

М.К. Сухонос, А.П. Полив'янчук, Ю.Л. Коваленко, М.Ф. Смирний, С.В. Романенко,  
Р.А. Семененко, Ю.В. Сігасва

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна*

## СТВОРЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ І ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВЛЯХ

*Створено концепцію комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях, яка дозволяє визначати показники енергетичного, екологічного та економічного ефекту цих заходів. Доведено практичну придатність цієї концепції в ході досліджень ефективності використання автоматизованої системи HERZ Smart Comfort для управління тепловими режимами приміщень фрагменту адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова з загальною опалювальною площею 225,3 м<sup>2</sup>.*

**Ключові слова:** *теплоспоживання, енергозбереження, натурний об'єкт, тепловий режим, енергоефективність, екологічність, економічний ефект.*

### Вступ

Актуальною проблемою вітчизняного комунального сектору економіки є нераціональне використання теплової енергії при теплозабезпеченні будівель. Негативними наслідками цієї проблеми є: невідповідність теплових характеристик огорожувальних конструкцій будівель сучасним вимогам міжнародних стандартів, надмірне споживання системами комунальної енергетики вичерпних природних ресурсів, збільшення екологічного навантаження на навколишнє середовище, зокрема, забруднення атмосфери парниковими газами і забруднюючими речовинами, систематичне несення не виправданих економічних витрат комунальними підприємствами і населенням в опалювальні періоди та ін. За напрямками негативного впливу ці наслідки можна розділити на три групи: енергетичні, екологічні та економічні.

Шляхом вирішення вказаної проблеми є впровадження енергозберігаючих заходів в будівлях. Для забезпечення максимальної результативності цих заходів їх ефективність слід розглядати, як комплексну величину, в якій враховуються енергетичні, екологічні та економічні показники.

### Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягала у створенні і практичному використанні концепції комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях за критеріями, які характеризують їх енергетичну, екологічну та економічну ефективність. Для досягнення цієї мети вирішені наступні завдання:

1) створення концепції комплексного оцінювання заходів з енергозбереження в будівлях за вказаними критеріями та математичної моделі для їх визначення;

2) дослідження розробленої концепції на натурному об'єкті, на якому впроваджено енергозберігаючі технології.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки значна кількість міст України, зокрема, Київ, Харків, Львів, Тернопіль, Чернівці та ін. приєдналися до «Угоди мерів по клімату і енергетиці» [1], в якому передбачається проведення муніципальною владою заходів щодо істотного скорочення викидів парникових газів на 30% до 2030 року. Для досягнення цього результату потрібна нова стратегія використання і розвитку муніципальної енергетичної системи, яка передбачає підвищення екологічної безпеки котельних установок і теплоцентралей за рахунок впровадження інноваційних вискоєфективних енергозберігаючих та екологічних технологій [2,3]. Дана стратегія повинна враховувати такі проблеми, як: застарілі технології та обладнання для виробництва теплової енергії, висока енергоемність і матеріальні витрати, що перевищують в 2-3 рази відповідні показники розвинутих країн; відсутність сучасних систем захисту навколишнього середовища, відсутність належних правових і економічних механізмів, які стимулювали б розробку екологічно безпечних технологій, техніки для захисту навколишнього середовища і т.д. [4,5]. У той же час стимулювання ефективного споживання теплової енергії населенням дозволить знизити ресурсомісткість місь-

ких теплових мереж, що дозволить знизити забруднення навколишнього середовища і скоротити викиди в атмосферу парникових газів [6].

### Виклад основного матеріалу

Концепція комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях створена з метою підвищення інформативності процесу оцінювання шляхом врахування при його проведенні різних критеріїв ефективності. Сутність концепції полягає в тому, що загальна ефективність енергозберігаючих заходів розглядається, як 3-компонентний вектор  $E$ , складовими якого є енергетичний –  $E_I$ , екологічний –  $E_{II}$  та економічний –  $E_{III}$  ефекти від їх впровадження (рис. 1).

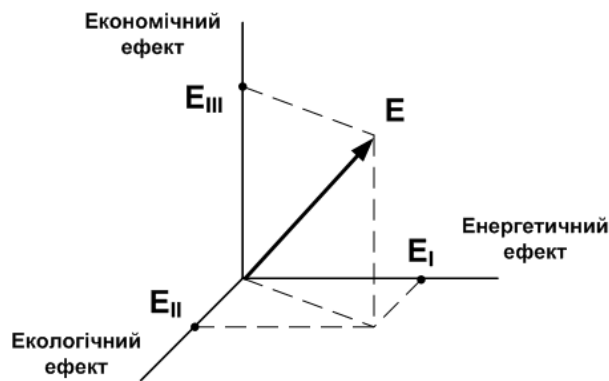


Рис. 1. Складові загальної ефективності заходів з енергозбереження в будівлях

При цьому критеріями ефективності є:

– енергетичного ефекту  $E_I$ : абсолютне –  $\Delta Q$  (кВт·год) і відносне –  $\delta Q$  (%) значення зекономленої кількості теплової енергії за опалювальний період, які визначаються за формулами:

$$\Delta Q = Q_{сум1} - Q_{сум2}, \quad (1)$$

де  $Q_{сум1}$  і  $Q_{сум2}$  – сумарні теплові втрати через огорожувальні конструкції будівлі за опалювальний період до і після впровадження енергозберігаючих заходів, відповідно, кВт·год;

$$\delta Q = \frac{Q_{сум1} - Q_{сум2}}{Q_{сум1}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

– екологічного ефекту  $E_{II}$ : маса (об'єм) зекономленого палива –  $\Delta M_n$  (кг) ( $\Delta V_n$  (м<sup>3</sup>)), зменшення маси викидів у атмосферу парникових газів, зокрема – CO<sub>2</sub> і забруднюючих речовин –  $\Delta M_{зр}$  (кг):

$$\Delta M_n = 3,6 \cdot \frac{\Delta Q}{Q_n}, \quad (3)$$

де  $Q_n$  – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

$$\Delta V_n = \frac{\Delta M_n}{\rho_n}, \quad (4)$$

де  $\rho_n$  – густина палива, кг/м<sup>3</sup>;

$$\Delta M_{зр} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot K_{зр} \cdot \Delta Q, \quad (5)$$

де  $K_{зр}$  – коефіцієнт емісії забруднюючої речовини, г/ГДж;

– економічного ефекту  $E_{III}$ : зменшення плати за кількість теплової енергії, спожитої за опалювальний період –  $\Delta C_{оп}$  (грн) та за паливо –  $\Delta C_n$  (грн):

$$\Delta C_{оп} = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot c_{оп} \cdot \Delta Q, \quad (6)$$

де  $c_{оп}$  – вартість одиниці теплової енергії згідно встановлених тарифів [7], грн/Гкал;

$$\Delta C_n = c_n \cdot \Delta V_n, \quad (7)$$

де  $c_n$  – вартість палива згідно встановлених тарифів, грн/т або грн/тис. м<sup>3</sup>.

Сумарні потоки теплових втрат через огорожувальні конструкції будівлі –  $Q_{сум1}$  і  $Q_{сум2}$ , які використовуються при оцінюванні критеріїв енергетичного ефекту  $E_I$ , визначаються за допомогою формули [8] (рис. 2):

$$Q_{сум} = \left( \sum_{i=1}^4 k_i \cdot F_i + c \cdot M_{інф} \right) \cdot (t_b - t_3) = k_{тв} \cdot \tau_{он} \cdot (t_b - t_3), \quad (8)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт теплопередачі через  $i$ -ту огорожувальну конструкцію, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F_i$  – площа поверхні  $i$ -ї огорожувальної конструкції, м<sup>2</sup>;

$c$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

$M_{інф}$  – масова витрата повітря при інфільтрації, кг/с;

$t_b$  – внутрішня температура повітря в приміщенні, °С;

$t_3$  – зовнішня температура повітря, °С.

$k_{тв}$  – коефіцієнт:

$$k_{тв} = \sum_{i=1}^4 k_i \cdot F_i + c \cdot M_{інф}. \quad (9)$$

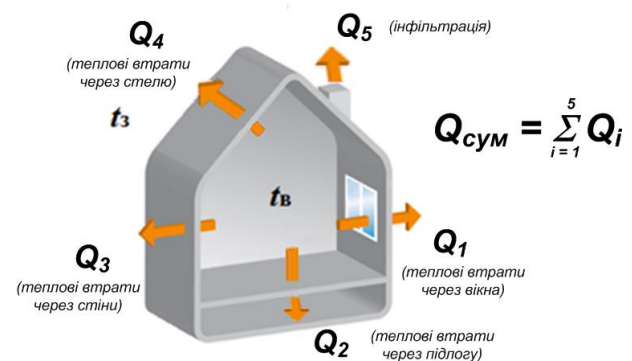


Рис. 2. Складові сумарних теплових втрат через огорожувальні конструкції будівлі

Представлена концепція дозволяє розширювати перелік критеріїв ефективності шляхом додавання нових показників до складових загальної ефективності

сті. Зокрема, до групи показників, що характеризують економічний ефект енергозберігаючого заходу може бути доданий термін окупності капітальних вкладень.

## Результати досліджень та їх аналіз

**Апробація концепції комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях.** Представлена концепція була апробована при визначенні показників ефективності використання автоматизованої системи HERZ Smart Comfort для управління тепловими режимами приміщень фрагменту адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, який використовувався в якості натурального об'єкту для проведення досліджень і являв собою 3-поверхову будівлю з 6-ма приміщеннями з загальною опалювальною площею 225,3 м<sup>2</sup>. Для цього об'єкту було проаналізовано фактичну потребу в комфортних теплових режимах приміщень з температурою  $t_{в}^{комф} = 20$  °С (рис. 3) і визначено коефіцієнт відносної потреби в комфортному теплозабезпеченні  $\gamma_{комф}$ :

$$\gamma_{комф} = \sum_{i=1}^3 \frac{S_{опi}}{S_{оп}} \cdot \gamma_{комфi} \quad (10)$$

де  $S_{опi}$  – опалювальна площа і-го поверху будівлі, м<sup>2</sup>;

$\gamma_{комфi}$  – відносна потреба в комфортному теплозабезпеченні і-го поверху:

$$\gamma_{комфi} = \frac{\tau_{оп(т)i}}{\tau_{оп(т)}} \quad (11)$$

де  $\tau_{оп(т)i}$  – середньотижнева тривалість періоду комфортного теплозабезпечення протягом опалювального сезону для і-го поверху, год;

$\tau_{оп(т)}$  – тривалість тижневого періоду – 168 год.

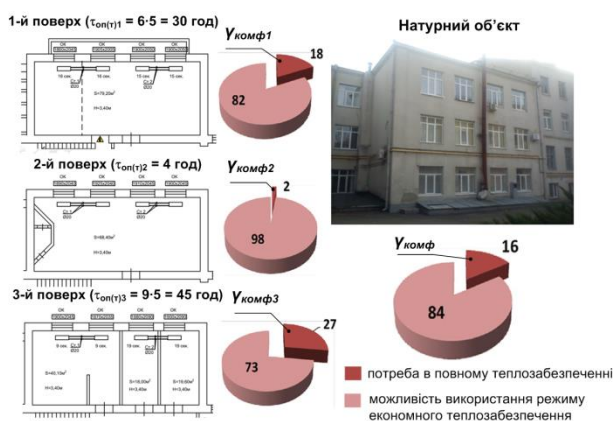


Рис. 3. Результати аналізу потреби приміщень натурального об'єкту у комфортному теплозабезпеченні

Система HERZ Smart Comfort дозволяє підтримувати потрібні температурні режими в приміщеннях будівлі: комфортний – в приміщеннях, які цього потребують, та економічний – в інших приміщеннях.

При цьому температура економічного режиму теплозабезпечення –  $t_{в}^{екон}$  згідно встановлених вимог є на 4 °С нижчою від  $t_{в}^{комф}$  і дорівнює 16 °С.

Показники енергетичної ефективності від використання системи регулювання тепловими режимами приміщень натурального об'єкту були визначені за формулами (без врахування теплової інерції будівлі):

$$\begin{aligned} \delta Q &= (1 - \gamma_{комф}) \frac{t_{в}^{комф} - t_{в}^{екон}}{t_{в}^{комф} - t_{з(с)}} \cdot 100\% = \\ &= (1 - 0,16) \frac{20 - 16}{20 - (-0,8)} \cdot 100\% = 17\% \end{aligned}$$

де  $t_{з(с)} = -0,8$  °С – середня температура атмосферного повітря в м. Харків за опалювальний період 2017 р;

$$\begin{aligned} \Delta Q &= (q \cdot S_{оп}) \cdot \frac{\delta Q}{100} \cdot 10^3 = (97,5 \cdot 225,3) \cdot \frac{17}{100} = \\ &= 3734 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

де  $q = 97,5$  (кВт·год)/м<sup>2</sup> – фактичне питоме теплоспоживання адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова у 2017 р.

За формулами (4) – (7) було визначено показники екологічного та економічного ефектів від впровадження енергозберігаючого заходу за опалювальний період, які склали:

– зменшення витрат природного газу на опалення –  $\Delta V_{п} = 406,4$  м<sup>3</sup>;

– зменшення викидів CO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub> у атмосферу –  $\Delta M_{CO_2} = 789,1$  кг;  $\Delta M_{NO_x} = 0,86$  кг;

– зменшення плати за використання теплової енергії та палива  $\Delta C_{оп} = 4441$  грн та –  $\Delta C_{п} = 4041$  грн.

На базі досліджуваного натурального об'єкту, який розглядався в якості фізичної моделі будівель більших за розміром та будівель інших типів, було проведено оцінювання ефективності використання системи HERZ Smart Comfort у приміщеннях адміністративного корпусу (опалювальна площа 5821 м<sup>2</sup>), всіх корпусів університету (опалювальна площа 51186 м<sup>2</sup>) та фрагментів будівель лікарні і жилого будинку, опалювальні площі яких є такими самими, як в натурального об'єкту (рис. 4, 5).



Рис. 4. Результати оцінки енергетичного ефекту заходу з енергозбереження в будівлях університету

Таким чином результати апробації концепції комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях довели її практичну придатність та можливість використання при проведенні досліджень на натурних об'єктах, проведенні математичного, фізичного моделювання і прогнозування.



Рис. 5. Результати оцінювання ефективності заходу з енергозбереження в будівлях різних типів

### Висновки

1. Створено концепцію комплексного оцінювання ефективності заходів з енергозбереження в будівлях, яка дозволяє визначати показники енергетичного, екологічного та економічного ефекту: абсолютне і відносне значення кількості зекономленої теплової енергії, величини зменшення кількості палива, викидів у атмосферу парникових газів і забруднюючих речовин, величини зменшення плати за використане паливо та кількість спожитої теплової енергії.

2. Проведено апробацію запропонованої концепції при комплексному оцінюванні ефективності використання автоматизованої системи HERZ Smart Comfort для управління тепловими режимами приміщень 3-поверхового фрагменту адміністративного корпусу ХНУМГ ім. О.М. Бекетова з загальною опалювальною площею 225,3 м<sup>2</sup>. Визначено показники ефективності енергозберігаючого заходу за опалювальний період: економія теплової енергії – 3734 кВт·год або 17%, зменшення витрати природного газу на опалення – 406,4 м<sup>3</sup>, зниження викидів CO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub> – 789,1 кг і 0,86 кг, відповідно, скорочення плати за споживання теплової енергії – 4041 грн і палива – 4441 грн. Спрогнозовано ефективність використання досліджуваного енергозберігаючого заходу в адміністративному корпусі, всіх корпусах університету, а також в будівлях навчального закладу, лікарні, житлового будинку.

### Література

1. The Covenant of Mayors for Climate and Energy Reporting Guidelines. Covenant of Mayors & Mayors for climate and energy (2016). Adapt Offices and the Joint Research Centre of the European Commission, 78.
2. Ковалко, М.П. Енергозбереження – пріоритетний напрям державної політики України. [Текст] / М.П. Ковалко, С.П. Денисюк – Київ: Українські енциклопедичні знання, 1998. – 512 с.
3. Alibekova, A., Shaimerdenova, G., Agilbaeva, M. (2013) Ecological problems of thermal power plants. *Journal of Industrial Technology and Engineering*, 4(09), 40-44.
4. Варламов, Г.Б. Основні особливості реалізації принципу екологічної рівноваги на екологічному об'єкті [Текст] / Г.Б. Варламов, І.С. Дідик // Молодий вчений: наук. журнал. – Херсон, 2016. – № 1, Ч. 3. – С. 104-107.
5. Бараннік, В.О. Енергозбереження – пріоритетний напрям енергетичної політики та підвищення енергетичної безпеки України [Текст] / В.О. Бараннік, М.Г. Земляний // 36. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф. «Енергоефективність – 2004». – О., 2004. – С. 97-108.
6. Малярєнко, В.А. Аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів України та їх раціонального використання [Текст] / В.А. Малярєнко, І.С. Щербак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 2013. – № 14(988). – С. 118-126.
7. Тарифи на теплову енергію для бюджетних установ, інших споживачів (крім населення) і релігійних організацій. КП «Харківські теплові мережі»[Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS\\_v2\\_public\\_info\\_tarify.php](http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS_v2_public_info_tarify.php).
8. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст]: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М: Энергия, 1975. – 488 с.

### References

1. The Covenant of Mayors for Climate and Energy Reporting Guidelines / Covenant of Mayors & Mayors for climate and energy (2016). Adapt Offices and the Joint Research Centre of the European Commission, 78. [in English].
2. Kovalko, M., Denisyuk, S. (1998). Enerhozberzhennya – pryorytetnyj napryamok derzhavnoyi polityky Ukrayiny. [Mathematical modeling of heat transfer in the system of ecological diagnostics of diesel locomotive - diluting tunnel]. Energy saving is a priority right of the sovereign policy of Ukraine. Ukrainian encyclopedic knowledge, 512 [in Ukrainian].
3. Alibekova, A., Shaimerdenova, G., Agilbaeva, M. (2013). Ecological problems of thermal power plants. *Journal of Industrial Technology and Engineering*, № 4(09), 40-44. [in English].
4. Varlamov, G., Didik, I. (2016). The main features of the implementation of the principle of environmental equilibrium on the ecological object. [Osnovni osoblyvosti realizaciyi pryncypu ekolohichnoyi rivo-vahu na ekolohichnomu ob'yekti]. *Young scientist: scientific journal*, 1,3, 104-107. [in Ukrainian].
5. Barannik, V., Zemliany, M. (2004). Energy saving is a priority direction of energy policy and enhancement of Ukraine's energy security. [Enerhozberzhennya – pryorytetnyj napryam enerhetychnoyi polityky ta pidvyshhennya enerhetychnoyi bezpeky Ukrayiny]. *Collection. scientific*



works of the International Scientific and Practical Conference «Energy Efficiency – 2004», 97-108. [in Ukrainian].

6. Maiarenko, V., Sherbak, I. (2013). Analysis of consumption of fuel and energy resources of Ukraine and their rational use. [Analiz spozhyvannya palyvno-enerhetychnykh resursiv Ukrainy ta yix racional'noho vykorystannya]. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, 14(988), 118-126. [in Ukrainian].

7. Tariffs for heat energy for budget institutions, other consumers (except for population) and religious organizations. Communal Enterprise "Kharkiv heat networks" [electronic resource] (2018). [Taryfy na teplovu enerhiyu dlya byudzhetykh ustanov, inshykh spozhyvachiv (krim naseleennyia) i relihiinykh orhanizacij. KP «Харків»ki teplovi merezhi». Retrieved from [http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS\\_v2\\_public\\_info\\_tarify.php](http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS_v2_public_info_tarify.php). [in Ukrainian].

8. Isachenko, V., Osipova, V., Sukomel, A. (1975). Heat transfer: textbook for universities. [Теплоperedacha: uchebnyk dlja vuzov]. Energy, 488 [in Russian].

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І.В. Парсаданов, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

**Автор:** СУХОНОС Марія Костянтинівна  
д.т.н., проф.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [sukhonos.maria@gmail.com](mailto:sukhonos.maria@gmail.com)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7246-8740>

**Автор:** ПОЛИВ'ЯНЧУК Андрій Павлович  
д.т.н., проф.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [ar@mail@meta.ua](mailto:ar@mail@meta.ua)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9966-1938>

**Автор:** КОВАЛЕНКО Юрій Леонідоич  
к.т.н., с.н.с.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [kovalenkoy55@gmail.com](mailto:kovalenkoy55@gmail.com)

**Автор:** СМІРНИЙ Михайло Федорович  
д.т.н., проф.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [mfsmirny@gmail.com](mailto:mfsmirny@gmail.com)

**Автор:** РОМАНЕНКО Сергій Вікторович

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [etv1715@gmail.com](mailto:etv1715@gmail.com)

**Автор:** СЕМЕНЕНКО Роман Анатолійович

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [semenenko\\_roman@ukr.net](mailto:semenenko_roman@ukr.net)

**Автор:** СІГАЄВА Юлія Володимирівна

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail - [usigaeva01@gmail.com](mailto:usigaeva01@gmail.com)

## CREATION AND APPROPRIATION OF THE CONCEPT OF FULL EVALUATION OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF ENERGY CONSERVATION MEASURES IN BUILDINGS

M.K. Sukhonos, A.P. Polivyanchuk, Y.L. Kovalenko, M.F. Smirny, S.V. Romanenko,  
R.A. Semenenko, Y.V. Sigaeva

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

*The concept of an integrated assessment of the effectiveness of energy saving measures in buildings has been created, which allows determining the indicators of energy, environmental and economic effect from the implementation of these measures: the absolute and relative value of the amount of thermal energy saved, the amount of decrease in the amount of fuel, greenhouse gas emissions into the atmosphere CO<sub>2</sub> and pollutants, the magnitude of the reduction in fees for used fuel and the amount of consumed thermal energy. An approbation of the proposed concept was carried out with a comprehensive assessment of the effectiveness of using the HERZ Smart Comfort automated system to control the thermal conditions of the premises of a 3-story fragment of the O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv with a total heated area of 225.3 m<sup>2</sup>. The efficiency indicators of the studied energy-saving measures for the heating period were determined: saving heat energy - 3734 kW·h or 17%, reducing the consumption of natural gas for heating - 406.4 m<sup>3</sup>, reducing CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions - 789.1 kg and 0.86 kg, accordingly, the reduction of fees for the consumption of thermal energy - 4041 UAH and fuel - 4441 UAH. On the basis of the investigated natural object, which was considered as a physical model of large buildings and other types of buildings, the HERZ Smart Comfort system was assessed in the premises of the administrative building (heated area 5821 m<sup>2</sup>), all buildings of the university (heated area 51186 m<sup>2</sup>) and fragments of hospital and residential buildings, the heating areas of which are the same as those of a natural object. The results of approbation of the concept of integrated assessment of the effectiveness of energy saving measures in buildings demonstrated its practical suitability and ability to use it when conducting research on field objects, performing mathematical and physical modeling and forecasting.*

**Keywords:** heat consumption, energy saving, natural object, thermal regime, energy efficiency, environmental friendliness, economic effect.