

DOI 10.26886/2414-634X.2(46)2021.2

UDC 697.97

**ANALYSIS OF THE ENERGY, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL
EFFICIENCY OF AIR CONDITIONING SYSTEMS WITH DIRECT AND
INDIRECT EVAPORATIVE COOLING**

E. Dmytrochenkova, PhD of Technical Sciences

<https://orcid.org/0000-0003-3768-5245>

e-mail: elladmitrochenkova@gmail.com

Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine, Kiev

The article is devoted to the analysis of energy, economic and environmental efficiency, which are achieved by using indirect adiabatic cooling of air in the central air conditioner instead of direct cooling. Two corresponding schematic diagrams of air conditioning systems are considered. As a result of the calculations, it was found that indirect adiabatic cooling of the air makes it possible to reduce the consumption of cold and electricity by 65%. The monetary equivalent of reducing energy consumption can reach UAH 14,760 for 4 months of operation of the air conditioning system in cooling mode. Also, the use of this mode of operation of climatic equipment makes it possible to obtain a certain environmental effect in the form of reducing carbon dioxide emissions at the level of 5.15 tons per season.

Keywords: indirect evaporative cooling, refrigeration capacity, irrigation chamber, economic efficiency, ecological effect

кандидат технічних наук, Дмитроченкова Е. І., Аналіз енергетичної, економічної та екологічної ефективності систем кондиціонування повітря з прямим та непрямим випарним охолодженням / Київський національний університет будівництва та архітектури, Україна, Київ.

Стаття присвячена аналізу енергетичної, економічної та екологічної ефективності, які досягаються при застосування непрямого адіабатичного охолодження повітря в центральному кондиціонері замість прямого адіабатичного охолодження. Розглянуто дві відповідні принципові схеми систем кондиціонування. В результаті проведених розрахунків встановлено, що непряме адіабатичне охолодження повітря дає можливість скоротити споживання холоду та електричної енергії на 65%. Грошовий еквівалент скорочення енергоспоживання може досягти 14 760 грн за 4 місяці роботи системи кондиціонування повітря в режимі охолодження. Також застосування даного режиму роботи кліматичного обладнання дає можливість отримати і певний екологічний ефект у вигляді скорочення викидів діоксиду вуглецю на рівні 5,15 т за сезон.

Ключові слова: непряме випарне охолодження, холодильна потужність, камера зрошення, економічна ефективність, екологічний ефект

Вступ. Системи кондиціонування повітря (СКП) з прямим випарним охолодженням знаходять своє застосування для підготовки повітря в приміщеннях різного призначення. Для зволоження та осушки повітря в центральному кондиціонері найчастіше використовуються камери зрошення. Такі системи характеризуються достатньо високим рівнем енергоспоживання. Тому актуальність проблеми його зниження, і, як наслідок, досягнення певного економічного та екологічного ефекту, не може викликами сумнівів.

Аналіз досліджень і публікацій. В роботах [1-2] розглянуто схеми непрямого адіабатичного охолодження, які базуються на складному теплообміні між повітрям з одного боку та повітрям – водою з іншого.

Представлені варіанти схем руху робочих тіл в межах теплообмінних апаратів, а також конструкції самих теплообмінників. В [3] авторами вже проведено техніко-економічне порівняння двох схем СКП – схеми охолодження свіжого повітря із застосуванням поверхневого охолодження та схеми з непрямим адіабатичним охолодженням за рахунок установки секції випарного охолоджувача однієї з конструкцій, наведених в [1], після секції рекуператора. Проведені розрахунки довели, що застосування системи з непрямим випарним охолодженням дозволяє підвищити енергоефективність системи кондиціонування за рахунок зниження споживання енергії на охолодження повітря на 80%.

Можна зазначити, що в ті схеми систем кондиціонування повітря, які розглядались принципово відрізняються конструктивно – відсутністю та наявністю секції випарного охолодження, а також рекуператора. У зв'язку з цим доцільно провести порівняння двох систем кондиціонування повітря, до конструктивного складу яких входить і рекуператор, і секція випарного охолодження, але вони характеризуються різними схемами обробки повітря.

Тому **метою** даної статті є проведення аналізу енергетичної, економічної та екологічної ефективності систем кондиціонування повітря з прямим і непрямим випарним охолодженням.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день найпоширенішою схемою є схема обробки повітря в кондиціонері та фанкойлах, які розміщуються безпосередньо в приміщеннях. В даному випадку в центральному кондиціонері обробці підлягає мінімальна кількість повітря, яка повинна подаватись в приміщення за санітарними нормами, а у фанкойлах здійснюється остаточна підготовка суміші рециркуляційного повітря з повітрям, що надходить з кондиціонеру. І

вже підготовлена до необхідних параметрів суміш подається в приміщення.

При такому варіанті забезпечення необхідних параметрів мікроклімату в приміщенні центральний повітря обробний агрегат (центральний кондиціонер) може працювати за двома схемами обробки повітря – з прямим випарним охолодженням та непрямим випарним охолодженням.

Принципова схема СКП з прямим випарним охолодженням наведена на рис.1.

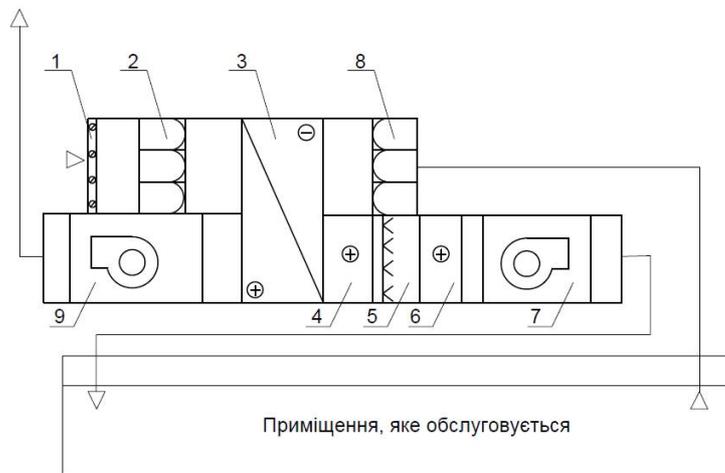


Рис. 1 Принципова схема системи кондиціонування повітря з прямим випарним охолодженням

1 – приймальний клапан; 2 – фільтр припливного повітря; 3 – рекуператор; 4 – повітря підігрівач першого підігріву; 5 – зрошувальна камера; 6 - повітря підігрівач другого підігріву; 7 – вентилятор припливного повітря; 8 – фільтр витяжного повітря; 9 – вентилятор витяжного повітря

Обробка повітря в СКП даної конструкції відбувається за класичним порядком. В теплий період року зовнішнє повітря після рекуператора надходить в зрошувальну камеру, де охолоджується та осушується, після чого за необхідності підігрівається в повітря підігрівачі другого підігріву до необхідних параметрів і подається до фанкойлів, де відбувається його змішування з рециркуляційним

повітрям з приміщення. Суміш підлягає подальшому охолодженню і вже з параметрами припливного повітря подається в приміщення.

Якщо говорити про СКП з непрямым охолодженням, то її принципова схема наведена на рис.2.

Процес обробки повітря в кондиціонері аналогічний попередньому на відміну від того, що в теплий період року адиабатичному охолодженню в зрошувальній камері підлягає не припливне повітря, а те, яке видаляється. Рекуператор в даній конструкції також виконує свою пряму функцію, де за рахунок більш холодного витяжного повітря знижується температура припливного, яка потім за необхідності ще знижується в поверхневому повітроохолоджувачі.

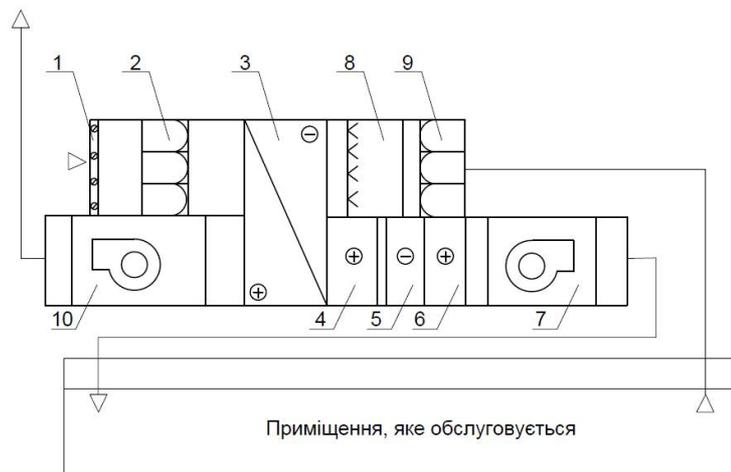


Рис. 2. Принципова схема системи кондиціонування повітря з непрямым випарним охолодженням

1 – приймальний клапан; 2 – фільтр припливного повітря; 3 – рекуператор; 4 – повітря підігрівач першого підігріву; 5 – поверхневий повітроохолоджувач; 6 - повітря підігрівач другого підігріву; 7 – вентилятор припливного повітря; 8 – зрошувальна камера; 9 – фільтр витяжного повітря; 10 – вентилятор витяжного повітря

Задачею даної роботи є аналіз енергетичної, економічної та екологічної ефективності систем кондиціонування повітря, які працюють за наступними режимами:

режим №1 - обробка в фанкойлі суміші, яка утворюється за рахунок змішення зовнішнього повітря після його обробці в центральному кондиціонері із прямим адіабатичним зволоженням, і рециркуляційного повітря в змішувальній камері фанкойлу;

режим №2 - обробка в фанкойлі суміші, яка утворюється за рахунок змішення зовнішнього повітря після його обробці в центральному кондиціонері із непрямим адіабатичним охолодженням, і рециркуляційного повітря в змішувальній камері фанкойлу.

Для проведення порівняльного аналізу обрана система кондиціонування повітря торговельного залу адміністративної будівлі зі складом та магазином в м. Суми (Україна).

У відповідності до умов роботи обох режимів в центральному кондиціонері обробці підлягає мінімальна витрата зовнішнього повітря, $\text{дм}^3/\text{год}$, яка визначається за додатком X [4, с.103]:

$$Q_{tot} = n \cdot q_p + S \cdot q_B, \quad (1)$$

де n – проектна кількість людей в приміщенні (115 осіб);

q_p – питома витрата зовнішнього повітря на 1 людину, $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{люд})$;

S – площа приміщення, м^2 (846 м^2);

q_B – питома витрата зовнішнього повітря на розбавлення будівельних забруднень, $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

За результатами розрахунків встановлено, що мінімальна санітарна норма зовнішнього повітря, (G_k) , становить 6035 $\text{кг}/\text{год}$.

Визначення необхідного повітрообміну з урахуванням роботи фанкойлів здійснено за допомогою $i-d$ – діаграми вологого повітря у відповідності до методики, наведеної в [5, с.108]. Параметри окремих точок процесів обробки повітря враховано при визначенні кількості холоду, яка необхідна для охолодження повітря в теплий період року.

Розрахунок витрати холоду на охолодження повітря в центральному кондиціонері за умови його роботи в режимі №1 здійснено за рівнянням

$$Q_X^K = 0,278 \cdot G_K \cdot (I_{Ext} - I_{O'}) \quad (2)$$

де I_{Ext} - ентальпія зовнішнього повітря, кДж/кг_{с.п.};

$I_{O'}$ - ентальпія повітря на виході з камери зрошення, кДж/кг_{с.п.}.

Значення температури повітря на виході із зрошувальної камери при цьому ж режимі роботи повітря обробного агрегату отримано з використанням рівняння

$$t_{O'} = E_a (t_e^n - t_{ext}) + t_{ext}, \quad (3)$$

де E_a - адіабатичний коефіцієнт ефективності тепломасообміну в камері зрошення (приймається 0,9);

t_e^n - початкова температура води, яка подається в камеру зрошення, °С (приймається 9°С);

t_{ext} - температура зовнішнього повітря, °С.

При роботі центрального кондиціонера в режимі №2 витрата холоду на охолодження в ньому мінімальної санітарної норми повітря визначена за рівнянням

$$Q_X^K = 0,278 \cdot G_K \cdot (I_p - I_{O'}), \quad (4)$$

де I_p - ентальпія повітря на виході з рекуператора при відповідній температурі, кДж/кг_{с.п.}.

Температура повітря на виході з рекуператора, °С, при цих умовах розрахована за формулою

$$t_p = t_{ext} - \eta (t_{ext} - t_{O'}), \quad (5)$$

де η - ККД рекуператора (приймалась для розрахунків на рівні 0,6).

Значення температури повітря на виході із зрошувальної камери для даного режиму роботи кондиціонеру визначено як

$$t_{or} = E_a(t_e^n - t_l) + t_l, \quad (6)$$

де t_l - температура повітря, яке видаляється, °С (з урахуванням висоти приміщення і його призначення дорівнювало 27,3°С).

Розрахунок холодильної потужності центрального кондиціонера при його роботі в режимах №1 та №2 виконано для найжаркішого дня 2020 року. У відповідності до [6] таким днем було 26 травня. Зміна температури зовнішнього повітря в цей день в продовж робочого дня наведена на рис. 3.

Так як охолодженню підлягає повітря при температурі не нижче 25°С, то для подальших розрахунків і аналізу отриманих результатів прийнято діапазон часу зазначеного дня з 10.00 до 18.00.

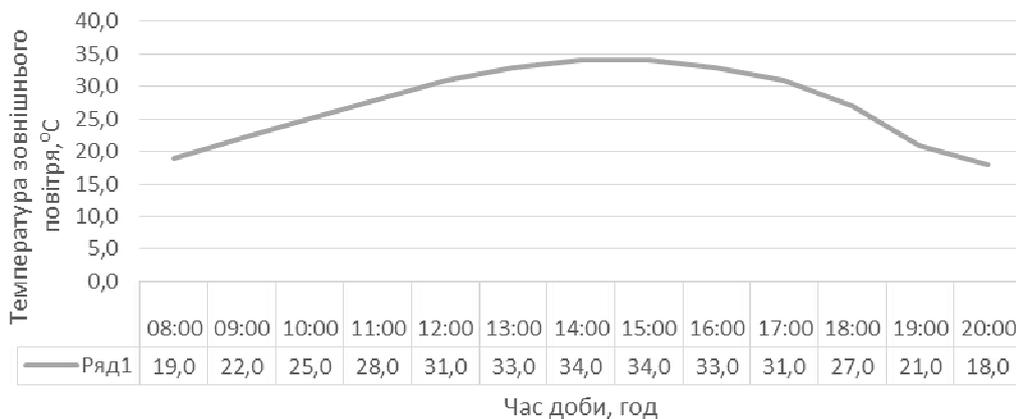


Рис.3. Зміна температури зовнішнього повітря в продовж робочого дня 26.05.2020 року

Застосування рівнянь (1), (2) та (3) дало можливість визначити холодильну потужність центрального кондиціонера при режимі роботи №1, а рівнянь (4), (5) та (6) – при режимі №2. Динаміка зміни отриманих результатів для відповідних температур зовнішнього повітря найжаркішого дня 2020 року представлена на рис.4.

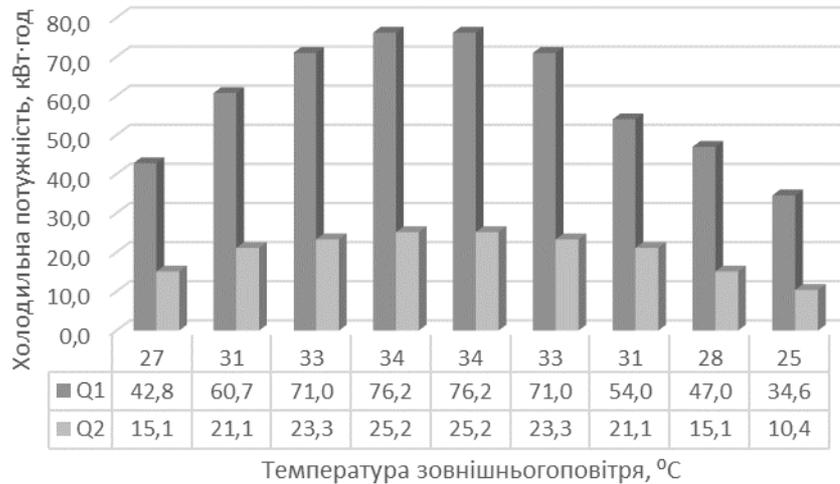


Рис.4. Динаміка зміни холодильної потужності центрального кондиціонера в залежності від режиму роботи та температури зовнішнього повітря:

Q₁ – холодильна потужність при роботі в режимі №1, кВт·год;

Q₂ – холодильна потужність при роботі в режимі №2, кВт·год.

Аналіз отриманих результатів дає можливість констатувати, що середнє перевищення холодильної потужності повітря обробного агрегату при роботі в режимі №1 становить 65%. Ця різниця досягається за рахунок того, що при роботі кондиціонера в режимі №2 охолодженню підлягає повітря з меншими температурними показниками ніж зовнішнє і рекуператор в теплий період року також виконує свою пряму функцію, забезпечуючи теплообмін між охолодженим повітрям, яке видаляється, і зовнішнім.

Враховуючи тривалість стояння зазначених температур зовнішнього повітря у відповідності до [6] встановлено, що загальне споживання холоду центральним кондиціонером протягом 26 травня 2020 року за умови роботи в режимі №1 дорівнює 559,2 кВт, а за умови роботи в режимі №2 – 185,81 кВт. Таким чином, економія споживання холоду при зміні режиму роботи повітря обробного агрегату буде дорівнювати 373,39 кВт в продовж найжаркішого дня року.

Для проведення повного енергетичного аналізу також досліджено зміну в споживанні електричної енергії холодильною машиною, яка застосовується для приготування холодної води для камери зрошення. Підбір типорозміру чилера здійснено по максимальній холодильній потужності, якій відповідав певний рівень енергоспоживання. Так для забезпечення роботи зрошувальної камери в режимі №1 при максимальному рівні холодоспоживання електроспоживання холодильної машини дорівнює 26,4 кВт·год, а при роботі в режимі №2 – 9,25 кВт·год.

Динаміка зміни кількості спожитої електричної енергії холодильною машиною в залежності від режиму роботи кондиціонера та температури зовнішнього повітря наведена на рис. 5.

Середнє відхилення в кількості спожитої електричної енергії чилером в залежності від умов роботи центрального кондиціонеру та температури зовнішнього повітря протягом 26.05.2020 становить 65%. Причиною такої різниці між рівнем енергоспоживання при роботі в режимах №1 та №2 є відповідна різниця в кількості необхідного холоду для забезпечення роботи камери зрошення.

З урахуванням тривалості стояння температур протягом зазначеного дня загальне споживання електричної енергії чилером при роботі кондиціонеру в режимі №1 дорівнює 159,72 кВт, а при роботі в режимі №2 – 55,96 кВт. В результаті різниця в споживанні даного енергоносія становила 103,76 кВт.

За даними [7] станом на 1.01.2020 року вартість 1 кВт·год електричної енергії становила 123,23 грн/ МВт·год. Таким чином, грошовий еквівалент скорочення споживання електричної енергії становить 127,62 грн/день.

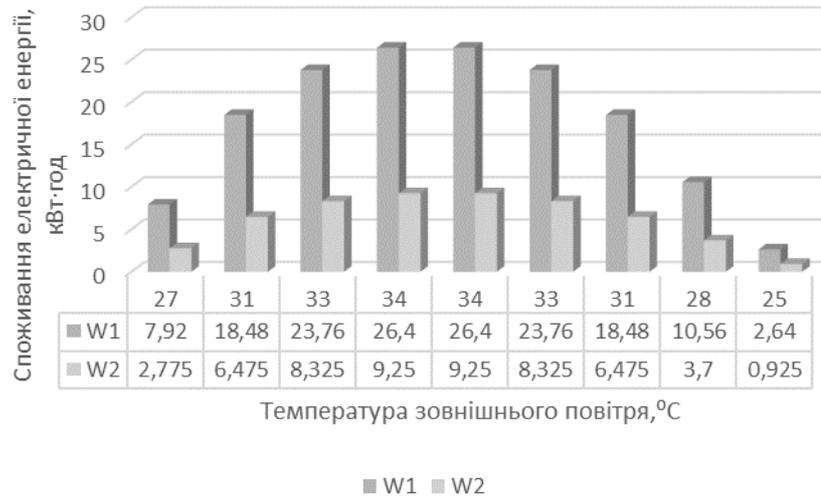


Рис.5. Динаміка зміни кількості спожитої електричної енергії холодильною машиною в залежності від режиму роботи центрального кондиціонера та температури зовнішнього повітря: W_1 – електроспоживання чилера при роботі кондиціонера при роботі в режимі №1, кВт·год; W_2 – електроспоживання чилера при роботі кондиціонера при роботі в режимі №2, кВт·год.

Аналогічна динаміка буде спостерігатись і в інші дні роботи системи в режимі охолодження протягом 4 місяців. Приймавши середню економію в споживанні електричної енергії чилером на рівні 120 грн/день, визначена загальна економія за сезон. Вона склала 14 760 грн.

Також проведена оцінка і екологічного ефекту - скорочення викидів діоксиду вуглецю CO_2 , який може бути досягнений за рахунок зменшення енергоспоживання при зміні режиму роботи центрального кондиціонера. Розрахунок здійснено у відповідності до [8] – 0,42 кг CO_2 на 1 кВт/год електричної енергії. Якщо прийняти, що середнє щоденне енергоспоживання чилером при умові роботи кондиціонера в режимі №1 може становити 150 кВт, а в режимі №2 – 50 кВт, то скорочення

викидів діоксиду вуглецю буде дорівнювати 5,15 т за 4 місяці роботи кондиціонера в режимі охолодження.

Висновки. Отримані результати показали, що застосування непрямого охолодження в системі кондиціонування повітря, яка передбачає обробку в фанкойлі суміші, що утворюється за рахунок змішення зовнішнього повітря після його обробці в центральному кондиціонері і рециркуляційного повітря в змішувальній камері фанкойлу, дає можливість скоротити споживання холоду та електричної енергії чилером на 65%. При цьому грошовий еквівалент сезонної економії споживання електричної енергії буде дорівнювати 14 760 грн. Також заміна режиму роботи центрального кондиціонера дає можливість отримати і екологічний ефект на рівні 5,15 т CO₂ за сезон за рахунок скорочення енергоспоживання.

Література:

1. Bogdan Porumba, Paula Ungureșana, Lucian Fechete Tutunaru, Alexandru Șerban, Mugur Bălana. (2016) A review of indirect evaporative cooling technology. *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, 85, 461-471.
2. Ahmad, A., Rehman, S., Al-Hadhrani, L.M. (2013). Performance evaluation of an indirect evaporative cooler under controlled environmental conditions. *Energy and Buildings*, 62, 278-285.
3. Bogdan Porumba, Mugur Bălana, Raluca Porumba. (2016) Potential of indirect evaporative cooling to reduce the energy consumption in fresh air conditioning applications. *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, 85, 433 – 441.
4. ДБН В. 2.5 – 67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». (2013). Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово – комунального господарства України, 113 с.

5. Белова Е.М.(2003). *Системы кондиционирования воздуха с чиллерами и фэнкойлами*. Москва, Евроклимат, 400
6. Архів погоди в Сумах < <http://rp5.ua/>> (2021, березень, 15).
7. Про встановлення тарифів на розподіл електричної енергії з 01 січня 2020 року < <https://www.soe.com.ua/> > (2021, березень, 19).
8. Наказ про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель (Міністерство регіонального розвитку та житлово – комунального господарства України) < <https://zakon.rada.gov.ua/>> (2021, березень 25).

References:

1. Bogdan Porumba, Paula Ungureșana, Lucian Fechete Tutunaru, Alexandru Șerban, Mugur Bălana. (2016) A review of indirect evaporative cooling technology. *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, 85, 461-471.
2. Ahmad, A., Rehman, S., Al-Hadhrani, L.M. (2013). Performance evaluation of an indirect evaporative cooler under controlled environmental conditions. *Energy and Buildings*, 62, 278-285.
3. Bogdan Porumba, Mugur Bălana, Raluca Porumba. (2016) Potential of indirect evaporative cooling to reduce the energy consumption in fresh air conditioning applications. *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, 85, 433 – 441.
4. DBN V. 2.5 – 67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціювання». (2013). Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово – комунального господарства України, 113 с.
5. Belova E.M.(2003). *Sistemy kondicionirovanija vozduha s chillerami i fjenkojlami*. Moskva, Evroklimat, 400. [in Russian]
6. Arhiv pogodi v Sumah < <http://rp5.ua/>> (2021, berezen', 15).

7. Pro vstanovlennja tarifiv na rozpodilelektrichnoï energii z 01 sichnja 2020 roku < <https://www.soe.com.ua/> > (2021, berezen', 19).
8. Nakaz pro zatverdzhennja Metodiki viznachennja energetichnoï efekтивности budivel' (Ministerstvo regional'nogo rozvitku ta zhitlovo – komunal'nogo gospodarstva Ukraïni) < <https://zakon.rada.gov.ua/>> (2021, berezen' 25).

Citation: E. Dmytrochenkova (2021). ANALYSIS OF THE ENERGY, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF AIR CONDITIONING SYSTEMS WITH DIRECT AND INDIRECT EVAPORATIVE COOLING. New York. TK Meganom LLC. Innovative Solutions in Modern Science. 2(46). doi: 10.26886/2414-634X.2(46)2021.2

Copyright: E. Dmytrochenkova ©. 2021. This is an openaccess article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.