

УДК 66.067.1.621.72

СТУПЕНЕВИЙ ПРИНЦИП РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ В СИСТЕМІ КОНДИЦІЮВАННЯ ПОВІТРЯ

Є.І. Трушляков, к.т.н., професор, А.М. Радченко, к.т.н., доцент, В.С. Ткаченко, аспірант, Б.С. Портной, аспірант,

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна;

С.Г. Фордуй, к.т.н., технічний керівник напрямку енергоресурсів та енергозбереження

PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна;

С.А. Кантор, к.т.н.,

ПАТ "Завод "Екватор", Миколаїв, Україна

nirad50@gmail.com

Анотація. Підтримання роботи холодильних компресорів в номінальному або близькому до нього режимах шляхом вибору раціонального проектного теплового навантаження та його розподілу за характером зміни поточного теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов є одним з перспективних резервів підвищення енергетичної ефективності систем кондиціювання повітря, реалізація якого забезпечує досягнення максимального або близького до нього річного виробництва холоду відповідно до його витрат на кондиціювання повітря. В загальному випадку весь діапазон поточних теплових навантажень будь-якої системи кондиціювання повітря включає діапазон нестабільних навантажень, обумовлених попереднім охолодженням зовнішнього повітря зі значними коливаннями витрат холодопродуктивності відповідно до поточних кліматичних умов, і діапазон порівняно стабільної холодильної потужності, що витрачається на подальше зниження температури повітря від певної порогової температури до кінцевої температури на виході. Якщо діапазон стабільного теплового навантаження може бути забезпечений при роботі звичайного компресора в режимі, близькому до номінального, то попереднє охолодження зовнішнього повітря зі значними коливаннями теплового навантаження потребує регулювання холодопродуктивності шляхом застосування компресора з регульованою швидкістю або ж використання надлишку холоду, закумульованого при знижених теплових навантаженнях. Такий ступеневий принцип охолодження забезпечує узгодження роботи холодильних машин з характером зміни поточних теплових навантажень будь-якої системи кондиціювання повітря, чи то центральної системи кондиціювання повітря з його тепловологісною обробкою в центральному кондиціонері, чи то її комбінації з місцевою рециркуляційною системою кондиціювання повітря в приміщеннях, по суті, як комбінації підсистем – попереднього охолодження зовнішнього повітря з регулюванням холодопродуктивності та подальшого охолодження повітря до встановленої кінцевої температури в умовах відносно стабільного теплового навантаження.

Ключові слова: система кондиціювання, холодопродуктивність, теплове навантаження, річне виробництво холоду.

Актуальність теми.

Робота систем кондиціювання повітря (СКП) характеризується значними коливаннями теплового навантаження, які значною мірою визначаються тепловологісними параметрами зовнішнього повітря. Тому проблема вибору встановленої (проектної) холодопродуктивності холодильних машин (ХМ) СКП в умовах нерівномірних теплових навантажень є досить гострою, і від її вирішення залежать навантаження та тривалість експлуатації ХМ упродовж року, тобто ефективність використання встановлених холодильних потужностей [3]. Завищені встановлені холодильні потужності ХМ (проектні теплові навантаження СКП) спричиняють невиправдані капітальні витрати на ХМ, а занизькі – призводять до порушення режимів тепловологісної обробки повітря через нестачу холоду, що неприпустимо, передусім для комфортного кондиціювання.

Мета дослідження – розробити метод визначення проектного холодопродуктивності СКП та її раціонального розподілу за пороговою температурою відповідно до кліматичних умов експлуатації.

Результати дослідження.

Для узагальнення результатів, отриманих для СКП різної продуктивності, доцільно представляти їх характеристики як питомі, тобто у відносних величинах, віднесених до витрати повітря в повітроохолоджувачі (ПО).

Характер зміни темпу питомого річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$, віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності (холодильної потужності ХМ) q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності $q_0 = Q_0/G_a$, кДж/кг, встановленої ХМ для температур охолодженого повітря $t_{n2} = 20, 17, 15$ та 10°C і кліматичних умов Миколаївської обл., 2017 рік, представлено на рис. 1.

Як видно, максимальний темп приросту річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$ при охолодженні повітря до $t_{n2} = 10^\circ\text{C}$ має місце при проектній питомій холодопродуктивності $q_{0.10\text{опт}} = 27$ кДж/кг, для температур $t_{n2} = 15, 17$ та 20°C відповідно: $q_{0.15\text{опт}} = 18$ кДж/кг, $q_{0.17\text{опт}} = 15$ кДж/кг та $q_{0.20\text{опт}} = 12$ кДж/кг (оптимальні значення $q_{0.опт}$).

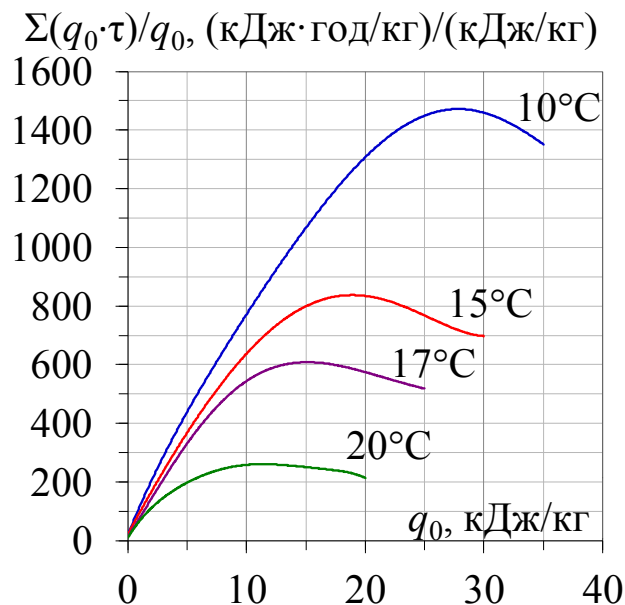
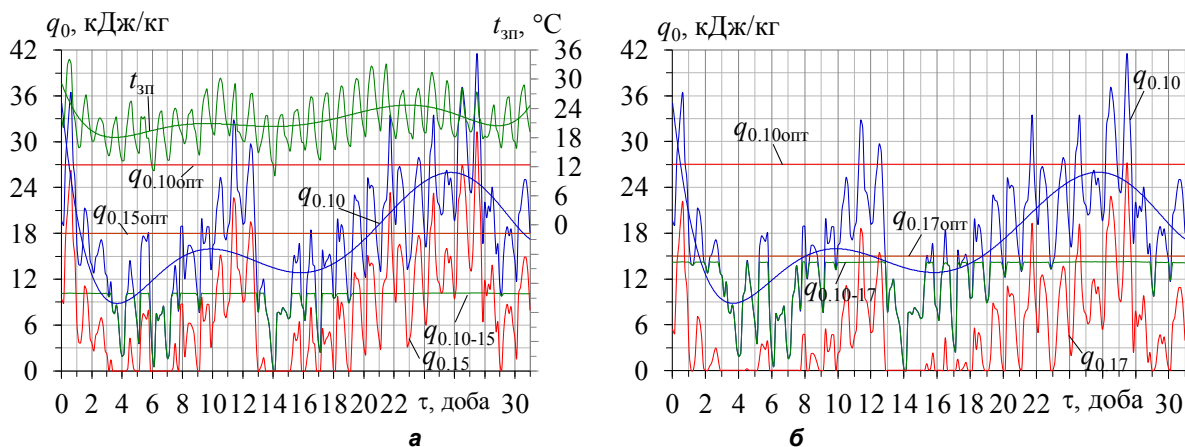


Рис. 1. Значення питомого (при $G_n = 1$ кг/с) річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$, віднесеного до встановленої питомої холодопродуктивності ХМ СКП q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності q_0 при температурах охолодженого повітря $t_{n2} = 10, 15, 17$ та 20°C

Для обґрунтування підходу до розподілу проектного теплового навантаження відповідно до поточних кліматичних умов поточні значення питомих теплових навантажень СКП q_0 при охолодженні зовнішнього повітря від $t_{зп}$ до t_{n2} $^\circ\text{C}$, теплового навантаження $q_{0.10-20} = q_{0.10} - q_{0.20}$ для охолодження повітря від 20°C до 10°C і $q_{0.10-17} = q_{0.10} - q_{0.17}$ – від 17°C до 10°C та $q_{0.10-15} = q_{0.10} - q_{0.15}$ – від 15°C до 10°C для липня 2017 р. представлено на рис. 2.



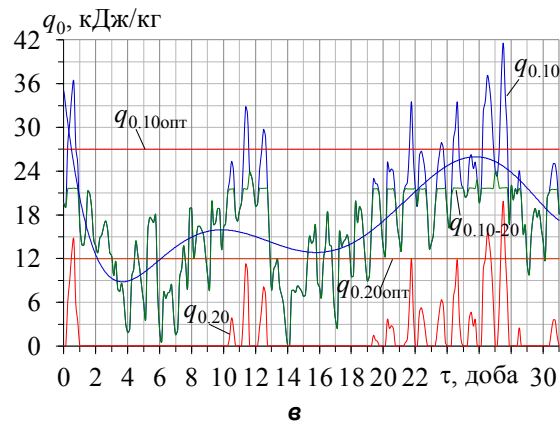


Рис. 2. Поточні значення питомих холодинних потужностей $q_{0,20}$, $q_{0,17}$, $q_{0,15}$ та $q_{0,10}$, необхідних для охолодження зовнішнього повітря від $t_{зп}$ до температур 20, 17, 15 і 10°C, відповідно, питомі холодинні потужності: $q_{0,10-20} = q_{0,10} - q_{0,20}$ при охолодження повітря від 20°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$, $q_{0,10-17} = q_{0,10} - q_{0,17}$ (від 17°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$), $q_{0,10-15} = q_{0,10} - q_{0,15}$ (від 15°C до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$), загальних оптимальних проектних питомих холодинних потужностей $q_{0,20\text{опт}}$, $q_{0,17\text{опт}}$, $q_{0,15\text{опт}}$ і $q_{0,10\text{опт}}$ для охолодження зовнішнього повітря до 20, 17, 15 і 10°C, відповідно, за липень 2017 р.: а – порогова температура 15°C; б – 17°C; в – 20°C

Як видно з рис. 2, питомі холодинні потужності $q_{0,10-20}$ та $q_{0,10-17}$ охолодження повітря від 20 та 17°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$ доволі нестабільні. Це спричинено більш раннім (при більш високій проміжній температурі 20 і 17°C у порівнянні з 15°C) падінням до нуля теплових навантажень $q_{0,20}$ та $q_{0,17}$ попереднього охолодження зовнішнього повітря, що викликано зменшенням температурного діапазону $\Delta t_{20} = t_{зп} - 20^\circ\text{C}$ та $\Delta t_{17} = t_{зп} - 17^\circ\text{C}$ (у порівнянні з $\Delta t_{15} = t_{зп} - 15^\circ\text{C}$), результатом чого є відповідне збільшення холодинних потужностей $q_{0,10-20}$ і $q_{0,10-17}$, необхідних для подальшого охолодження повітря від температур 20 та 17°C до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ (рис. 3). Як наслідок, питомі холодинні потужності $q_{0,10-20}$ та $q_{0,10-17}$ для подальшого охолодження повітря від 20 і 17°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$ суттєво перевищують відносно стабільні величини $q_{0,10-15}$ і відзначаються значними коливаннями.

На відміну від поділу загальної питомої холодинної потужності СКП на два діапазони: нестабільної $q_{0,15}$ і порівняно стабільної $q_{0,10-15}$ за пороговою температурою $t_{п2}=15^\circ\text{C}$, у разі поділу загальної оптимальної проектної холодинної потужності $q_{0,10\text{опт}}$ за проміжними температурами 20 і 17°C теплові навантаження в діапазонах $q_{0,20}$ і $q_{0,10-20}$, а також $q_{0,17}$ і $q_{0,10-17}$ дуже нестабільні (рис. 2), як і визначені за остаточним принципом їх значення при попередньому (бустерному) охолодженні зовнішнього повітря $q_{0,510-20\text{опт}} = q_{0,10\text{опт}} - q_{0,10-20}$ і $q_{0,510-17\text{опт}} = q_{0,10\text{опт}} - q_{0,10-17}$ до 20 і 17°C та $q_{0,10-20}$ і $q_{0,10-17}$ подальшого охолодження від 20 і 17°C до $t_{п2} = 10^\circ\text{C}$ (рис. 3).

Наслідком зниження холодинних потужностей $q_{0,20}$ та $q_{0,17}$ і, відповідно, значень $q_{0,510-20\text{опт}}$ та $q_{0,510-17\text{опт}}$ для попереднього бустерного охолодження зовнішнього повітря до 20 і 17°C, залишкова частка змінних навантажень переноситься зі ступеня попереднього охолодження зовнішнього повітря на ступінь глибокого охолодження повітря від 20 та 17°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$, що призводить до збільшення питомих холодинних потужностей $q_{0,10-20}$ та $q_{0,10-17}$ (рис. 3).

То ж температуру охолодженого повітря 15°C слід вважати за порогову, подальше охолодження повітря нижче якої проходить за відносно стабільного теплового навантаження $q_{0,10-15} = q_{0,10} - q_{0,15}$.

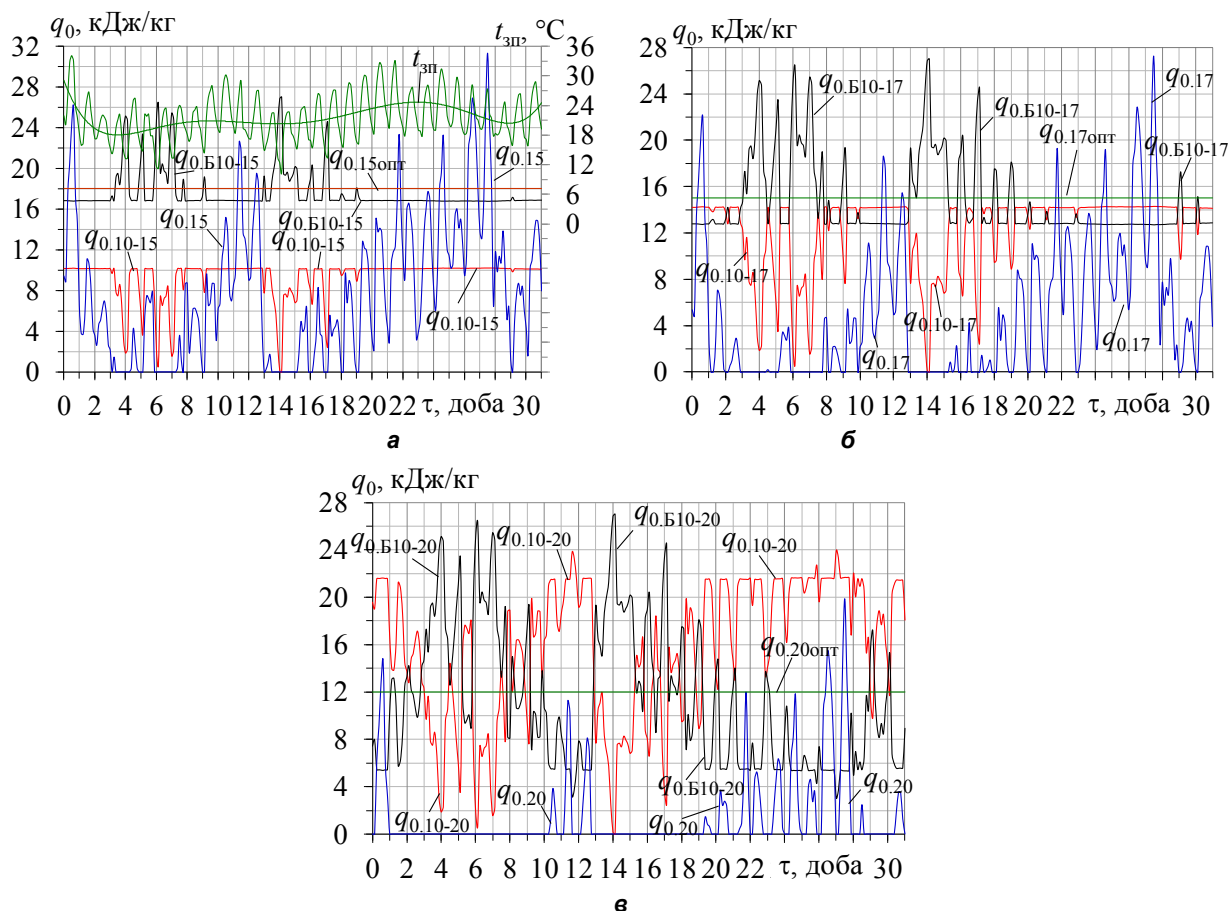


Рис. 3. Поточні значення питомих холодильних потужностей $q_{0,20}$, $q_{0,17}$ та $q_{0,15}$, необхідних для охолодження зовнішнього повітря від $t_{зп}$ до 20, 17 і 15°C, відповідно, холодильні потужності $q_{0,10-20} = q_{0,10} - q_{0,20}$, необхідні для охолодження повітря від 20°C до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$, $q_{0,10-17} = q_{0,10} - q_{0,17}$ (від 17°C до 10°C), $q_{0,10-15} = q_{0,10} - q_{0,15}$ (від 15°C до 10°C), теплові навантаження $q_{0,Б10-20\text{опт}} = q_{0,10\text{опт}} - q_{0,10-20}$ попереднього охолодження зовнішнього повітря від $t_{зп}$ до 20°C, $q_{0,Б10-17\text{опт}} = q_{0,10\text{опт}} - q_{0,10-17}$ (від $t_{зп}$ до 17°C), $q_{0,Б10-15\text{опт}} = q_{0,10\text{опт}} - q_{0,10-15}$ (від $t_{зп}$ до 15°C), загальні оптимальні проектні холодильні потужності $q_{0,20\text{опт}}$, $q_{0,17\text{опт}}$ і $q_{0,15\text{опт}}$ для охолодження повітря до 20, 17 і 15°C, відповідно, за липень 2017 р. для кліматичних умов Миколаївської обл.: **а** – порогова температура 20°C; **б** – 17°C; **в** – 15°C

Таким чином, загальне нестабільне поточне теплове навантаження $q_{0,10}$ при охолодженні зовнішнього повітря від $t_{зп}$ до $t_{п2}=10^\circ\text{C}$ може покриватися двоступеневим охолодженням зовнішнього повітря з оптимальною проектною холодною потужністю $q_{0,10\text{опт}}$: з попереднім охолодженням зовнішнього повітря до порогової температури 15°C і використанням холодної потужності (для покриття змінного теплового навантаження) $q_{0,Б10-15\text{опт}}$ у бустерному ступені та глибоким охолодженням повітря від порогової температури 15°C до кінцевої температури $t_{п2}=10^\circ\text{C}$ з використанням базової холодопродуктивності $q_{0,10-15}$ для покриття порівняно стабільного теплового навантаження у другому ступені.

Висновок. Запропоновано методологічний підхід до визначення теплових навантажень СКП з урахуванням поточних кліматичних умов експлуатації, що полягає в розділенні поточних теплових навантажень на діапазони відносно стабільного навантаження і нестабільного теплового навантаження охолодження зовнішнього повітря, що розраховується за остаточним принципом як різниця проектного теплового навантаження СКП і його стабільної складової.

Список літератури

1. Marques, R.P. Thermodynamic analysis of trigeneration systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands / R. P. Marques, D. Hacon, A. Tessarollo, J. A. R. Parise // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42. – P. 2323–2330.

2. Ortiga, J. Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network / Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A. // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 50. – P. 1536–1542.

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

Trushliakov E.I., Radchenko A.M., Tkachenko V.S., Portnoi B.S., Forduy S.G., Kantor S.A.

THE STAGE PRINCIPLE OF DISTRIBUTION OF THERMAL LOAD IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

Abstract. *Maintaining the operation of refrigeration compressors in nominal or close modes by selecting a rational design thermal load and distributing it in response to the behavior of the current thermal load according to the current climatic conditions is one of the promising reserves for improving the energy efficiency of air conditioning systems, which implementation ensures maximum or close to it in the annual cooling production according to air conditioning duties. In general case, the total range of current thermal loads of any air-conditioning system includes a range of unstable loads caused by precooling of ambient air with significant fluctuations in the cooling capacity according to current climatic conditions, and a range of relatively stable cooling capacity expended for further lowering the air temperature from a certain threshold temperature to the final outlet temperature. If a range of stable thermal load can be provided within operating a conventional compressor in a mode close to nominal, then precooling the ambient air with significant fluctuations in thermal load requires adjusting the cooling capacity by using a variable speed compressor or using excess of heat accumulated at reduced load. Such a stage principle of cooling ensures the operation of refrigerating machines matching the behavior of current thermal loads of any air-conditioning system, whether the central air conditioning system with ambient air procession in the central air conditioner, or its combination with the local indoors recirculation air conditioning systems in the air-conditioning system. In essence, as combinations of subsystems – precooling of ambient air with regulation of cooling capacity and subsequent cooling air to the mouth of the set point temperature under relatively stable thermal load.*

Key words: conditioning system, design cooling capacity, thermal load, annual refrigeration generation.

Трушляков Е.И., Радченко А.Н., Ткаченко В.С., Портной Б.С., Фордуй С.Г., Кантор С.А.

СТУПЕНЧАТЫЙ ПРИНЦИП РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В СИСТЕМЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Аннотация. *Поддержание работы холодильных компрессоров в номинальном или близком к нему режимах путем выбора рациональной проектной тепловой нагрузки и ее распределения согласно характеру изменения текущей тепловой нагрузки в соответствии с текущими климатическими условиями является одним из перспективных резервов повышения энергетической эффективности систем кондиционирования воздуха, реализация которого обеспечивает достижение максимального или близкого к нему годового производства холода в соответствии с его расходом на кондиционирование воздуха. В общем случае весь диапазон текущих тепловых нагрузок любой системы кондиционирования воздуха включает диапазон нестабильных нагрузок, обусловленных предварительным охлаждением наружного воздуха со значительными колебаниями затрат холодопроизводительности в соответствии с текущими климатическими условиями, и диапазон сравнительно стабильной холодопроизводительности, расходуемой на дальнейшее понижение температуры воздуха от некоторой пороговой температуры до конечной температуры на выходе. Если диапазон стабильной тепловой нагрузки может быть покрыт при работе обычного компрессора в режиме, близком к номинальному, то предварительное охлаждение наружного воздуха со значительными колебаниями тепловой нагрузки требует регулирования холодопроизводительности путем применения компрессора с регулируемой скоростью или использования избытка холода, аккумулированного при пониженных тепловых нагрузках. Такой ступенчатый принцип охлаждения обеспечивает согласование работы холодильных машин с характером изменения текущих тепловых нагрузок любой системы кондиционирования воздуха, то ли центральной системы кондиционирования воздуха с его тепловлажностной обработкой в центральном кондиционере, то ли ее комбинации с местной циркуляционной системой кондиционирования воздуха в помещениях, по сути, как комбинации подсистем - предварительного охлаждения наружного воздуха с регулированием холодопроизводительности и последующего охлаждения воздуха до конечной температуры в условиях относительно стабильной тепловой нагрузки.*

Ключевые слова: система кондиционирования, холодопроизводительность, тепловая нагрузка, годовое производство холода.