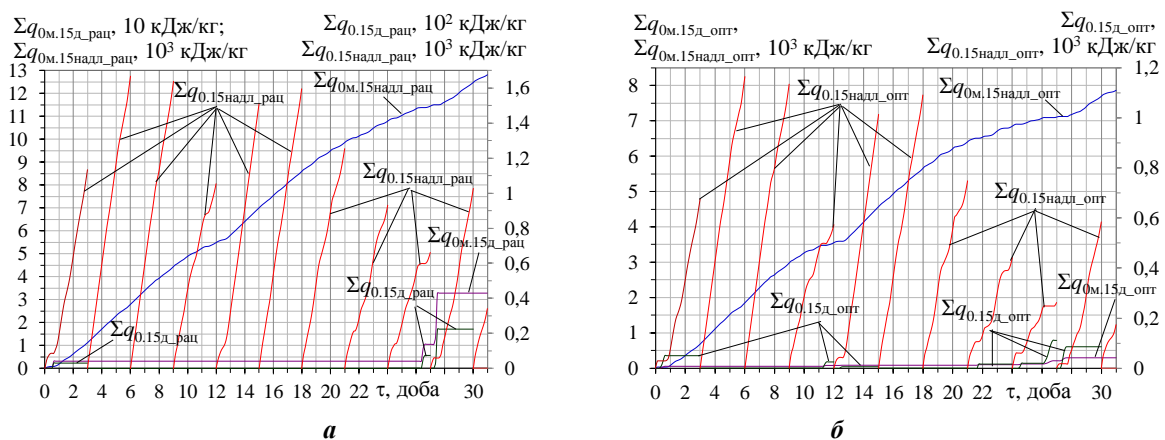


Рис. 5. Значення сумарного дефіциту $\sum q_{0.15д}$ і надлишку $\sum q_{0.15надл}$ питомої холодопродуктивності для раціонального $q_{0.15рац}$ (а) та оптимального $q_{0.15опт}$ (б) проектних навантажень за кожні три доби, а також по накопиченню за місяць дефіциту $\sum q_{0м.15д}$ і надлишку $\sum q_{0м.15надл}$ питомої холодопродуктивності

4. Verification of energy reduction effect through control optimization of supply air temperature in VRF-OAP system [Text] / J. H. Lee, H. J. Yoon, P. Im, Y.-H. Song // *Energies*. – 2018. – Vol. 11 (1): 49. DOI: 10.3390/en11010049.

5. Gas turbine unite inlet air cooling by using an excessive refrigeration capacity of absorption-ejector chiller in booster air cooler [Text] / R. Radchenko, A. Radchenko, S. Serbin, S. Kantor, B. Portnoi // *HTRSE-2018. E3S Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 70. – 6 p.

6. Statistical approach to improve the efficiency of air conditioning system performance in changeable climatic conditions [Text] / E. Trushliakov, M. Radchenko, A. Radchenko, S. Kantor, Y. Zongming // *The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018"*. – 2018. – P. 1303-1307.

References

1. Goetzler, W. Variable Refrigerant Flow Systems. *ASHRAE Journal*, vol. 49 (4), 2007, pp. 24–31.

2. Im, P., Malhotra, M., Munk, J. D., Lee, J. Cooling Season Full and Part Load Performance Evaluation of Variable Refrigerant Flow (VRF) System Using an Occupancy Simulated Research Building. *Proceedings*

of the 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, USA, July 11–14, 2016, paper 1788.

3. Khatri, R., Joshi, A. Energy Performance Comparison of Inverter based Variable Refrigerant Flow Unitary AC with Constant Volume Unitary AC. *Energy Procedia*, no. 109, 2017, pp. 18–26.

4. Lee, J. H., Yoon, H. J., Im, P., Song, Y.-H. Verification of energy reduction effect through control optimization of supply air temperature in VRF-OAP system. *Energies*, vol. 11 (1):39, 2018. DOI: 10.3390/en11010049.

5. Radchenko, R., Radchenko, A., Serbin, S., Kantor, S., Portnoi, B. Gas turbine unite inlet air cooling by using an excessive refrigeration capacity of absorption-ejector chiller in booster air cooler. *HTRSE-2018. E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 70. 6 p.

6. Trushliakov, E., Radchenko, M., Radchenko, A., Kantor, S., Zongming, Y. Statistical approach to improve the efficiency of air conditioning system performance in changeable climatic conditions. *The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018"*, 2018, pp. 1303-1307.

Поступила в редакцию 12.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Е. И. Трушляков, А. Н. Радченко, Н. И. Радченко, С. А. Кантор, В. С. Ткаченко

Одним из резервов повышения энергетической эффективности систем кондиционирования воздуха является обеспечение работы холодильных компрессоров в номинальном или близком к номинальному режимам путем выбора рациональных проектных тепловых нагрузок охлаждения (холодопроизводительности) и их распределения в соответствии с характером изменения тепловой нагрузки в пределах его проектной (установленной) величины в соответствии с текущими переменными климатическими условиями с целью обеспечения близкого к максимальному годового производства холода (годовой холодопроизводительности) в соответствии с потребностями кондиционирования. Обосновано направление повышения эффективности кондиционирования наружного воздуха в системах комбинированного центрально-местного типа путем рационального распределения тепловой нагрузки - расходов холодопроизводительности - центрального кондиционера на зоны переменной тепловой нагрузки в соответствии с текущими климатическими условиями и относительно стабильной ее величины, то есть затрат холодопроизводительности на дальнейшее охлаждение воздуха на входе в систему местного кондиционирования рециркуляционного воздуха в отдельных помещениях. По результатам сопоставления значений избытка производства холода и его дефицита за каждые 3 суток для рациональной проектной тепловой нагрузки системы кондиционирования (холодопроизводительности установленной холодильной машины), которая обеспечивает близкое к максимальному годовое производство холода, и по соответствующим величинам избытка и дефицита холодопроизводительности в соответствии с текущими климатическими условиями по накоплению в течение июля обоснована целесообразность аккумуляции избытка холодопроизводительности центрального кондиционера при пониженных текущих тепловых нагрузках и ее использования для покрытия дефицита холода при повышенных тепловых нагрузках путем предварительного охлаждения наружного воздуха. Разработана схема комбинированной центрально-местной системы кондиционирования воздуха, в состав которой входят подсистемы кондиционирования наружного воздуха в центральном кондиционере и местного кондиционирования рециркуляционного воздуха в отдельных помещениях.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха; холодопроизводительность; предварительное охлаждение; климат.

INCREASING THE EFFICIENCY OF AMBIENT AIR CONDITIONING IN THE COMBINED TYPE SYSTEM

E. I. Trushliakov, A. M. Radchenko, M. I. Radchenko, S. A. Kantor, V. S. Tkachenko

One of the most attractive reserves of enhancing the energetic efficiency of air conditioning systems is to provide the operation of refrigeration compressors in nominal or close to nominal modes by choosing rational design cooling loads (cooling capacities) and their distribution according to a cooling load behaviour within the overall design (installed) cooling load band to match current changeable climatic conditions and provide close to maximum annual cooling capacity generation according to cooling duties.

The direction of increasing the efficiency of outdoor air conditioning in combined central-local type systems by rationally distributing the heat load - cooling capacity of the central air conditioner into zones of variable heat load in accordance with current climatic conditions and its relatively stable value, i.e. cooling capacity required for further air cooling at the entrance to the indoor recirculation air conditioning system is justified. By comparing the values of the excessive production of cold and its deficit within every 3 days for a rational design heat load of the air conditioning system (cooling capacity of the installed refrigeration machine), which provides close to maximum annual production of cold, and the corresponding values of the excess and deficit of cooling capacity in accordance with current climatic conditions during July substantiated the feasibility of accumulating the excess of cooling capacity of a central air conditioner at low current loads and its use for covering cooling deficit at elevated heat loads through pre-cooling the outdoor air. It is developed a scheme of a combined central-local air conditioning system, which includes the subsystems for the outdoor air conditioning in a central air conditioner and the local indoor recirculated air conditioning.

Keywords: air conditioning; cooling capacity; precooling; climate.

Трушликов Євген Іванович – канд. техн. наук, проф. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри кондиціювання і рефрижерациї Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Ткаченко Веніамін Сергійович – аспірант Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Trushliakov Evgeniy Ivanovych – Candidate of Technical Science, Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: eugeniyt@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6171-5438.

Radchenko Andrii Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8735-9205.

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, ORCID Author ID: 0000-0001-5796-5370.

Kantor Sergiy Anatoliyovych – PhD, PJSC "Zavod "Ekvator", Mykolaiv, Ukraine, e-mail: s_kantor@mail.ru, ORCID Author ID: 0000-0001-5050-5937.

Tkachenko Veniamin Sergiyovych – PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: btd@zavod-ekvator.com, ORCID Author ID: 0000-0003-0790-8698.