



Ochrona Zbiorów

Seria wydawnicza
Narodowego Instytutu Muzealnictwa
i Ochrony Zbiorów
oraz Muzeum Narodowego w Krakowie

02



mnk
MUZEUM
NARODOWE
W KRAKOWIE

ZARZĄDZANIE KLIMATEM W MUZEACH:
OCHRONA ZBIORÓW
I ENERGOOSZCZĘDNOŚĆ

OCHRONA ZBIORÓW

zeszyt nr:

02

.....
Seria wydawnicza
**Narodowego Instytutu Muzealnictwa
i Ochrony Zbiorów
oraz Muzeum Narodowego w Krakowie**

.....
**ZARZĄDZANIE KLIMATEM
W MUZEACH:
OCHRONA ZBIORÓW
I ENERGOOSZCZĘDNOŚĆ**

Spis treści

Wstęp, 3

Klimat w muzeum , 5

Zagrożenia obiektów drewnianych, 6

Koszty kontroli klimatu, 7

Scenariusze kontroli klimatu w Muzeum, 11

Optymalizacja kontroli klimatu w MNK, 14

Bezpieczeństwo obiektów w trakcie zmiany sposobu zarządzania klimatem – emisja akustyczna, interferometria płamkowa, 17

Energooszczędna i skuteczna ochrona obiektów w muzeum, 20

Wstęp

Podstawowym działaniem prewencyjnym zapewniającym ochronę konserwatorską zabytkowemu wyposażeniu i zbiorom jest stabilizacja wilgotności względnej oraz, dla niektórych materiałów, również temperatury we wnętrzach zabytkowych budowli lub muzeów. Niewłaściwy sposób kontroli parametrów mikroklimatycznych powietrza, bądź całkowity brak takiej kontroli, może wywołać nieodwracalne zmiany w obiektach zabytkowych, zwłaszcza tych narażonych na fizyczne uszkodzenie związane z wahaniami wilgotności względnej. Z drugiej strony ściśle kontrolowanie klimatu wewnątrz budynku jest kosztowne zarówno z punktu widzenia inwestycji w instalację systemów klimatyzacyjnych, jak i bieżącej eksploatacji tych urządzeń. Co więcej, w związku z wprowadzeniem w 2013 roku w Polsce dyrektywy Komisji Europejskiej COM(2008) 30 zakładającej do 2020 roku redukcję emisji CO₂ o 20%, należy spodziewać się, podobnie jak w innych krajach, które zaczęły wdrażać tę dyrektywę, bardzo znacznego wzrostu kosztów energii w ciągu kilku nadchodzących lat.

Nieuniknione zmiany w strukturze kosztów działania muzeów, a szczególnie prognozowany wzrost kosztów prewencji konserwatorskiej realizowanej poprzez kontrolę klimatu, są żywo dyskutowane przez środowiska muzealne. Koniecznością staje się przegląd obecnych norm konserwatorskich, ich weryfikacja i opracowanie, w oparciu o wyniki badań naukowych i profesjonalne ekspertyzy, nowych strategii ochrony zbiorów wychodzących naprzeciw oczekiwaniom społecznym, uwarunkowaniom ekonomicznym oraz nieuniknionym zmianom prawnym. Najwięcej emocji a zarazem kontrowersji, wzbudza problem energooszczędnego sposobu zapewnienia warunków mikroklimatycznych bezpiecznych dla zbiorów. Powszech-

ne w środowiskach muzealnych przekonanie, że wysokie standardy w ochronie zbiorów nie mogą być obniżane z powodu wprowadzania nowych regulacji ekonomiczno-prawnych jest ważnym impulsem do opracowania optymalnych strategii ochrony dzieł sztuki.

W poszukiwaniu najlepszej strategii zarządzania zbiorami Muzeum Narodowe w Krakowie (MNK) dokonało przeglądu swoich metod zarządzania klimatem oraz podjęło próbę określenia, w oparciu o najnowsze badania naukowe, optymalnego poziomu wahań temperatury i wilgotności w pomieszczeniach, gdzie przechowywane są obiekty wrażliwe. Podjęte działania miały charakter kompleksowy. Przeanalizowano metody realizacji wytycznych konserwatorskich dotyczących zalecanego poziomu stabilizacji temperatury i wilgotności powietrza w różnego typu budynkach i przy użyciu różnych dostępnych systemów klimatyzacyjnych. Dyskutowano również same zalecenia w odniesieniu do typu kolekcji i stanu jej zachowania.

W celu opracowania strategii ochrony zbiorów najefektywniej wykorzystującej zasoby muzeów nawiązali współpracę specjaliści z Muzeum Narodowego w Krakowie, Muzeum Narodowego w Warszawie (MNW) oraz naukowcy z Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera PAN. Ten zespół realizował dzięki grantowi Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009–2011 projekt badawczy "Zarządzanie kolekcją muzealną w oparciu o komputerowe modelowanie wpływu wahań mikroklimatu na obiekty zabytkowe". Uznając, że opracowany na podstawie przeprowadzonego programu badawczego projekt racjonalizatorski może być cennym źródłem praktycznych informacji dla innych muzeów w Polsce, Muzeum Narodowe w Krakowie we współpracy z Narodowym Insty-

tutem Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów przygotowało niniejszą broszurę. Znajdą w niej Państwo informacje na temat rzeczywistych warunków przechowywania zbiorów w największych muzeach w Polsce, analizy efektywności różnych strategii kontroli klimatu oraz zalecenia dotyczące sterowania systemami klimatyzacji w celu zoptymalizowania kosztów w stosunku do uzyskanej klasy klimatu we wnętrzu budynku. Dodatkowo

zaprezentowano, opartą na wynikach pomiaru mikrouszkodzeń obiektów, analizę zagrożeń związanych z mikroklimatem w tych pomieszczeniach, w których znajdują się wrażliwe dzieła sztuki.

Mamy nadzieję, że zawarte w tej publikacji wskazówki i analizy będą wartościową pomocą dla osób kształtujących politykę instytucji muzealnych a także wszystkich zaangażowanych w ochronę zbiorów dziedzictwa kulturowego.

Klimat w muzeum

Większość polskich muzeów mieści się w budynkach zabytkowych, nieszczelnych, o wysokim współczynniku wymiany powietrza, bez izolacji termicznej. W takich budynkach, nawet przy zastosowaniu wydajnych systemów klimatyzacyjnych, kontrola wewnętrznego klimatu jest możliwa tylko w bardzo ograniczonym stopniu.

Zarządzanie klimatem w muzeach jest zazwyczaj podporządkowane komfortowi zwiedzających i pracowników obsługi. Oznacza to ogrzewanie sal ekspozycyjnych w okresie zimowym do temperatur od 18°C do 22°C oraz ich ochładzanie (jeśli jest to technicznie możliwe) do temperatur komfortowych w okresie letnim. Działania te w zimie wywołują znaczące spadki, natomiast w lecie wzrosty poziomu wilgotności względnej powietrza.

W okresie silnych mrozów, gdy temperatura na zewnątrz spada do -20°C, ogrzanie bardzo suchego powietrza we wnętrzu budynku powoduje spadek poziomu wilgotności względnej w nienawilżanych salach i magazynach muzealnych do poziomu ok. 7–8%. Aby przeciwdziałać tak niskim poziomom wilgotności względnej, w większości muzeów nawilża się powietrze za pomocą lokalnych urządzeń lub centralnego systemu kontroli mikroklimatu. W budynkach zabytkowych działania te są tylko częściowo skuteczne: wilgotność względna nie spada poniżej poziomu 20–30%. Niepożądanym, a często występującym efektem ubocznym nawilżania powietrza w okresie zimowym jest kondensacja wilgoci na zimnych ścianach, zachodząca najczęściej za obrazami, meblami lub innymi obiektami eksponowanymi we wnętrzu.

Przechowywanie i eksponowanie kolekcji w zabytkowych budynkach stawia więc osoby

odpowiedzialne za kontrolę mikroklimatu w sytuacji wymagającej odpowiedzialnego wyważenia przeciwstawnych racji. Z jednej strony w trosce o kolekcję powinny one dążyć do utrzymania stabilnej wilgotności względnej powietrza i nie dopuszczać do zimowych przesuszeń, z drugiej jednak strony grozi to, przez doprowadzenie do kondensacji, zniszczeniem samego budynku.

Zresztą wybór szerokości pasma stabilizacji wilgotności jest często wyborem dość iluzorycznym, szczególnie że zaangażowanie nawet bardzo poważnych środków finansowych nie pozwala na utrzymanie komfortowych temperatur i równocześnie stabilnej wilgotności powietrza w nieizolowanych termicznie, szybko wentylowanych budynkach historycznych. W praktyce pytamy więc z reguły nie o to, jak uzyskać optymalne dla kolekcji warunki klimatyczne, ale w jaki sposób najtaniej i najbardziej efektywnie osiągnąć rozwiązanie kompromisowe, uwzględniając jednocześnie zabytkowy charakter budynku, jak i rodzaj eksponowanych w nim dzieł sztuki. Problemem naprawdę istotnym jest natomiast sposób realizacji wybranej strategii klimatycznej. Typowym przykładem działań nieefektywnych, realizowanych przez personel odpowiedzialny za ochronę zbiorów, jest ścisła stabilizacja poziomu wilgotności przez cały rok, podczas gdy ryzyko uszkodzenia obiektów występuje wyłącznie w czasie krótkich epizodów spadku poziomu wilgoci w okresie zimowym.

Wybór niewłaściwej metody kontrolowania klimatu może nie tylko doprowadzić do zwiększenia ryzyka uszkodzenia wrażliwych obiektów, ale także narazić muzeum na ponoszenie kosztów niewspółmiernie wysokich w stosunku do uzyskanego stopnia ochrony kolekcji.

Zagrożenia obiektów drewnianych

Drewno polichromowane należy do kategorii obiektów muzealnych najbardziej zagrożonych zniszczeniem spowodowanym zmianami poziomu wilgotności względnej i temperatury. Dlatego w praktyce muzealnej przyjmuje się, że wahania mikroklimatu, które są bezpieczne dla polichromowanego drewna, są również bezpieczne dla większości pozostałych dzieł sztuki przechowywanych w muzeach.

Drewniane obiekty polichromowane złożone są z wielu warstw materiałów higroskopijnych: drewna, kleju zwierzęcego, zaprawy klejowej i farb. Materiały te w różnym stopniu kurczą się, gdy tracą wodę, i pęcznieją, gdy ją absorbują. Badania naukowe pozwoliły ustalić, że różna odpowiedź wymiarowa zaprawy i drewnianego podłoża prowadzi do pęknięcia warstwy dekoracyjnej. W wyniku sorpcji pary wodnej z otoczenia drewno odkształca się znacznie bardziej od warstwy zaprawy, powodując jej ściskanie podczas spadków i rozciąganie podczas wzrostów poziomu wilgotności. Jeżeli odkształcenie podłoża drewnianego jest większe niż krytyczne odkształcenie warstwy zaprawy, to następuje jej pęknięcie lub odpajanie.

Groźne naprężenia mogą też wystąpić w samym drewnie, gdy jego ruch ograniczony jest zewnętrznymi więzami nałożonymi przez sztywną konstrukcję lub gdy obiekt składa się z elementów drewnianych połączonych w różnych kierunkach anatomicznych. Ograniczenie swobodnej odpowiedzi drewna może spowodować jego deformację i pęknięcie, a w konsekwencji również pęknięcie i odpajanie warstwy malarskiej.

Wieloletnie obserwacje doprowadziły do ugruntowania w międzynarodowym środowisku konserwatorskim poglądu, że stabilny mikroklimat zapewnia optymalne warunki przechowywania obiektów wrażliwych. Jednak dopiero niedawno

podjęto systematyczne badania naukowe mające określić wielkość dopuszczalnych fluktuacji klimatu. Polegają one na pomiarach, wywołanej zmianami temperatury i wilgotności względnej, odpowiedzi wymiarowej materiałów artystycznych oraz ustalaniu krytycznych poziomów odkształceń, przy których materiały te zaczynają deformować się plastycznie lub pękać. W sposób konserwatywny można określić zakres bezpiecznych fluktuacji klimatu poprzez wahania temperatury i wilgotności względnej, które nie powodują odkształceń drewna czy warstwy zaprawy wykraczających poza obszar sprężysty. Prowadzi to do wniosku, że występujące w muzeum typowe zmiany temperatury $20 \pm 5^\circ\text{C}$ oraz wahania wilgotności względnej w zakresie $50 \pm 15\%$ nie stwarzają zagrożenia dla polichromowanego drewna.

Inny sposób określenia bezpiecznych warunków przechowywania obiektów wrażliwych opiera się na koncepcji aklimatyzacji, zgodnie z którą zagrożenie nowymi uszkodzeniami fizycznymi jest bardzo niskie, o ile wahania temperatury i poziomu wilgotności w otoczeniu obiektu są mniejsze od występujących w przeszłości. Ocena zagrożeń opiera się wyłącznie na analizie historycznych danych mikroklimatycznych, dzięki czemu nie muszą być wykonywane skomplikowane pomiary i obliczenia mechanicznej odpowiedzi materiałów tworzących obiekt. Jednak podejście to może być zastosowane tylko wtedy, gdy zastane warunki klimatyczne nie powodują rozwoju uszkodzeń obiektu, tzn. gdy wpływ zmęczenia materiałów na postęp procesu niszczenia jest znikomy.

Koncepcja aklimatyzacji została wykorzystana w międzynarodowych normach dotyczących kontroli warunków środowiska we wnętrzach, w których przechowywane są wrażliwe obiekty zabytkowe (PN-EN 15757, 2012).

Przyjęcie kryterium materiałowego i aklimatyzacyjnego pozwala na ustalenie indywidualnych, dla danego zbioru obiektów, długookresowych poziomów stabilizacji z uwzględnieniem zmian rocznych oraz dopuszczalnych zakresów krótkotrwałych fluktuacji.

Mimo iż każdy drewniany obiekt polichromowany posiada niepowtarzalną oryginalną strukturę i historię (obejmującą również historię

zabiegów konserwatorskich), to badania materiałowe i analizy warunków przechowywania wskazują, że wahania wilgotności względnej powietrza w zakresie $50 \pm 15\%$ nie stwarzają zagrożenia dla obiektów dziedzictwa. Można przyjąć, że zakres ten jest bezpiecznym poziomem odniesienia dla norm określających warunki przechowywania nawet najbardziej wrażliwych dzieł sztuki.

Koszty kontroli klimatu

Wykonana w MNK i MNW analiza warunków przechowywania zbiorów miała na celu, obok określenia największych wynikających z niestabilności klimatu zagrożeń dla kolekcji, zdefiniowanie działań koniecznych do optymalizacji zarządzania klimatem w muzeum. W dwóch oddziałach MNK: Gmachu Głównym oraz Pałacu Biskupa Erazma Ciołka oraz w Gmachu Głównym MNW przeprowadzono pomiary zużycia energii wydatkowanej na utrzymanie warunków klimatycznych w pomieszczeniach wystawieniowych. Wybrane do monitorowania oddziały są reprezentatywnymi przykładami budynków, w których znajdują się zbiory muzealne w Polsce. W Gmachu Głównym MNK kontrola klimatu realizowana jest za pomocą centralnego systemu klimatyzacji, natomiast w Gmachu Głównym MNW oraz w Pałacu Biskupa Erazma Ciołka za pomocą przenośnych nawilzaczy i osuszaczy powietrza.

Gmach Główny MNK oraz Gmach Główny MNW są budynkami o podobnych rozwiązaniach architektonicznych. Przestronne, wysokie sale wystawowe, duże połączenie okien oraz ograniczona izolacja termiczna murów są wspólne dla obu budynków. Podstawowa różnica, rzutująca na poziom stabilizacji wilgotności względnej powietrza i na koszty kontroli klimatu, polega na zastosowaniu centralnego systemu klimatyzacji

w Gmachu Głównym MNK oraz lokalnych nawilzaczy powietrza w Gmachu Głównym MNW.

W 2010 roku w Gmachu Głównym MNK, w którym działa centralny system klimatyzacji, na ogrzewanie zużyto 2654 MWh (64% całkowitego rocznego zużycia energii), na chłodzenie i osuszanie powietrza zużyto 1310 MWh (32%), a na wentylację i nawilżanie 183 MWh (4%). Łączny koszt energii w 2010 roku wyniósł około 1000 000 zł, przy czym kontrola wilgotności powietrza ze względów konserwatorskich pochłonęła w przybliżeniu 1/3 tej kwoty. Warszawskie muzeum nie posiada centralnego systemu klimatyzacji, a działający w nim system chłodzenia obejmuje niewielką liczbę sal wystawowych i służy wyłącznie podnoszeniu komfortu zwiedzających w okresie letnim. W tym właśnie celu w 2010 roku w Gmachu Głównym MNW na ogrzewanie oraz chłodzenie pomieszczeń zużyto 3020 MWh, a na nawilżanie powietrza w okresie zimowym 22 MWh. Widać stąd, że ilość energii wykorzystywanej na kontrolę wilgotności dla zabezpieczenia kolekcji w Gmachu Głównym MNW nie przekracza 1% całkowitego zużycia energii w celu kontroli klimatu. Działania prewencyjne kosztują około 8000 zł, a roczny koszt ogrzewania i chłodzenia budynku Muzeum wynosi 768 000 zł.

Dla porównania analiza klimatu i zużycia energii w Pałacu Biskupa Erazma Ciołka pokazuje, że

znacznie stabilniejszy mikroklimat można uzyskać przy bardzo niewielkim nakładzie energii na klimatyzację w stosunku do energii używanej do ogrzewania dla komfortu. W 2006 roku budynek Muzeum został oddany do użytku po kompleksowym remoncie. W ramach przeprowadzonych prac poprawiono izolację termiczną ścian i okien. Grube mury oraz niewielka wymiana powietrza z otoczeniem ułatwiają kontrolę wilgotności realizowaną za pomocą przenośnych nawilżaczy i osuszaczy powietrza. W 2010 roku ilość energii zużytej na utrzymanie w tym budynku właściwej wilgotności powietrza stanowiła zaledwie 4% całkowitego zużycia energii na kontrolę klimatu.

Warunki klimatyczne oraz roczne zużycie energii na kontrolę klimatu w wybranych oddziałach MNK i MNW zebrano w tab. 1. Analiza przedstawionych w niej danych prowadzi do trzech istotnych wniosków.

1) Ograniczanie zimowych przesuszeń stawiących zagrożenie dla przechowywanych obiektów nie jest kosztowne.

Uderzający jest duży koszt energetyczny osuszania powietrza w stosunku do jego nawilżania (odpowiednio 37 kWh/m³ i 5 kWh/m³ powietrza w przypadku Gmachu Głównego MNK). Ta dysproporcja wynika z zastosowania do osuszania i nawilżania powietrza różnych procesów technologicznych: koszt wykroplenia 1 kg wody jest znacznie wyższy od kosztu jego dodania. Planując efektywną strategię ochrony zbiorów, należy więc koniecznie uwzględniać różne koszty związane z utrzymaniem dolnego i górnego ograniczenia dozwolonego pasma wilgotności względnej powietrza. Jest to ważne tym bardziej, że w większości muzeów to właśnie występujące w zimie przesuszenie powietrza jest najgroźniejsze dla przechowywanych w nich obiektów.

2) Ograniczenie intensywności wentylacji sprzyja ochronie zbiorów i redukcji kosztów.

Różnice w zużyciu energii na ogrzewanie i utrzymanie wysokiego stopnia stabilizacji wilgotności względnej w Pałacu Biskupa Erazma Ciołka w stosunku do Gmachu Głównego MNK wynikają przede wszystkim z innego tempa wentylacji w tych budynkach. W przypadku Pałacu Biskupa Erazma Ciołka wymiana powietrza odbywa się przez system wentylacji grawitacyjnej z szybkością około 0,2 wymian na godzinę. System kontroli klimatu jest więc w dużej mierze pasywny – efektywność przenośnych nawilżaczy i osuszaczy powietrza wynika z dobrej izolacji sal, w których eksponowane są zbiory. W Gmachu Głównym MNK wymiana powietrza jest znacznie wyższa: 0,7 na godzinę. System centralnej klimatyzacji przygotowuje duże ilości powietrza o zadanych parametrach mikroklimatycznych, które jest bardzo szybko dostarczane i usuwane z sal wystawowych przez system wymuszonej wentylacji. Taki system, mimo dużego zużycia energii, jest nie tylko mało wydajny, ale może również prowadzić do destabilizacji mikroklimatu wewnątrz budynku w przypadku szybko zmieniających się warunków zewnętrznych.

3) Wysokie koszty kontroli klimatu w Gmachu Głównym MNK nie są związane z działaniami konserwatorskimi, lecz wynikają z dążenia do zapewnienia komfortu zwiedzającym.

Kosztowny proces osuszania i schładzania powietrza w Gmachu Głównym MNK powoduje przede wszystkim obniżenie maksymalnej temperatury w lecie do komfortowego poziomu 24°C (w porównaniu z 28°C w Gmachu Głównym MNW i Pałacu Biskupa Erazma Ciołka). Podniesienie dolnego pasma stabilizacji wilgotności w stosunku do Gmachu Głównego MNW jest

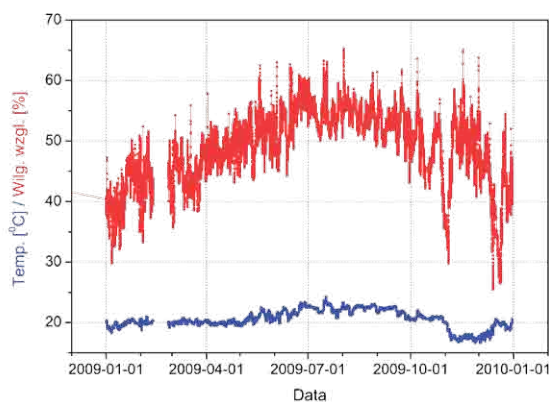
również zauważalne, ale jak to było dyskusyjne powyżej, jest realizowane stosunkowo niskim kosztem. Oznacza to, że o wysokim koszcie klimatyzacji w Gmachu Głównym MNK decyduje dążenie do zapewnienia komfortu zwiedzającym a nie względy konserwatorskie.

Podsumowując, można stwierdzić, że poziom ochrony zbiorów oraz koszt podejmowanych w tym celu działań zależy w dużej mierze od

wyboru odpowiedniej strategii zarządzania klimatem. Wybór realistycznych zakresów dopuszczalnych wahań temperatury i wilgotności względnej oraz opracowanie, adekwatnych dla budynku oraz znajdujących się w nim urządzeń klimatyzacyjnych, procedur kontroli klimatu pozwala zoptymalizować koszty ponoszone przez muzeum w stosunku do wybranego poziomu ochrony przechowywanych dzieł sztuki.

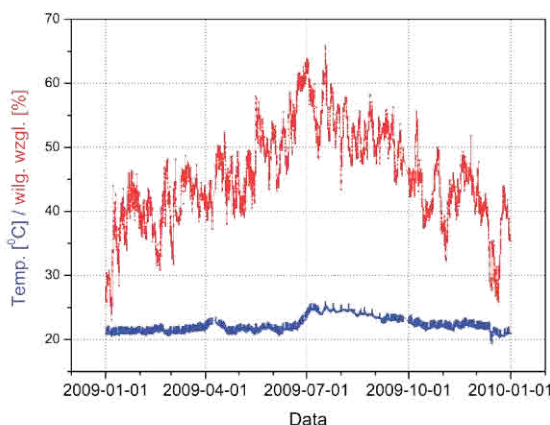
	Gmach Główny MNK	MNW	Pałac Biskupa Erazma Ciołka MNK
Średnia wilg. wzgl.	38 – 55	31 – 60	46 – 61
Chwilowa wilg. wzgl.	26 – 65	21 – 68	34 – 69
Średnia temp. w lecie	23°C	26°C	27°C
Najwyższa temp. w lecie	24°C	28°C	28°C
ilość wymian powietrza w ciągu godziny	0,7	0,4	0,2
Zużycie energii na kontrolę klimatu jednego m ³ powietrza	42 kWh/m ³ w tym: nawilżanie: 5 kWh/m ³ osuszanie + chłodzenie : 37 kWh/m ³	1 kWh/m ³	0,8 kWh/m ³

Tabela 1. Warunki klimatyczne oraz roczne zużycie energii na kontrolę klimatu w wybranych oddziałach MNK i MNW.



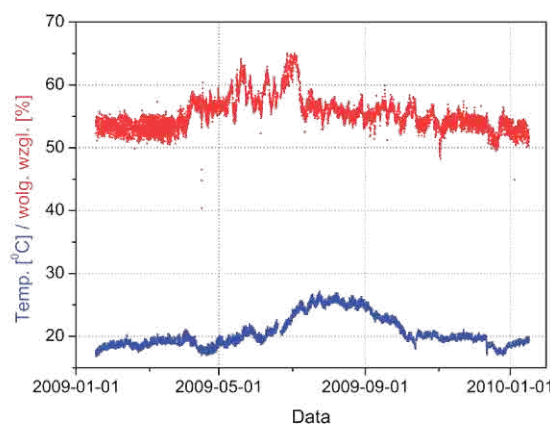
	kWh	%
Ogrzewanie	2 653 974	64 %
Nawilżanie	183 254	4 %
Chłodzenie / osuszanie	1 309 513	32 %

Muzeum Narodowe w Krakowie –
Gmach Główny



	kWh	%
Ogrzewanie	2 696 355	89 %
Chłodzenie	324 003	11 %
Nawilżanie	22 111	1 %

Muzeum Narodowe w Warszawie –
Gmach Główny



	kWh	%
Ogrzewanie	70 723	96 %
Nawilżanie / osuszanie	2 917	4 %

Muzeum Narodowe w Krakowie –
Pałac Biskupa Erazma Ciołka

Rys. 1. Warunki klimatyczne oraz roczne zużycie energii na kontrolę klimatu w wybranych oddziałach MNK i MNW.

Scenariusze kontroli klimatu w Muzeum

Utrzymanie temperatury i wilgotności względnej w muzeum w wąskim, określonym przez wytyczne konserwatorskie, paśmie wymaga ponoszenia stałych, dużych wydatków na pokrycie kosztów zużywanej energii, serwisowania urządzeń klimatyzacyjnych oraz pracy przeszkolonego personelu.

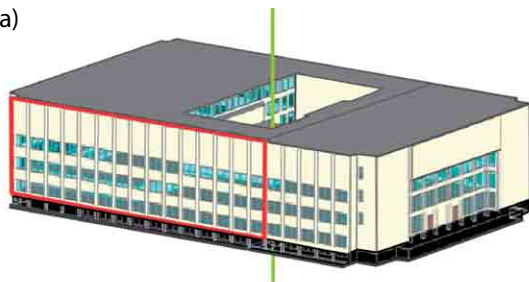
Audyt energetyczny przeprowadzony w muzeach Instytucji Smithsona w USA pokazał, że zużycie energii znacznie rośnie przy zawężeniu zakresu dopuszczalnych wahań wilgotności względnej, np. zawężenie pasma dozwolonych wahań z 10% do 5% wymaga dwukrotnego zwiększenia zużycia energii potrzebnej na kontrolę wilgotności względnej. Szacuje się, że poprawienie klimatu o jedną kategorię w skali zaproponowanej w wytycznych ASHRAE spowoduje podwojenie kosztów związanych z jego kontrolą. Ponadto, w pełnej analizie zysków i kosztów należy uwzględnić także wydatki inwestycyjne i inne koszty ukryte związane z zajmowaną przez urządzenia powierzchnią w budynkach. Opracowanie optymalnej metody kontroli klimatu w muzeum pozwala więc na zrationalizowanie wydatków związanych z prewencyjną ochroną konserwatorską i w związku z tym przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa kolekcji szczególnie, jeśli zaoszczędzone środki finansowe pozostają w budżetach muzealnych działów konserwacji.

Opracowanie optymalnego scenariusza kontroli klimatu wymaga przeanalizowania kosztów i wydajności procesów technologicznych (ogrzewania, chłodzenia, nawilżania i osuszania), za pomocą których steruje się poziomami wilgotności i temperatury w budynku, oraz uwzględnienia

właściwości termo- i higroizolacyjnych samego budynku. Przeprowadzona analiza musi brać pod uwagę również specyfikę klimatu zewnętrznego oraz sposób użytkowania budynku (liczbę pracowników i odwiedzających, różne strefy ogrzewania i kontroli wilgotności w budynku).

W ramach prowadzonego projektu badawczego przeanalizowano różne scenariusze kontroli klimatu w Gmachu Głównym MNK, zakładając, że jest on dobrym reprezentantem dużej klasy budynków muzealnych w Polsce. Obliczenia i symulacje wykonano we współpracy z naukowcami z Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie przy użyciu programu WUFI®plus przeznaczonego do analiz ciepłno-wilgotnościowych budynków.

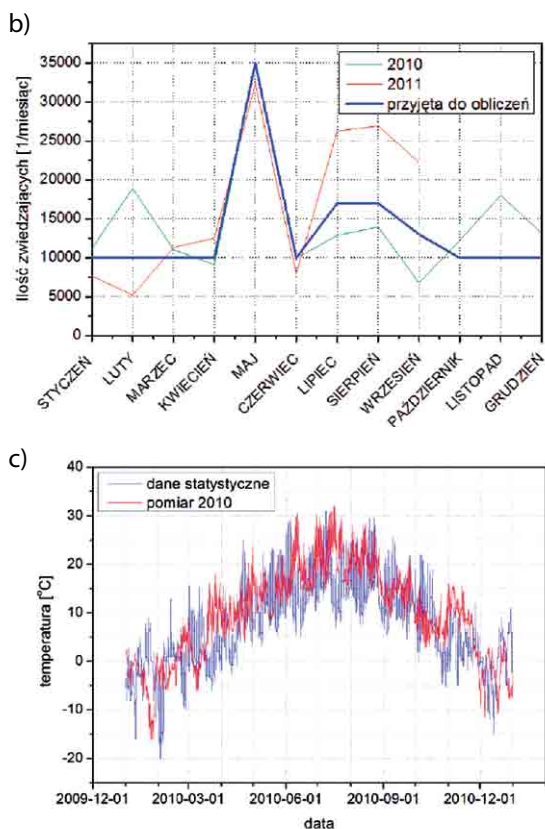
a)



Konstrukcja ścian i przegród na podstawie audytu budowlanego

Trzy strefy: ogrzewana, częściowo ogrzewana piwnica oraz nieogrzewany wjazd do budynku

Kubatura budynku: 76 219 m³, powierzchnia: 19 500 m², objętość powietrza: 68 601 m³



Rys. 2. Zestaw danych do symulacji programem WUFI[®]plus;

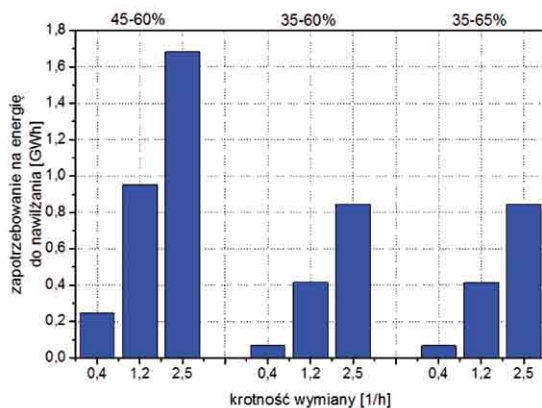
- a) trójwymiarowy model budynku,
 b) liczba zwiedzających w kolejnych miesiącach na przestrzeni dwóch lat,
 c) porównanie użytej w obliczeniach temperatury zewnętrznej (klimat statystyczny) z wynikami pomiaru w 2010 roku.

Przeanalizowano wielkość zużycia energii dla trzech pasm dopuszczalnej wilgotności względnej: a) 45–60%, b) 35–60%, c) 35–65% oraz trzech różnych szybkości wentylacji budynku: d) 0,4,

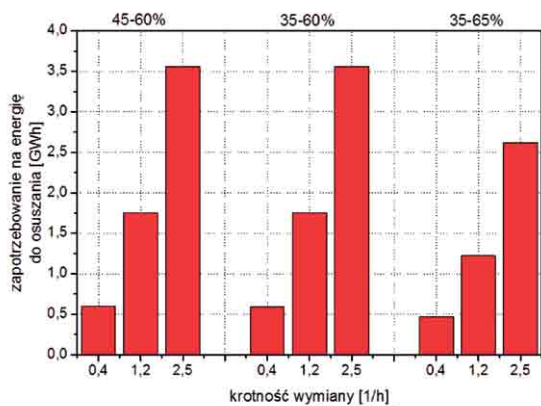
e) 1,2, f) 2,5 wymian na godzinę. Ponadto w każdej symulacji przyjęto dopuszczalny zakres temperatur od 19°C do 25°C. W efekcie przeprowadzone symulacje obejmowały dziewięć różnych scenariuszy.

Ich wynikiem jest kompleksowa analiza zużycia energii w Gmachu Głównym MNK uwzględniająca różne poziomy kontroli wilgotności i sposoby wentylacji sal wystawowych. Otrzymane rezultaty są zgodne z pomiarami zużycia energii z dokładnością do 6%, co po uwzględnieniu trudności w określeniu budowy części przegród budynku i uproszczeń geometrycznych zastosowanych w symulacji dowodzi, że przyjęty model może być z powodzeniem stosowany do przewidywania kosztów planowanych zmian strategii kontroli klimatu.

Zależność ilości zużywanej energii na osuszanie i nawilżanie powietrza w różnych scenariuszach kontroli klimatu przedstawiono na rys. 3 i 4.

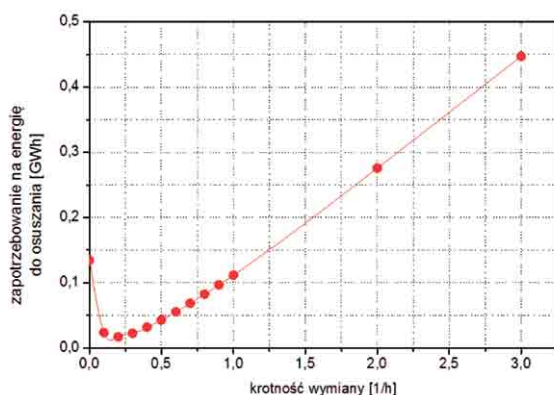


Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię do nawilżania powietrza w Gmachu Głównym MNK w zależności od docelowego zakresu wilgotności względnej powietrza oraz krotności wymiany.

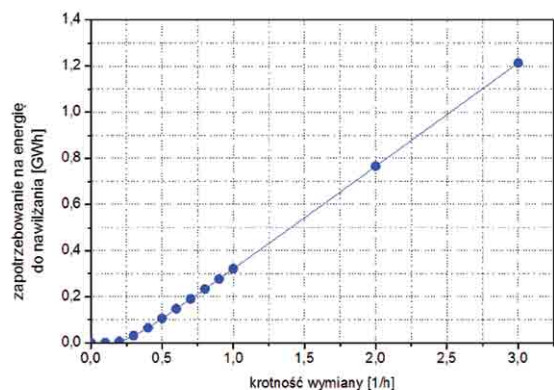


Rys. 4. Zapotrzebowanie na energię do osuszania powietrza w Gmachu Głównym MNK w zależności od docelowego zakresu wilgotności względnej powietrza oraz krotności wymian.

Zgodnie z oczekiwaniami, koszty energetyczne nawilżania rosną, gdy podwyższamy dolną granicę pasma stabilizacji wilgotności względnej, a koszty osuszania rosną, gdy obniżamy górną granicę tego pasma. Ponadto wyraźnie widać dużą zależność kosztów obu tych procesów od szybkości wentylacji. Dokładna analiza przedstawiona na rys. 5. i 6. pokazuje, że obniżenie szybkości wymiany powietrza w Gmachu Głównym MNK do 0,3 na godzinę jest optymalne z punktu widzenia oszczędności energii. Ograniczeniem może być jedynie mierzony zawartością CO₂ spadek jakości zapachowej powietrza w przypadku, gdy znacznie wzrasta liczba osób przebywających w salach wystawowych. Przeprowadzone obliczenia pokazują, że średni poziom CO₂ w Gmachu Głównym MNK dla wymiany powietrza 0,3 na godzinę nie przekraczały zalecanych poziomów, jednak dla komfortu zwiedzających w przypadku ograniczania szybkości wentylacji należy zawsze rozważyć zainstalowanie czujników poziomu CO₂ pozwalających ocenić sytuację i czasowo zwiększyć szybkość wentylacji, jeśli jest to konieczne.



Rys. 5. Zapotrzebowanie na energię do nawilżania w funkcji szybkości wentylacji budynku.



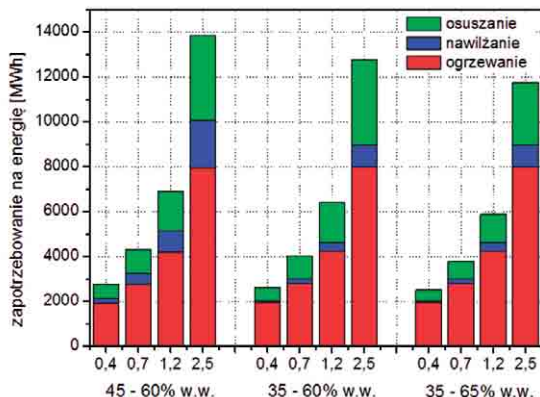
Rys. 6. Zapotrzebowanie na energię do osuszania w funkcji szybkości wentylacji budynku.

Przeprowadzone symulacje objęły również analizę kosztów ogrzewania i ochładzania powietrza dla rozważanych scenariuszy kontroli klimatu. Koszty tych działań są praktycznie niezależne od wybranego pasma stabilizacji wilgotności względnej. Można je zmniejszać jedynie poprzez ograniczanie szybkości wentylacji lub inwestycje polegające na poprawie izolacji termicznej budynku.

Pełne zestawienie kosztów energetycznych rozważanych scenariuszy kontroli klimatu pokazano na rys.7. Na jego podstawie można stwierdzić że czynniki wpływające na zużycie energii w muzeach to

- szybkość wentylacji – jej ograniczenie może przynieść oszczędności nawet **kilkudziesięciu procent** w stosunku do sumarycznych kosztów kontroli klimatu,
- osuszanie – podwyższenie górnego poziomu dopuszczalnych wahań wilgotności względnej pozwala zaoszczędzić **kilkanaście procent** w stosunku do sumarycznych kosztów kontroli klimatu,
- nawilżanie – obniżenie dolnego poziomu dopuszczalnych wahań wilgotności względnej

pozwała zaoszczędzić **kilka procent** w stosunku do sumarycznych kosztów kontroli klimatu.



Rys. 7. Zestawienie kosztów energetycznych różnych scenariuszy kontroli klimatu.

Optimalizacja kontroli klimatu w MNK

Wdrażanie racjonalnych rozwiązań dotyczących kontroli klimatu wymaga podjęcia wielu decyzji odnoszących się do długofalowych celów działalności muzeum. Szczególnie ważne jest, aby realizowana strategia kontroli opierała się na precyzyjnym rozpoznaniu potrzeb przechowywanej kolekcji oraz uwzględniała rzeczywiste finansowe i techniczne możliwości instytucji. Przede wszystkim optymalna strategia kontroli klimatu w muzeum powinna uwzględniać:

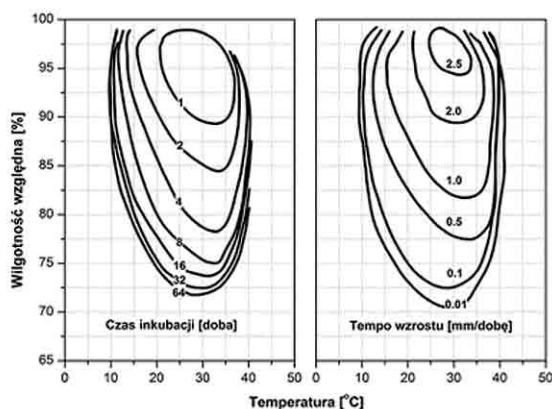
- bezpieczeństwo przechowywanych dzieł sztuki
- komfort zwiedzających i personelu
- ochronę środowiska naturalnego i energooszczędność (względny etyczny i ekonomiczny)

Na analizie tych trzech zagadnień opierają się przedstawione poniżej rekomendacje dotyczące kontroli klimatu w Gmachu Głównym MNK.

Analiza zagrożeń związanych z klimatem wewnątrz muzealnych:

I. Zagrożenia biologiczne

Rozwój pleśni i grzybów pleśniowych stanowiących poważne zagrożenie dla obiektów wykonanych z materiałów organicznych może być ograniczony lub całkowicie zatrzymany poprzez utrzymywanie wilgotności względnej powietrza **poniżej poziomu 75%**. Dodanie 10-procentowego marginesu bezpieczeństwa oznacza, że wilgotność względna nie powinna przekraczać 65%.



Rys. 8. Wzrost grzybów pleśniowych – poziom krytyczny wilgotności względnej 75% (źródło: Sedlbauer K. et al. *Mold growth prediction by computational simulation*, ASHRAE conference IAQ, San Francisco).

II. Zagrożenia chemiczne

Poziom zanieczyszczeń i stężenie aktywnych związków chemicznych wewnątrz muzeum są wprost proporcjonalne do ich stężenia na zewnątrz. Ilość niepożądanych substancji przedostających się do wnętrza budynku może być ograniczona przez **zmniejszenie szybkości wentylacji**. Dodatkowym efektem ograniczenia wentylacji jest wydłużenie okresu używalności filtrów węglowych i przeciwpyłowych stosowanych w kanałach wentylacyjnych.

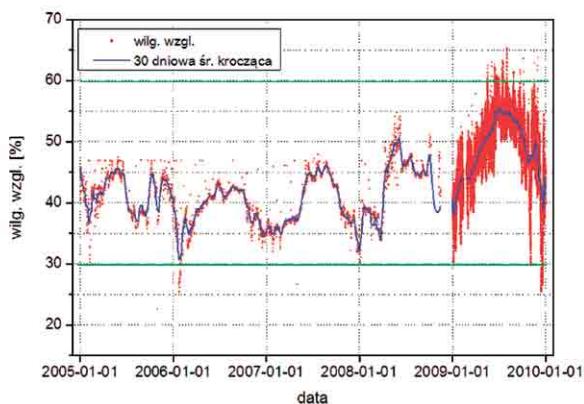
III. Zagrożenie uszkodzeniami fizycznymi

Bezpieczne zakresy wahań wilgotności względnej w otoczeniu wrażliwych obiektów higroskopijnych można określać, opierając się na badaniach odpowiedzi obiektów na zmienne warunki otoczenia lub na analizie warunków, w jakich obiekty były przechowywane.

Badania materiałowe oraz oparte na nich matematyczne symulacje wpływu niestabilności klimatu na wrażliwe obiekty drewniane pozwalają określić bezpieczne zakresy wahań wilgotności względnej powietrza w otoczeniu

obiektu na $\pm 15\%$. Dla średniego poziomu rocznego równego 50% oznacza to dozwolone pasmo fluktuacji pomiędzy 35% a 65% wilgotności względnej.

Natomiast zgodnie z koncepcją aklimatyzacji stanowiącą podstawę normy polskiej i europejskiej PN-EN15757: 2012 zalecającą metodologię określania klimatu dla obiektów wrażliwych, zaburzenia wilgotności względnej wywołane realizacją wybranej strategii kontroli klimatu powinny mieścić się w waniach lokalnego mikroklimatu, do których obiekty zaadaptowały się w przeszłości. Poniżej na rys. 9. pokazano zmiany wilgotności względnej w Gmachu Głównym MNK w ciągu pięciu kolejnych lat – od 2005 do 2009 roku. Jeśli przyjmujemy, że dla przechowywanych w gmachu Muzeum obiektów charakterystyczny czas odpowiedzi na zmiany wilgotności względnej wynosi 30 dni, to zarejestrowane w przeszłości wahania lokalnego klimatu określone 30-dniową średnią kroczącą będą mieściły się w granicach **30–60% wilgotności względnej**. Przyjęcie krótszego czasu odpowiedzi dodatkowo poszerzy ten zakres.



Rys. 9. Wilgotność względna w Gmachu Głównym MNK w ciągu pięciu kolejnych lat – od 2005 do 2009 roku.

Analiza ekonomiczna

Biorąc pod uwagę bardzo dużą różnicę w kosztach nawilżania i osuszania powietrza, należy przyjąć, że z ekonomicznego punktu widzenia nie warto oszczędzać, ograniczając nawilżanie w muzeum. Przeciwnie, tam gdzie to jest technicznie możliwe, należy przeciwdziałać zimowym spadkom wilgotności względnej. Centralny system klimatyzacji w Gmachu Głównym MNK został zmodernizowany na przełomie 2008 i 2009 roku i, jak pokazano na rys. 9. jest w stanie utrzymać 30-dniową średnią wilgotności względnej powietrza powyżej 35% w ciągu całego roku. W związku z niskimi kosztami nawilżania, mimo iż we wcześniejszych okresach wilgotność rokrocznie spadała poniżej poziomu 35%, można przyjąć tę wartość jako dolne ograniczenie pasma dozwolonej wilgotności w Gmachu Głównym MNK.

Równocześnie, z powodu wysokich kosztów osuszania, za górne ograniczenie pasma dozwolonej wilgotności należy przyjąć najwyższą bezpieczną wartość wilgotności względnej powietrza. Ograniczeniem takim jest ryzyko ataku biologicznego występujące powyżej 65% wilgotności względnej.

Analiza komfortu

Analiza komfortu dotyczy przede wszystkim temperatury i wentylacji w muzeum. Wartości temperatury w miejscu pracy określone są precyzyjnie przepisami prawa pracy i, o ile nie ma możliwości różnicowania temperatur w pomieszczeniach, w których pracują oraz nie pracują ludzie, trzeba się do nich bezwzględnie stosować. Należy jednak pamiętać, że obniżanie

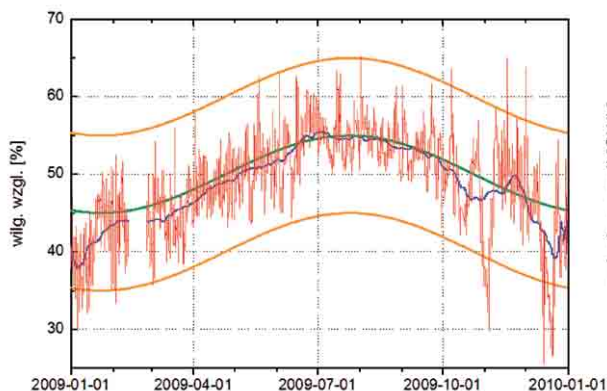
temperatury jest bardzo skutecznym sposobem podwyższania wilgotności względnej powietrza (obniżenie temperatury o 3°C podnosi wilgotność względną o około 10%) i może stanowić ważną procedurę awaryjną w przypadku niewydolności systemów nawilżania w muzeum. Jeśli chodzi o chłodzenie w okresie letnim, to jest ono niewątpliwie korzystne dla podniesienia komfortu zwiedzających i personelu, obojętne z punktu widzenia ochrony zbiorów i równocześnie bardzo kosztowne.

System wentylacji w muzeum powinien dostarczać takiej ilości świeżego powietrza, aby przebywający w budynku ludzie czuli się komfortowo. Jakość zapachową powietrza określa się na podstawie występującego w nim poziomu CO₂. Przykładem ilościowego ujęcia pojęcia komfortu związanego z wentylacją pomieszczeń jest amerykańska norma ASTM D6245 podająca poziom CO₂, przy którym 20% ankietowanych opisuje powietrze jako uciążliwe zapachowo. Przeprowadzone w Gmachu Głównym MNK pomiary ilości CO₂ pozwoliły określić w oparciu o tę normę średni poziom wymaganej wentylacji budynku na **0,3–0,4 wymiany na godzinę**.

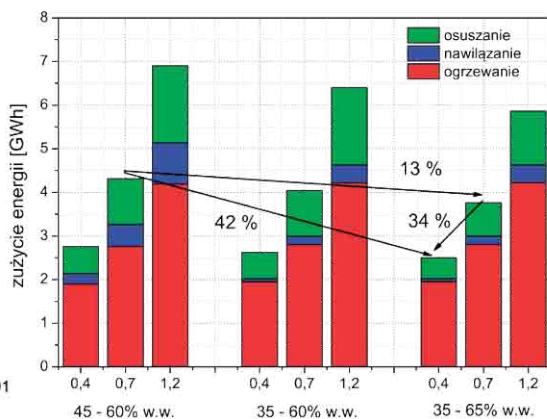
Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy opracowano następujące wytyczne dla klimatu w Gmachu Głównym MNK:

- intensywności wentylacji: 0,4/h, optymalnie sterowana poziomem CO₂,
- wilgotność względna powietrza: utrzymywana w paśmie 35 – 65 %,
- temperatura: utrzymywana w paśmie 18 – 25°C.



Rys. 10. Wynik praktycznego zastosowania strategii opracowanej dla Gmachu Głównego MNK na przykładzie danych z 2009 roku.



Rys. 11. Przewidywane oszczędności związane z wprowadzeniem nowej strategii kontroli klimatu w Gmachu Głównym MNK.

Bezpieczeństwo obiektów w trakcie zmiany sposobu zarządzania klimatem – emisja akustyczna, interferometria plamkowa

Zaproponowane w ramach nowej strategii kontroli klimatu pasmo stabilizacji wilgotności względnej nie odbiega od typowych warunków panujących w monitorowanych galeriach Gmachu Głównego MNK, jednak zastosowanie nowej metody stabilizacji może prowadzić do zwiększenia krótkookresowych fluktuacji lub przesunięcia wartości długookresowych średnich wilgotności względnej. Dlatego ważnym elementem wprowadzania nowej strategii kontroli mikroklimatu jest ocena ryzyka fizycznego uszkodzenia zabytkowych obiektów. Ocena wpływu wahań klimatu na tempo rozwoju uszkodzeń wrażliwych obiektów zabytkowych została wykonana za pomocą wysokoczułych nieniszczących metod pomiarowych: emisji akustycznej i interferometrii plamkowej.

Mikropęknięcie drewna – emisja akustyczna

Monitorowanie rozwoju mikrouszkodzeń obiektów drewnianych za pomocą metody emisji

akustycznej polega na analizie fal dźwiękowych powstających podczas różnych procesów niszczących zachodzących w strukturze badanego materiału. W Gmachu Głównym MNK pomiary przeprowadzono na szafie wrocławskiej ekspozycyjnej w sali 202 w Galerii Rzemiosła Artystycznego. Jest to masywny mebel o skomplikowanej konstrukcji, z wyraźnymi uszkodzeniami wywołanymi przez zmiany wilgotności względnej występujące w przeszłości w jego otoczeniu. System pomiarowy zastosowany do monitorowania szafy składa się z dwóch, umieszczonych na przeciwległych ścianach szafy, szerokopasmowych różnicowych czujnikach Emisji Akustycznej, działających w trybie antykorelacji. Zastosowana procedura antykorelacyjna umożliwia znaczną redukcję szumu pochodzącego od zaburzeń elektrycznych i trudnych do przewidzenia (tym bardziej kontrolowania) zdarzeń występujących w galerii. System pomiarowy przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Po lewej: XVIII-wieczna. szafa wrocławska eksponowana w sali 202 w Galerii Rzemiosła Artystycznego w Gmachu Głównym MNK, po prawej: antykorelacyjny układ do pomiaru emisji akustycznej zamontowany wewnątrz szafy.

Analiza wyników monitorowania emisji akustycznej polega na określaniu czasowych korelacji pomiędzy poziomem mierzonego sygnału a fluktuacjami klimatu rejestrowanymi w pobliżu obiektu. Ocena zagrożenia opiera się więc na ustaleniu bezpośredniego związku pomiędzy obserwowanym procesem mikropęknięcia materiału a wywołującymi je fluktuacjami wilgotności względnej o różnych amplitudach i długościach trwania. Zastosowana metoda umożliwia długotrwały pomiar kumulujących się uszkodzeń, a przeprowadzona analiza statystyczna – przewidywanie poziomu uszkodzeń dla nowej strategii kontroli klimatu.

Wyniki przeprowadzonych analiz:

- Wyznaczenie zależności między rozwojem długości pęknięć a cechami klimatu

Analiza przeprowadzona dla szafy wrocławskiej pokazuje, że pęknięcie drewna wywołane jest fluktuacjami wilgotności nie dłuższymi niż dwa tygodnie, gdy dwutygodniowa średnia wilgotność spada poniżej 40%.

- Ocena strategii kontroli klimatu z punktu widzenia rozwoju uszkodzeń w obiekcie referencyjnym

Warunki klimatyczne panujące w Galerii Rzemiosła Artystycznego powodują wzrost długości monitorowanych pęknięć ścian szafy o 0,4 mm / rok.

Zaproponowana energooszczędna strategia kontroli klimatu nie spowoduje zwiększenia zagrożeń dla monitorowanego obiektu.

Odspajanie warstw dekoracyjnych – interferometria plamkowa

Interferometria plamkowa (ang. *Digital Speckle Pattern Interferometry – DSPI*) jest odmianą interferometrii holograficznej opartej na analizie światła laserowego rozproszonego na optycznie chropowatej powierzchni. W procesie interferencji biorą udział dwie wiązki laserowe: pierwsza oświetla badaną powierzchnię a po odbiciu interferuje z drugą tzw. wiązką odniesienia. Wynik interferencji rejestrowany jest za pomocą kamery. Analiza powstających prążków pozwala zidentyfikować miejsca, w których występują defekty (nieregularności) powierzchni, takie jak pęcherze

pod warstwą dekoracyjną, czy mikropęknięcia. Wzbudzenie powierzchni następuje przez jej ogrzanie – wtedy rejestruje się przestrzenny rozkład odkształceń wywołany niejednorodnościami w rozkładzie temperatury, lub przez użycie fali dźwiękowej – wtedy odspojone części obiektu wibrują pod wpływem fali wymuszającej, natomiast nieodspojone pozostają nieruchome.

Metoda jest nieinwazyjna i bezkontaktowa. Pozwala z bardzo dużą precyzją rejestrować stan zachowania powierzchni dzieła sztuki, a uzyskane za jej pomocą mapy defektów warstw dekoracyjnych mogą służyć jako punkt odniesienia w ocenie uszkodzeń wywołanych wahaniami klimatu.



Rys. 13. Interferometr plamkowy podczas wykonywania pomiaru.

Taka analiza, wykonana na powstałym około 1500 roku obrazie tablicowym wzmocnionym parkietem wykazała, że klimat w Pałacu Biskupa Erazma Ciołka nie spowodował w przeciągu

około dwóch lat rozwoju istniejących uszkodzeń warstwy dekoracyjnej. Metoda może więc być podstawą rekomendacji dotyczącej warunków przechowywania cennych dzieł sztuki.

Energooszczędna i skuteczna ochrona obiektów w muzeum

Mimo iż ograniczanie nadmiernego zużycia energii koniecznej do kontroli mikroklimatu leży w żywotnym interesie instytucji kultury, jest problemem rzadko podejmowanym przez polskie muzea.

Opracowanie i wdrożenie planu energooszczędnej kontroli warunków ekspozycji i przechowywania zbiorów wymaga ścisłej i stałej współpracy różnych działów muzeum. W praktyce najczęściej współpraca ta ogranicza się do określenia przez konserwatorów wytycznych klimatycznych, które następnie wdrażane są przez pracowników działu technicznego. Tymczasem wyzwania stojące przed służbami odpowiedzialnymi za zapewnienie odpowiedniej ochrony zbiorów mają charakter interdyscyplinarny. Wymagają zrozumienia podstaw procesów technologicznych związanych z kontrolą klimatu przez konserwatorów oraz zdobycia ogólnej wiedzy o zagrożeniach klimatycznych dla zbiorów przez pracowników odpowiedzialnych za kontrolę klimatu.

W niniejszej broszurze przedstawiliśmy strategię ochrony zbiorów zrealizowaną we współpracy z działem konserwacji i działem technicznym Muzeum Narodowego w Krakowie, z pomocą naukowców z Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni im. Jerzego Habera PAN oraz Uniwersytetu Rolniczego. Rekomendacje zaproponowane dla Gmachu Głównego MNK (przedstawione na str. 16) mogą być traktowane jako ogólne zalecenia dla muzeów mieszczących się w budynkach historycznych wyposażonych w centralny system klimatyzacyjny. Proponujemy również, by pieniądze zaoszczędzone w wyniku wprowadzenia nowej strategii kontroli klimatu zostały przeznaczone na inne działania związane z ochroną zbiorów.

Możliwość radykalnej poprawy efektywności zarządzania klimatem pojawia się podczas remontowania budynków istniejących, bądź przystosowywania nowych obiektów do potrzeb muzeów. Dobór właściwych zakresów sterowania temperaturą i wilgotnością powietrza oraz metod przygotowania powietrza o wybranych parametrach może zwiększyć bezpieczeństwo kolekcji i jednocześnie znacząco obniżyć koszty funkcjonowania muzeum. Niestety często zdarza się, że niewłaściwa ocena potrzeb skutkuje instalacją bardzo skomplikowanych, wysoce wydajnych systemów klimatyzacyjnych, których koszt eksploatacji przekracza bieżące możliwości finansowe muzeów. W takich przypadkach zarówno środki inwestycyjne, jak i przestrzeń przeznaczona na maszynownie i centrale klimatyczne są wykorzystane nieefektywnie. Aby uniknąć takiej sytuacji, wprowadzenie nowej strategii kontroli klimatu powinno być poprzedzone analizą, której najważniejsze elementy zestawiono poniżej.

Zalecenia dla nowo projektowanych i remontowanych muzeów

Przystępując do przygotowania inwestycji należy:

- rozważyć potrzebę wprowadzenia systemu kontroli klimatu. Gdy uzasadnieniem prowadzonej inwestycji jest poprawienie ochrony zbiorów muzealnych trzeba zaplanować docelowe pasma stabilizacji temperatury i wilgotności względnej powietrza w odniesieniu do istniejących warunków klimatycznych. Pomocne wskazówki można znaleźć na przykład w poświęconym galeriom, muzeom, bibliotekom i archiwom rozdziale wytycznych opublikowanych przez Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Wentylacji ASHRAE. Wytyczne określają pięć klas ochrony zbiorów – AA, A, B, C, D. Istotne jest, aby ograniczyć planowaną poprawę klasy klimatu maksymalnie o dwie kategorie. Na przykład jeśli w danym muzeum klimat pasuje się w kategorii D, to rozsądne wydaje się dążenie do kategorii C lub maksymalnie B. W większości wypadków taka procedura wyboru klimatu docelowego pozwala na znaczącą poprawę bezpieczeństwa obiektów, a jednocześnie chroni muzeum przed ponoszeniem nieuzasadnionych kosztów związanych z instalacją i eksploatacją zbyt wydajnych systemów kontroli klimatu.

Wytyczne ASHRAE określają także klasę kontroli klimatu, który może być osiągnięty w różnych typach budynków (również zabytkowych) co pozwala na efektywne dopasowanie wymogów związanych z ochroną zbiorów dla indywidualnych muzeów;

- wykonać analizę kosztów instalacji a zwłaszcza eksploatacji nowych systemów klimatyzacyjnych w długofalowej perspektywie. Analiza oprócz kosztów energii powinna brać pod uwagę inne koszty eksploatacyjne (np. wydatki związane z zakupem i wymianą filtrów eliminujących zanieczyszczenia zewnętrzne wprowadzane przez wentylację mechaniczną).

Na etapie realizacji inwestycji:

- opracować procedury sterowania systemem kontroli klimatu zmierzające do obniżenia zużycia energii, np. nocne obniżenie temperatury, sterowanie prędkością wentylacji w zależności liczby użytkowników mierzonej poziomem CO₂ itp.,
- zainstalować mierniki energii monitorujące działanie systemu kontroli klimatu.

Po wykonanej inwestycji:

- monitorować na bieżąco zużycie energii przez zainstalowane systemy klimatyczne oraz przygotowywać coroczne raporty.

Zalecenia Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji (ASHRAE) w części dotyczącej wilgotności względnej, parametru szczególnie istotnego w ochronie drewna polichromowanego.

Pasma krótkookresowych fluktuacji i dopuszczalnej zmiany parametrów mikroklimatu w cyklu rocznym dzielą się na sześć klas stabilizacji mikroklimatu. Dla każdej klasy podano poziom zagrożenia obiektów.

Długookresowy poziom wilgotności względnej – 50% lub historyczna średnia roczna.

Klasa stabilizacji mikroklimatu	Pasmo krótkookresowych fluktuacji	Zmiana poziomu w cyklu rocznym	Zagrożenia obiektów uszkodzeniami fizycznymi
AA stabilizacja precyzyjna, pełna klimatyzacja pomieszczeń	±5%	brak	Brak dla większości obiektów i obrazów
A stabilizacja precyzyjna, ale możliwy ograniczony cykl roczny	±5%	+10% w lecie, -10% w zimie	Niewielkie dla obiektów o wysokiej wrażliwości, brak dla większości obiektów i obrazów
	±10%	brak	
B stabilizacja z możliwym cyklem rocznym	±10%	+10% w lecie, -10% w zimie	Umiarkowane dla obiektów o wysokiej wrażliwości, niewielkie dla większości obiektów i obrazów
C zapobiega wszelkim znaczącym zagrożeniom	przez cały rok między 25% a 75%		Wysokie dla obiektów o wysokiej wrażliwości, umiarkowane do niewielkiego dla większości obiektów i obrazów
D zapobiega zawilgoceniu	poniżej 75%		Wysokie dla większości obiektów i obrazów w przypadku spadków wilgotności względnej, ale unika się odspojen i deformacji spowodowanych wysoką wilgotnością względną oraz ataku pleśni.

O Instytucie

Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów jest instytucją kultury powołaną przez Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego dnia 1 marca 2011 roku.

Instytut gromadzi i upowszechnia wiedzę o muzeach i zbiorach publicznych, wyznacza standardy w muzealnictwie, wspomaga kulturę zarządzania w muzeum, wspiera edukację społeczną o wartości dziedzictwa kulturowego, podnosi poziom ochrony dzieł gromadzonych w muzeach.

Tworzymy nowoczesną i kompetentną instytucję kultury zachęcającą do współpracy tak środowiska zawodowo związane z muzeami, jak i wszystkich, którym bliskie jest budowanie nowoczesnego muzealnictwa w Polsce. Chcemy stać się forum wymiany myśli i doświadczeń muzealników, ale również przedstawicieli świata nauki, sztuki i biznesu, którzy podobnie jak my postrzegają muzea jako instytucje o ogromnym potencjale twórczym i wpływie na zmiany społeczne.

Zapraszamy do współpracy i wymiany poglądów na www.nimoz.pl

Redakcja: **Michał Łukomski**

Tekst: **Łukasz Bratasz, Janusz Czop, Józef Kłyś, Roman Kozłowski, Leszek Krzemień, Michał Łukomski, Jan Radoń, Agnieszka Sadłowska-Sałęga, Joanna Sobczyk, Marcin Strojcki, Krzysztof Wąs**

Zdjęcia: **Piotr Frączek**

Projekt graficzny, skład: **Anna Szwaja**

Broszura powstała dzięki współpracy Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów w Warszawie oraz Muzeum Narodowego w Krakowie.

Badania naukowe będące podstawą niniejszego wydawnictwa przeprowadzono w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Zarządzanie kolekcją muzealną w oparciu o komputerowe modelowanie wpływu wahań mikroklimatu na obiekty zabytkowe”.

Kontakt:

Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów

ul. Okrężna 9

02-916 Warszawa

tel. +48 22 651 53 00 w. 19

e-mail: mrogowski@nimoz.pl

Muzeum Narodowe w Krakowie

Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych

ul. Piłsudskiego 14

31-109 Kraków

tel. +48 12 625 73 14

e-mail: lanboz@muzeum.krakow.pl

Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni

im Jerzego Habera PAN,

ul. Niezapominajek 8,

30-239 Kraków

tel.: + 48 12 639 51 52

email: nclukomsk@cyf-kr.edu.pl

Broszura jest również dostępna w formie elektronicznej w witrynach:

www.muzeum.krakow.pl

www.nimoz.pl/pl/wydawnictwa/

©for this edition Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów and Muzeum Narodowe w Krakowie

ISBN NIMOZ: 978-83-933790-5-7

ISBN MNK: 978-83-7581-103-2