

БАБЕНКО ОЛЕКСІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2773-6571>e-mail: oleksij_babenko@ukr.net**СТЕПАНОВ ДМИТРО**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2806-3180>e-mail: stepanovdv@ukr.net**СТЕПАНОВА НАТАЛІЯ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4654-2062>e-mail: stepanovand@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ ЗА УМОВ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

В роботі наведено результати моделювання процесу енергоспоживання громадських, житлових, комерційних будівель в результаті використання різних джерел теплової енергії. Запропоновано будівлі з такими джерелами енергії, як: а) низькотемпературний газовий котел потужністю до 120 кВт для потреб тепlopостачання житлової будівлі і фреонові системи кондиціонування для потреб охолодження будівлі; б) котел газовий конденсаційний тепловою потужністю до 120 кВт з температурним режимом 55/45°C для потреб тепlopостачання і фреонові системи кондиціонування для потреб охолодження; в) реверсивна теплонасосна установка типу «грунт-вода» з температурним режимом 35/28°C для потреб системи опалення та охолодження та реверсивна теплонасосна машина з режимом 55/45°C для потреб гарячого водopостачання; г) реверсивний тепловий насос типу «повітря-повітря» для потреб системи опалення та охолодження та електричні бойлерні установки для потреб гарячого водopостачання; д) котел твердопаливний на біомасі з ручним завантаженням палива із тепловою потужністю понад 100 кВт, для забезпечення потреб тепlopостачання і фреонові системи для потреб охолодження; е) котел на паливних гранулах з автоматичним механізованим завантаженням палива тепловою потужністю понад 100 кВт для потреб тепlopостачання будівлі і фреонові системи для потреб охолодження; є) централізована система тепlopостачання будівлі. Наведено результати розрахунків питомого споживання первинної енергії та питомих викидів парникових газів для кожного з вище вказаних джерел теплової енергії. Встановлено, що найменші значення витрати первинної енергії та питомих викидів парникових газів мають котли на біомасі. Найменшу ефективність має система тепlopостачання з централізованим джерелом енергії. Моделювання проводилося для кліматичних умов м. Вінниці. Разом з тим, недоліком використання твердопаливних котлів є обмеження їх використання за умов густонаселеного району, що пояснюється складністю очищення димових газів та регулярного постачання біомаси. Тому визначено, що найбільш ефективним джерелом теплової енергії для будівель різного типу для досягнення нормованих показників енергоефективності є теплонасосна установка «грунт-вода». Вказана установка, поряд з забезпеченням будівель тепловою енергією, дозволяє здійснювати охолодження в теплу пору року, працюючи в реверсивному режимі.

Ключові слова: система тепlopостачання, система охолодження, енергоспоживання, клас енергоефективності, енергетична сертифікація будівлі.

BABENKO OLEKSII, STEPANOV DMYTRO, STEPANOVA NATALIA

Vinnytsia National Technical University

SIMULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A RESIDENTIAL BUILDING UNDER THE CONDITIONS OF DIFFERENT HEAT ENERGY SOURCES

The paper presents the results of modeling the process of energy consumption in public, residential, and commercial buildings as a result of the use of various sources of thermal energy. Buildings with such energy sources as: a) a low-temperature gas boiler with a capacity of up to 120 kW for the needs of heat supply of a residential building and freon air conditioning systems for the needs of cooling the building; b) a gas condensing boiler with a thermal capacity of up to 120 kW with a temperature regime of 55/45°C for heat supply and freon air conditioning systems for cooling; c) reversible heat pumping unit of the "ground-water" type with a temperature regime of 35/28°C for the needs of the heating and cooling system and a reversible heat pumping machine with a regime of 55/45°C for the needs of hot water supply; d) a reversible air-to-air heat pump for heating and cooling systems and electric boilers for hot water supply; e) a biomass solid fuel boiler with manual fuel loading with a heat output of more than 100 kW for heat supply and freon systems for cooling; f) a fuel pellet boiler with automatic mechanized fuel loading with a heat output of more than 100 kW for building heating and cooling and freon systems for cooling; g) centralized heating system of the building. The results of calculations of the specific primary energy consumption and specific greenhouse gas emissions for each of the above heat sources are presented. It is established that biomass boilers have the lowest values of primary energy consumption and specific greenhouse gas emissions. The lowest efficiency is achieved by a district heating system with a centralized energy source. The modeling was conducted for the climatic conditions of Vinnytsia. At the same time, the disadvantage of using solid fuel boilers is the limitation of their use in densely populated areas, which is explained by the complexity of flue gas cleaning and regular biomass supply. Therefore, it has been determined that the most efficient source of thermal energy for buildings of various types to achieve the standardized energy efficiency indicators is a ground-to-water heat pump system. This installation, along with providing buildings with thermal energy, allows for cooling in the warm season, operating in reverse mode.

Keywords: heating system, cooling system, energy consumption, energy efficiency class, energy certification of the building.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Енергопостачання житлового-комунального сектору України пов'язане із значними витратами викопних паливно-енергетичних ресурсів. У комунальному секторі для забезпечення нормативних показників мікроклімату приміщень в процесі виробництва теплоти і холоду затрачаються значні обсяги паливно-енергетичних ресурсів, такі як вугілля, природний газ, електроенергія і останнім часом – деревина. На сьогодні великим попитом користуються системи охолодження повітря приміщень, в тому числі житлових. Підвищення енергоефективності систем опалення та охолодження житлових будівель є ключем до енергетичної незалежності України та покращення комфорту проживання українців. Підвищення енергетичної ефективності в свою чергу призводить до зростання економічності енергопостачання, а також скорочення техногенного навантаження на довкілля не тільки на території використання енергоресурсів, але й в районах виробництва електроенергії [1].

В даній роботі пропонується системний підхід до підвищення енергоефективності, а саме, спочатку оцінка енергоефективності будівлі і потім обґрунтований вибір джерела теплоти та холоду. Нормативна база, що регламентує енергоефективність житлових будівель залежно від країни або регіону може змінюватися. У більшості країн прийняті законодавчі акти, стандарти та норми, які встановлюють вимоги до енергоефективності житлових або громадських будівель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Європейському Союзі існує Директива про енергоефективність будівель (Directive 2010/31/EU), яка встановлює стандарти та загальні вимоги до енергоефективності будівель [2]. У багатьох країнах Європейського Союзу цю директиву також впроваджено у національне законодавство.

Крім того, існують організації, наприклад, Міжнародна рада з енергоефективності (International Energy Agency, IEA) або Європейська агенція з енергоефективності (European Agency for the Cooperation of Energy Regulators, ACER), які також розробляють рекомендації та стандарти для підвищення енергоефективності будівель [3].

Директива 2010/31/EU щодо енергетичної ефективності будівель (EPBD) встановлює загальні вимоги до енергетичної ефективності будівель у ЄС. Вона визначає, що кожна країна-член ЄС має розробити національну стратегію та нормативні акти щодо підвищення енергоефективності будівель.

У багатьох країнах ЄС існують системи обов'язкової енергетичної сертифікації житлових та громадських будівель. Ці сертифікати надають інформацію про енергетичні показники будівлі та рекомендації щодо покращення її енергоефективності.

Енергоефективність будівель в ЄС регулюється також стандартами проектування і будівництва, такими як EN 15232, EN ISO 52000 та EN ISO 13790. Вказані стандарти надають елементи методології розрахунку енергоефективності, визначення енергетичних характеристик тощо [3].

Багато країн ЄС рекомендують чи навіть вимагають проведення енергетичних аудитів будівель та систем моніторингу їхнього енергоспоживання [4–9].

У конкретному регіоні або країні важливо перевіряти місцеве законодавство та нормативні акти, пов'язані з енергоефективністю житлових та громадських будівель. Деякі країни також можуть мати національні стандарти будівництва, які включають вимоги до енергоефективності. Стандарти і нормативні документи можуть час від часу змінюватися, тому стежити за новачіями в цій галузі важливо.

В Україні прийняті відповідні національні норми та стандарти [10–16], що визначають енергоспоживання будівель та їхню енергоефективність. При визначенні енергоспоживання будівель також можуть використовуватися різного роду програмні продукти для обчислень, імітацій та спостереження за енергопотребою, оригінальні математичні моделі.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження впливу вибору джерела теплової енергії на показники енергоефективності житлової будівлі.

Виклад основного матеріалу

Дослідження таких об'єктів, як громадські та житлові будівлі, об'єкти комерційного призначення, будівлі закладів освіти, спортивних закладів, тощо з метою розроблення заходів по забезпеченню допустимих показників енергоефективності дозволяє визначити клас енергетичної ефективності вказаних будівель. Розглядаючи поняття «клас енергетичної ефективності житлової будівлі» береться до уваги розрахунковий рівень її енергетичної ефективності, який визначається відповідно до показників енергетичної ефективності, що в свою чергу встановлюються відповідно до вимог законодавства з врахуванням норм гармонізованих стандартів Євросоюзу у сфері енергоефективності будівель [2]. Будівлі класу СС2 та СС3; будь-які будівлі, в яких розташовані органи місцевого самоврядування або органи державної влади і мають опалювальну площу понад 250 м², а також будівлі, які підлягають термомодернізації із залученням державної підтримки, згідно Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» повинні підлягати обов'язковій енергетичній сертифікації [17].

За допомогою розробленої математичної моделі проведено дослідження впливу різних джерел теплоти на показники енергоефективності житлової будівлі. Математична модель виконана відповідно до методики, що наведена у ДСТУ 9190:2022 [16]. Послідовність розрахунків передбачала визначення енергопотребі будівлі, енергоспоживання, а після цього і питомого споживання первинної енергії. За

наявності інформації про енергоспоживання будівлі визначено значення питомих викидів парникових газів для різних джерел теплозабезпечення житлової будівлі.

Об'єкт дослідження – п'ятиповерхова цегляна житлова будівля у місті Вінниця з об'ємом 8311 м³, з огорожувальними конструкціями, термічні опори яких відповідають вимогам [12], коефіцієнтом компактності 0,318, коефіцієнтом скління фасадів 0,213.

У таблиці 1 наведено джерела теплової енергії, що розглядалися дослідженнях.

Таблиця 1

Досліджувані джерела енергозабезпечення

Варіант	Джерела енергії для потреб		
	опалення	гарячого водопостачання	охолодження
1	низькотемпературний газовий котел із потужністю до 120 кВт		фреонові системи кондиціонування
2	конденсаційний газовий котел (температурний режим 55/45°C) із тепловою потужністю до 120 кВт		фреонові системи кондиціонування
3	реверсивна теплонасосна установка «грунт-вода» (температурний режим 35/28°C)	реверсивна теплонасосна машина (температурний режим 55/45°C)	реверсивна теплонасосна установка «грунт-вода» (температурний режим 35/28°C)
4	реверсивний тепловий насос типу «повітря-повітря»	електричні бойлерні установки	реверсивний тепловий насос «повітря-повітря»
5	твердопаливний котел на біомасі з ручним завантаженням палива із тепловою потужністю понад 100 кВт		фреонові системи кондиціонування
6	котел на паливних гранулах з автоматичним механізованим завантаженням палива із тепловою потужністю понад 100 кВт		фреонові системи кондиціонування
7	централізована система тепlopостачання будівлі		

Результати моделювання показників зміни питомого споживання первинної енергії показані на рис. 1.

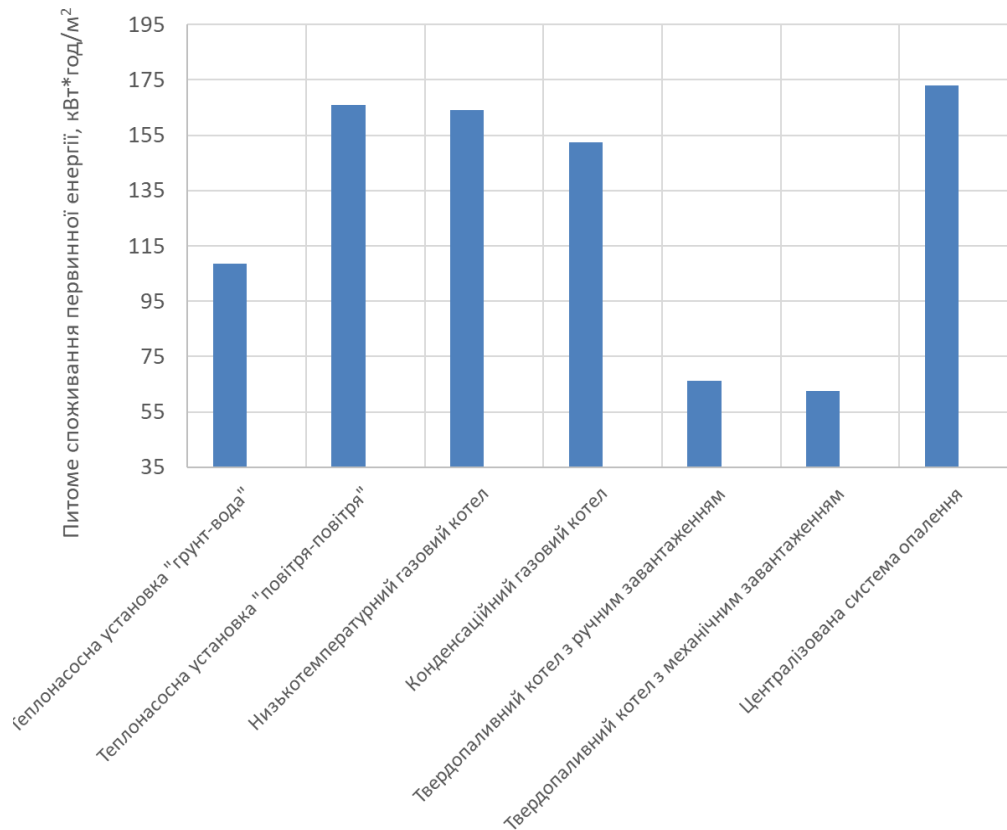


Рис. 1. Результати числового моделювання зміни питомого споживання первинної енергії для різних джерел теплової енергії будівлі

На рис. 2 показаний вплив вибору джерела теплової енергії на питомі викиди парникових газів, пов'язані з функціонуванням інженерних систем житлової будівлі.

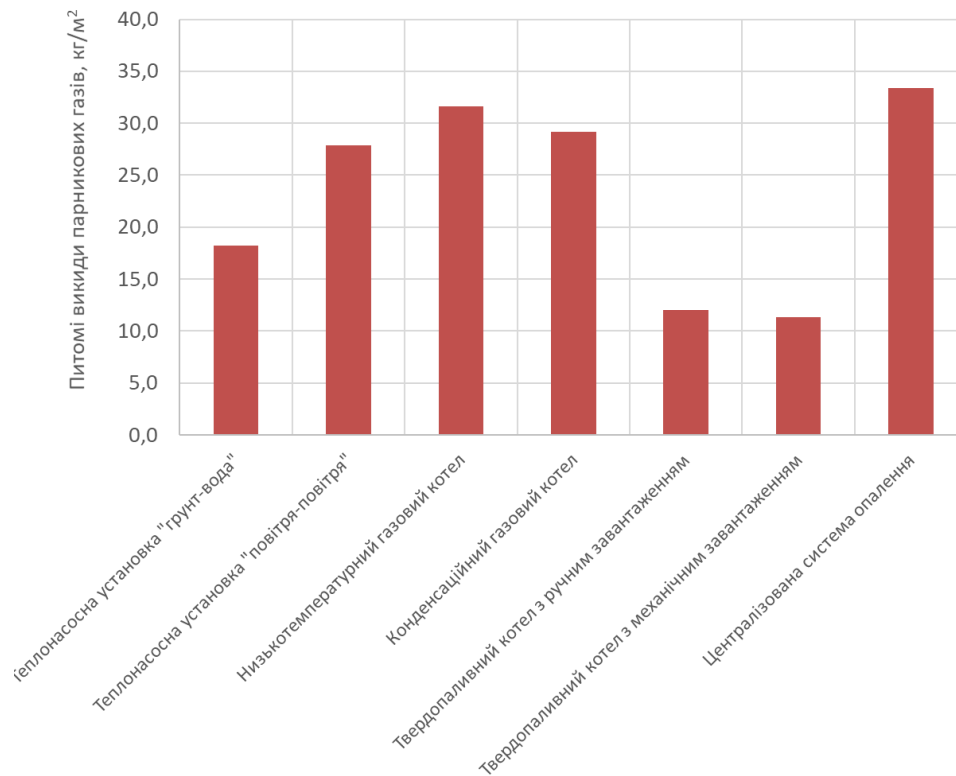


Рис. 2. Результати числового моделювання питомих викидів парникових газів для різних джерел теплозабезпечення житлової будівлі

Аналізуючи результати моделювання із рис. 1 та рис. 2 встановлено, що варіанти з котлами на біомасі мають найменші значення питомих витрат первинної енергії (62 та 66 кВт·год/м²) та питомих викидів парникових газів (11,3 та 12 кг/м²). Не дивлячись на низькі сезонні ККД наведеного опалювального обладнання, їх висока ефективність пов'язана із відносно низьким фактором використання первинної енергії для біомаси та низькими значеннями питомої величини викидів парникових газів на одиницю використаного палива, оскільки біомаса є CO₂ - збалансованим паливом. Оскільки кількість згенерованого вуглекислого газу CO₂ під час спалювання біомаси у теплогенераторі зіставляється із кількістю CO₂, поглинутого деревиною під час її зростання. На нашу думку, в умовах щільної міської забудови і враховуючи рівень сучасного обладнання для очищення відхідних газів такі варіанти не мають використовуватись для теплопостачання житлової будівлі.

Централізоване джерело теплопостачання має найменшу ефективність.

Для низькотемпературних та конденсаційних газових котлів питомі витрати первинної енергії (164 та 152 кВт·год/м²) та питомі викиди парникових газів (31,6 та 29,2 кг/м²) досить високі. Згідно отриманих результатів у порівнянні із досліджуваними джерелами енергії, не рекомендується для впровадження для забезпечення потреб теплопостачання навіть конденсаційний газовий котел.

Варіант становлення фреонових теплонасосних систем типу «повітря-повітря» та електробойлерів для потреб гарячого водопостачання має відносно низькі показники енергетичної та екологічної ефективності. Не зважаючи на те, що коефіцієнт сезонної ефективності має достатньо високе значення (3,0 та 5,0) при роботі системи опалення та охолодження для такого варіанту, але через великі питомі витрати первинної енергії за використання гарячої води електричною енергією не доречно вважати цей варіант раціональним. Зважаючи на наші кліматичні умови, в найбільш холодний період року є необхідність у піковому джерелі теплоти, оскільки коефіцієнт перетворення такого теплонасосного обладнання в такому режимі наблизитиметься до одиниці [18].

Отже, для даної житлової будівлі забезпечити потреби опалення, гарячого водопостачання та охолодження пропонується за допомогою реверсивного теплового насоса «грунт-вода» з обов'язковим розташуванням фанкойлів в кожному опалюваному приміщенні.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проаналізовано вплив вибору джерела теплової енергії для забезпечення потреб будівлі в опаленні та гарячому водопостачанні на питоме споживання первинної енергії і величину питомих викидів парникових газів. Встановлено, що варіанти теплопостачання від твердопаливних котлів на біомасі та теплонасосних систем «грунт-вода» мають найкращі показники. Центральне теплопостачання має найгірші показники. Тепловий насос типу «повітря-повітря», низькотемпературний і конденсаційний газовий котел також мають низькі показники.

Важке впровадження теплопостачання за допомогою котлів на біомасі на даному етапі через значні

труднощі із очищенням та відведенням димових газів в умовах щільної міської забудови.

Отже, для забезпечення потреб тепло- та холодопостачання житлової будівлі рекомендується до використання реверсивна теплонасосна установка типу «грунт-вода» та система фанкойлів з метою підтримання оптимальних температурних режимів в приміщеннях.

Література

1. Про енергоефективність будівель : закон України від 17.10.2019. №199 – IX. Дата оновлення 1.12.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
2. Фаренюк Є., Фаренюк Г. Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель. Наука та будівництво, вип. 33. URL : <http://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/197>
3. Фаренюк Г. Г. Наукові основи нормативного забезпечення енергоефективності будівельних об'єктів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 2010, вип. 14. С. 52–60.
4. Енергоефективність будівель в Україні. URL: <https://dergbud.org.ua/enerhoefektyvnist-budivelua.html>
5. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель : Наказ №169 від 11.07.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/z0822-18#Text>.
6. Панадій Є. С. Підвищення енергетичної ефективності житлової будівлі м. Києва з побудовою системи моніторингу витрат енергоносіїв. Магістерська кваліфікаційна робота. URL: <https://core.ac.uk/reader/323527200>
7. ДСТУ Б В.2.2-39:2016. Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель. [Чинний від 2017-01-01]. Київ, 2016. 50 с. (Національний стандарт України).
8. ДСТУ ISO 50002:2016 Енергетичні аудити. Вимоги та настанова щодо їх проведення. [Чинний від 2016-01-01]. Київ, 2016. 40 с. (Національний стандарт України)
9. ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007.Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорту будинків при новому будівництві та реконструкції. [Чинний від 2008-07-01]. Київ, 2008. 49 с. (Національний стандарт України).
10. ДСТУ Б EN15217:2013. Енергетична ефективність будівель. Методи представлення енергетичних характеристик та енергетичної сертифікації будівель (EN15217:2007, IDT).[Чинний від 2014-04-01]. Київ, 2014. 44 с. (Національний стандарт України)
11. Мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель : затвержені Наказом Міністерства розвитку громад та територій України 27 жовтня 2020 року № 260.
12. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція будівель. К. : Мінрегіонбуд України, 2012 р. <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/06/dbn-v.2.6-31.pdf>
13. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. К. : Мінрегіонбуд України, 2014.
14. Парубець О.М., Сугоняко Д.О., Краснянська Ю.В. Напрями вдосконалення механізму фінансування житлово-комунального господарства України. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. 2017. Вип. 3 (08). URL : http://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/8_2017/57.pdf
15. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні.
16. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.
17. Праховник А. В., Дешко В. І., Шевченко О. М. Енергетична сертифікація будівель. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2011. № 5. С. 140–153.
18. ДСТУ 9191:2022. Теплоізоляція будівель. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.

References

1. Pro enerhoefektyvnist budivel : zakon Ukrainy vid 17.10.2019. №199 – IX. Data onovlennia 1.12.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
2. Farenjuk Ye., Farenjuk H. Metodichni osnovy novoho pokolinnia budivelnykh norm z enerhoefektyvnosti budivel. Nauka ta budivnytstvo, vyp. 33. URL : <http://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/197>
3. Farenjuk H. H. Naukovi osnovy normatyvnoho zabezpechennia enerhoefektyvnosti budivelnykh ob'ektiv. Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohozopostachannia, 2010, vyp. 14. S. 52–60.
4. Enerhoefektyvnist budivel v Ukraini. URL: <https://dergbud.org.ua/enerhoefektyvnist-budivelua.html>
5. Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel : Nakaz №169 vid 11.07.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/z0822-18#Text>.
6. Panadii Ye. S. Pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti zhytlovoi budivli m. Kyieva z pobudovoioiu systemy monitorynhu vytrat enerhonosiiv. Mahisterska kvalifikatsiina robota. URL: <https://core.ac.uk/reader/323527200>
7. DSTU B V.2.2-39:2016. Metody ta etapy provedennia enerhetychnoho audytu budivel. [Chynnyi vid 2017-01-01]. Kyiv, 2016. 50 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
8. DSTU ISO 50002:2016 Enerhetychni audyty. Vymohy ta nastanova shchodo yikh provedennia. [Chynnyi vid 2016-01-01]. Kyiv, 2016. 40 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy)

9. DSTU-N B A.2.2-5:2007. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasportu budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii. [Chynnyi vid 2008-07-01]. Kyiv, 2008. 49 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
10. DSTU B EN15217:2013. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metody predstavlennia enerhetychnykh kharakterystyk ta enerhetychnoi sertyfikatsii budivel (EN15217:2007, IDT). [Chynnyi vid 2014-04-01]. Kyiv, 2014. 44 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy)
11. Minimalni vymohy do enerhetychnoi efektyvnosti budivel : zatverdzeni Nakazom Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy 27 zhovtnia 2020 roku № 260.
12. DBN V.2.6-31:2021 Teplova izoliatsiia budivel. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2012. <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/06/dbn-v.2.6-31.pdf>
13. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiuvannia povitria. K. : Minrehionbud Ukrainy, 2014.
14. Parubets O.M., Suhoniako D.O., Krasnianska Yu.V. Napriamy vdoskonalennia mekhanizmu finansuvannia zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy. Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia. 2017. Vyp. 3 (08). URL : http://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/8_2017/57.pdf
15. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osviltenni ta hariachomu vodopostachanni.
16. DSTU 9191:2022. Teploizoliatsiia budivel. Metody vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel.
17. Prakhovnyk A. V., Deshko V. I., Shevchenko O. M. Enerhetychna sertyfikatsiia budivel. Naukovi visti NTUU «KPI». 2011. № 5. S. 140–153.
18. DSTU 9191:2022. Teploizoliatsiia budivel. Metody vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel.