

# Gruntowy rurowy powietrzny wymiennik ciepła w wentylacji jednorodzinnych, zrównoważonych budynków mieszkalnych

An earth-to-air heat exchanger for ventilation systems in sustainable single-family homes

dr inż. Aldona Skotnicka-Siepsiak (ORCID: 0000-0002-8576-1954), Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, prof. Carles Serrat (ORCID: 0000-0002-1504-5354), Uniwersytet Techniczny w Katalonii, Barcelona

DOI: 10.5604/01.3001.0053.9360

**Streszczenie:** Wentylacja w zrównoważonych budynkach jednorodzinnych wymaga zastosowania nie tylko rozwiązań energooszczędnych, które czerpać będą maksymalnie z odnawialnych źródeł energii, ale muszą one również zapewnić prawidłowe funkcjonowanie obiektu w zmiennych warunkach zewnętrznych. Sprostac muszą one nie tylko dobowym i sezonowym zmianom otoczenia, ale również obserwowanym globalnie zmianom klimatycznym. Wymagania te spełniają gruntowe rurowe wymienniki ciepła (GWC). W poniższym artykule przeanalizowano eksperymentalne wyniki pracy tego urządzenia w polskich warunkach klimatycznych. Przeanalizowano okres jednego roku od września 2020 roku do końca sierpnia 2021 roku. Głównym celem pracy była nie tyle sama ocena ilości ciepła i chłodu pozyskanego z GWC, co ocena jego potencjału energetycznego w różnych układach wentylacji jednorodzinego budynku mieszkalnego funkcjonujących w rzeczywistych, zmiennych warunkach otoczenia. W ramach badań rozpatrywano przypadek wentylacji grawitacyjnej i porównano pod względem zapotrzebowania energetycznego z trzema innymi przypadkami układów wentylacyjnych: wentylacją wyposażoną dodatkowo w GWC, wentylacją z rekuperacją i wysokosprawnym wymiennikiem ciepła oraz z wentylacją wyposażoną zarówno w GWC, jak i w rekuperację z odzyskiem ciepła.

**Słowa kluczowe:** gruntowy powietrzny wymiennik ciepła, wentylacja energooszczędna, odzysk ciepła w układach wentylacyjnych.

**Abstract:** Ventilation systems in sustainable single-family homes require energy-efficient solutions that make optimal use of renewable energy sources and meet air quality and thermal comfort requirements in buildings. These systems should ensure a stable indoor environment and adequately respond to daily and seasonal fluctuations in temperature, as well as global climate change. Earth-to-air heat exchanges (EAHE) meet the above requirements. This article analyzes the performance of an EAHE in the Polish. The experiment covered a period of one year from the beginning of September 2020 to the end of August 2021. In addition to determining the heating and cooling loads, the main aim of the study was to evaluate the EAHE's thermal performance in ventilation systems for single-family homes with different configurations under variable real-world conditions. Energy consumption in a building equipped with a natural ventilation system was compared with three other scenarios: a ventilation system coupled with an EAHE, a mechanical ventilation system with heat recovery and a high-efficiency heat exchanger, and a mechanical ventilation system with both an EAHE and heat recovery.

**Keywords:** ground air heat exchanger, energy-saving ventilation, heat recovery in ventilation systems.

## 1. Wprowadzenie

Gruntowy wymiennik ciepła (GWC) jest przykładem relatywnie prostej technologii, która we współpracy z tradycyjnymi systemami wentylacyjnymi i klimatyzacyjnymi daje możliwość wstępnego podgrzania oraz ochłodzenia powietrza [1]. Mimo swojej prostoty, GWC daje możliwość obniżenia zapotrzebowania na energię dla budynku oraz zminimalizowania wpływu na zmiany klimatyczne [2].

W polskich warunkach klimatycznych częściej rozpatruje się GWC jako wstępny system ogrzewania powietrza

wentylacyjnego. Jest w tym zakresie wykorzystywane zarówno w niewielkich instalacjach domów jednorodzinnych, jak i w dużych instalacjach przemysłowych [3]. GWC wykorzystywany jest również w celu ochłodzenia powietrza. Należy zwrócić jednak uwagę, że szczególnie w przypadku wykorzystania GWC do schłodzenia powietrza wentylacyjnego istotne jest uwzględnienie nie tylko ciepła jawnego, ale również utajonego [4]. Istnieje wiele konstrukcji GWC [5]. GWC wykorzystywane są zarówno w układach z wentylacją mechaniczną [6], jak i naturalną [7]. W tym drugim przypadku – zwłaszcza w połączeniu z solar chimney [8]. Ale

przydatność GWC weryfikowana jest również w połączeniu z innymi technologiami, jak na przykład materiały zmienno-fazowe [9], wentylatory zewnętrzne [10], układy fotowoltaiczne [11] czy dachy kopułowe [12].

Koncepcja GWC jest cały czas badana, udoskonalana i rozwijana. Przytoczyć można również liczne prace przeglądowe, podsumowujące obecny stan wiedzy w tematyce GWC [13].

Badanie pracy GWC, ich projektowanie oraz optymalizacja bardzo często prowadzone są z wykorzystaniem symulacji numerycznych [14].

Poniższy artykuł ma za zadanie analizę rzeczywistej pracy rurowego, gruntowego wymiennika ciepła GWC dla polskich warunków klimatycznych, cechujących się gorącym latem i zimną zimą. W przeprowadzonej analizie skupiono się nie tylko na bilansie energetycznym pracy GWC, ale też przeanalizowano współpracę tego urządzenia z często wykorzystywanymi układami systemu wentylacyjnego w budownictwie jednorodzinnych.

## 2. Badania

Na eksperymentalnym stanowisku pomiarowym, które zlokalizowane jest na Wydziale Geoinżynierii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, wykonano pomiary temperatury powietrza zewnętrznego  $\Theta_{out}$  oraz w oparciu o funkcjonujący tam gruntowy rurowy wymiennik ciepła (GWC), pomierzono temperaturę na jego wylocie  $\Theta_{in}$ . GWC wykonano z rur systemu AwaduktThermo o średnicy 0,2 m, które zakopane zostały na średniej głębokości około 2,12 m [15]. Długość urządzenia wynosi 41 m. Analizowane wartości pomiarowe były rejestrowane ze średniogodzinową dokładnością w okresie roku, od początku września 2020 roku do końca sierpnia 2021 roku.

Przeanalizowano zapotrzebowanie na ciepło i chłód dla przykładowego budynku jednorodzinny. W analizie uwzględniono jednokondygnacyjny budynek, dla którego wartość współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych wynosi  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , dla dachu  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , dla okien zewnętrznych  $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , a dla drzwi zewnętrznych  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Szczelność powietrzna budynku wynosi  $1,0 \text{ l/h}$ . Łączna powierzchnia użytkowa pomieszczeń wynosi  $108 \text{ m}^2$ . Strumień powietrza wentylacyjnego wynosi  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przyjęto, że aby zapewnić komfort termiczny, temperatura wewnętrzna powinna wynosić  $20^\circ\text{C}$  [16, 17].

Wyznaczono zapotrzebowanie na ciepło i chłód dla budynku w czterech poniższych przypadkach.

- Przypadek 1 – napływające do wnętrza budynku powietrze wentylacyjne jest powietrzem zewnętrznym  $\Theta_{out}$  w ilości  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przypadek taki jest zbliżony do działania na przykład wentylacji grawitacyjnej w budynku. W celu utrzymania komfortu termicznego odpowiednie ilości ciepła (wartości dodatnie w bilansie) bądź chłodu (wartości ujemne w bilansie) dostarczyć musi system grzewczo-wentylacyjny.

- Przypadek 2 – ta sama ilość powietrza zewnętrznego jak w przypadku 1, przed dostarczeniem do budynku przepływa przez GWC  $\Theta_{in}$ . Dopiero po wstępnym ogrzaniu lub schłodzeniu w GWC system grzewczo-wentylacyjny dostarcza odpowiednią ilość ciepła lub chłodu, tak aby temperatura wewnątrz budynku wynosiła  $20^\circ\text{C}$ .

- Przypadek 3 – analizowana w badaniach ilość powietrza wentylacyjnego dostarczana jest do budynku z wykorzystaniem wymiennika ciepła, który pozwala odzyskiwać ciepło ze strumienia powietrza, ze sprawnością temperaturową wynoszącą 90%. W przypadku gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest ujemna, musi ono w ramach zabezpieczenia przeciwmroźniowego zostać podgrzane w nagrzewnicy wstępnej do temperatury  $0^\circ\text{C}$ . Jeżeli po przejściu przez wymiennik ciepła nie została osiągnięta temperatura komfortu, nagrzewnica wtórna podgrzeje powietrze do  $20^\circ\text{C}$ .

- Przypadek 4 – układ jak w przypadku 3, dodatkowo wyposażony w GWC.

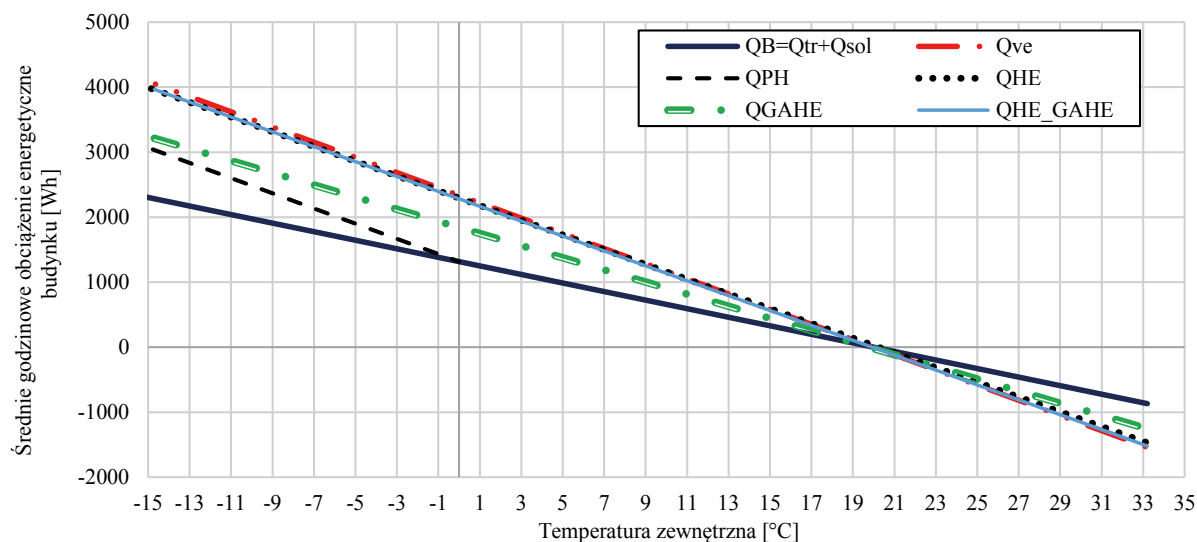
Obliczenia przeprowadzone zostały zgodnie z normą ISO 13790:2008 [18].

## 3. Wyniki

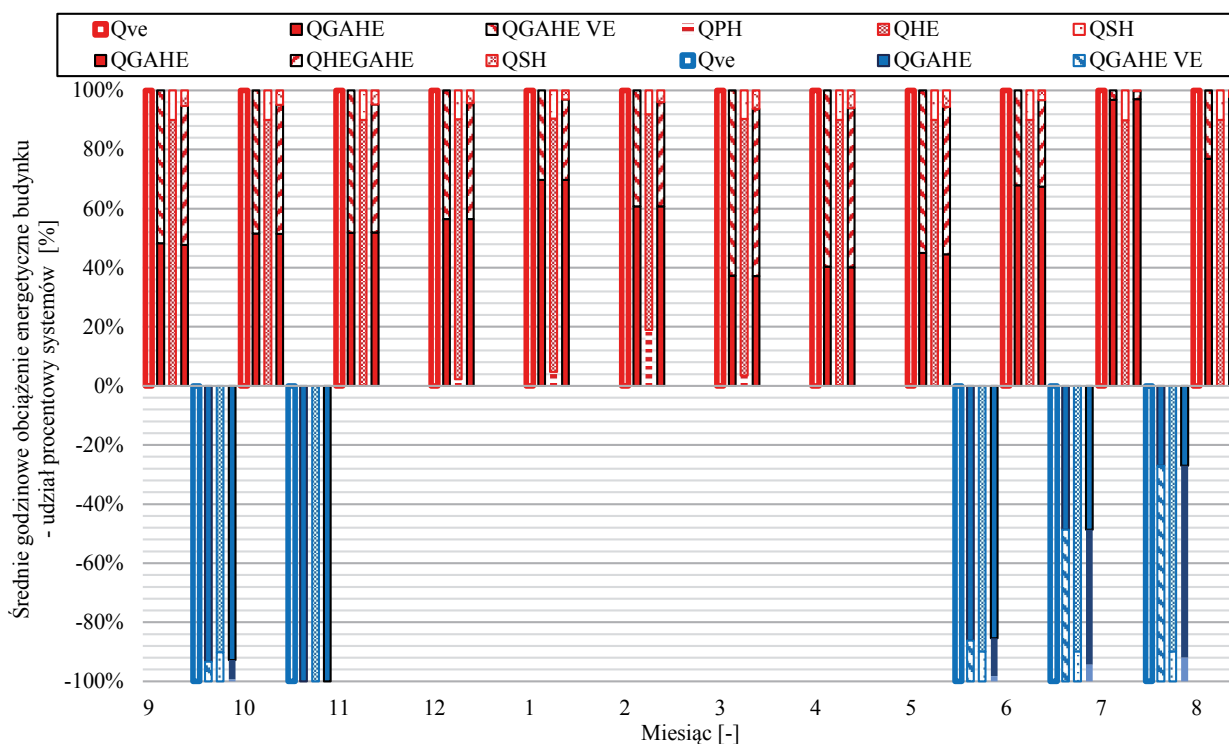
Analiza porównawcza dla typowego roku meteorologicznego (TRM) oraz danych pomiarowych z analizowanego okresu pozwoliła stwierdzić, że średnia godzinowa temperatura zewnętrzna w TRM wynosiła  $6,9^\circ\text{C}$ , podczas gdy w pomiarowych wynosiła ona  $9,6^\circ\text{C}$ . W TRM temperatury wahały się w zakresie od  $-17,3$  do  $31,0^\circ\text{C}$ , podczas gdy w analizowanym okresie od  $-18,7$  do  $32,6^\circ\text{C}$ .

W sumarycznej analizie budynku uwzględniono przepływ ciepła przez przenikanie  $Q_{tr}$ , zyski ciepła przez przegrody przezroczyste budynku  $Q_{sol}$  oraz przepływ ciepła przez wentylację  $Q_{ve}$ . Bilans dwóch pierwszych składowych  $Q_{tr}$  oraz  $Q_{sol}$  stanowi zapotrzebowanie na ciepło lub chłód budynku  $Q_B$ . W bilansie, jako niezależne od zewnętrznych warunków pogodowych i stałe w skali roku, pominięto wewnętrzne zyski ciepła  $Q_{int}$  (rys. 1).

W przypadku 1 (rys. 1) – gdy dostarczamy jako powietrze wentylacyjne powietrze zewnętrzne, bez żadnej wcześniejszej obróbki termicznej, około połowę zapotrzebowania na ciepło generowane jest przez wentylację. Od kwietnia do sierpnia zapotrzebowanie na chłód w obiekcie wynika przede wszystkim z zysków ciepła od przeszklonych przegród. W przypadku 2 (rys. 1) gdy przed wprowadzeniem do budynku powietrze wentylacyjne przechodzi przez GWC, w okresie letnim dostarczane jest w ten sposób około 55% ciepła dla układu wentylacyjnego, natomiast w pozostałym okresie roku około 40%. Chłód dostarczany z GWC do systemu wentylacji stanowi niewielki odsetek (3,0%) całkowitego zapotrzebowania na chłód w obiekcie w okresie letnim. Niemniej jednak chłód pozyskany z GWC zaspokaja około 75% zapotrzebowania na chłód układu wentylacyjnego w okresie letnim (rys. 2).



Rys. 1. Średnie godzinowe obciążenie energetyczne budynku [Wh] w zależności od temperatury zewnętrznej – wszystkie systemy



Rys. 2. Procentowe udziały w średnim godzinowym bilansie energetycznym budynku poszczególnych składowych układu wentylacyjnego budynku; dla każdego z miesięcy kolejne z czterech słupków wykresu reprezentują przypadki 1, 2, 3 oraz 4

Rozpatrując przypadek 3, zastosowanie wymiennika ciepła (HE) wymaga użycia zabezpieczenia przeciwmroźniowego w postaci nagrzewnicy wstępnej (PH). Podgrzewa ona powietrze zewnętrzne o temperaturach ujemnych do temperatury 0°C. Działanie nagrzewnicy wstępnej konieczne jest w okresie od listopada do kwietnia. W dwóch pierwszych miesiącach roku, które cechują najniższe temperatury zewnętrzne, zapotrzebowanie na ciepło dla nagrzewnicy wstępnej wynosi około 10% całego zapotrzebowania na ciepło dla układu wentylacyjnego. Średnio w całym okresie użytkowania wykorzystanie wstępnej nagrzewnicy

odpowiada za 5% zapotrzebowania na ciepło na potrzeby wentylacji. Im niższe temperatury zewnętrzne, tym większe jest zapotrzebowanie na energię dla PH (rys. 1). W skali roku ciepło odzyskane w HE stanowi około 86% całego zapotrzebowania na wentylację. Zastosowanie nagrzewnicy wtórnej SH odpowiada za około 9% zapotrzebowania na ciepło w bilansie systemu wentylacyjnego (rys. 2).

W przypadku 4 (sprzętowe rozbudowanie przypadku 3 o GWC) nie zaobserwowano znaczących różnic temperatur powietrza na wyjściu z HE w stosunku do przypadku 3. Zastosowanie GWC eliminuje całkowicie konieczność stosowania

wstępnej nagrzewnicy powietrza w układzie. Wstępny podgrzew powietrza wentylacyjnego przeprowadzony z wykorzystaniem GWC dostarczył przeciętnie 54% potrzebnego dla wentylacji obiektu ciepła, zaś wstępne schłodzenie powietrza zewnętrznego w GWC dało około 41% potrzebnego na cele wentylacyjne chłodu (rys. 2). Zastosowanie HE dostarczyło około 41% ciepła i około 52% chłodu w bilansie układu wentylacyjnego analizowanego budynku. Dogrzew powietrza przez HE do temperatury 20°C stanowi około 5% bilansu energetycznego układu grzewczego natomiast jego ochłodzenie do tej temperatury generuje około 6% zapotrzebowania na chłód w bilansie obiektu.

#### 4. Podsumowanie

GWC jest rozwiązaniem, które umożliwia znaczne obniżenie zużycia energii w systemach wentylacyjnych. Badania w polskich warunkach eksploatacyjnych wskazują na szczególnie dużą przydatność tego rozwiązania w warunkach zimowych, do wstępnego podgrzewu powietrza wentylacyjnego. GWC jest w stanie dostarczyć w skali roku około 45% ciepła potrzebnego do działania układu wentylacyjnego i około jedną piątą całego ciepła wymaganego w sumarycznym bilansie obiektu. Zrealizowane z wykorzystaniem GWC wstępne schładzanie w warunkach letnich pokrywa w około trzech czwartych zapotrzebowanie na chłód dla powietrza wentylacyjnego. Biorąc jednak pod uwagę specyfikę szczelnych, dobrze izolowanych termicznie nowoczesnych budynków z dużymi przeszkleniami, jest to jedynie niewielki odsetek (około 3%) całościowego zapotrzebowania na chłód budynku. Ponieważ głównym źródłem zapotrzebowania na chłód są przeszklenia, w celu zabezpieczenia budynku przed przegrzewaniem trzeba stosować zabezpieczenia przeciwsłoneczne, a utrzymanie warunków komfortu termicznego w warunkach letnich wymaga zastosowania układu klimatyzacyjnego, poza układem wentylacyjnym wyposażonym w GWC.

GWC jest również rozwiązaniem, które zasługuje na szczególną uwagę w budownictwie zrównoważonym. W perspektywie obserwowanych zmian klimatycznych GWC pozwala wydajnie zminimalizować energię potrzebną na działanie układu wentylacyjnego w bardzo zmiennych warunkach zewnętrznych oraz umożliwia energetyczną adaptację budynku.

**Publikacja została napisana w wyniku odbywania przez autorkę stażu w Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTECH Departament de Matemàtiques Hiszpania, współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój), zrealizowanego w projekcie Program Rozwojowy Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (POWR.03.05.00-00-Z310/17).**

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Fazlikhani F., Goudarzi H., Solgi E., Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates, *Energy conversion and management* 148, 2017, str. 78–89
- [2] Zajch A., Gough W., Chiesa G., Earth-Air Heat Exchanger Potential Under Future Climate Change Scenarios in Nine North American Cities, In *Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of SEB 2019*, Springer Singapore, 2020, str. 109–119
- [3] Peretti C., Zarrella A., De Carli M., Zecchin R., The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE), A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, 2013, str. 107–116
- [4] Wei H., Yang D., Wang J., Du J., Field experiments on the cooling capability of earth-to-air heat exchangers in hot and humid climate, *Applied Energy* 2020, 276, str. 115493
- [5] Taurines K., Girous-Julien S., Menezes C., Energy and thermal analysis of an innovative earth-to-air heat exchanger: experimental investigations, *Energy and Buildings* 187, 2019, str. 1–15
- [6] Hegazi A. A., Abdelrehim O., Khater A., Parametric Optimization of Earth-Air Heat Exchangers (EAHEs) for Central Air Conditioning International Journal of Refrigeration, 2021
- [7] Bai Y., Long T., Li W., Li Y., Liu S., Wang Z., Huang S., Experimental investigation of natural ventilation characteristics of a solar chimney coupled with earth-air heat exchanger (SCEAHE) system in summer and winter, *Renewable Energy* 193, 2022, str. 1001–1018
- [8] Sakhri N., Menni Y., Chamkha A. J., Lorenzini G., Ameer H., Kaid N., Bensafi M., Experimental study of an earth-to-air heat exchanger coupled to the solar chimney for heating and cooling applications in arid regions, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 145, 2021, str. 3349–3358
- [9] Qin D., Liu J., Zhang G., A novel solar-geothermal system integrated with earth-to-air heat exchanger and solar air heater with phase change material-numerical modelling, experimental calibration and parametrical analysis, *Journal of Building Engineering* 35, 2021, str. 101971
- [10] Ahmad H., Sakhri N., Menni Y., Omri M., Ameer H., Experimental study of the efficiency of earth-to-air heat exchangers: Effect of the presence of external fans, *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 2021, str. 101461
- [11] Li Z. X., Shahsavari A., Al-Rashed A. A., Kalbasi R., Afrand M., Talebizadehsardari P., Multi-objective energy and exergy optimization of different configurations of hybrid earth-air heat exchanger and building integrated photovoltaic/thermal system, *Energy Conversion and Management*, 195, 2019, str. 1098–1110
- [12] Akbarpoor A. M., Poshtiri A. H., Biglari F., Performance analysis of domed roof integrated with earth-to-air heat exchanger system to meet thermal comfort conditions in buildings, *Renewable Energy* 168, 2021, str. 265–293
- [13] Salem H. H., Hashem A. L., Integration of Earth-air heat exchanger in buildings review for theoretical researches, In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2023, July, tom 2787, nr 1
- [14] Hamdane S., Mahboub C., Moumni A., Numerical approach to predict the outlet temperature of earth-to-air-heat-exchanger, *Thermal Science and Engineering Progress* 21, 2021, str. 100806
- [15] Skotnicka-Siepiak A., Wesołowski M., Piechocki J., Validating Models for Calculating the Efficiency of Earth-to-Air Heat Exchangers Based on Laboratory Data for Fall and Winter 2016 in Northeastern Poland, *Polish Journal of Environmental Studies* 28(5)2019
- [16] PN-EN 12831-1:2017-08: Energy performance of buildings – Method for calculation of the design heat load – Part 1: Space heating load, Module M3-3
- [17] Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730:2005)
- [18] ISO 13790:2008: Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling