*dr inż. Aleksander Starakiewicz*<sup>1)\*)</sup> ORCID: 0000-0002-8340-8401 *dr inż. Przemysław Miąsik*<sup>1)</sup> ORCID: 0000-0001-7203-3803 *dr inż. Joanna Krasoń*<sup>1)</sup> ORCID: 0000-0003-3556-6592

# Thermal efficiency of the thermal storage walls *Efektywność cieplna przegród kolektorowo-akumulacyjnych*

#### DOI: 10.15199/33.2025.06.05

Abstract: The article presents a procedure for calculating the thermal parameters of the thermal storage wall and determining its thermal efficiency. To illustrate the thermal efficiency of the thermal storage wall, seven characteristic material solutions were selected for the accumulation layer, nine types of glazing for the collector, two construction profiles for the collector, and two spacer frames in insulating glass. The equivalent heat transfer coefficient defining the thermal efficiency of the thermal storage walls is the most reliable parameter. The results obtained indicate that there are potential possibilities to construct collector accumulation walls with the value of the equivalent heat transfer coefficient  $U_r < 0.0 \text{ W/(m^2K)}$  in any facade orientation in any month of the year.

**Keywords:** thermal storage wall; Trombe wall; energy efficiency; heat flow; passive systems.

ost types of renewable energy originate from solar radiation. Solar radiation occurs indirectly in water energy, wind energy, biomass energy, environmental energy, and energy from sea and ocean waves [1]. Passive systems obtain solar radiation energy through the phenomenon of photothermal conversion and are used to heat and cool the space in a building. Most often, they form the exterior casing or architectural element of a building. They can be located within various elements of the building, such as walls, windows, or roofs [2]. They do not require additional devices that enable the use of solar radiation energy.

The thermal storage wall (TSW), also known as the solar wall or Trombe wall, is one of the simplest technical solutions of passive solar systems. Its essence is to place transparent glazing in front of the structural wall (layer of accumulation material) from the outside [3]. Solar radiation, penetrating through the transparent glazing, is absorbed on a suitably prepared, external surface of the heat storage, i.e. on the absorber, and converted into heat. The heated accumulation layer absorbs energy in the form of heat, which it then partially transfers to the interior of the building. This is not an instantaneous process (it occurs with a certain delay). However, it is possible to select the physical parameters of the partition in such a way that the period of the highest heat output is close Streszczenie: W artykule przedstawiono procedurę określania parametrów cieplnych ściany kolektorowo-akumulacyjnej i określania jej efektywności cieplnej. W celu zobrazowania efektywności cieplnej takiej ściany wybrano siedem charakterystycznych rozwiązań materiałowych warstwy akumulacyjnej, dziewięć rodzajów przeszklenia kolektora, dwa profile konstrukcyjne kolektora oraz dwie ramki dystansowe w szybach zespolonych. Równoważny współczynnik przenikania ciepła określający efektywność cieplną ścian kolektorowo-akumulacyjnych jest najbardziej miarodajnym parametrem. Uzyskane wyniki wskazują, że istnieją potencjalne możliwości konstruowania ścian kolektorowoakumulacyjnych o wartości równoważnego współczynnika przenikania ciepła  $U_r < 0,0 W/(m^2K)$  w przypadku dowolnej orientacji elewacji w każdym miesiącu roku.

Slowa kluczowe: ściana kolektorowo-akumulacyjna; ściana Trombe; efektywność energetyczna; przepływ ciepła; systemy pasywne.

iększość rodzajów energii odnawialnej ma swoją genezę w promieniowaniu słonecznym, które w sposób pośredni występuje w energii wodnej, wiatru, biomasy, otoczenia oraz energii fal morskich i oceanów [1]. Systemy pasywne energię promieniowania słonecznego pozyskują dzięki zjawisku konwersji fototermicznej i są wykorzystywane do ogrzewania oraz chłodzenia przestrzeni w budynku. Najczęściej stanowią one zewnętrzną obudowę lub element architektoniczny budynku. Mogą być umiejscowione w obrębie różnych elementów budynku, takich jak ściany, okna czy dachy [2]. Nie wymagają dodatkowych urządzeń umożliwiających wykorzystanie energii promieniowania słonecznego.

Przegroda kolektorowo-akumulacyjna (PKA), zwana też ścianą słoneczną lub ścianą Trombe, należy do najprostszych rozwiązań technicznych pasywnych systemów słonecznych. Jej istotą jest umieszczenie przezroczystego przeszklenia przed ścianą konstrukcyjną budynku (warstwą materiału akumulacyjnego) od strony zewnętrznej [3]. Promieniowanie słoneczne, przenikając przez przezroczyste przeszklenie, jest absorbowane na odpowiednio przygotowanej, zewnętrznej powierzchni magazynu ciepła, tj. na absorberze, i przetwarzane na ciepło. Ogrzewana warstwa akumulacyjna pochłania energię w postaci ciepła, którą następnie przekazuje częściowo do wnętrza budynku. Nie jest to proces natychmiastowy (zachodzi z pewnym opóźnieniem). Możliwy jest jednak taki dobór parametrów fizycznych przegrody, aby okres największego wydatku ciepła był zbliżony do okresu największego zapotrzebowania na ciepło przez pomieszczenie

Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

<sup>\*)</sup> Correspondence address: olekstar@prz.edu.pl

to the period of the highest room heat demand [4]. There is an air space between the glazing and the accumulation material. If it is not connected to an adjacent room in the building, the barrier is called an unventilated thermal storage wall. When connecting the gap to the rooms of the building through channels in the accumulation layer, the wall is ventilated, the so-called Trombe wall [5]. Thanks to the holes in the upper and lower parts of the accumulation layer of such a barrier, air circulates between the collector and the room. The temperature in the gap is not maintained at such a high level as in a closed space, which is why there are smaller heat losses towards the outside air. In such a solution, heat exchange with the internal environment takes place partly through the wall and partly through the ventilation channels [6]. In the Trombe wall, the most dominant process in heat exchange is the radiation phenomenon. Convection occurs during the sunny period, when the ventilation channels are open, while during cloudy days there is a predominance of heat conduction through the accumulation layer [7]. In unventilated barriers, more of the acquired thermal energy is stored. The slow heat flow through the unventilated wall does not cause overheating of the room during the period of strong sunlight, which often happens in the case of a ventilated wall.

Based on the comparative analysis of heat flow through partitions with and without ventilation channels located in the accumulation layer, it was found that in the case of using a wall with closed channels, the **acquired amount of heat penetrated through the partition three times longer than in the case of open ventilation openings** [8].

Thermal storage walls may also have defects that reduce energy efficiency. These include low thermal resistance during a period of a large number of cloudy days, and in the case of walls with ventilated channels, a thermosiphon phenomenon can occur, which is characterised by the flow of cold air through the lower ventilation channel to the adjacent room during periods of low outside temperatures [6].

#### Construction of the thermal storage wall

In the thermal storage wall, there are different material and construction solutions for the collector, absorber, and heat storage. Figure 1 shows a diagram of the thermal storage wall without and with ventilation channels.



*Fig. 1. Schematic diagram of a thermal storage wall: a) without ventilation; b) with ventilation channels [9]* 

Rys. 1. Schemat ściany kolektorowo-akumulacyjnej: a) bez wentylacji; b) z kanałami wentylacyjnymi [9] [4]. Pomiędzy przeszkleniem a materiałem akumulacyjnym znajduje się przestrzeń powietrzna. Jeżeli nie ma ona połączenia z przyległym pomieszczeniem w budynku, to przegroda określana jest jako kolektorowo-akumulacyjna niewentylowana. W przypadku połączenia szczeliny z pomieszczeniami budynku przez kanały w warstwie akumulacyjnej, ściana jest wentylowana, tzw. ściana Trombe [5]. Dzięki otworom w górnej i dolnej części warstwy akumulacyjnej takiej przegrody, powietrze cyrkuluje między kolektorem a pomieszczeniem. Temperatura w szczelinie nie utrzymuje się na tak wysokim poziomie jak w przestrzeni zamkniętej, dlatego też występują mniejsze straty ciepła w kierunku powietrza zewnętrznego. W takim rozwiązaniu, wymiana ciepła ze środowiskiem wewnętrznym odbywa się częściowo przez ścianę oraz częściowo przez kanały wentylacyjne [6]. W ścianie Trombe najbardziej dominującym procesem w wymianie ciepła jest zjawisko promieniowania. Konwekcja pojawia się w okresie nasłonecznionym, podczas otwartych kanałów wentylacyjnych, natomiast w okresie dni pochmurnych jest przewaga przewodzenia ciepła przez warstwę akumulacyjną [7]. W przegrodach niewentylowanych więcej pozyskanej energii cieplnej jest magazynowane. Powolny przepływ ciepła przez ściane niewentylowana nie powoduje przegrzania pomieszczenia w okresie silnego nasłonecznienia, co niejednokrotnie ma miejsce w przypadku ściany wentylowanej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej przepływu ciepła przez przegrody bez oraz z kanałami wentylacyjnymi, umieszczonymi w warstwie akumulacyjnej stwierdzono, że w przypadku zastosowania ściany z zamkniętymi kanałami pozyskana ilość ciepła trzykrotnie dłużej przenikała przez przegrodę niż przy otwartych otworach wentylacyjnych [8].

W przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych mogą wystąpić również wady wpływające na obniżenie efektywności energetycznej. Należą do nich: mała odporność cieplna w okresie występowania dużej liczby dni pochmurnych, a w przypadku ścian z kanałami wentylowanymi może wystąpić zjawisko termosyfonowe, które charakteryzuje się przepływem powietrza zimnego przez dolny kanał wentylacyjny do przyległego pomieszczenia, w okresie występowania niskiej temperatury zewnętrznej [6].

#### Konstrukcja przegrody kolektorowo--akumulacyjnej

W przegrodzie kolektorowo-akumulacyjnej występują różne rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne kolektora, absorbera i magazynu ciepła. Rysunek 1 przedstawia schemat ściany kolektorowo-akumulacyjnej bez i z kanałami wentylacyjnymi. Kolektor został zdefiniowany jako zespół następujących elementów: przeszklenie, rama przeszklenia oraz przestrzeń powietrzna między ostatnią warstwą przeszklenia a absorberem [5]. Kolektor pełni główną rolę we wszystkich systemach ogrzewania słonecznego. Dzięki niemu powstaje tzw. efekt szklarniowy. Ramę kolektora w pasywnych systemach słonecznych mogą stanowić rozwiązania wykonane z produkowanych seryjnie standardowych profili okiennych

42

The collector has been defined as a set of the following elements: glazing, frame, and air space between the last layer of glazing and the absorber [5]. The collector plays an important role in all solar heating systems. Due to this, the so-called greenhouse effect is created. The collector frame in passive solar systems can be solutions made of standard window profiles produced in series or made according to individual designs. The frame structure can be made of wood, plastic, aluminium, or any composite material. Glazing consists of several individual glass panes or is used as a combined pane. The panes are made of any type of ordinary or low-emission glass; the space between the panes can be additionally filled with noble gas (combined panes), through which the appropriate technical parameters of the glazing are obtained. However, it should be noted that each additional layer of glass and its incorrectly selected type can reduce the value of solar radiation falling on the absorber. In thermal storage walls (TSWs), it is recommended to use insulating glass units because they are not subject to periodic internal fogging (unlike single-pane units) and have better thermal insulation. The use of a triplepane unit filled with xenon in TSW resulted in a 48.8% shorter heating season [10].

In simulation tests of the argon–filled Trombe wall, triple glazing also improved thermal comfort in the room. The temperature increased by 1.52°C, while the temperature on the wall surface increased by 8.5°C [11].

In current solutions, electrochromic glass can be used, which reduces the energy used to cool the room and is used in the electrochromic Trombe walls [12]. The basic task of the absorbing surface (absorber) is to absorb as much solar radiation energy as possible and convert it into heat. Thermal storage walls can have different types of absorbers: plaster, copper, steel, or aluminium sheets attached to the accumulation layer. The most common is the absorption layer made directly on the external surface of the accumulation layer in the form of dark-coloured plaster (this solution is one of the cheapest and at the same time ensures a tight connection between the absorber and the accumulation layer, and therefore good energy conduction).

The massive part of the thermal storage wall, acting as heat storage, also takes part in the distribution of thermal energy, contributes to the stabilisation of the temperature in the adjacent room, and can perform a structural function. On the one hand, it should have a large thermal capacity (accumulation phase) and a large thermal resistance (distribution phase). For the construction of a wall layer made of traditional building materials, materials with a density of 1600–2400 kg/m<sup>3</sup> are recommended [13]. This is a criterion for the highest possible transfer of accumulated thermal energy to the room. It is also permissible to use materials with a density of 600–1400 kg/m<sup>3</sup>, but it should be noted that such a wall will have a lower thermal efficiency. The accumulation layer should be 20-50 cm thick, the optimal thickness of a concrete wall should be 35-40 cm, while a brick wall should be 37 cm [14]. Increasing the dimensions of a wall means increasing the weight of the wall and, consequently, the building.

lub zrealizowane wg indywidualnych projektów. Konstrukcja ramy przeszklenia może być wykonana z drewna, tworzywa sztucznego, aluminium lub dowolnego kompozytu. Przeszklenie składa się z kilku pojedynczych tafli szkła lub występuje jako szyba zespolona. Szyby wykonywane są z dowolnego rodzaju szkła zwykłego lub niskoemisyjnego, przestrzeń między szybami może być dodatkowo wypełniona gazem szlachetnym (szyby zespolone), dzięki czemu uzyskuje się odpowiednie parametry techniczne przeszklenia. Należy jednak zwrócić uwagę, że każda dodatkowa warstwa szkła oraz jego źle dobrany rodzaj mogą obniżyć wartość promieniowania słonecznego padającego na absorber. W przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych (PKA) zaleca się stosować szyby zespolone, ponieważ nie ulegają one okresowemu wewnętrznemu zaparowaniu (w przeciwieństwie do szyb w układzie pojedynczym) oraz mają lepszą izolacyjność termiczną. Zastosowanie zestawu trójszybowego wypełnionego ksenonem w PKA wpłynęło na skrócenie sezonu grzewczego o 48,8% [10].

W badaniach symulacyjnych ściany Trombe, potrójny zestaw szybowy wypełniony argonem również wpłynął na poprawę komfortu cieplnego w pomieszczeniu. Temperatura zwiększyła się o 1,52°C, przy jednoczesnym wzroście temperatury na powierzchni ściany o 8,5°C [11].

W obecnych rozwiązaniach można stosować szkło elektrochromowe, które wpływa na redukcję energii stosowanej do chłodzenia pomieszczenia i jest wykorzystywane w elektrochromowych ścianach Trombe [12]. Podstawowym zadaniem powierzchni absorbującej (absorbera) jest pochłanianie jak największej ilości energii promieniowania słonecznego i przetwarzanie jej na ciepło. Ściany kolektorowo-akumulacyjne mogą mieć różne rodzaje absorberów: tynki, blachy z miedzi, stali lub aluminium, mocowane do warstwy akumulacyjnej. Najbardziej rozpowszechniona jest warstwa absorpcyjna wykonana bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni warstwy akumulacyjnej w postaci ciemno barwionego tynku (takie rozwiązanie należy do najtańszych i jednocześnie zapewnia szczelne połączenie absorbera z warstwą akumulacyjną, a więc dobre przewodzenie energii).

Masywna część przegrody kolektorowo-akumulacyjnej, pełniąca rolę magazynu ciepła, bierze również udział w rozprowadzaniu energii cieplnej, przyczynia się do stabilizacji temperatury w przyległym pomieszczeniu oraz może pełnić funkcję konstrukcyjną. Z jednej strony powinna mieć dużą pojemność cieplną (faza akumulacji), a z drugiej duży opór cieplny (faza dystrybucji). Do wznoszenia warstwy murowej z tradycyjnych materiałów budowlanych zaleca się materiały o gęstości 1600-2400 kg/m<sup>3</sup> [13]. Jest to kryterium w przypadku jak największego przekazywania zakumulowanej energii cieplnej do pomieszczenia. Dopuszcza się też stosowanie materiałów o gęstości 600-1400 kg/m3, ale należy mieć na uwadze fakt, że taka ściana będzie mieć gorszą efektywność cieplną. Warstwa akumulacyjna powinna mieć grubość 20-50 cm, optymalna grubość ściany betonowej powinna wynosić 35-40 cm, natomiast ściany z cegły 37 cm [14]. Zwiększenie wymiarów ściany wiąże się ze zwiększeniem ciężaru muru, a w efekcie budynku.

6/2025 (nr 634)

# Determination of the equivalent heat transfer coefficient of the thermal storage wall

The efficiency of passive solar systems is assessed by analysing the energy balances of buildings or individual components in the case of quasi-steady heat exchange conditions over a long period. In all of these models, properly prepared climate data play an important role.

The process of heat exchange with the environment through glazing is complex. Solar radiation, which is converted into heat by conversion, reaches the external surface of the wall through the collector. Glazing also limits the heat exchange of the wall surface with the environment through convection and radiation. This heat exchange process in the solar wall model was assumed in a simplified way, assigning a constant thermal resistance ( $R_g$ ) to the collector (glazing). It is defined as the sum of the thermal resistance of the air layers and the glass and the resistance to heat transfer on the external surface, and in this way the thermal resistance of the insulating glass units is calculated.

The reciprocal of the collector thermal resistance is the equivalent heat transfer coefficient ( $\alpha_r$ ). This coefficient should be determined experimentally, but calculating it with the assumption of resistance of the air layer to the resistance and resistance to heat transfer resistance on the exterior surfaces of building partitions, recommended for design purposes by standards [15, 16], gives values close to the real ones. This was confirmed by the results of our own experimental studies [17]. It was also assumed that heat exchange on the internal surface occurs in accordance with Newton's law at a constant heat transfer coefficient. The influence of wind, cloudiness, air humidity, and atmospheric precipitation on the heat exchange processes between the wall and its external environment is omitted. At the same time, it was assumed that the wall material has constant physical properties over time and that the one-dimensional heat conduction is met.

In order to determine heat losses through a building partition, the average heat flux density q, flowing through this barrier with a heat transfer coefficient U, should be determined from a room with an average temperature  $T_i$  towards the external environment with an average temperature  $T_e$ . In opaque partitions, the heat flux density is determined according to the equation:

$$q = U \cdot (T_i - T_e) \tag{1}$$

where:

q - heat flux density [W/m<sup>2</sup>];

 $U-heat\ transfer\ coefficient\ of\ the\ barrier\ [W/(m^2K)];$ 

 $T_i-average \ internal \ temperature \ [^{\circ}C];$ 

 $T_e-average \ external \ environment \ temperature \ [W/m^2].$ 

In a classic external barrier, the heat gain from solar radiation is omitted because it is small. In the case of thermal storage walls, the energy of solar radiation plays a fundamental role. The heat flux density in a solar wall is the resultant of two heat flux densities: heat transfer (flowing through the partition towards the outside) and the accumulated energy flux

#### Określenie równoważnego współczynnika przenikania ciepła przegrody kolektorowo--akumulacyjnej

Efektywność pasywnych systemów słonecznych oceniana jest przez analizę bilansów energetycznych budynków lub wydzielonych elementów w przypadku quasi-ustalonych warunków wymiany ciepła w długim okresie. We wszystkich tych modelach pierwszoplanową rolę odgrywają odpowiednio przygotowane dane klimatyczne.

Proces wymiany ciepła z otoczeniem przez przeszklenie ma charakter złożony. Promieniowanie słoneczne, które przez konwersję zamieniane jest na ciepło, dociera do zewnętrznej powierzchni ściany przez kolektor. Przeszklenie dodatkowo ogranicza wymianę ciepła powierzchni ściany z otoczeniem przez konwekcję i promieniowanie. Ten proces wymiany ciepła w modelu ściany słonecznej został przyjęty w sposób uproszczony, przypisując kolektorowi (przeszkleniu) **stały opór cieplny (R**<sub>g</sub>). Jest on określany jako suma oporu cieplnego warstw powietrza oraz szyb i oporu przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej i w taki sposób oblicza się opór cieplny szyb zespolonych.

Odwrotnościa oporu cieplnego kolektora jest równoważny współczynnik przejmowania ciepła przez kolektor  $(\alpha_r)$ . Współczynnik ten powinien być wyznaczony doświadczalnie, ale obliczanie go przy przyjęciu wartości oporu warstw powietrza i oporu przejmowania ciepła na zewnętrznych powierzchniach przegród budowlanych, zalecanych do celów projektowania przez normy [15, 16], daje wartości zbliżone do rzeczywistych. Potwierdziły to wyniki własnych badań doświadczalnych [17]. Założono również, że na powierzchni wewnętrznej wymiana ciepła zachodzi zgodnie z prawem Newtona przy stałym współczynniku przejmowania ciepła. Pomijany jest wpływ wiatru, zachmurzenia, wilgotności powietrza i opadów atmosferycznych na procesy wymiany ciepła między ścianą i jej otoczeniem zewnętrznym. Jednocześnie przyjęto, że materiał ściany ma stałe w czasie właściwości fizyczne oraz spełnione są warunki jednowymiarowego przewodzenia ciepła.

W celu wyznaczenia strat ciepła przez przegrodę budowlaną należy określić średnią gęstość strumienia ciepła q, płynącego przez tę przegrodę o współczynniku przenikania ciepła U, z pomieszczenia o średniej temperaturze  $T_i$  w kierunku środowiska zewnętrznego o średniej temperaturze  $T_e$ . W przegrodach nieprzezroczystych gęstość strumienia ciepła określa się wg równania:

$$q = U \cdot (T_i - T_e) \tag{1}$$

gdzie:

q – gęstość strumienia ciepła [W/m<sup>2</sup>];

 $T_i$  – średnia temperatura w pomieszczeniu [°C];

 $T_e$  – średnia temperatura środowiska zewnętrznego [°C].

W klasycznej przegrodzie zewnętrznej pomija się zysk ciepła od nasłonecznienia, gdyż jest on niewielki. W przypadku przegród kolektorowo-akumulacyjnych, energia promieniowa-

in the form of heat from solar radiation (flowing through the partition to the interior of the room) – determined according to the equation:

$$q = U_{TSW} \cdot \left[1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e}\right] (T_i - T_e)$$
(2)

where:

 $U_{TSW}$  – heat transfer coefficient of the thermal storage wall [W/(m<sup>2</sup>K)];  $R_T$  – total heat transfer resistance of the barrier [m<sup>2</sup>K/W];

 $\Sigma R_{\lambda}-$  sum of thermal resistances of homogeneous layers [m²K/W];

 $R_p$  – thermal resistance of the unventilated air layer (between the absorber and the glazing) [m<sup>2</sup>K/W] [15];

 $R_{col}-thermal\ resistance\ of\ the\ collector\ [m^2K/W];$ 

 $R_{si}, R_{se}-heat\ transfer\ resistances,\ respectively\ on\ the\ inner\ and\ outer\ surface\ of\ the\ barrier\ [m^2K/W]\ [15];$ 

 $U_{col}$  – heat transfer coefficient of the collector [W/(m<sup>2</sup>K)] [16];

 $C_g$  – glazing coefficient of the collector [–];

g – solar radiation transmittance coefficient through the glazing [–];

a - absorption coefficient of the external wall surface (absorber) [-];

Z - shading coefficient of the barrier [-];

 $S_i$  – average hourly solar radiation intensity in a month (or a specified time period) [W/m<sup>2</sup>];

 $\alpha_r$  – equivalent heat transfer coefficient of the collector [W/(m<sup>2</sup>K)].

The next parameters are calculated according to the following equations:

$$U_{TSW} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_{\lambda} + R_p + R_{col} + R_{se}}$$
(3)

$$R_{col} = \frac{1}{U_{col}} - (R_{si} + R_{se})$$
(4)

$$U_{col} = \frac{\sum (A_g \cdot U_g) + \sum (A_f \cdot U_f) + \sum (l_g \cdot \Psi_g)}{\sum A_g + \sum A_f}$$
(5)

$$C_g = \frac{A_g}{A_g + A_f} \tag{6}$$

$$\alpha_r = \frac{1}{R_p + R_{col} + R_{se}} = \frac{1}{R_p + \frac{1}{U_{col}} - R_{si}}$$
(7)

where:

 $U_g$  – heat transfer coefficient of the pane in the collector [W/(m<sup>2</sup>K)];

 $U_f$  – heat transfer coefficient of the cooperating elements of the collector frame [W/(m<sup>2</sup>K)];

 $\Psi_g-\text{linear heat transfer coefficient resulting from the combined thermal effects of the pane, spacer frame and collector frame [W/mK];}$ 

 $A_g$  – surface area of the pane in the collector [m<sup>2</sup>];

 $A_f$  – projected surface area of the collector frame with a given cooperating element [m<sup>2</sup>];

 $l_g$  – visible circumference of the pane in the collector with a given cooperating element [m].

Based on the comparative method for predicting the thermal efficiency of thermal storage walls, based on the similarity of equations (1) and (2), the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$  was determined. This coefficient determines how much heat flows through 1 m<sup>2</sup> of the solar wall with an air temperature difference on both sides of 1K, depending on the wall con-

nia słonecznego odgrywa zasadniczą rolę. Gęstość strumienia ciepła w ścianie słonecznej to wypadkowa dwóch gęstości strumieni ciepła: przenikania ciepła (płynącego przez przegrodę w kierunku zewnętrznym) i strumienia zakumulowanej energii w postaci ciepła pochodzącej od promieniowania słonecznego (płynącego przez przegrodę do wnętrza pomieszczenia) – określana wg równania:

$$q = U_{PKA} \cdot \left[ 1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e} \right] (T_i - T_e)$$
(2)

gdzie:

U<sub>PKA</sub> – współczynnik przenikania ciepła przegrody kolektorowo--akumulacyjnej [W/(m<sup>2</sup>K)];

 $R_T$  – całkowity opór przenikania ciepła przegrody [m<sup>2</sup>K/W];

 $\Sigma R_{\lambda}$  – suma oporów cieplnych warstw jednorodnych [m<sup>2</sup>K/W];

R<sub>p</sub> – opór cieplny niewentylowanej warstwy powietrza (między absorberem a przeszkleniem) [m<sup>2</sup>K/W] [15];

Rkol – opór cieplny kolektora [m<sup>2</sup>K/W];

R<sub>si</sub>, R<sub>se</sub> – opory przejmowania ciepła, odpowiednio na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody [m<sup>2</sup>K/W] [15];

Ukol – współczynnik przenikania ciepła kolektora [W/(m<sup>2</sup>K)] [16];

C<sub>g</sub> – współczynnik zaszklenia kolektora [–];

g – współczynnik przepuszczania promieniowania słonecznego przez przeszklenie [–];

a – współczynnik absorpcyjności zewnętrznej powierzchni ściany (absorbera) [–];

Z – współczynnik zacienienia przegrody [–];

 $S_i$  – średnie godzinowe natężenie promieniowania słonecznego w miesiącu (lub określonym przedziale czasowym) [W/m<sup>2</sup>];

 $\alpha_r$  – równoważny współczynnik przejmowania ciepła przez kolektor  $[W/(m^2K)].$ 

Kolejne parametry obliczane są wg równań:

$$U_{PKA} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_{\lambda} + R_p + R_{kol} + R_{se}}$$
(3)

$$R_{kol} = \frac{1}{U_{kol}} - (R_{si} + R_{se})$$
(4)

$$U_{kol} = \frac{\sum (A_g \cdot U_g) + \sum (A_f \cdot U_f) + \sum (l_g \cdot \Psi_g)}{\sum A_g + \sum A_f}$$
(5)

$$C_g = \frac{A_g}{A_g + A_f} \tag{6}$$

$$\alpha_r = \frac{1}{R_p + R_{kol} + R_{se}} = \frac{1}{R_p + \frac{1}{U_{kol}} - R_{si}}$$
(7)

gdzie:

 $U_g$  – współczynnik przenikania ciepła szyby w kolektorze [W/(m<sup>2</sup>K)];  $U_f$  – współczynnik przenikania ciepła elementów współpracujących ramy kolektora [W/(m<sup>2</sup>K)];

$$\begin{split} \Psi_g - & \text{liniowy współczynnik przenikania ciepła wynikający z połączonych efektów cieplnych szyby, ramki dystansowej i ramy kolektora [W/mK]; A_g - pole powierzchni szyby w kolektorze [m<sup>2</sup>]; \end{split}$$

A<sub>f</sub> – zrzutowane pole powierzchni ramy kolektora przy danym elemencie współpracującym [m<sup>2</sup>];

 $l_{\rm g}-$  widoczny obwód szyby w kolektorze przy danym elemencie współpracującym [m].

6/2025 (nr 634)

struction, collector parameters, and climatic conditions. It is described by the equations [18]:

$$U_r(T_i - T_e) = U_{TSW} \left[ 1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e} \right] (T_i - T_e) \quad (8)$$

$$U_r = U_{TSW} \left[ 1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e} \right]$$
(8a)

In equation 8a, the technical parameters related to collector construction were distinguished and defined as the "collector parameter – B" and the parameters related to the climatic data, defined as the "heating index –  $A_{ind}$ " [20]. Both parameters were defined using the following equations:

$$B = \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} = a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot \left(R_p + \frac{1}{U_{col}} - R_{si}\right)$$
(9)

$$A_{ind} = \frac{S_i}{T_i - T_e} = \frac{\overline{24 \cdot Lk}}{T_i - T_e} = \frac{I_i}{24 \cdot Lk \cdot (T_i - T_e)} = \frac{I_i}{Sth}$$
(10)

where:

$$Sth = 24 \cdot Lk \cdot (T_i - T_e) \tag{11}$$

where:

B - collector parameter [m<sup>2</sup>K/W];

 $A_{ind}-solar\ heating\ index\ [W/(m^2K)];$ 

$$\label{eq:interval} \begin{split} I_i - \text{monthly sum of solar radiation on a vertical plane with orientation ``i'' (or a specified time interval) [Wh/m^2]; \end{split}$$

Lk – number of calendar days in the month under consideration [days]; Sth – number of degree–hours in the month under consideration [Kh]; 24 – number of hours in a day [h];

Finally, equation (8a) for the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$  takes the form [19]:

$$U_r = U_{TSW} \cdot (1 - A_{ind} \cdot B) \tag{12}$$

The heat transfer coefficient  $U_{TSW}$  and the collector parameter B determine the properties of the solar wall and are independent of climatic conditions. Only the solar heating index  $A_{ind}$  describes the effect of climatic conditions on the functioning of the wall. The equivalent heat transfer coefficient  $U_r$ can take positive and negative values. A negative value means that the wall acts as a heat source. This situation occurs when the solar heating index  $A_{ind}$  and the collector parameter B meet the condition:

$$U_r \le 0; A_{ind} \ge \frac{1}{B} \tag{13}$$

Knowing the collector parameter B, it is possible to determine the minimum value of the solar heating index  $A_{ind, min}$ , for which the solar wall heat balance will be zero (U<sub>r</sub> = 0).

#### Determination of thermal efficiency of selected thermal storage walls – results

The thermal efficiency of a barrier is the amount of thermal energy that penetrates a given surface at a given thermal forcing in a given time interval. In solid barriers, the heat Na podstawie metody porównawczej przewidywania efektywności cieplnej przegród kolektorowo-akumulacyjnych, bazującej na podobieństwie równań (1) i (2), wyznaczono równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r</sub>. Współczynnik ten określa, ile ciepła przepływa przez 1 m<sup>2</sup> ściany słonecznej przy różnicy temperatury powietrza po obu jej stronach 1K, zależnie od konstrukcji ściany, parametrów kolektora i warunków klimatycznych. Opisują go równania [18]:

$$U_r(T_i - T_e) = U_{PKA} \left[ 1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e} \right] (T_i - T_e) \quad (8)$$

$$U_r = U_{PKA} \left[ 1 - \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{S_i}{T_i - T_e} \right]$$
(8a)

W równaniu 8a zostały wyróżnione parametry techniczne związane z budową kolektora i określono je jako "parametr kolektora – B" oraz parametry związane z danymi klimatycznymi, określonymi jako "indeks heliogrzewczy – A<sub>ind</sub>" [19]. Oba parametry zostały zdefiniowane za pomocą równań:

$$B = \frac{a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} = a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot \left(R_p + \frac{1}{U_{kol}} - R_{si}\right)$$
(9)

$$A_{ind} = \frac{S_i}{T_i - T_e} = \frac{\frac{I_i}{24 \cdot Lk}}{T_i - T_e} = \frac{I_i}{24 \cdot Lk \cdot (T_i - T_e)} = \frac{I_i}{Sth}$$
(10)

gdzie:

$$Sth = 24 \cdot Lk \cdot (T_i - T_e) \tag{11}$$

gdzie:

B - parametr kolektora [m<sup>2</sup>K/W];

A<sub>ind</sub> – indeks heliogrzewczy [W/(m²K)];
I<sub>i</sub> – miesięczna suma promieniowania słonecznego na płaszczyznę pionową o orientacji "i" (lub określonego przedziału czasowego) [Wh/m²];
Lk – liczba dni kalendarzowych w rozpatrywanym miesiącu [doby];
Sth – liczba stopniogodzin w rozpatrywanym miesiącu [Kh];
24 – liczba godzin w dobie [h].

Ostatecznie równanie 8a na równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r</sub> przyjmuje postać [19]:

$$U_r = U_{PKA} \cdot (1 - A_{ind} \cdot B) \tag{12}$$

Współczynnik przenikania ciepła U<sub>PKA</sub> oraz parametr kolektora B określają właściwości ściany słonecznej i są niezależne od warunków klimatycznych. Jedynie indeks heliogrzewczy A<sub>ind</sub> opisuje wpływ warunków klimatycznych na funkcjonowanie ściany. Równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r</sub> może przyjmować wartości dodatnie i ujemne. Wartość ujemna oznacza, że ściana pełni rolę źródła ciepła. Sytuacja ta występuje, gdy indeks heliogrzewczy A<sub>ind</sub> i parametr kolektora B spełniają warunek:

$$U_r \le 0 \, \mathrm{dla} \, A_{ind} \ge \frac{1}{B} \tag{13}$$

Znając parametr kolektora B, można określić minimalną wartość indeksu heliogrzewczego  $A_{ind, min}$ , w przypadku której bilans ciepła ściany słonecznej będzie równy zero ( $U_r = 0$ ).

flux flows towards a lower temperature, and the thermal efficiency of this partition is equivalent to its thermal insulation and is most often expressed by the value of the heat transfer coefficient U.

In partitions using solar radiation energy, the direction of heat flow is variable and, depending on thermal forcing, it can be directed towards the external environment or towards the interior of the room. The thermal efficiency of thermal storage walls can be determined by their heat balance ( $Q_{H, TSW}$ ), the difference between heat gain ( $Q_{sol, TSW}$ ) and heat losses ( $Q_{T, TSW}$ ) or expressed by the value of the equivalent heat transfer coefficient ( $U_r$ ). When preparing the energy performance of a building, it is important to know the gains and losses through the thermal storage wall.

The heat balance of the thermal storage wall is expressed by the following equations:

$$Q_{H,TSW} = Q_{T,TSW} - Q_{sol,TSW} \tag{14}$$

 $Q_{sol,TSW} = U_{TSW} \cdot A_{ind} \cdot B \cdot Sth \cdot A_{TSW} =$ 

$$= I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot \frac{U_{TSW} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot A_{TSW}}{\alpha_r} = I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot A_{eff, TSW}$$
(14a)

$$Q_{T,TSW} = U_{TSW} \cdot Sth \cdot A_{TSW} \cdot \frac{Ld}{Lk} = [Wh]$$
(14b)

where:

 $Q_{H, TSW}$  – heat balance of the thermal storage wall in a month [Wh];  $Q_{sol, TSW}$  – heat gains from the sun through the thermal storage wall in a month [Wh];

 $Q_{T, TSW}$  – heat losses through the thermal storage wall in a month [Wh];  $L_d$  – number of heating days in the month under consideration [days].

Another indicator defining the thermal efficiency of solar barriers is the so-called **energy partition coefficient**  $\eta_{TSW}$ , defining the relationship between solar energy on the absorber surface (heat gain) and the solar radiation energy incident on the external surface of this partition. This value is expressed by the following equation:

$$\eta_{TSW} = \frac{Q_{Sol,TSW}}{Q_{I,TSW}} = \frac{I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot \frac{U_{TSW} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot A_{TSW}}{\alpha_r}}{I_i \cdot A_{TSW}} = \frac{U_{TSW} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{Ld}{Lk} = U_{TSW} \cdot B \cdot \frac{Ld}{Lk}$$
(15)

where:

 $Q_{I,\,TSW}-$  sum of solar energy on the external surface of the thermal storage wall in a month [Wh].

To illustrate the thermal efficiency of the thermal storage wall, seven characteristic material solutions of the accumulation layer (M1–M7) were adopted. In the M7 variant, the ceramic wall elements modified with phase change material (PCM) were included. Some of the holes in the block were filled with PCM RT25HC instead of rock wool [19]. Table 1 presents the technical characteristics of these materials.

Selected types of collector glazing and construction profiles were also adopted for analysis. Figure 2 shows the geometric

#### Wyniki wyznaczenia efektywności cieplnej wybranych przegród kolektorowo--akumulacyjnych

Efektywność cieplna przegrody to ilość energii cieplnej, która przenika przez określoną powierzchnię, przy zadanym wymuszeniu termicznym w określonym przedziale czasowym. W przegrodach pełnych strumień ciepła płynie w kierunku temperatury niższej, a efektywność cieplna tej przegrody jest równoważna z jej izolacyjnością termiczną i najczęściej wyrażana wartością współczynnika przenikania ciepła U.

W przegrodach wykorzystujących energię promieniowania słonecznego kierunek przepływu strumienia ciepła jest zmienny i w zależności od wymuszenia termicznego może być skierowany w kierunku środowiska zewnętrznego lub do wnętrza pomieszczenia. Efektywność cieplna przegród kolektorowo-akumulacyjnych może być określona na bazie ich bilansu ciepła ( $Q_{H, PKA}$ ), różnicy między zyskiem ciepła ( $Q_{sol, PKA}$ ) i stratami ciepła ( $Q_{T, PKA}$ ) lub wyrażana wartością równoważnego współczynnika przenikania ciepła ( $U_r$ ). W sporządzaniu charakterystyki energetycznej budynku istotna jest znajomość zysków i strat ciepła przez przegrodę kolektorowoakumulacyjną.

Bilans ciepła przegrody kolektorowo-akumulacyjnej wyrażony jest równaniami:

$$Q_{H,PKA} = Q_{T,PKA} - Q_{sol,PKA} \tag{14}$$

 $Q_{sol,PKA} = U_{PKA} \cdot A_{ind} \cdot B \cdot Sth \cdot A_{PKA} =$ 

$$= I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot \frac{U_{PKA} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot A_{PKA}}{\alpha_r} = I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot A_{eff, PKA}$$
(14a)

$$Q_{T,PKA} = U_{PKA} \cdot Sth \cdot A_{PKA} \cdot \frac{Ld}{Lk} = [Wh]$$
(14b)

gdzie:

 $Q_{H, PKA}$  – bilans ciepła przegrody kolektorowo-akumulacyjną w miesiącu [Wh];

 $Q_{\text{sol},\,\text{PKA}}-zysk$ ciepła od słońca przez przegrodę kolektorowo-akumulacyjną w miesiącu [Wh];

 $Q_{T,\,PKA}-$ straty ciepła przez przegrodę kolektorowo-akumulacyjną w miesiącu [Wh];

 $L_d$  – liczba dni grzewczych w rozpatrywanym miesiącu [doby].

Innym wskaźnikiem określającym efektywność cieplną przegród słonecznych jest tzw. **współczynnik podziału energii**  $\eta_{PKA}$ , określający stosunek zaabsorbowanej energii słonecznej na powierzchni absorbera (zysk ciepła) do energii promieniowania słonecznego padającej na zewnętrzną powierzchnię tej przegrody. Wielkość ta wyrażona jest równaniem:

$$\eta_{PKA} = \frac{Q_{Sol,PKA}}{Q_{I,PKA}} = \frac{I_i \cdot \frac{Ld}{Lk} \cdot \frac{U_{PKA} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z \cdot A_{PKA}}{\alpha_r}}{I_i \cdot A_{PKA}} = \frac{U_{PKA} \cdot a \cdot g \cdot C_g \cdot Z}{\alpha_r} \cdot \frac{Ld}{Lk} = U_{PKA} \cdot B \cdot \frac{Ld}{Lk}$$
(15)

gdzie:

 $Q_{I, PKA}$  – suma energii słonecznej na zewnętrznej powierzchni przegrody kolektorowo-akumulacyjnej w miesiącu [Wh].

dimensions of the collector adopted for the energy characteristics of the thermal storage walls.

Table 2 presents the thermal parameters of the collectors depending on the profiles used for the collector frame, the type of glazing, and the spacer frame in the insulating glass. Two window profiles, two insulating glass spacer frames, and nine types of insulating glass were assumed for collector calculations. The heat transfer coefficients of the profiles are: "classic" profile U<sub>f</sub> = 1.6 [W/(m<sup>2</sup>K)], "passive" profile U<sub>f</sub> = 0.79 [W/(m<sup>2</sup>K)], while the linear heat transfer coefficients of the spacer frames are: aluminium  $\Psi_g = 0.08$  [W/(m×K)], and plastic  $\Psi_g = 0.03$  [W/(m×K)].

The values of the B collector parameters presented in Table 2 have a direct impact on the amount of heat gain generated in the thermal storage walls ( $Q_{sol, TSW}$ ). The higher the value of the B parameter, the higher the value of heat gains in such a partition. In the case of the collector construction elements taken into consideration, the parameter values of B change from 0.194 [m<sup>2</sup>K/W] ("classic" profile, glass S1) to 0.609 [m<sup>2</sup>K/W] ("passive" profile, glass S9). This is an increase of 3.13 times. In such extreme cases, to obtain the same value of heat gain on the thermal storage wall (Q<sub>sol, TSW</sub>), the solar energy that falls in the collector with the parameter  $B = 0.609 [m^2 K/W]$ may be 3.13 times lower than in the collector with B = 0.194 $[m^2K/W]$ . Table 3 presents the heat transfer coefficients of the U<sub>TSW</sub> thermal storage wall in the case of the "classic" profile, depending on the material used for the accumulation layer and the type of glazing.

The values of the  $U_{TSW}$  heat transfer coefficient presented in Table 3 have a direct effect on the amount of heat losses in thermal storage walls ( $Q_{T, TSW}$ ). The lower the value of the  $U_{TSW}$ coefficient, the lower the heat losses in such a barrier. In therW celu zobrazowania efektywności cieplnej przegrody kolektorowo-akumulacyjnej przyjęto siedem charakterystycznych rozwiązań materiałowych warstwy akumulacyjnej (M1–M7). W wariancie M7 uwzględniono ceramiczne elementy murowe modyfikowane materiałem zmiennofazowym (PCM). Część otworów w pustaku została wypełniona PCM RT25HC zamiast wełny skalnej [20]. W tabeli 1 przedstawiono cechy techniczne tych materiałów.

Do analizy przyjęto również wybrane rodzaje przeszklenia oraz profili konstrukcyjnych kolektora. Rysunek 2 przedstawia wymiary geometryczne kolektora przyjęte do charakterystyki energetycznej analizowanych przegród kolektorowo--akumulacyjnych. W tabeli 2 przedstawiono parametry cieplne kolektorów w zależności od zastosowanych profili na ramę kolektora, rodzaju przeszklenia oraz ramki dystansowej w szybach zespolonych. Do obliczeń kolektora przyjęto dwa profile okienne, dwie ramki dystansowe w szybach zespolonych oraz dziewięć rodzajów szyb zespolonych. Współczynniki przenikania ciepła profili wynoszą: profil "klasyczny"  $U_f = 1,6 [W/(m^2K)], profil "pasywny" U_f = 0,79 [W/(m^2K)],$ natomiast liniowe współczynniki przenikania ciepła ramek dys $tansowych: aluminiowa <math>\Psi g = 0,08 [W/(m \times K)],$  a z tworzywa sztucznego  $\Psi g = 0,03 [W/(m \times K)].$ 

Przedstawione w tabeli 2 wartości parametrów kolektora B mają bezpośredni wpływ na wielkość generowanego zysku ciepła w przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych (Q<sub>sol, PKA</sub>). Im większa wartość parametru B, tym większa wartość zysków ciepła w takiej przegrodzie. W przypadku przyjętych do rozważań elementów konstrukcyjnych kolektora, wartości parametru B zmieniają się od 0,194 [m<sup>2</sup>K/W] (profil "klasyczny", szyba S1) do 0,609 [m<sup>2</sup>K/W] (profil "pasywny", szyba S9). Jest to wzrost o 3,13 razy. W takich skrajnych przypadkach,

 Table 1. Selected technical features of materials in the accumulation layer of the wall

 Tabela 1. Wybrane cechy techniczne materiałów w warstwie akumulacyjnej przegrody

Tabela 1. wyl	Frane cechy lechn	iczne maieriaic	<i>)w w warsiwie aku</i>	mulacyjnej pl	rzegroay
Material symbol/ Symbol materiału	Type of material/ Rodzaj materiału	Wall thickness d/ Grubość ściany d [cm]	Thermal conductivity coefficient λ/ Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(mK)]	Material density ρ/ Gęstość materiału ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal resistance R/ Opór cieplny R [m <sup>2</sup> K/W]
M1	Concrete	25	1,7	2200	0,147
M2	Silicate brick	38	0,9	1900	0,422
M3	Solid ceramic brick	38	0,77	1800	0,494
M4	Ceramic hollow block	38	0,32	1000	1,188
M5	Aerated concrete block	36	0,21	600	1,714
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	38	0,143	800	2,657
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	26,2	0,132	800	1,985



Fig. 2. Dimensions of the collector in the considered thermal storage wall Rys. 2. Wymiary kolektora w rozpatrywanej przegrodzie kolektorowo-akumulacyjnej

#### Table 2. Collector parameters [20]

Tabela 2. Parametry cieplne kolektorów [20]

Collector/ Kolektor	Type of insulating glass unit/Rodzaj szyby zespolonej	Heat transfer coefficient Ucol, passive/ Współczynnik przenikania ciepła U <sub>kol</sub> , pasywny [W/m <sup>2</sup> K]	Heat transfer coefficient U <sub>col</sub> , classic/ Współczynnik przenikania ciepła U <sub>kol</sub> , klasyczny [W/m <sup>2</sup> K]	Heat transfer coefficient of glass U <sub>g</sub> / Współczynnik przenikania ciepła szyby U <sub>g</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	Transmission coefficient of the glazing g/ Współczynnik transmisyjności przeszklenia g	Parameter B, passive/ Parametr B, pasywny [m <sup>2</sup> K/W]	Parameter B, classic/ Parametr B, klasyczny [m <sup>2</sup> K/W]
S1	Single chamber, ordinary glass 4/12/4	2,61	3,02	3,0	0,74	0,221	0,194
S2	Single chamber, ordinary and low-e glass 4/12/4T	1,77	2,18	1,9	0,72	0,305	0,252
S3	Single chamber, ordinary and low-e glass + argon; 4/16Ar/4T	1,47	1,87	1,5	0,72	0,364	0,290
S4	Single chamber, ordinary and low-e glass Plus + argon; 4/15Ar/4TP	1,16	1,57	1,1	0,62	0,390	0,294
S5	Single chamber, ordinary glass +argon; 4/16Ar/4	2,31	2,72	2,6	0,83	0,277	0,239
S6	Double chamber, ordinary glass +argon; 4/14Ar/4/14Ar/4	1,62	2,03	1,7	0,76	0,350	0,285
S7	Double chamber, ordinary and low-e glass TRIII E +argon.; TRIII E +Argon 4T/16Ar/4/16Ar/4T	0,85	1,26	0,7	0,62	0,523	0,360
S8	Double chamber, ordinary and low-e glass LE +argon; 4LE/16Ar/4/16Ar/33.1LE	0,78	1,19	0,6	0,5	0,461	0,308
S9	Double chamber, low-e glass Ew + krypton 4Ew/12Kr/4Ew/12Kr/4Ew	0,78	1,19	0,6	0,66	0,609	0,407

mal storage walls with different material solutions (M1÷M7) and glazing in the S1÷S9 collector, the value of the  $U_{TSW}$  coefficient changes from 1.466 to 0.347 [W/m<sup>2</sup>K], which means a reduction of this coefficient by 76.4%. In the case of material M1 with glazing in the S1÷S9 collector, the  $U_{TSW}$  coefficient changes from 1.466 to 0.837 [W/m<sup>2</sup>K], which means a reduction of the coefficient by 42.9% and this is the collector's effect. In the collector with glazing S1 and materials in the accumulation layer M1÷M7, the  $U_{TSW}$  coefficient changes from 1.466 to 0.422 [W/m<sup>2</sup>K], which means a reduction of the U<sub>TSW</sub> coefficient by 71.2% and this is the effect of the material in the accumulation layer. The maximum reduction in the  $U_{TSW}$  coefficient by 76.4% is obtained between variant M1, S1 with the  $U_{TSW}$  coefficient = 1.466 [W/m<sup>2</sup>K] and variant M7, S9 with the  $U_{TSW}$  coefficient = 0.422 [W/m<sup>2</sup>K].

Table 4 presents the solar radiation energy partition coefficient  $-\eta_{TSW}$  [-] of the "classical" profile.

The values of this coefficient show what part of the solar energy incident on the collector is transferred through the thermal storage wall to the interior of the building in the form of heat gain ( $Q_{sol, TSW}$ ). The TSW partition with the M1 material and a collector made of a "classic" profile and S1÷S9 glazing is able to transfer from 28.5 to 34.0% of the solar energy incident on the external surface of this barrier. This is a partition in which there is a material with the highest thermal conduc-

aby uzyskać identyczną wartość zysku ciepła w przegrodzie kolektorowo-akumulacyjnej ( $Q_{sol,PKA}$ ), wartość energii słonecznej padającej na kolektor o parametrze B = 0,609 [m<sup>2</sup>K/W] może być o 3,13 razy mniejsza niż na kolektor o B = 0,194 [m<sup>2</sup>K/W]. W tabeli 3 przedstawiono współczynniki przenikania ciepła przegrody kolektorowo-akumulacyjnej U<sub>PKA</sub> w przypadku profilu "klasycznego" w zależności od zastosowanego materiału warstwy akumulacyjnej i rodzaju przeszklenia.

Przedstawione w tabeli 3 wartości współczynnika przenikania ciepła U<sub>PKA</sub> mają bezpośredni wpływ na wielkość strat ciepła w przegrodach kolektorowo-akumulacyjnych (Q<sub>T. PKA</sub>). Im mniejsza wartość współczynnika  $U_{PKA}$ , tym mniejsze straty ciepła w takiej przegrodzie. W przegrodach kolektorowo--akumulacyjnych o różnych rozwiązaniach materiałowych (M1÷M7) i przeszkleniach w kolektorze S1÷S9, wartość współczynnika  $U_{PKA}$  zmienia się od 1,466 do 0,347 [W/m<sup>2</sup>K], co oznacza zmniejszenie tego współczynnika o 76,4%. W przypadku materiału M1 z przeszkleniami w kolektorze S1÷S9, współczynnik U<sub>PKA</sub> zmienia się od 1,466 do 0,837 [W/m<sup>2</sup>K], co oznacza zmniejszenie współczynnika o 42,9% i jest to wpływ kolektora. W kolektorze z przeszkleniem S1 i materiałami w warstwie akumulacyjnej M1÷M7, współczynnik UPKA zmienia się od 1,466 do 0,422 [W/m2K], co oznacza zmniejszenie współczynnika UPKA o 71,2% i jest to wpływ materiału w warstwie akumulacyjnej. Maksymalne obniżenie współ-

tivity coefficient ( $\lambda$ ) and the lowest thermal resistance of the accumulation layer (R). The higher the thermal resistance of the material in the accumulation layer, the less solar energy is transferred to the building. The least solar energy (6.1-11.0%)is transferred by partitioning with M6 material.

czynnika U<sub>PKA</sub> o 76,4% uzyskuje się między wariantem M1, S1 o współczynniku  $U_{PKA} = 1,466 \text{ [W/m^2K]}$  a wariantem M7, S9 o współczynniku  $U_{PKA} = 0,422 \ [W/m^2K].$ 

W tabeli 4 przedstawiono współczynnik podziału energii promieniowania słonecznego –  $\eta_{PKA}$  [–] profilu "klasycznego".

Table 3. Thermal storage wall heat transfer coefficient –  $U_{TSW}\,[W/(m^2K)]$  with the "classic" profile Tabela 3. Współczynnik przenikania ciepła przegrody kolektorowo-akumulacyjnej  $U_{PKA}[W/(m^2K)]$  w przypadku profilu "klasycznego"

Variant of the accumulation layer/ Wariant	Type of material / Rodzaj	Heat transfer coefficient of barrier U <sub>TSW</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]/Współczynnik przenikania ciepła , type of glazing in the collector S1 – S9 and collector parameter B/ rodzaj przeszklenia w kolektorze (S1–S9) i parametr kolektora B								U <sub>PKA</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]		
warstwy akumulacyjnej	materialu	S1 B = 0,194	S2 B = 0,252	S3 B = 0,290	S4 B = 0,294	S5 B = 0,239	S6 B = 0,285	S7 B = 0,360	S8 B = 0,308	89 B = 0,407		
M1	Concrete	1,466	1,235	1,130	1,011	1,390	1,184	0,874	0,837	0,837		
M2	Silicate brick	1,045	0,922	0,862	0,791	1,005	0,893	0,705	0,680	0,680		
M3	Solid ceramic brick	0,972	0,865	0,812	0,749	0,938	0,840	0,671	0,649	0,649		
M4	Ceramic hollow block	0,581	0,540	0,519	0,493	0,568	0,531	0,458	0,447	0,447		
M5	Aerated concrete block	0,445	0,421	0,408	0,391	0,437	0,415	0,369	0,362	0,362		
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,313	0,301	0,295	0,286	0,310	0,298	0,274	0,270	0,270		
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,422	0,401	0,389	0,374	0,416	0,395	0,353	0,347	0,347		

**Table 4. Solar radiation energy partition coefficient** –  $\eta_{TSW}$  [–] with the "classic" profileTabela 4. Współczynnik podziału energii promieniowania słonecznego  $\eta_{PKA}$  [–] w przypadku profilu "klasycznego"

Variant of the accumulation layer / Wariant warstwy akumulacyjnej	Type of material/		W ty	Solar 'spółczynnik pe of glazing odzai przesz	radiation en podziału en ; in the collec ; klenia w kol	rergy partition coefficient η <sub>TSW</sub> / rergii promieniowania słonecznego η <sub>PKA</sub> ector S1 – S9 and collector parameter B/ slektorza S1–S9 i parametr kolektora B							
	Rodzaj materiału	S1	S2	S3	S4	\$5	S6	S7	S8	S9			
		B = 0,194	B = 0,252	B = 0,290	B = 0,294	B = 0,239	B = 0,285	B = 0,360	B = 0,308	B = 0,407			
M1	Concrete	0,285	0,312	0,327	0,297	0,332	0,337	0,315	0,258	0,340			
M2	Silicate brick	0,203	0,233	0,250	0,233	0,241	0,254	0,254	0,210	0,277			
M3	Solid ceramic brick	0,189	0,218	0,235	0,220	0,224	0,239	0,242	0,200	0,264			
M4	Ceramic hollow block	0,113	0,136	0,150	0,145	0,136	0,151	0,165	0,138	0,182			
M5	Aerated concrete block	0,086	0,106	0,118	0,115	0,105	0,118	0,133	0,112	0,147			
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,061	0,076	0,085	0,084	0,074	0,085	0,099	0,083	0,110			
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,082	0,101	0,113	0,110	0,099	0,113	0,127	0,107	0,141			

Tables 5 and 6 present the values of the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$  of collector-accumulation barriers, at the Rzeszów-Jasionka meteorological station, in December, toward the south (Table 5) and north (Table 6), depending on the material used for the accumulation layer (M1÷M7) and the type of glazing in the collector (S1÷S9). The coefficient values were calculated for the "classic" profile.

December was selected for analysis as the least favourable month of the year. Yellow highlights the partition variants for which the equivalent heat transfer coefficient U<sub>r</sub> meets the current requirements for the maximum value set for opaque walls of classic construction (U $\leq$ 0.2 W/(m<sup>2</sup>K)). In the case of the southern elevation, most variants meet the requirements for thermal protection of buildings. Red highlights the variants for which the TSW wall is a source of heat for the building.

The northern elevation is the least sunny side of the building. Despite this, in this case, you can see such TSW configurations (marked in yellow) with a classic collector profile, in which the values of the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$ take a value of no more than 0.2 W/(m<sup>2</sup>K)). Table 7 presents the thermal storage wall heat transfer coefficients in the case of a "passive" profile, depending on the material used for the accumulation layer and the type of glazing.

Despite the lower values obtained for the "passive" profile than for the "classic" profile presented in Table 3, none of the calculated values given in Table 7 meet the condition  $U_{TSW} \le 0.2$  W/(m<sup>2</sup>K). Therefore, it can be assumed that none of the barriers presented meets the requirements of protection for the external walls of the building. However, it should be remembered that the presented values take into account only the effect of heat losses, without taking into account solar gains. The situation changes significantly when both the effect of heat losses resulting from

Wartości tego współczynnika obrazują, jaka część energii słonecznej padającej na kolektor przekazywana jest przez przegrodę kolektorowo-akumulacyjną do wnętrza budynku w postaci zysku ciepła ( $Q_{sol, PKA}$ ). Przegroda PKA z materiałem M1 i kolektorem wykonanym z profilu "klasycznego" i przeszkleniami S1÷S9 jest w stanie przekazać od 28,5 do 34,0% energii słonecznej padającej na zewnętrzną powierzchnię tej przegrody. Jest to przegroda, w której występuje materiał o największym współczynniku przewodzenia ciepła ( $\lambda$ ) i najmniejszym oporze cieplnym warstwy akumulacyjnej (R). Im większy opór cieplny materiału w warstwie akumulacyjnej, tym mniej energii słonecznej przekazywanej do budynku. Najmniej energii słonecznej (6,1–11,0%) przekazuje przegroda z materiałem M6.

W tabelach 5 i 6 przedstawiono wartości równoważnego współczynnika przenikania ciepła U<sub>r</sub> przegród kolektorowoakumulacyjnych, w stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka, w grudniu, w kierunku południowym (tabela 5) i północnym (tabela 6), w zależności od zastosowanego materiału warstwy akumulacyjnej (M1÷M7) i rodzaju przeszklenia w kolektorze (S1÷S9). Wartości współczynnika zostały obliczone w przypadku profilu "klasycznego".

Do analizy wybrano grudzień jako najmniej korzystny w całym roku. Kolorem żółtym wyróżniono warianty przegród, w przypadku których wartość równoważnego współczynnika przenikania ciepła U<sub>r</sub> spełnia obecne wymagania dotyczące wartości maksymalnej, stawiane ścianom nieprzezroczystym o konstrukcji klasycznej (U $\leq$ 0,2 W/(m<sup>2</sup>K)). W przypadku elewacji południowej większość wariantów spełnia wymagania dotyczące ochrony cieplnej budynków. Kolorem czerwonym wyróżniono te warianty, w których ściana PKA jest źródłem ciepła dla budynku.

# Table 5. Equivalent heat transfer coefficient – $U_{r,S}[W/(m^2K)]$ of thermal storage walls facing south in December for Rzeszow with the "classic" profile

Tabela 5. Równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r, S</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)] przegród kolektorowo-akumulacyjnych o orientacji południowej w grudniu w przypadku profilu "klasycznego", dotyczy Rzeszowa

Variant of the accumulation layer/ Wariant warstwy akumulacyjnej	Type of material / Rodzaj	Equivalent heat transfer coefficient U <sub>r.S</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]/ Równoważny współczynnik przenikania ciepła U <sub>r.S</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] type of glazing in the collector S1 – S9 and collector parameter B/ rodzaj przeszklenia w kolektorze S1–S9 i parametr kolektora B								
	materiału	S1 B = 0,194	S2 B = 0,252	S3 B = 0,290	S4 B = 0,294	S5 B = 0,239	S6 B = 0,285	S7 B = 0,360	S8 B = 0,308	89 B = 0,407
M1	Concrete	0,75	0,45	0,30	0,26	0,55	0,33	0,08	0,18	-0,02
M2	Silicate brick	0,53	0,33	0,23	0,20	0,40	0,25	0,06	0,15	-0,02
M3	Solid ceramic brick	0,49	0,31	0,22	0,19	0,37	0,23	0,06	0,14	-0,02
M4	Ceramic hollow block	0,30	0,20	0,14	0,13	0,22	0,15	0,04	0,10	-0,01
M5	Aerated concrete block	0,23	0,15	0,11	0,10	0,17	0,12	0,03	0,08	-0,01
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,16	0,11	0,08	0,07	0,12	0,08	0,02	0,06	-0,01
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,21	0,14	0,10	0,10	0,16	0,11	0,03	0,08	-0,01

the temperature difference and thermal resistance of the partition, as well as heat gains from solar radiation, are taken into account in the total balance.

Tables 8 and 9 present the values of the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$  of thermal storage walls in the case of the Rzeszów-Jasionka meteorological station, in December, towards the south (Table 8) and the north (Table 9), depending on the material used for the accumulation layer (M1÷M7) and the Elewacja północna jest najmniej nasłonecznioną stroną budynku. Pomimo tego, również w tym przypadku można zauważyć takie konfiguracje PKA (wyróżnione kolorem żółtym) z profilem klasycznym kolektora, w których wartości równoważnego współczynnika przenikania ciepła U<sub>r</sub> przyjmują wartość nie większą niż 0,2 W/(m<sup>2</sup>K)). W tabeli 7 przedstawiono współczynniki przenikania ciepła przegrody kolektorowoakumulacyjnej U<sub>PKA</sub> w przypadku profilu "pasywnego", w za-

# Table 6. Equivalent heat transfer coefficient – $U_{r, N}$ [W/(m<sup>2</sup>K)] of thermal storage walls facing north in December for Rzeszow with the "classic" profile

Tabela 6. Równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r. N</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)] przegród kolektorowo-akumulacyjnych o orientacji północnej w grudniu w przypadku profilu "klasycznego", dotyczy Rzeszowa

Variant of the	Trme of		R	Equivale ównoważny	ent heat trans współczynni	sfer coefficie k przenikan	ent U <sub>r.N</sub> [W/ ia ciepła U <sub>r.</sub>	(m <sup>2</sup> K)]/ <sub>N</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)	)]						
layer/ Wariant	material/ Rodzaj	type of glazing in the collector S1 – S9 and collector parameter B/ rodzaj przeszklenia w kolektorze S1–S9 i parametr kolektora B													
warstwy akumulacyjnej	materiału	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S</b> 3	<b>S4</b>	85	<b>S6</b>	<b>S</b> 7	<b>S8</b>	<b>S9</b>					
		B = 0,194	B = 0,252	B = 0,290	B = 0,294	B = 0,239	B = 0,285	B = 0,360	B = 0,308	B = 0,407					
M1	Concrete	1,12	0,85	0,73	0,65	0,98	0,77	0,49	0,52	0,42					
M2	Silicate brick	0,80	0,64	0,56	0,51	0,71	0,58	0,39	0,42	0,34					
M3	Solid ceramic brick	0,74	0,60	0,52	0,48	0,66	0,55	0,37	0,40	0,33					
M4	Ceramic hollow block	0,44	0,37	0,33	0,32	0,40	0,35	0,26	0,28	0,22					
M5	Aerated concrete block	0,34	0,29	0,26	0,25	0,31	0,27	0,21	0,23	0,18					
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,24	0,21	0,19	0,18	0,22	0,19	0,15	0,17	0,14					
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,32	0,28	0,25	0,24	0,29	0,26	0,20	0,22	0,17					

Table 7. Thermal storage wall heat transfer coefficient –  $U_{TSW}\left[W/(m^2K)\right]$  with the "passive" profile

Tabela 7. Współczynnik przenikania ciepła przegrody kolektorowo-akumulacyjnej  $U_{PKA}[W/(m^2K)]$  w przypadku profilu "pasywnego" Heat transfer coefficient U<sub>TSW</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)]/Współczynnik przenikania ciepła U<sub>PKA</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)] Variant of the accumulation Type of type of glazing in the collector S1 - S9 and collector parameter B/ layer/ material/ rodzaj przeszklenia w kolektorze S1–S9 i parametr kolektora B Wariant Rodzaj warstwy materiału **S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9** akumulacyjnej B=0,221 B=0,305 B=0,364 B=0,390 B=0,277 B=0,350 B=0,523 B=0,461 B=0,609 M1 Concrete 1,36 1,09 0,97 0,82 1,27 1,03 0,66 0,61 0,61 M2 Silicate brick 0,99 0,84 0,76 0,67 0,94 0,80 0,56 0,52 0,52 Solid ceramic M3 0,93 0,79 0,72 0.64 0,88 0.76 0,53 0,50 0,50 brick Ceramic hollow M4 0.56 0.51 0.48 0.44 0.55 0.50 0.39 0,37 0.37 block Aerated M5 0.400.38 0,36 0,39 0.32 0.31 0.31 0.43 0,43 concrete block Hollow ceramic M6 block 38 cm 0,31 0.29 0.28 0,27 0.30 0.29 0.25 0.24 0.24 P+W Hollow M7 ceramic block, 0,39 0,36 0,35 0,33 0,38 0,36 0,30 0,29 0,29 PCM+wool

type of glazing in the collector  $(S1 \div S9)$ . This time, the values of the "passive" profile coefficient were calculated.

Yellow and red colours are used to distinguish partition variants whose equivalent heat transfer coefficient  $U_r$  meets the condition  $U_r \leq 0.2$  W/(m<sup>2</sup>K). For the southern elevation, only a few variants do not meet this requirement in December. Furthermore, in the case of three glazing variants, all variants of the accumulation layer meet the condition  $U_r \leq 0$  (cells highlighted in red). This means that the wall is a source of heat in the building.

In Table 9, the partition variants in which the value of the equivalent transfer coefficient meets the condition of  $U_r \le 0.2 \text{ W/(m^2K)}$  are highlighted in yellow. Comparing the results for the north and south elevations, the following relationship is visible: in the case of the north elevation, the type of glazing is still important, but the thermal resistance of the accumulation layer and the entire partition begins to play a greater role. The most favourable values were obtained for variant M6, whose thermal resistance is the highest among the configurations analysed.

Among the variants analysed, there are no values below zero, which would indicate a situation in which, in the worst location (northern elevation) and in the worst month (December), the wall does not generate heat losses, but the values in the case of the most favourable variants approach zero. Technological development, primarily regarding glazing with high transmittance while maintaining its insulation, gives hope that in the near future it will be possible to implement such TSW barriers that will be a source of heat in the building regardless of its location and the time of year.

The thermal efficiency of the thermal storage wall is influ-

enced by: the type of material of the accumulation layer; the

type of glazing; the value of the heating index; the internal air

Conclusions

leżności od zastosowanego materiału warstwy akumulacyjnej i rodzaju przeszklenia.

Pomimo mniejszych wartości uzyskanych w przypadku profilu "pasywnego" niż profilu "klasycznego" przedstawionych w tabeli 3, żadna z wyliczonych wartości podanych w tabeli 7 nie spełnia warunku U<sub>PKA</sub> $\leq$ 0,2 W/(m<sup>2</sup>K). Można zatem uznać, że żadna z zaprezentowanych przegród nie spełnia wymagań dotyczących ochrony dla obecnie projektowanych ścian zewnętrznych budynku. Należy jednak pamiętać, że przedstawione wartości uwzględniają wyłącznie efekt strat ciepła, bez uwzględnienia zysków słonecznych. Sytuacja zmienia się istotnie w momencie, kiedy uwzględnia się w łącznym bilansie zarówno efekt strat ciepła wynikających z różnicy temperatury i oporu cieplnego przegrody, jak i zysków ciepła pochodzących od promieniowania słonecznego.

W tabelach 8 i 9 przedstawiono wartości równoważnego współczynnika przenikania ciepła U<sub>r</sub> przegród kolektorowoakumulacyjnych w przypadku stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka, w grudniu, w kierunku południowym (tabela 8) i północnym (tabela 9), w zależności od zastosowanego materiału warstwy akumulacyjnej (M1÷M7) i rodzaju przeszklenia w kolektorze (S1÷S9). Tym razem obliczono wartości współczynnika profilu "pasywnego".

Kolorami żółtym i czerwonym wyróżniono warianty przegród, których wartość równoważnego współczynnika przenikania ciepła U<sub>r</sub> spełnia warunek U<sub>r</sub>≤0,2 W/(m<sup>2</sup>K). W przypadku elewacji południowej tylko kilka wariantów nie spełnia tego wymagania w grudniu. Co więcej, w przypadku trzech wariantów przeszklenia wszystkie warianty warstwy akumulacyjnej spełniają warunek U<sub>r</sub>≤0 (komórki wyróżnione na czerwono). Oznacza to, że ściana jest źródłem ciepła w budynku.

W tabeli 9 kolorem żółtym wyróżniono warianty przegród, w których wartość równoważnego współczynnika przenikania

Table 8. Equivalent heat transfer coefficient –  $U_{r,S}$  [W/(m<sup>2</sup>K)] of thermal storage walls facing south in December for Rzeszow with the "passive" profile

Tabela 8. Równoważny współczynnik przenikania ciepła  $U_{r,S}$  [ $W/(m^2K)$ ] przegród kolektorowo-akumulacyjnych o orientacji południowej w przypadku profilu "pasywnego", dotyczy Rzeszowa

Variant of the		Heat tran	sfer coefficie	ent U <sub>r.S</sub> [W/(n	n²K)]/Równo	ważny wspo	ółczynnik pr	rzenikania o	ciepła U <sub>r, S</sub> [	W/(m <sup>2</sup> K)]	
accumulation layer / Wariant warstwy akumulacyjnej	Type of material/ Rodzaj	type of glazing in the collector S1 – S9 and collector parameter B / rodzaj przeszklenia w kolektorze S1–S9 i parametr kolektora B									
	materialu	S1 B = 0,221	S2 B = 0,305	S3 B = 0,364	S4 B = 0,390	S5 B = 0,277	S6 B = 0,350	S7 B = 0,523	S8 B = 0,461	S9 B = 0,609	
M1	Concrete	0,60	0,25	0,08	0,01	0,38	0,12	-0,21	-0,10	-0,33	
M2	Silicate brick	0,44	0,19	0,06	0,01	0,28	0,09	-0,18	-0,09	-0,28	
M3	Solid ceramic brick	0,41	0,18	0,06	0,01	0,27	0,09	-0,17	-0,08	-0,27	
M4	Ceramic hollow block	0,25	0,12	0,04	0,01	0,16	0,06	-0,13	-0,06	-0,20	
M5	Aerated concrete block	0,19	0,09	0,03	0,00	0,13	0,05	-0,10	-0,05	-0,17	
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,14	0,07	0,02	0,00	0,09	0,03	-0,08	-0,04	-0,13	
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,17	0,08	0,03	0,00	0,11	0,04	-0,10	-0,05	-0,16	

# Table 9. Equivalent heat transfer coefficient – $U_{r, N}[W/(m^2K)]$ of thermal storage walls facing north in December for Rzeszow with the "passive" profile

Tabela 9. Równoważny współczynnik przenikania ciepła  $U_{r,N}[W/(m^2K)]$  przegród kolektorowo-akumulacyjnych o orientacji północnej w przypadku profilu "pasywnego", dotyczy Rzeszowa

X7 • 4 641		$\label{eq:heat} \mbox{Heat transfer coefficient } U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynnik przenikania ciepła U_{\rm r,N}  [W/(m^2 K)]/R \acute{o} w noważny w spółczynni ciepła U_{\rm r,N}$								W/(m <sup>2</sup> K)]
accumulation layer /	Type of material / Rodzaj		parameter ] kolektora ]	arameter B / kolektora B						
wariant warstwy akumulacyinei	materialu	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S</b> 3	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>
		B = 0,221	B = 0,305	B = 0,364	B = 0,390	<b>B</b> = 0,277	B = 0,350	B = 0,523	B = 0,461	B = 0,609
M1	Concrete	0,99	0,68	0,54	0,43	0,84	0,59	0,24	0,26	0,15
M2	Silicate brick	0,72	0,53	0,42	0,35	0,62	0,46	0,20	0,23	0,13
M3	Solid ceramic brick	0,68	0,50	0,40	0,33	0,58	0,43	0,19	0,22	0,13
M4	Ceramic hollow block	0,41	0,32	0,27	0,23	0,36	0,28	0,14	0,16	0,09
M5	Aerated concrete block	0,32	0,25	0,21	0,19	0,28	0,23	0,12	0,14	0,08
M6	Hollow ceramic block 38 cm P+W	0,22	0,18	0,16	0,14	0,20	0,16	0,09	0,10	0,06
M7	Hollow ceramic block, PCM+wool	0,28	0,23	0,19	0,17	0,25	0,20	0,11	0,12	0,07

temperature. Based on the analysis of the results, the following conclusions were drawn.

• the heat transfer coefficient of the collector  $U_{col}$  depends on the thermal parameters of the collector material (profile), the insulating glass (glazing) and the spacer frame in the insulating glass. The higher the insulation of these elements, the lower the value of the coefficient  $U_{col}$ ; in the case of a "classic" profile  $U_{col} = 1.19 \div 3.02 [W/(m^2K)]$ , and a "passive" profile  $U_{col} = 0.78 \div 2.61 [W/(m^2K)]$ ;

• the type of collector construction (material and glazing) and the material of the accumulation layer significantly affects the value of the heat transfer coefficient of the thermal storage wall  $U_{TSW}$ . The higher the insulation of the collector and accumulation layer, the lower the value of the  $U_{TSW}$  coefficient; in the case of the "classic" profile  $U_{TSW} = 0.27 \div 1.47 [W/(m^2K)]$ , and the "passive" profile  $U_{TSW} = 0.24 \div 1.36 [W/(m^2K)]$ ;

• the heat transfer coefficient of the  $U_{TSW}$  thermal storage wall reaches the highest value and shows high variability when the accumulation layer is made of materials with a density greater than 1600 kg/m<sup>3</sup>, while the lowest values and minimal variability when the accumulation layer is characterised by high thermal resistance (R > 1.7 m<sup>2</sup>K/W);

• the type of glazing has a minimal effect on the value of the heat transfer coefficient of the  $U_{TSW}$  thermal storage wall, when the thermal resistance of the accumulation layer  $R > 2.0 \text{ m}^2\text{K/W}$ ;

• the most reliable coefficient determining the thermal efficiency of thermal storage walls is the equivalent heat transfer coefficient  $U_r$ ;

• when designing thermal storage walls, their parameters (materials) should be selected so that the value of the equivalent heat transfer coefficient is negative;

• the highest thermal efficiency (regardless of the material) is characteristic of TSWs with the highest B coefficient (collector parameter);

54

spełnia warunek U<sub>r</sub> $\leq$ 0,2 W/(m<sup>2</sup>K). Porównując wyniki dotyczące elewacji północnej i południowej, widoczna jest następująca zależność: w przypadku elewacji północnej rodzaj przeszklenia nadal jest istotny, ale większe znaczenie zaczyna odgrywać opór cieplny warstwy akumulacyjnej i calej przegrody. Najkorzystniejsze wartości uzyskano w przypadku wariantu M6, którego opór cieplny jest największy spośród przeanalizowanych konfiguracji.

Wśród przeanalizowanych wariantów nie ma wartości poniżej zera, co wskazywałoby na sytuację, w której przy najgorszej lokalizacji (elewacja północna) i w najgorszym miesiącu (grudzień) ściana nie generuje strat ciepła, ale wartości w przypadku najkorzystniejszych wariantów zbliżają się do zera. Rozwój technologiczny dotyczący przede wszystkim przeszkleń o dużej transmisyjności przy zachowaniu ich izolacyjności daje nadzieję, że już w najbliższym czasie uda się zrealizować takie przegrody PKA, które będą źródłem ciepła w budynku niezależnie od jego lokalizacji oraz okresu w roku.

#### Wnioski

Na efektywność cieplną przegrody kolektorowoakumulacyjnej mają wpływ: rodzaj materiału warstwy akumulacyjnej; rodzaj przeszklenia; wartość indeksu heliogrzewczego; temperatura powietrza wewnętrznego. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników sformułowano następujące wnioski:

• współczynnik przenikania ciepła kolektora U<sub>kol</sub> zależy od parametrów cieplnych materiału kolektora (profilu), szyby zespolonej (przeszklenia) oraz ramki dystansowej w szybie zespolonej. Im większa izolacyjność tych elementów, tym mniejsza wartość współczynnika U<sub>kol</sub>;.w przypadku profilu "klasycznego" U<sub>kol</sub> = 1,19÷3,02 [W/(m<sup>2</sup>K)], a "pasywnego" U<sub>kol</sub> = 0,78÷2,61 [W/(m<sup>2</sup>K)];

• M4, M5, M6 and M7 materials (with a density not exceeding 1000 kg/m<sup>3</sup>) are the least susceptible to the effects of glazing and retain high thermal efficiency;

• S7, S8 and S9 glazing is universal for all TSWs, regardless of the type of material of the accumulation layer;

• due to glazing, the highest thermal efficiency is achieved by TSWs with glazing marked with the symbol S9;

• a properly selected type of collector (material and glazing) and the material of the accumulation layer reduce the  $U_{TSW}$  heat transfer coefficient in the case of the "classic" profile to 57% and the "passive" one to 45%;

Received: 27.01.2025 Revised: 06.03.2025 Published: 24.06.2025

#### Literature

 Chwieduk DA. Energetyka słoneczna budynku. Warszawa: Arkady; 2011.
 Sadineni SB, Madala S, Boehm RF. Passive building energy savings: A review of building envelope components. Renew. Sustain. Energy Rev.

2011; https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014[3] Balcomb J.D. Passive solar design handbook. vol. 2. Los Alamos Scien-

tific Laboratory, USA; 1980.

[4] Jung HC. Passive solar houses in Korea. Solar World Congress. Perth, 1983.[5] Hauser G. Passive sonnen energie nutzung durch Fenster, An Banwande

und temporare Warmeschutzme Bauhmen. HLH. 1983; 5,6/44.

[6] Hu Z, He W, Ji J, Zhang S. A review on the application of Trombe wall system in buildings. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017; https://doi.org/10.1016/j. rser.2016.12.003

[7] Rabani M, Kalantar V, Rabani, M. Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design. Energy. 2017; https://doi.org/10.1016/j. energy.2017.06.066

[8] Briga-Sá A, Boaventura-Cunha J, Lanzinha JCG, Paiva A. Experimental and analytical approach on the Trombe wall thermal performance parameters characterization. Energy Build. 2017; https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.018

[9] Krasoń J. Wpływ materiałów zmiennofazowych na efektywność energetyczną modyfikowanych przegród kolektorowo-akumulacyjnych. Praca doktorska. 2023

[10] Pourghorban A, Asoodeh H. The impacts of advanced glazing units on annual performance of the Trombe wall systems in cold climates. Sustain. Energy Technol. Assessments. 2022; https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101983

[11] Błotny J, Nemś M. Analysis of the Impact of the Construction of a Trombe Wall on the Thermal Comfort in a Building Located in Wrocław, Poland. Atmosphere, 2019; https://doi.org/10.3390/atmos10120761

[12] Wang D, Hu L, Du H, Liu Y, Huang J, Xu Y, Liu J. Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. Renew. Sustain. Energy Rev. 2020; https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772
[13] Bernard C, Body Y, Zanoli A. Experimental comparison of latent and sensible heat thermal walls. Sol. Energy. 1985 https://doi.org/10.1016/0038-092X (85)90021-0

[14] Fang X, Li Y. Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls. Sol. Energy. 2000; https://doi.org/10.1016/S0038--092X (00)00014-1.

[15] PN-EN ISO 6946:1999, Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania

[16] PN-EN ISO 10077-1:2002, Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Część 1: Metoda uproszczona • rodzaj konstrukcji kolektora (materiału i przeszklenia) oraz materiału warstwy akumulacyjnej wpływa w znaczny sposób na wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody kolektorowo – akumulacyjnej U<sub>PKA</sub>. Im większa izolacyjność kolektora i warstwy akumulacyjnej, tym mniejsza wartość współczynnika U<sub>PKA</sub>; w przypadku profilu "klasycznego" U<sub>PKA</sub> = 0,27 ÷ 1,47 [W/(m<sup>2</sup>K)], a profilu "pasywnego" U<sub>PKA</sub> = 0,24 ÷ 1,36 [W/(m<sup>2</sup>K)];

• współczynnik przenikania ciepła przegrody kolektorowoakumulacyjnej U<sub>PKA</sub> osiąga największą wartość i wykazuje dużą zmienność, gdy warstwa akumulacyjna wykonana jest z materiałów o gęstości większej niż 1600 kg/m<sup>3</sup>, natomiast najmniejsze wartości i minimalną zmienność, gdy warstwa akumulacyjna charakteryzuje się dużym oporem cieplnym (R > 1,7 m<sup>2</sup>K/W);

• rodzaj przeszklenia ma minimalny wpływ na wartość współczynnika przenikania ciepła przegrody kolektorowoakumulacyjnej  $U_{PKA}$ , gdy opór cieplny warstwy akumulacyjnej R > 2,0 m<sup>2</sup>K/W;

 najbardziej miarodajnym współczynnikiem określającym efektywność cieplną przegród kolektorowo-akumulacyjnych jest równoważny współczynnik przenikania ciepła U<sub>r</sub>;

 projektując przegrody kolektorowo-akumulacyjne, należy tak dobrać jej parametry (materiały), aby wartość równoważnego współczynnika przenikania ciepła była ujemna;

 największą efektywnością cieplną (bez względu na materiał) charakteryzują się PKA o największym współczynniku B (parametr kolektora);

 materiały M4, M5, M6 i M7 (o gęstości nieprzekraczającej 1000 kg/m<sup>3</sup>) są najmniej podatne na wpływ przeszklenia i zachowują wysoką efektywność cieplną;

 przeszklenia S7, S8 i S9 są uniwersalne w przypadku wszystkich PKA bez względu na rodzaj materiału warstwy akumulacyjnej;

• ze względu na przeszklenie największą efektywnością cieplną charakteryzują się PKA, w których zastosowano przeszklenie oznaczone symbolem S9;

 odpowiednio dobrany rodzaj kolektora (materiału i przeszklenia) oraz materiału warstwy akumulacyjnej powoduje zmniejszenie współczynnika przenikania ciepła U<sub>PKA</sub> w przypadku profilu "klasycznego" do 57%, a "pasywnego" do 45%;

> Artykuł wpłynął do redakcji: 27.01.2025 r. Otrzymano poprawiony po recenzjach: 06.03.2025 r. Opublikowano: 24.06.2025 r.

[17] Kossecka E, Kośny J, Łoskot K, Prętczyński Z, Starakiewicz A. Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła przez zaszklenie dla ściany słonecznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. 1990; 146/3

[18] Starakiewicz A. "Funkcjonowanie przegród kolektorowo-akumulacyjnych w polskich warunkach klimatycznych". Praca doktorska, IPPT PAN 1993.

[19] Starakiewicz, A.; Miąsik, P.; Krasoń, J.; Babiarz, B. Multi-Aspect Shaping of the Building's Heat Balance. Energies 2024, 17, 2702. https://doi.org/10.3390/en17112702

[20] https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt