

Є. І. ТРУШЛЯКОВ¹, А. М. РАДЧЕНКО¹, С. Г. ФОРДУЙ², А. А. ЗУБАРЄВ¹,
С. А. КАНТОР³, В. С. ТКАЧЕНКО¹

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

² PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна

³ ПАТ "Завод "Екватор", Україна

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ КОМБІНОВАНОГО ТИПУ

Оскільки ефект від роботи систем кондиціювання припливного повітря залежить від тривалості та глибини охолодження, то цілком правомірною є його оцінка значенням питомого річного виробництва холоду, який представляє собою добуток необхідної холодопродуктивності для охолодження повітря до цільової температури та тривалості експлуатації при даній холодопродуктивності і, таким чином, враховує поточні кліматичні умови. Вочевидь, що реалізація потенціалу охолодження (кондиціювання) зовнішнього повітря залежить від встановленої (проектної) холодопродуктивності установок кондиціювання припливного повітря, яка, в свою чергу, повинна враховувати коливання теплових навантажень відповідно до поточних змінних тепловологісних параметрів зовнішнього повітря. Зі збільшенням температури зовнішнього повітря, ростуть витрати палива, на виробництво одиначної потужності (механічної/електричної енергії), а відтак і більше шкідливих речовин потрапляє в атмосферу з відпрацьованими газами. Для зменшення негативного впливу непродуктивних витрат палива при роботі систем кондиціювання повітря за підвищених температур зовнішнього повітря вдаються до різних методів визначення встановленої холодопродуктивності установки, з метою її зменшення. В роботі досліджено екологічну ефективність охолодження повітря з урахуванням змінних упродовж року кліматичних умов експлуатації для м. Київ. В якості показників оцінки екологічного ефекту від охолодження повітря обрано сумарне по накопиченню річне скорочення викидів двооксиду вуглецю CO_2 та оксиду азоту NO_x . Показано, що при виборі встановленої холодопродуктивності, за методом забезпечення максимального темпу приросту річного виробництва холоду відповідно до збільшення встановленої холодопотужності холодопотужності машини спостерігається більше скорочення питомих витрат палива у порівнянні з методом вибору за максимальним річним виробництвом холоду, відповідно і шкідливих викидів. При порівнянні методів вибору проектної холодопродуктивності, охолодження повітря до 15°C забезпечує скорочення викидів двооксиду вуглецю CO_2 більш ніж 34 т за 2017 для кліматичних умов м. Київ, на користь методу забезпечення максимального темпу приросту річного виробництва холоду, а оксиду азоту NO_x – приблизно 5,8 т.

Ключові слова: кондиціювання повітря; холодопродуктивність; екологія; клімат.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Енерговитрати на тепловологісну обробку повітря в системах кондиціювання припливного повітря (СКПП) залежать від температури $t_{\text{нв}}$ та відносної вологості $\phi_{\text{нв}}$ навколишнього повітря, які відзначаються значними змінами упродовж доби [1, 2].

Основні положення методології вибору встановленої (проектної) холодопродуктивності холодильних машин (ХМ) СКПП в умовах нерівномірних теплових навантажень розглянуті в роботі [3].

Про ефективність використання встановленої холодопродуктивності ХМ СКПП можна судити за її витратою за певний проміжок часу. Відповідно й екологічну ефективність СКПП оцінюють за скороченням

витрати палива на виробництво електроенергії, що споживає компресор ХМ.

Метою роботи є аналіз екологічної ефективності роботи СКПП при різних підходах до визначення встановленої (проектної) холодопродуктивності холодильної машини за відповідного споживання електроенергії холодильним компресором для конкретних кліматичних умов (на прикладі м. Київ).

2. Результати дослідження

З метою узагальнення і поширення результатів на СКПП різної продуктивності їх характеристики подано як питомі, віднесені до витрати повітря $G_{\text{п}}$. Питоме річне виробництво холоду – витрати холодопродуктивності на кондиціювання повітря одиначно

чної витрати ($G_n = 1 \text{ кг/с}$) $\Sigma q_0 \cdot \tau = \Sigma(Q_0 \cdot \tau) / G_n$, кДж·год/кг, де $\Sigma(Q_0 \cdot \tau)$ – повне річне виробництво холоду, кВт·год; Q_0 – холодопродуктивність, кВт; τ – період, год.

Про характер зміни питомого річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)$ та 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 $q_0 = Q_0 / G_n$, кДж/кг, встановленої холодильної машини для температури охолодженого повітря $t_{n2} = 15, 17, 18$ та 20°C та кліматичних умов м. Київ, 2017 рік, можна судити по рис. 1.

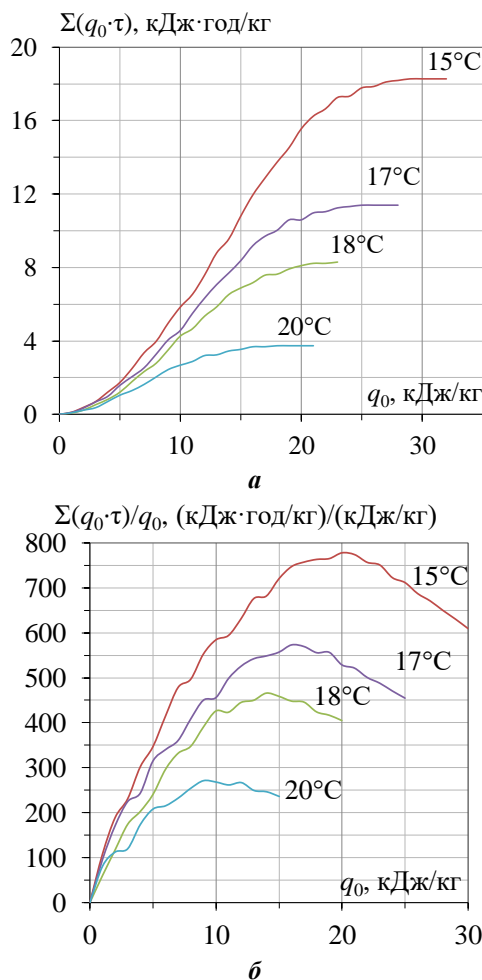


Рис. 1. Значення питомого (при $G_n = 1 \text{ кг/с}$) річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)$ (а) та річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$ (б), віднесеного до питомої холодопродуктивності ХМ СКП q_0 , в залежності від проектної питомої холодопродуктивності q_0

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

Через падіння темпу приросту $\Sigma(q_0 \cdot \tau)$ подальше збільшення проектної питомої холодопродуктивності q_0 не призводить до помітного збільшення річного виробництва холоду.

Значення річного виробництва холоду $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$, 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 відношення $\Sigma(q_0 \cdot \tau)/q_0$ при охолодженні повітря до $t_{n2} = 15^\circ\text{C}$ досягається при проектній питомій холодопродуктивності $q_{0.опт} = 20 \text{ кДж/кг}$ (оптимальне значення $q_{0.опт}$), що значно менше, ніж раціональна $q_{0.15рац} = 25 \text{ кДж/кг}$, і складає близько 20%. Аналогічні співвідношення спостерігаються і для інших температур охолодженого повітря.

Очевидно, що за меншої встановленої холодопродуктивності ХМ річні потреби холоду відповідно до його витрат на кондиціонування можуть бути покриті шляхом використання надлишку холоду, накопичуваного при зменшених поточних теплових навантаженнях, для покриття підвищених потреб охолодження.

Про характер зменшення річного питомого виробництва холоду $\Sigma\Delta(q_0 \cdot \tau)$ завдяки застосуванню холодопродуктивності (за умови використання її надлишку для покриття дефіциту) упродовж року в залежності від температури охолодженого повітря $t_{n2} = 15, 17, 18$ і 20°C за 2017 р., для кліматичних умов м. Київ можна судити за рис. 2.

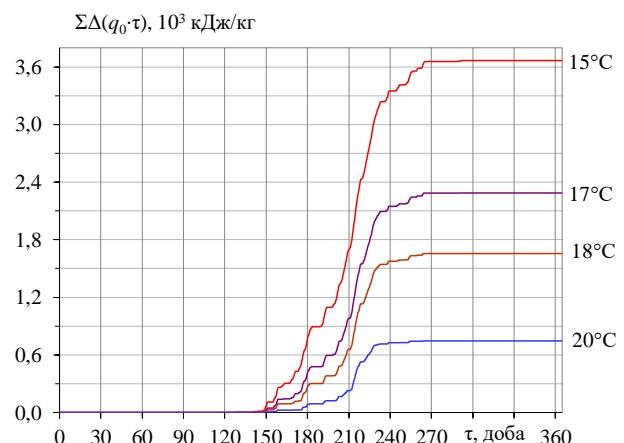


Рис. 2. Зменшення вироблення холоду $\Sigma\Delta(q_0 \cdot \tau)$ за накопиченням упродовж року при охолодженні повітря до $15, 17, 18$ і 20°C за 2017 р., м. Київ

Для подальшого порівняння ефективності роботи СКПП різної встановленої (проектної холодопродуктивності), визначеної за обома методами, розраховано скорочення річного споживання механічної (відповідно й електричної) енергії холодильним компресором $\Sigma\Delta(N_{\text{мех}} \cdot \tau = G_{\text{п}} \cdot \Sigma\Delta(q_0 \cdot \tau) / (\eta \cdot \varepsilon)$ (рис. 3, а) та відповідного скорочення витрати палива на її виробництво, наприклад газопоршневим двигуном (ГПД) автономної електростанції $\Sigma\Delta(B_e \cdot \tau) = \Sigma\Delta(N_{\text{мех}} \cdot \tau) \cdot \Delta b_e$ (рис. 3, б), де η – електричний ККД ГПД, %; ε – холодильний коефіцієнт ПКХМ, Δb_e – питома витрата палива ГПД.

Оцінку екологічного ефекту від скорочення споживання палива на виробництво електроенергії для приводу холодильного компресора проведено, як приклад, для автономної електростанції на базі ГПД JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (електрична потужність 1400 кВт [4]).

Як видно з рис. 3 (б) при застосуванні холодильної машини меншої встановленої холодопродуктивності у разі визначення її проектної величини за максимальним темпом приросту річного виробництва холоду при охолодженні повітря до 20°C річне скорочення споживання палива становить близько 5,5 т, а при охолодженні повітря до 15°C зменшення споживання зростає приблизно до 27 т порівняно з визначенням проектної потужності за максимальним значенням річного виробництва холоду для кліматичних умов м. Київ, Україна.

Враховуючи, що кожна зекономлена тонна палива для ГПД скорочує викиди двооксиду вуглецю CO_2 на 12,9 кг, а оксиду азоту NO_x на 2,16 кг, було

розраховано річне скорочення викидів шкідливих речовин (рис. 4, 5).

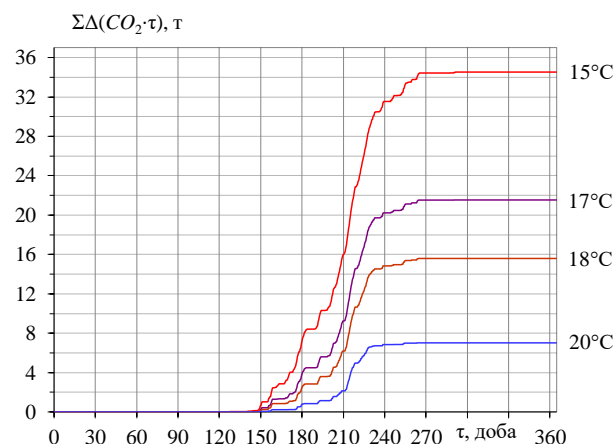


Рис. 4. Зменшення викидів двооксиду вуглецю $\Sigma\Delta(\text{CO}_2 \cdot \tau)$ за накопиченням упродовж року при охолодженні повітря до 15, 17, 18 і 20 °C за 2017 р., м. Київ

З рис. 4 видно, що при застосуванні холодильної машини меншої встановленої холодопродуктивності, визначеної за максимальним темпом приросту річного виробництва холоду (рис. 1,б), при охолодженні повітря до 20°C зменшення викидів CO_2 становить 7 т за рік для кліматичних умов м. Київ, а до 15°C – 34,5 т.

При охолодженні повітря до 20°C річне скорочення викидів NO_x складає приблизно 1,2 т, тоді як при охолодженні до 15°C – 5,8 т (рис. 5).

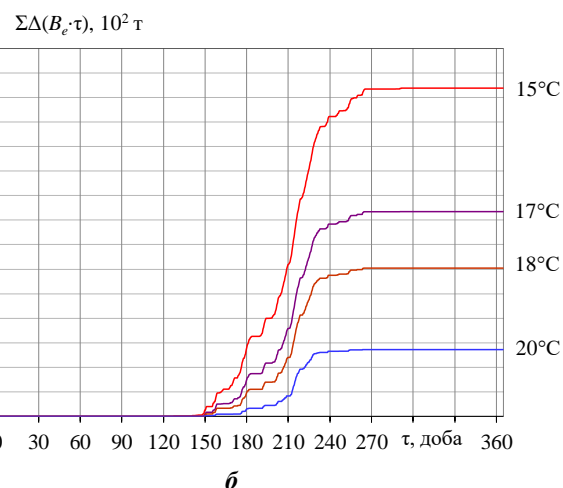
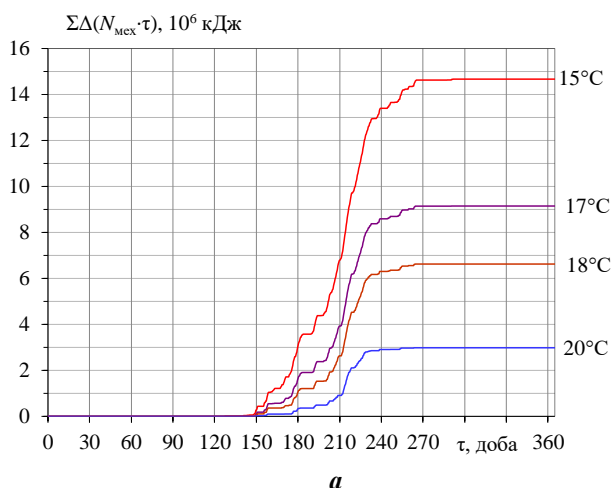


Рис. 3. Скорочення споживання механічної (відповідно й електричної) енергії холодильним компресором СКПП $\Sigma\Delta(N_{\text{мех}} \cdot \tau)$ (а) та відповідного споживання палива привідним двигуном електрогенератора $\Sigma\Delta(B_e \cdot \tau)$ (б) за накопиченням упродовж року при охолодженні повітря до 15, 17, 18 і 20 °C за 2017 р., м. Київ

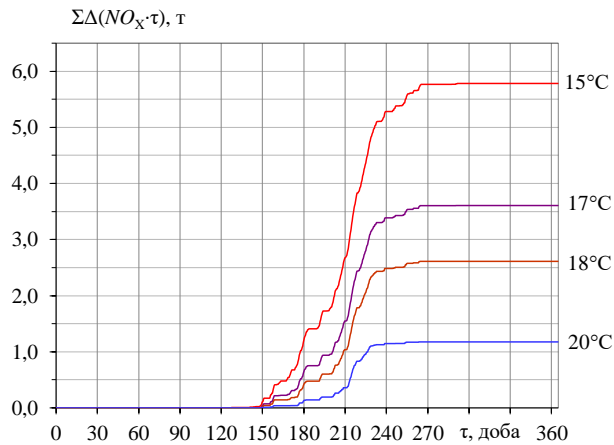


Рис. 5. Зменшення викидів оксиду азоту $\Sigma\Delta(\text{NO}_x \cdot \tau)$ за накопиченням упродовж року при охолодженні повітря до 15, 17, 18 і 20 °C за 2017 р., м. Київ.

Слід зазначити, що такий підхід до визначення екологічної ефективності роботи СКПП за різної встановленої холодопродуктивності цілком справедливий у разі виробництва електроенергії установкою автономного енергозабезпечення тригенераційного типу – з утилізацією теплоти, відведеної від базового двигуна, тепловикористовуючою холодильною машиною, як приклад – найбільш поширеною абсорбційною бромистолітєвою (АБХМ), з використанням її холодопродуктивності на технологічні потреби сумісно з парокompresорними електропривідними холодильними машинами.

Висновки

Проаналізовано екологічну ефективність роботи СКПП при різних підходах до визначення встановленої (проектної) холодопродуктивності холодильної машини, виходячи з відповідного споживання електроенергії холодильним компресором та витрат палива на її виробництво, як приклад, автономною електростанцією на базі ГПД для кліматичних умов м. Київ.

Показано, що у разі визначення проектної холодоїльної потужності за максимальним темпом приросту річного виробництва холоду, екологічний ефект у вигляді скорочення викидів CO_2 і NO_x порівняно з визначенням проектної потужності за максимальним значенням річного виробництва холоду суттєвий і залежить від температури охолодженого повітря. За меншої встановленої холодоїльної потужності ХМ річні потреби холоду відповідно до його витрат на кондиціювання можуть бути покриті шляхом використання надлишку холоду, накопичуваного при зменшених поточних теплових навантаженнях, для покриття підвищених потреб охолодження.

Література

1. Marque, R. P. Thermodynamic analysis of tri-generation systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands [Text] / R. P. Marques, D. Hacon, A. Tessarollo, J. A. R. Parise // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42, Iss. 12. – P. 2323-2330. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.07.026.
2. Ortiga, J. Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network [Text] / Jordi Ortiga, Joan Carles Bruno, Alberto Coronas // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 50, Iss. 2. – P. 1536-1542. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.041.
3. Statistical method to define rational heat loads on railway air conditioning system for changeable climatic conditions [Text] / A. Radchenko, M. Radchenko, E. Trushliakov, S. Kantor, V. Tkachenko // *The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018"*. – Jiangsu, Nanjing, China. – P. 1294-1298. Doi: 10.1109/icsai.2018.8599355.
4. Jenbacher gas engines. Technical Specification. JMS 420 GS-N.L [Electronic resource] // GE Jenbacher GmbH & Co OHG. – Access mode: http://www.cogeneration.com.ua/img/zstored/J420V06_en.pdf. – 14.09.2019.

References

1. Marques, R. P., Hacon, D., Tessarollo, A., Parise, J. A. R. Thermodynamic analysis of trigeneration systems taking into account refrigeration, heating and electricity load demands. *Energy and Buildings*, 2010, vol. 42, iss. 12, pp. 2323-2330. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.07.026.
2. Ortiga, J., Bruno, J. C., Coronas, A. Operational optimisation of a complex trigeneration system connected to a district heating and cooling network. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 50, iss. 2, pp. 1536-1542. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.041.
3. Radchenko, A., Radchenko, M., Trushliakov, E., Kantor, S., Tkachenko, V. Statistical method to define rational heat loads on railway air conditioning system for changeable climatic conditions. *The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018"*, Jiangsu, Nanjing, China, pp. 1294-1298. DOI: 10.1109/icsai.2018.8599355.
4. Jenbacher gas engines. Technical Specification. JMS 420 GS-N.L. GE Jenbacher GmbH & Co OHG. Available at: http://www.cogeneration.com.ua/img/zstored/J420V06_en.pdf (accessed 14.09.2019).

Поступила в редакцию 15.09.2019, рассмотрена на редколлегии 14.10.2019

АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

*Е. И. Трушляков, А. Н. Радченко, С. Г. Фордуй,
А. А. Зубарев, С. А. Кантор, В. С. Ткаченко*

Поскольку эффект от работы систем кондиционирования приточного воздуха зависит от продолжительности и глубины охлаждения, то вполне правомерной является его оценка по значению удельного годового производства холода, который представляет собой произведение необходимой холодопроизводительности для охлаждения воздуха до целевой температуры и длительности эксплуатации при данной холодопроизводительности и, таким образом, учитывает текущие климатические условия. Очевидно, что реализация потенциала охлаждения (кондиционирования) наружного воздуха зависит от установленной (проектной) холодопроизводительности установок кондиционирования приточного воздуха, которая, в свою очередь, должна учитывать колебания тепловых нагрузок в соответствии с текущими переменными тепловлажностными параметрами наружного воздуха. С увеличением температуры наружного воздуха, растут расходы топлива на производство единичной мощности (механической / электрической энергии), а поэтому и больше вредных веществ попадает в атмосферу с отработавшими газами. Для уменьшения негативного влияния непроизводительных расходов топлива при работе систем кондиционирования воздуха при повышенных температурах наружного воздуха прибегают к различным методам определения установленной холодопроизводительности установки, с целью ее уменьшения. В работе исследована экологическая эффективность охлаждения воздуха с учетом переменных в течении года климатических условий эксплуатации для г. Киев. В качестве показателей оценки экологического эффекта от охлаждения воздуха избрано суммарное по накоплению годовое сокращение выбросов двуокиси углерода CO_2 и оксида азота NO_x . Показано, что при выборе установленной холодопроизводительности, по методу обеспечения максимального темпа прироста годового производства холода в соответствии с увеличением установленной холодильной мощности холодильной машины наблюдается большее сокращение удельных расходов топлива по сравнению с методом выбора по максимальному годовому производству холода, соответственно и вредных выбросов. При сравнении методов выбора проектной холодопроизводительности, охлаждение воздуха до $15^\circ C$ обеспечивает сокращение выбросов двуокиси углерода CO_2 более 34 т за 2017 для климатических условий г. Киев, в пользу метода обеспечения максимального темпа прироста годового производства холода, а оксида азота NO_x – примерно 5,8 т.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха; холодопроизводительность; экология; климат.

THE ECOLOGICAL EFFICIENCY ANALYSIS OF COMBINED AIR CONDITIONING SYSTEMS

*E. I. Trushliakov, A. M. Radchenko, S. G. Forduy,
A. A. Zubarev, S. A. Kantor, V. S. Tkachenko*

Since the supply air conditioning systems operation effect depends on the cooling duration and depth, it is quite justified to estimate it by the value of the specific annual cold production, which is the product of the necessary cooling capacity for cooling the air to the target temperature multiplied by duration of operation at a given cooling capacity and, thus, considers current climatic conditions. Obviously, the realization of the cooling potential (air conditioning) of the ambient air depends on the installed (design) cooling capacity of the air conditioning units, which, in turn, must considering fluctuations in thermal loads by the current variable thermal and humidity parameters of the ambient air. With an increase in the temperature of the ambient air, fuel consumption for the production of a unit capacity (mechanical/electrical energy) increases, and, accordingly, the more harmful substances are removed to the atmosphere with exhaust gases. To reduce the negative impact of unproductive fuel consumption during the operation of air conditioning systems at elevated ambient temperatures, resort to various methods for determining the installed cooling capacity of the installation, to reduce it. In the work, the ecological efficiency of air cooling is studied considering the climatic operating conditions for the Kyiv city that are variable during the year. The annual reduction in emissions of carbon dioxide CO_2 and nitric oxide NO_x was chosen as indicators for assessing the environmental effect of air cooling. It has been shown that when choosing the installed cooling capacity, by the method of ensuring the maximum growth rate of the annual cold production considering the increase in the installed cooling capacity of the chiller, there is a greater reduction in specific fuel consumption compared to the

method of choosing the maximum annual cold production, respectively, and harmful emissions. When comparing the methods for choosing the design cooling capacity, air cooling to 15 °C provides a reduction in carbon dioxide CO_2 emissions of more than 34 t for 2017 for the climatic conditions of Kiev, in favor of the method of ensuring the maximum growth rate of annual cold production, and nitric oxide NO_x – about 5,8 t.

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

Трушляков Євген Іванович – канд. техн. наук, проф., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Фордуй Сергій Георгійович – канд. техн. наук, технічний керівник напряму енергоресурсів та енергозбереження PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна.

Зубарєв Анатолій Анатолійович – ст. викл. каф. кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

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

Ткаченко Веніамін Сергійович – аспірант, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Trushliakov Eugeniy 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.

Forduy Serhiy Georgiyovych – Candidate of Technical Science, Sr. Engineering manager PepsiCo, Inc., Central Technical Team-Europe and Sub Saharan Africa (CTS ESSA), Kyiv, Ukraine, e-mail: serhiy.forduy@pepsico.com, ORCID Author ID: 0000-0003-0110-4090.

Zubarev Anatolii Anatoliyovych – senior lecturer of the Conditioning and Refrigeration Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: anatoly.zubarev@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-7868-4519.

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.