

dr hab. inż. Dariusz Bajno, prof. uczelni^{1*)}

ORCID: 0000-0001-7664-8653

dr hab. inż. Andrzej Marynowicz, prof. uczelni²⁾

ORCID: 0000-0002-8308-8479

dr inż. Andrzej Kucharczyk²⁾

ORCID: 0000-0003-3576-1267

Badanie wpływu wewnętrzných dociepleń budynków historycznych na ich stan techniczny

The impact of the internal thermal modernization of historic buildings on their technical condition

DOI: 10.15199/33.2023.05.09

Streszczenie. W artykule rozważono dwa przypadki obiektów historycznych objętych ochroną konserwatorską, w przypadku których przewidziano docieplenie przegród zewnętrznych od wewnątrz. Jeden z nich pochodzi z 1830 r., natomiast drugi z 1880 r. W pierwszym analizowanym obiekcie termomodernizacja przegród została przeprowadzona na przełomie 2018 i 2019 r., natomiast drugi, wzniesiony w technologii tzw. muru pruskiego, nadal oczekuje na termomodernizację. Niewielka wiedza na temat wpływu procesów zachodzących we wnętrzu przegród docieplanych od wewnątrz na ich drewniany szkielet skłoniła nas do opracowania programu badań przegrody z ociepleniem od wewnątrz w skali naturalnej, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przedstawione w artykule wstępne wyniki pomiarów, realizowanych po raz pierwszy w kraju w tak szerokim zakresie, potwierdziły złożoność procesów cieplno-wilgotnościowych w niejednorodnych przegrodach.

Słowa kluczowe: docieplanie od wewnątrz; wilgoć w przegrodach; korozja biologiczna; monitoring cieplno-wilgotnościowy.

Abstract. The article considers two cases of historical objects under conservator's protection, for which thermal insulation of their external partitions from the inside is provided. One of them dates from 1830 and the other from 1880. While in the first analyzed case, the thermal modernization of partitions was carried out at the turn of 2018 and 2019, the second building, which was erected in the so-called "half-timbered wall" is still waiting for thermal modernization. The lack of research in this area and little knowledge about the impact of physical processes taking place inside partitions insulated from the inside on their wooden skeleton prompted the authors to develop a program of testing this type of partition with insulation from the inside on a natural scale, in conditions close to real. The preliminary results of measurements presented in this article, carried out for the first time in the country in such a wide range, confirmed the complexity of thermal and humidity processes in such highly heterogeneous partitions.

Keywords: thermal insulation from the inside; moisture in partitions; biological corrosion; HAM monitoring.

Rozkład temperatury oraz migracja wilgoci we wnętrzu przegród budowlanych będą zawsze czynnikami decydującymi o ich przydatności eksploatacyjnej oraz trwałości. Wilgoć gromadząca się w materiałach budowlanych pogarsza ich właściwości cieplochronne, a jednocześnie trwałość. Obowiązujące w wielu krajach przepisy wymagają wyeliminowania prawdopodobieństwa wystąpienia kondensacji wilgoci na wewnętrznych powierzchniach takich przegród oraz zabezpieczenia pomieszczeń przed pojawieniem się i rozwojem grzybów pleśniowych szkodliwych dla zdrowia ludzkiego [1]. Zalecają również, aby w przegrodach budynków nie występowało zawilgocenie zwiększające się w kolejnych latach eksploatacji,

spowodowane wewnętrzną kondensacją pary wodnej. Dostatecznie często stosowane w ostatnim okresie techniki dociepleń ścian zewnętrznych „od wewnątrz” znacznie poprawiają ich parametry cieplochronne i jednocześnie mikroklimat pomieszczeń. Nieumiejętne ich zastosowanie może jednak doprowadzić do odwrotnych skutków niż oczekiwane, tj. uszkodzenia wbudowanych w przegrody materiałów o małej odporności na korozję biologiczną oraz niską temperaturę. O ważności i aktualności problematyki dociepleń „od wewnątrz” mogą świadczyć liczne badania dotyczące zarówno podejścia do modelowania, jak i badań eksperymentalnych [2 ÷ 5].

Obiekty zabytkowe powinny jak najdłużej zachowywać swój autentyczny charakter. Często zdarza się, że są one poddawane termomodernizacji wyłącznie ze względów użytkowych, po przystosowaniu ich do innej funkcji niż pełniły pierwotnie. Zmiana sposobu użytkowania wiąże się z dodatkowym

oddziaływaniem temperatury i wilgoci wytwarzanej we wnętrzu takich obiektów na ich przegrody. W celu ograniczenia strat ciepła właściciele tych obiektów stosują mieszane techniki dociepleń lub tylko od wewnątrz.

Każda termomodernizacja budynku wymaga przeprowadzenia analizy cieplno-wilgotnościowej przegród. Ma to szczególne znaczenie w obiektach historycznych i zabytkowych [6, 7]. Ocieplenie przegród „od środka” z pewnością poprawi mikroklimat pomieszczeń, lecz nie zawsze okaże się to dla nich korzystne [6]. Pierwotne (zewnętrzne) warstwy przegród, będąc w stanie intensywnego zawilgocenia, mogą w okresie zimowym znaleźć się w strefie oddziaływania ujemnej temperatury przy jednoczesnym, nawet 20-krotnym, obniżeniu ich zdolności do kumulowania i oddawania ciepła po dociepleniu od wewnątrz. Obniżenie poziomu bezwładności cieplnej może doprowadzić do zaburzenia gospodarki

¹⁾ Politechnika Bydgoska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

²⁾ Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*}) Adres do korespondencji: dariusz.bajno@pbs.edu.pl

cieplej w pomieszczeniach, kiedy zostaną niewłaściwie docieplone lub zastosuje się mieszane technologie docieplenia. Nadal pozostaje nierozwiązalny problem pojawienia się liniowych mostków cieplnych na styku ściany ocieplonej „od wewnątrz” ze ścianami poprzecznymi, np. działowymi.

W obu przypadkach analizowanych w artykule, do wykonania warstwy docieplającej zastosowano lekkie płyty mineralne o grubości 10 i 12 cm, gęstości 115 kg/m^3 , współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda = 0,043 \text{ W/(mK)}$, współczynnika oporu dyfuzyjnego $\mu = 3$ oraz sorpcji ≤ 6 . Materiał ten jest odporny na ogień oraz korozję biologiczną, a także nie wymaga stosowania dodatkowej konstrukcji mocującej. Płyty te można dokładnie dopasować do siebie i przykleić do ścian za pomocą zaprawy klejącej.

Obiekt nr 1 – budynek pochodzący z 1830 r.

Przegrody tego budynku zostały w 1998 r. docieplone od wewnątrz, warstwą wełny mineralnej grubości 6 cm i wykończone płytami gipsowymi grubości 9,5 mm. Wełna mineralna była utrzymywana w pionie za pomocą drewnianych łąt i folii [7]. Drewniane łąty o rozstawie 60 cm utworzyły gęstą sieć liniowych mostków cieplnych o współczynnika przewodzenia ciepła λ , ok. czterokrotnie większym w porównaniu z podstawową warstwą ocieplenia, jaką były płyty wełny mineralnej.

W 2018 r. budynek (fotografia 1a) poddano rewitalizacji i modernizacji połączonej z termomodernizacją [6], w ramach której wymieniono również istniejącą wewnętrzną izolację cieplną. Pierwszą czynnością było odsłonięcie istniejących warstw ocieplenia przez zdemontowanie gipsowych okładzin (suchy tynk) i folii, która je chroniła przed wilgocią pochodzącą z powietrza wewnętrznego. Usunięcie okładzin uwiarydociło liczne ogniska zagrzybień w kolorze ciemnobrunatnym i czarnym. Grzyby „znalazły” tu dla siebie wilgotne środowisko sprzyjające rozwojowi. Warstwa ocieplająca, którą była higroskopijna i nasiąkliwa wełna mineralna, trwale gromadziła w swej strukturze niezwiązaną chemicznie wodę. Przyczyniło się to do rozwoju korozji biologicznej,

która na przestrzeni dwudziestu lat eksploatacji nie wyrządziła większych szkód prawie 190-letnim murem budynku.

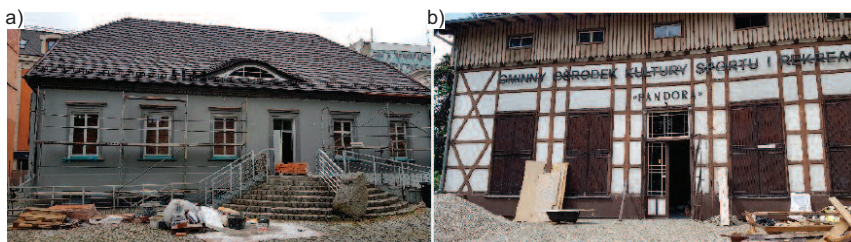
Przed montażem nowej izolacji przeprowadzono zaawansowane obliczenia cieplne i wilgotnościowe, które potwierdziły możliwość zastosowania omawianej technologii bez szkody dla budynku i jego przegród w warunkach narzuconego klimatu wewnętrznego, tj. przy utrzymaniu temperatury na poziomie $t_i = 18^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej powietrza wewnętrznego $\phi = \sim 45\%$. Przegrody te są monitorowane przez 4 ostatnie lata pod względem temperatury i zawartości wilgoci w warstwie zaprawy łączącej istniejący mur ceglany z nową warstwą docieplającą. Odbyna się to za pomocą czterech sond umieszczonych w różnych miejscach (rysunek 1).

Na rysunku 2 zamieszczono wyniki badań przeprowadzonych w okresie od maja 2019 r. do stycznia 2023 r. Potwierdzają one prawidłowość doboru nowej termoizolacji, pokazując wysychanie tej warstwy w fazie początkowej (w okresie od maja do sierpnia 2019 r.). W październiku 2019 r. nastąpił wzrost poziomu zawilgocenia spowodowany kondensacją międzywarstwową, który z małymi wahaniami utrzymuje się na

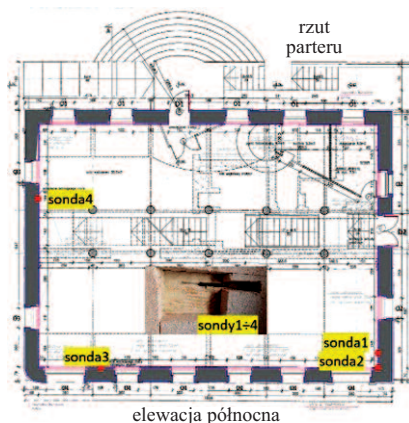
stabilnym poziomie. Monitoring wilgotności i temperatury jest kontynuowany, co pozwoli na wypracowanie wniosków dotyczących skuteczności lub szkodliwości wykonywania dociepleń przegród, m.in. obiektów zabytkowych od wewnątrz.

Budynek nr 2 i model ściany szkieletowej

Drugi budynek, pochodzący z 1880 r. (fotografia 1b), którego przegrody zewnętrzne wykonano w technologii „muru pruskiego”, został przewidziany do termomodernizacji również metodą „od wewnątrz”. Niewielka wiedza na temat skutków wdrażania takiego rozwiązania na stan zachowania drewna, szczególnie w obiektach zabytkowych, stwarza realne ryzyko nieodwracalnych uszkodzeń, a nawet może doprowadzić do całkowitej utraty wymaganych parametrów technicznych. W związku z tym w laboratorium Katedry Fizyki Materiałów Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej stworzono realne warunki do monitorowania procesów fizycznych zachodzących we wnętrzu konstrukcji. W tym celu wykonano ścianę ryglową wielkości rzeczywistej o szkielecie z trzysetletniego drewna, umieszczając ją we wnętrzu komory dwudzielnej, co pozwo-



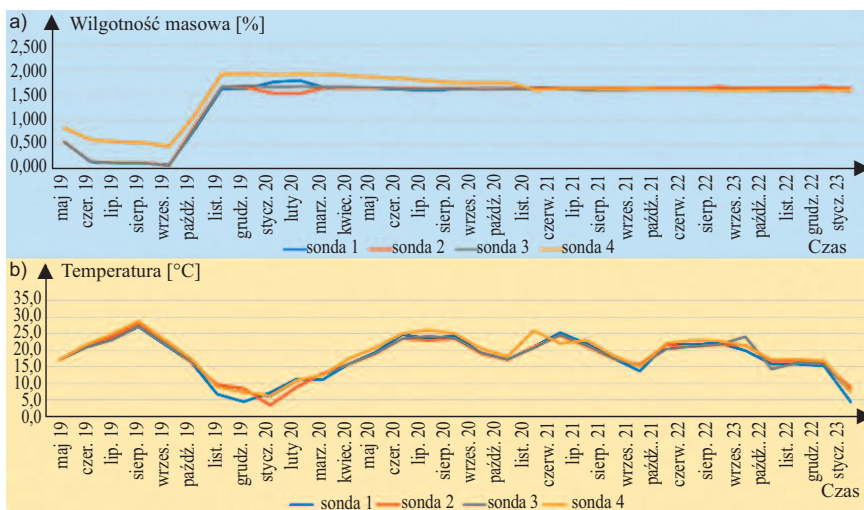
Fot. 1. Elewacja południowa budynków: a) budynku nr 1; b) budynku nr 2. Fot. D. Bajno
Photo 1. Buildings' southern facades: a) building no 1; b) building no 2. Photo D. Bajno



Rys. 1. Lokalizacja sond pomiarowych
Fig. 1. Localization of measuring probes

liło na uzyskanie odpowiednich warunków zewnętrznego i wewnętrznego klimatu po obu stronach przegrody w tym samym czasie (fotografia 2).

Wypełnienie szkieletu drewnianego stanowi współczesna, ceramiczna cegła pełna, wykończona po stronie wewnętrznej tynkiem wapiennym oraz we fragmentach tynkiem na bazie cementu. Przed ułożeniem warstw docieplenia zainstalowano na drewnianej konstrukcji ściany 7 czujników RH-T (temperatury i wilgotności względnej) i jedną sondę TDR (po stronie wewnętrznej czujniki cz. 1, cz. 3, cz. 4 ÷ 9) oraz 2 czujniki RH-T po stronie zewnętrznej ściany (cz. 2, cz. 4). Ich lokalizację

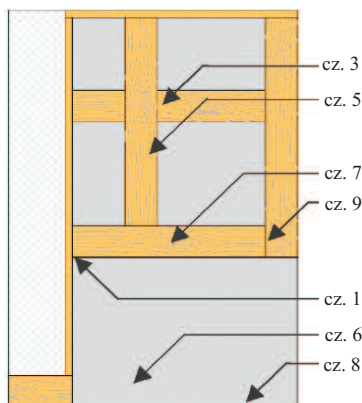


Rys. 2. Wilgotność masowa (a) i temperatura (b) na styku ściana – ocieplenie
 Fig. 2. Mass humidity (a) and temperature (b) at the junction wall – thermal insulation



Fot. 2. Etapy wykonywania ściany ryglowej – „mur pruski” w komorze klimatycznej
 Photo 2. Stages of making the half-timbered wall – „half-timbered wall” in the climatic chamber

na powierzchni przed dociepleniem pokazano na rysunku 3. Podczas badań mierzono temperaturę i wilgotność względną powierzchni drewna wewnątrz badanej ściany (rysunek 3, cz. 1 ÷ 9) w zależności od temperatury i wilgotności względnej w komorze klimatycznej, odpowiadającej warunkom wewnętrznym (T_{wew} , Rh_{wew}) i zewnętrznym (T_{zew} , Rh_{zew}).



Rys. 3. Lokalizacja czujników RH-T na powierzchni drewna
 Fig. 3. Location of sensors on the timber surface

Monitoring ciepło-wilgotnościowy rozpoczęto, kondycjonując ścianę przez ok. 3 miesiące, w warunkach otoczenia przy $T_{wew} = 23^{\circ}\text{C}$ i $Rh_{wew} = 60\%$ oraz $T_{zew} = 23,8^{\circ}\text{C}$ i $Rh_{zew} = 58\%$, uzyskując stały rozkład w czasie na wskazaniach wszystkich czujników pomiarowych. Pierwsze 4 doby stanowią końcowy etap kondycjonowania ściany (rysunki 4 ÷ 6). Cykl pomiarowy składał się z czterech etapów:

- **etap 1** – zmiana temperatury zewnętrznej z $23,8^{\circ}\text{C}$ do 11°C przy stałej wilgotności względnej 58% ; etap ten obejmował okres od 4. do 11. doby;
- **etap 2** – zmiana temperatury wewnętrznej z 11°C do 15°C , a wilgotności względnej z 60 do 70% ; etap ten obejmował okres od 11. do 18. doby;
- **etap 3** – zmiana temperatury wewnętrznej z 15°C do $19,5^{\circ}\text{C}$ przy zmianie wilgotności względnej z 70 do 60% (okres od 18. do 46. doby), z 60 do 75% (okres od 46. do 72. doby) i z 75 do 58% (okres od 72. do 123. doby);
- **etap 4** – zmiana temperatury wewnętrznej z $19,5^{\circ}\text{C}$ do $12,5^{\circ}\text{C}$ przy

zmiennej wilgotności względnej; etap ten obejmował okres od 123. do 145. doby.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład temperatury powierzchni drewnianego szkieletu badanej ściany ($T_1, T_3, T_5 \div T_9$). Podczas całego okresu monitorowania temperatura ta zmienia się zgodnie ze zmianą temperatury środowiska zewnętrznego (T_{zew}, T_2, T_4). Świadczy to, że warstwa docieplenia stanowi dobrą izolację termiczną. Taki układ może jednak powodować, że w elementach drewnianych będzie niska temperatura.

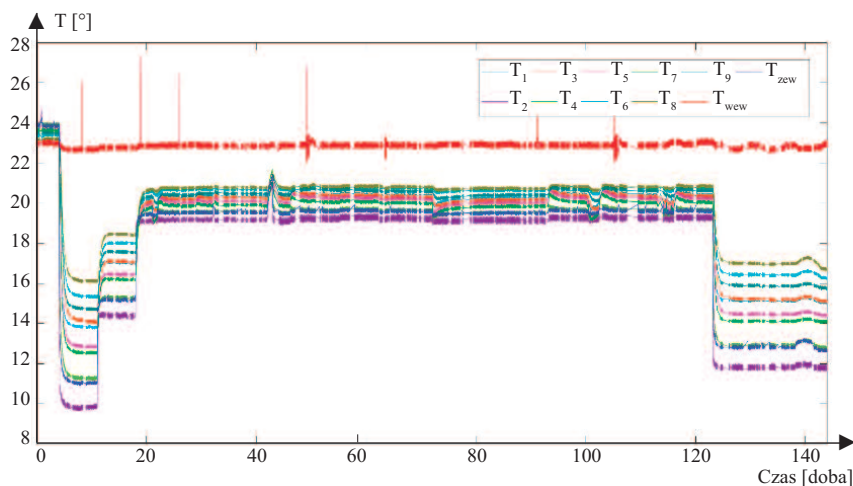
Na rysunku 5 zaprezentowano rozkład wilgotności względnej uzyskany z czujników umieszczonych na powierzchni elementów drewnianych wewnątrz ściany ($Rh_1, Rh_3, Rh_5 \div Rh_9$) oraz tych, które stanowiły warunki brzegowe, czyli klimatu wewnętrznego i zewnętrznego ($Rh_{wew}, Rh_{zew}, Rh_2, Rh_4$). W przypadku wilgotności względnej, podobnie jak temperatury, występuje trend zgodny ze zmianą środowiska zewnętrznego. Z tym że w przypadku wilgotności względnej czas stabilizacji jest znacznie większy niż temperatury.

Mając zmierzoną wilgotność względną (Rh) na powierzchni materiału oraz jego izotermę sorpcji $W = W(Rh)$, określono wilgotność masową. Na rysunku 6 przedstawiono uzyskane z obliczeń wartości wilgotności masowej w przypadku punktów, gdzie umieszczono czujniki 1, 3, 5 ÷ 9.

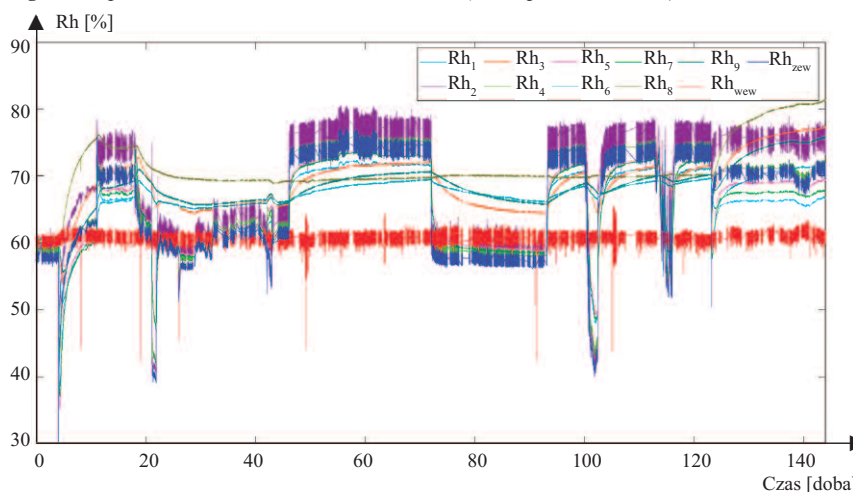
W badanych przypadkach (etap 1 ÷ 4) zawartość wody w drewnie kształtuje się na poziomie $\sim 30 \div 55 \text{ kg/m}^3$, co odpowiada wilgotności masowej $9 \div 16\%$, a więc drewna znajdującego się w stanie suchym ($< 15\%$) i powietrzno-suchym ($15 \div 18\%$). Ten poziom zawilgocenia drewna, nawet w miejscach o największej kondensacji wilgoci, nie sprzyja rozwojowi grzybów ani nie stanowi zagrożenia skutkami szkód mrozowych.

Podsumowanie

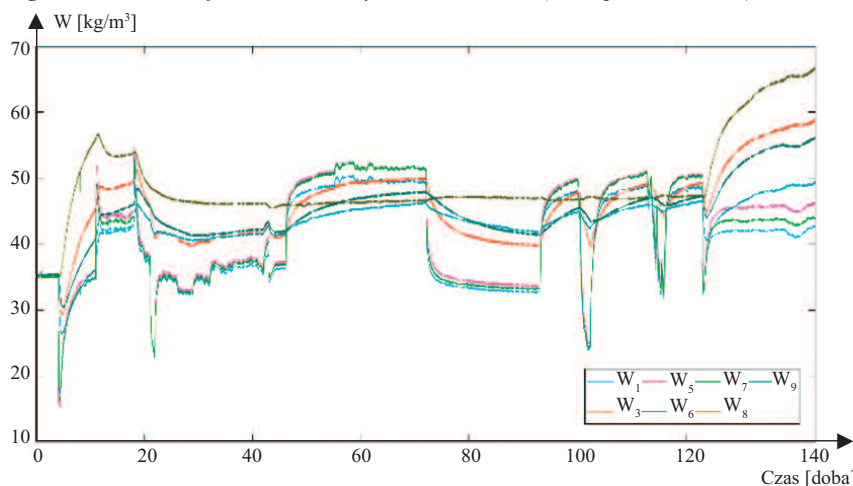
Bardzo istotnym problemem wewnętrznych przegród budowlanych jest gromadząca się w nich wilgoć, będąca wynikiem kondensacji pary wodnej, sorpcji, opadów atmosferycznych, podciągania kapilarnego itp. Stosowanie ocieplenia po wewnętrznej stronie przegród budowlanych lub w układach mieszanych będzie wiązało się z ryzykiem oddziaływania niskiej temperatury



Rys. 4. Rozkład temperatury w badanej ścianie (opis w tekście)
 Fig. 4. Temperature distribution in the tested wall (description in the text)



Rys. 5. Rozkład wilgotności względnej w badanej ścianie (opis w tekście)
 Fig. 5. Distributions of relative humidity in the tested wall (description in the text)



Rys. 6. Rozkład wilgoci wewnątrz badanej ściany W_1, W_3, W_5-W_9
 Fig. 6. Moisture distribution inside the tested wall W_1, W_3, W_5-W_9

w całym ich pierwotnym przekroju, aż do miejsc lokalizacji termoizolacji. W przypadku, gdy po pewnym czasie (może to być proces wieloletni) wzrost wilgoci w przegrodzie zostanie zahamo-

wany i ustabilizuje się na stałym poziomie, wówczas możemy mówić o właściwie dobranej metodzie oraz materiałach. W innym przypadku taki stan może doprowadzić do degradacji przegród,

szczególnie wykonanych z materiałów podatnych na wilgoć i korozję biologiczną. W obiektach historycznych i zabytkowych jest to ważne ze względu na ich unikatowość. Należy podkreślić, że takie przegrody będą technicznie sprawne i bezpieczne po zapewnieniu odpowiedniej krotności wymiany powietrza w pomieszczeniach docieplanych od wewnątrz. Najczęstszą przyczyną starzenia się obiektów budowlanych jest nie czas ich eksploatacji, lecz lekceważenie m.in. procesów fizycznych zachodzących w przegrodach, błędnie podejmowane decyzje przez osoby odpowiedzialne za te obiekty lub całkowity ich brak. Mury charakteryzują się dużą bezwładnością cieplną.

Uważamy, że można stosować warstwy docieplające od strony wewnętrznej przegród w obiektach historycznych, lecz po każdorazowym uzasadnieniu podejmowanych decyzji wynikami obliczeń oraz badań. Prowadzone przez nas badania powinny udzielić odpowiedzi na pytania dotyczące wpływu dociepleń wewnętrznych na stan materiałów budowlanych znajdujących się we wnętrzu zabytkowych przegród o bardzo niejednorodnej budowie.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. (z późn. zm.) w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [2] Antoline D, Černe K, Jagličić Z. Risk of Using Capillary Active Interior Insulation in a Cold Climate. *Energies*. 2021, <https://doi.org/10.3390/en14216890>.
- [3] Jensen NF, Bjarlov SP, Rode C, Moller EB. Hygrothermal assessment of four insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls through calibrated numerical simulations. *Build. Environ*. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107031>.
- [4] Keskküla K, Aru T, Kivistu M, Miljan M-J. Hygrothermal Analysis of Masonry Wall with Red Boards as Interior Insulation System. *Energies*. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13205252>.
- [5] Zhou X, Carmeliet J, Derome D. Influence of envelope properties on interior insulation solutions for masonry walls. *Build. Environ*. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.047>.
- [6] Bajno D. Wybrane aspekty cieplno-wilgotnościowe związane z dostosowywaniem budynków zabytkowych do eksploatacji w nowych warunkach, 61 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB „Bydgoszcz – Krynica” 20-25 września 2015 r.
- [7] Bajno D. Problemy związane z termomodernizacją budynków historycznych i zabytkowych. *Renowacje i zabytki*. 2019; 2. Kraków 2019.

Przyjęto do druku: 22.03.2023 r.