

# Warunki środowiskowe w pracowni konserwacji i w magazynie dzieł sztuki w muzeum – analiza przypadku

Environmental conditions in the maintenance room and in the art store of the museum - case study

ANNA CHARKOWSKA, JACEK HENDIGER, MACIEJ MIJAKOWSKI, PIOTR BARTKIEWICZ

DOI 10.36119/15.2020.8.3

Utrzymanie wymaganych wartości wilgotności względnej i temperatury w obszarach, w których dzieła sztuki są przechowywane, eksponowane lub poddawane konserwacji, często jest wspólnym wyzwaniem dla specjalistów z różnych dziedzin i zespołów interdyscyplinarnych. Powiązanie wiedzy i doświadczenia konserwatorów zabytków oraz specjalistów w zakresie nauk technicznych w dziedzinie warunków środowiskowych, przemian psychrometrycznych powietrza, termodynamiki, przepływów powietrza w pomieszczeniach, systemów wentylacji i klimatyzacji, pozwala na rozwiązywanie wielu problemów, które mogą wystąpić w tak ciekawym i wymagającym środowisku, jakimi są muzea, archiwa, magazyny dzieł sztuki oraz pracownie konserwatorskie.

Aby przybliżyć takie problemy oraz przedstawić sposoby ich analizy, w artykule odniesiono się do zagadnień związanych z funkcjonującą instalacją wentylacyjno-klimatyzacyjną pracującą na potrzeby pomieszczeń w muzeum, służących jako magazyn oraz pracownia konserwatorska.

Sformułowane wnioski mogą posłużyć zarówno pracownikom muzeum, jak i inżynierom zajmującym się w swojej pracy zawodowej instalacjami wewnętrznymi w muzeach i archiwach do analizy poprawności i korekty pracy systemów wentylacyjno-klimatyzacyjnych tak, aby osiągnąć wymagany cel, jakim jest spełnianie bardzo restrykcyjnych wymagań w zakresie warunków wewnętrznych w pomieszczeniach o różnym przeznaczeniu.

*Słowa kluczowe: dzieła sztuki, konserwacja, magazyn, warunki przechowywania, wilgotność względna, temperatura powietrza, wymagania konserwatorskie*

Maintaining the required relative humidity and temperature in areas where works of art are stored, exhibited, or maintained is often a common challenge for specialists in various fields and interdisciplinary teams. Combining the knowledge and experience of monument conservators and specialists in technical sciences in the field of environmental conditions, psychrometric changes of air, thermodynamics, indoor air flows, operation of ventilation and air conditioning systems, allows to solve many problems that may occur in such interesting and demanding environments as museums, archives, art magazines and conservation studios.

In order to present such problems and ways of analysing them, the article refers to issues related to a ventilation and air conditioning installation working for the needs of museum rooms, serving as a maintenance room and an art store.

The formulated conclusions can be used by both museum employees and engineers dealing with internal installations in museums and archives in their professional work, to analyse the correctness and correction of ventilation and air-conditioning systems in order to achieve the required goal: meeting very restrictive requirements in the field of internal conditions in rooms for various purposes.

*Keywords: works of art, conservation, storage room, storage conditions, air relative humidity, air temperature, conservation requirements*

## Wstęp

Przedmioty zabytkowe nie mogą być narażone na niewłaściwe i szkodliwe warunki środowiskowe, mogące doprowadzić do ich uszkodzeń podczas przechowywania lub eksponowania. W galeriach i muzeach posiadających własne kolekcje najważniejszym problemem jest ochrona obiektów przechowywanych dłu-

goterminowo. Niewłaściwe przechowywanie dzieł może skutkować nieodwracalnymi zmianami i uszkodzeniami, a w konsekwencji prowadzić do destrukcji obiektów. Wśród zagrożeń mogących w przyszłości skutkować zniszczeniem wielu obiektów zwraca się uwagę na m. in. nieodpowiednie warunki przechowywania, opakowania, meble do składowania wykonane z niewłaściwych materia-

łów, a także zaniedbania w utrzymywaniu magazynów i systemów wentylacyjnych w czystości [3]. A zatem sposób magazynowania, odpowiednie warunki środowiskowe, jak i, oczywiście, właściwe zabiegi konserwatorskie mają bardzo duże znaczenie dla zapobiegania zniszczeniom obiektów zabytkowych. Sposób magazynowania dzieł sztuki jest jednym z elementów konserwacji zapobiegawczej

dr inż. Anna Charkowska, <https://orcid.org/0000-0001-6060-9895>; dr inż. Jacek Hendiger, <https://orcid.org/0000-0002-8348-7816>,  
dr inż. Maciej Mijakowski, <https://orcid.org/0000-0001-8064-724X>, dr inż. Piotr Bartkiewicz, <https://orcid.org/0000-0002-0323-2451>  
- Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.  
Adres do korespondencji/ Corresponding author: [anna.charkowska@pw.edu.pl](mailto:anna.charkowska@pw.edu.pl)

Tabela 1. Parametry powietrza projektowe oraz oczekiwane w magazynie i pracowni konserwacji  
 Table 1. Design air parameters and expected in the storage room and maintenance workshop

	Lato						Zima					
	t		φ		x		t		φ		x	
	°C		%		g/kg		°C		%		g/kg	
Wartości obliczeniowe (projektowe)												
Powietrze zewnętrzne	30		45		12		-20		100		0,8	
Powietrze wewnętrzne	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja
	22	22	55±5	55±5	8,3÷10,3	8,3÷10,3	22	22	55±5	55±5	8,3÷10,3	8,3÷10,3
Wartości oczekiwane												
Powietrze wewnętrzne	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja	Magazyn	Konserwacja
	14÷18	opt.:20÷21 max 22	50±5	50±5	4,5÷7	6,5÷9	14÷18	opt.:20÷21 max 22	50±5	50±5	4,5÷7	6,5÷9

w muzeach [5], [6]. Poprawnie działające systemy wentylacji i klimatyzacji, zapewniające utrzymanie odpowiednich wartości parametrów powietrza i wymianę powietrza, sprzyjają walce z takimi zagrożeniami w pomieszczeniach magazynowych jak: występujące w niewłaściwych warunkach siedliska różnych gatunków bakterii, grzybów, wirusów, glonów, pierwotniaków czy owadów – szkodników drewna. I tak np. do rozwoju grzybów pleśniowych przyczyniają się: nadmierna wilgotność, niewydolna wentylacja pomieszczeń lub jej brak, oszczędności w ogrzewaniu lokali, bardzo szczelne plastikowe okna, szczelne drzwi [4].

Walkę o zachowanie dzieł sztuki prowadzą konserwatorzy zabytków, ale bez wiedzy i pomocy inżynierów ta walka byłaby trudna, a nawet często niemożliwa, szczególnie w wentylowanych i klimatyzowanych przestrzeniach wystawowych i magazynowych oraz w pracowniach konserwatorskich. Na przykładzie analizy warunków występujących w sali magazynowej dzieł sztuki i w pracowni konserwatorskiej w niniejszym artykule wskazano mogące się pojawić problemy dotyczące zapewnienia i utrzymania oczekiwanych przez użytkowników właściwości środowiska wewnętrznego. Zwrócono uwagę na dwa parametry powietrza – temperaturę i wilgotność względną, z podkreśleniem pierwszoplanowej roli wilgoci. Dla wielu przedmiotów zabytkowych jest to parametr wiodący, gdy poszukiwane są optymalne warunki cieplno-wilgotnościowe [1], [2]. Wartości wilgotności względnej powietrza są szczególnie istotne w przypadku obiektów złożonych z materiałów higroskopijnych [4].

Bazując na krótko- i długoterminowych przebiegach zmienności parametrów przeprowadzono dyskusję nad metodami rozwiązania problemów w zakresie modernizacji istniejącej instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnej.

Przeprowadzona analiza dotyczyła dwóch przylegających do siebie pomieszczeń. Jednym z nich był magazyn ekspozycji

natów o powierzchni 150m<sup>2</sup>. Drugie to zdecydowanie mniejsza pracownia konserwacji o powierzchni 50m<sup>2</sup>.

W zakresie czynności pomiarowych podejmowanych w obiekcie znalazły się:

- pomiary ciągłe (rejestracja) parametrów powietrza w pomieszczeniach przez okres dwóch tygodni,
- pomiary temperatury i wilgotności względnej powietrza oraz wydajności elementów wywiewnych i nawiewnych w rozpatrywanych pomieszczeniach.

Uzyskane podczas pomiarów rozkłady zmienności skonfrontowano także z zapisami uzyskanymi z systemu BSM.

### Parametry powietrza – projektowe, oczekiwane i zmierzone

Założenia projektowe, zamieszczone w tabeli 1, zostały zestawione z oczekiwaniami przedstawionymi przez użytkowników pomieszczeń. Należy zwrócić uwagę, że w tego typu obiektach zalecenia sformułowane przez użytkowników są ważne, gdyż pochodzą od osób profesjonalnie zajmujących się pracami konserwatorskimi i dobrze znającymi wymagania dotyczące przechowywania i konserwacji dzieł sztuki. W dalszej części to właśnie te oczekiwania użytkowników będą podstawą do sformułowania wniosków dotyczących prawidłowości parametrów powietrza w analizowanych pomieszczeniach.

Dla pracowni konserwatorskiej podane zostały wartości optymalne oraz wartość maksymalna temperatury powietrza (tab. 1).

Z punktu widzenia analizy procesu przygotowania powietrza, szczególnie jego właściwego osuszania lub nawilżania, związanego z zapewnieniem bezpiecznych warunków środowiskowych dla przedmiotów zabytkowych, istotnym parametrem jest wymagana zawartość wilgoci w powietrzu. W tabeli 1 podano zakres wartości zawartości wilgoci dotyczący obliczeniowych oraz oczekiwanych parametrów powietrza z uwzględnieniem ich dopuszczalnych tolerancji.

Wartości parametrów powietrza nawiewanego, wewnętrznego i wywiewanego zamieszczono w tabeli 2.

W tabeli 1 zamieszczono wartości parametrów powietrza (wilgotności względnej, temperatury, zawartości wilgoci): projektowe oraz oczekiwane przez konserwatorów.

### System wentylacji, strumienie powietrza wentylacyjnego i wymiana powietrza

Zastosowana w układzie centrala wentylacyjno-klimatyzacyjna przygotowuje powietrze doprowadzane do magazynu eksponatów i pracowni konserwacji w następującej ilości:

- powietrze nawiewane: 7500 m<sup>3</sup>/h,
- powietrze wywiewane: 6900 m<sup>3</sup>/h.

Ponadto, w pracowni konserwacji znajduje się digestorium, z którego powietrze w ilości 600m<sup>3</sup>/h usuwane jest przez oddzielny system wentylacji wywiewnej, z wykorzystaniem wentylatora dachowego.

Tabela 2. Zmierzone wartości parametrów powietrza w magazynie i pracowni konserwacji  
 Table 2. Measured values of air parameters in the storage room and maintenance workshop

Magazyn eksponatów									Pracownia konserwacji								
Powietrze nawiewane			Powietrze wewnętrzne			Powietrze wywiewane			Powietrze nawiewane			Powietrze wewnętrzne (pomiar w centrum pomieszczenia, nad stołem używanym do prac konserwatorskich)			Powietrze wywiewane		
t	φ	x	t	φ	x	t	φ	x	t	φ	x	t	φ	x	t	φ	x
°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg
17	52	6,4	17,5	53,5	6,8	19,3	49	7,0	18	50,3	6,5	18,5	49	6,5	19,3	49	7,0

Powietrze do rozpatrywanych pomieszczeń nawiewane jest za pomocą sufitowych nawiewników wirowych, a usuwane przez ściennie kratki wywiewne (rys. 1).

W magazynie eksponatów zaprojektowano 6 nawiewników, mających praktycznie równą wydajność. Całkowity strumień powietrza nawiewanego do magazynu wynosi 4000 m<sup>3</sup>/h. Krotność wymiany powietrza wynosi 11 h<sup>-1</sup> (kubatura pomieszczenia 370 m<sup>3</sup>). Natomiast w pomieszczeniu konserwacji zaprojektowano łącznie 5 sufitowych nawiewników powietrza o wydajności 700 m<sup>3</sup>/h każdy. Całkowity strumień powietrza nawiewanego do pomieszczenia konserwacji wynosi 3500 m<sup>3</sup>/h. Projektowanarotność wymiany powietrza, określona w odniesieniu do strumienia powietrza nawiewanego, wynosi 26 h<sup>-1</sup> (kubatura pomieszczenia 135 m<sup>3</sup>).

System odpowiedzialny za wentylację i klimatyzację obu pomieszczeń obsługiwany jest przez wspólną centralę nawiewno-wywiewną. W części nawiewnej, poza dwoma stopniami filtracji i wentylatorem, znajdują się, w kolejności montażu, następujące urządzenia przygotowujące powietrze:

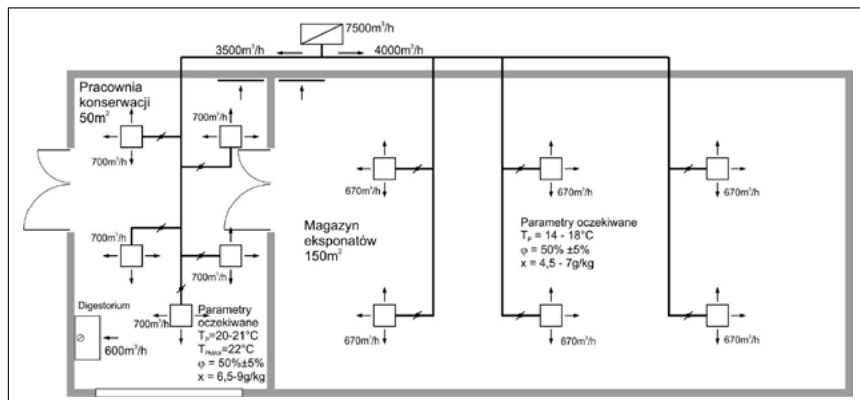
- wymiennik obrotowy higroskopijny o efektywności temperaturowej 74,6% i wilgotnościowej 69,7%,
- nagrzewnica wodna powietrza - parametry wody 60/45°C,
- chłodnica wodna powietrza - parametry wody 7/11°C.

Po stronie nawiewnej instalacji zaprojektowano także dwa kanałowe parowe nawilzacze powietrza o wydajności 9÷45 kg/h pary każdy.

Na podstawie uzyskanych informacji stwierdzono, że strumień powietrza wentylacyjnego doprowadzany do magazynu może być ograniczony do minimum spełniającego wymagania higieniczne związane z czasowym przebywaniem w tym pomieszczeniu 1 osoby.

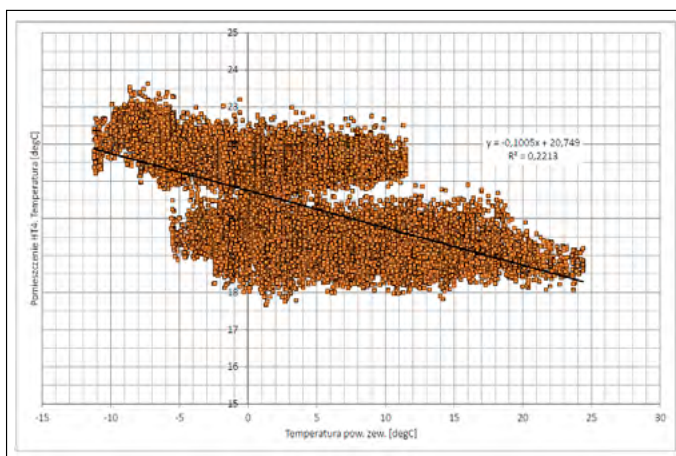
Natomiast w pomieszczeniu konserwacji ze względu na wykonywane czynności konserwatorskie z wykorzystaniem substancji chemicznych oraz możliwość konserwacji eksponatów zaatakowanych przez drobnoustroje, jak również ze względu na możliwość przedostawania się zanieczyszczonego powietrza z digestorium, niezbędny jest duży strumień powietrza wentylacyjnego, jednocześnie spełniający wymagania higieniczne związane z równoczesnym przebywaniem maksymalnie 3 pracowników.

Minimalne projektowe wymagania dotyczące higienicznej ilości powietrza zewnętrznego, określonej jakorotność wymiany powietrza, wynosiły odpowiednio:

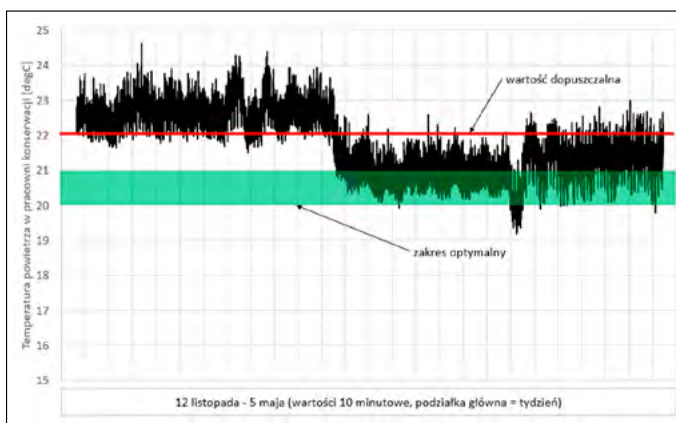


Rys. 1. Schemat instalacji wentylacyjnej  
Fig. 1. Scheme of the ventilation system

Rys. 2. Wykres korelacyjny pomiędzy temperaturą powietrza zewnętrznego i temperaturą powietrza w magazynie eksponatów  
Fig. 2. Correlation graph between the outside air temperature and air temperature in the exhibit storage room



Rys. 3. Przebieg czasowy zmienności temperatury powietrza wewnętrznego w pracowni konserwacji od listopada do maja  
Fig. 3. Time course of indoor air temperature variability in conservation room from November to May



- magazyn eksponatów: 0,6 h<sup>-1</sup> (do wysokości 4,0 m),
- pracownia konserwacji: 2,0 h<sup>-1</sup>.

### Ocena istniejącego rozwiązania w zakresie możliwości osiągnięcia parametrów oczekiwanych w pomieszczeniach

#### Analiza trendów historycznych parametrów powietrza uzyskanych z systemu BMS

Trendy poszczególnych parametrów powietrza dotyczyły okresu od kilku miesięcy do 1 roku, a w tym zapisów takich parametrów, jak:

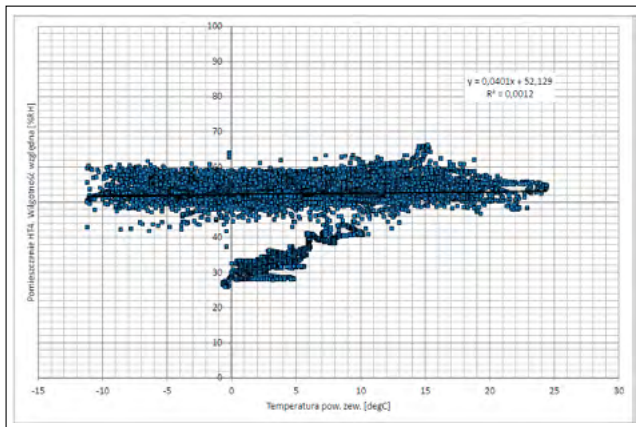
- temperatura powietrza wewnętrznego w magazynie eksponatów i pomieszczeniu konserwacji,
- wilgotność względna powietrza wewnętrznego w magazynie eksponatów i pomieszczeniu konserwacji,
- wilgotność względna powietrza nawiewanego z centrali,
- wilgotność względna powietrza wywiewanego przed centralą.

Na podstawie obserwacji i analizy zapisów z systemu BMS można zauważyć, że w dłuższym przedziale czasowym:

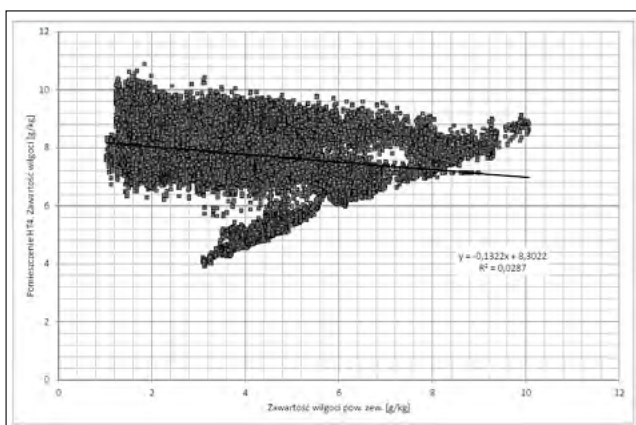
- w magazynie eksponatów oczekiwana wartość temperatury powietrza (14÷18°C) była niedotrzymana przez

100% czasu, a oczekiwana wartość wilgotności względnej ( $50 \pm 5\%$ ) przez 65% czasu,

- temperatura powietrza w magazynie eksponatów w okresie odpowiadającym danym z BMS wynosiła od  $17,8^{\circ}\text{C}$  do  $23,4^{\circ}\text{C}$ , wartość średnia wynosiła  $20,3^{\circ}\text{C}$ ,
- w magazynie eksponatów wilgotność względna powietrza w okresie odpowiadającym danym z BMS wynosiła od 26% do 82%, wartość średnia wynosiła 55,7%,
- wykres korelacyjny (rys. 2) wskazuje na zmiany średniej wartości temperatury powietrza wewnętrznego w magazynie eksponatów zależnie od temperatury powietrza zewnętrznego – wartość temperatury wewnętrznej około  $21,5^{\circ}\text{C}$  przy niskiej temperaturze powietrza zewnętrznego (od  $-9^{\circ}\text{C}$  do  $10^{\circ}\text{C}$ ) oraz wartość około  $19^{\circ}\text{C}$  przy wyższej wartości temperatury powietrza zewnętrznego (od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+25^{\circ}\text{C}$ ), powyższa zależność wynika prawdopodobnie ze zmiany nastaw, co jest widoczne również na przebiegu czasowym (rys. 3),
- wykres korelacyjny (rys. 4) wskazuje na utrzymywanie w przybliżeniu na stałym poziomie wartości wilgotności względnej powietrza wewnętrznego (około 53%) w magazynie eksponatów, niezależnie od zmiennej wartości temperatury powietrza zewnętrznego (od  $-12^{\circ}\text{C}$  do  $25^{\circ}\text{C}$ ), jednak dane wykorzystane do sporządzenia wykresu obejmują jedynie



Rys. 4. Wykres korelacyjny pomiędzy temperaturą powietrza zewnętrznego i wilgotnością względną powietrza w magazynie eksponatów  
Fig. 4. Correlation graph between the outside air temperature and relative air humidity in the exhibit storage room



Rys. 5. Wykres korelacyjny pomiędzy zawartością wilgoci (wilgotnością bezwzględną) powietrza zewnętrznego i zawartością wilgoci (wilgotnością bezwzględną) powietrza w magazynie eksponatów  
Fig. 5. Correlation graph between the moisture content (absolute humidity) of the outside air and the moisture content (absolute humidity) of the air in the exhibit storage room

okres od listopada do maja (brak okresu letniego z osuszaniem powietrza),

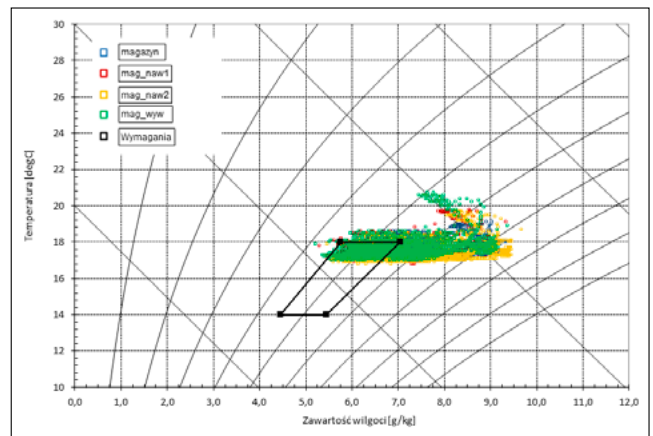
- z wykresu korelacyjnego (rys. 5) wynika, że zawartość wilgoci x w pomieszczeniu jest zawsze wyższa lub czasami równa zawartości wilgoci w powietrzu zewnętrznym, jednak dane do wykresu obejmują jedynie okres od listopada do maja (brak okresu letniego, z osuszaniem powietrza).

## Analiza wyników pomiarów i zalecenia

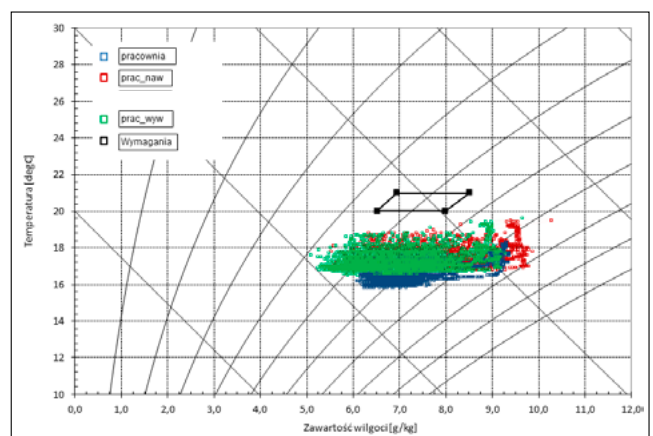
### Analiza wyników badań ciągłych parametrów wewnętrznych

Na podstawie ciągłej rejestracji parametrów powietrza (temperatury i wilgotności względnej) łącznie w 7 lokalizacjach w pracowni konserwacji i magazynie eksponatów, wykonanej przez około dwa tygodnie, na przełomie października i listopada, stwierdzono:

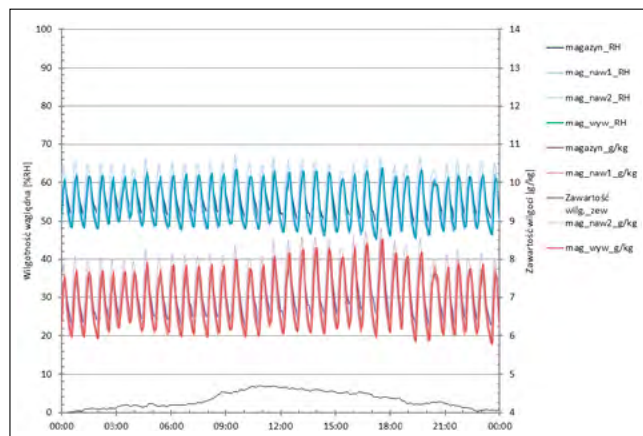
- wartości parametrów dostępne w systemie BMS odpowiadały wartościom odczytanym w trakcie pomiarów,
- w magazynie oczekiwana wartość temperatury powietrza ( $14 \div 18^{\circ}\text{C}$ ) była niedotrzymana przez około 5% czasu podczas prowadzenia pomiarów, a oczekiwana wartość wilgotności względnej ( $50 \pm 5\%$ ) przez 64% czasu (rys. 6),
- w pracowni konserwatorskiej oczekiwana wartość temperatury



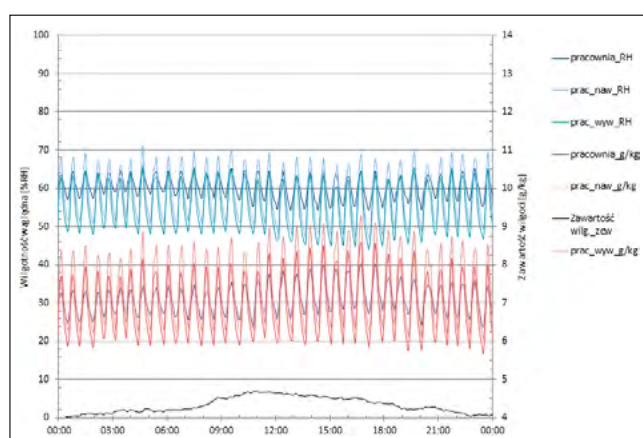
Rys. 6. Ilustracja temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego na wykresie psychrometrycznym - magazyn  
Fig. 6. Illustration of indoor air temperature and humidity on a psychrometric chart - exhibit storage room



Rys. 7. Ilustracja temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego na wykresie psychrometrycznym - pracownia konserwatorska  
Fig. 7. Illustration of indoor air temperature and humidity on a psychrometric chart - conservation room



Rys. 8. Przebieg rejestracji wskazań wilgotności powietrza wewnętrznego (jedna doba) – magazyn eksponatów  
 Fig. 8. The course of registration of indoor air humidity indications (one day) - exhibit storage room



Rys. 9. Przebieg rejestracji wskazań wilgotności powietrza wewnętrznego (jedna doba) – pracownia konserwatorska  
 Fig. 9. The course of registration of indoor air humidity indications (one day) - conservation room

powietrza ( $20 \pm 21^\circ\text{C}$ ) była niedotrzymana przez 100% czasu podczas prowadzenia pomiarów, a oczekiwana wartość wilgotności względnej ( $50 \pm 5\%$ ) przez 95% czasu (rys. 7),

- wykresy korelacyjne wskazują na brak realizacji procesu osuszania powietrza w centrali,
- przebieg zmienności zawartości wilgoci charakteryzuje się oscylacjami o amplitudzie około 2-3 g/kg i okresie około 1 godziny, co może wynikać ze zbyt dużej wydajności nawilżaczy powietrza lub nieprawidłowego algorytmu procesu automatycznej regulacji nawilżania, ewentualnie z nieprawidłowych nastaw w algorytmie.

### Efektywność osuszania powietrza w magazynie eksponatów

Jak wspomniano wcześniej, istotnym parametrem powietrza w pomieszczeniach jest zawartość wilgoci w powietrzu wewnętrznym. W analizowanym przypadku konieczne było dodatkowe osuszenie powietrza. W celu osiągnięcia wymaganej wilgotności powietrza w magazynie eksponatów zastosowano 2 osuszacze powietrza. Z ilości skroplin odprowadzanych z osuszaczy można ocenić ich wydajność na poziomie 0,83 kg/h. Przy założeniu projektowanej ilości powietrza wentylacyjnego dla pomieszczenia magazynów na poziomie  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ , można oszacować

jaką zmianę zawartości wilgoci powoduje działanie zastosowanych osuszaczy. W tym przypadku obliczony stopień osuszenia powietrza nie przekraczał 0,2 g/kg.

W związku z powyższym można stwierdzić, że działanie zastosowanych osuszaczy w tym przypadku nie przynosi istotnego efektu w utrzymaniu właściwej wilgotności powietrza w pomieszczeniu.

Powyższe rozważania znajdują także swoje odzwierciedlenie w wynikach uzyskanych w trakcie badań parametrów powietrza w analizowanych pomieszczeniach. Parametry powietrza nawiewanego i powietrza w pomieszczeniu były do siebie bardzo zbliżone.

Przy założeniu obliczeniowych w okresie letnim parametrów powietrza za chłodnicą w centrali oraz wymaganej w pomieszczeniu magazynowym maksymalnej zawartości wilgoci można oszacować, że wymagana wydajność osuszaczy powinna być minimum 10-krotnie większa.

### Analiza wyników pomiarów i zalecenia

Analiza istniejących warunków środowiskowych w pracowni konserwacji i w magazynie eksponatów oraz warunków pracy urządzeń centrali wentylacyjno-klimatyzacyjnej pozwoliła na przedstawienie uwag dotyczących możliwości poprawy funkcjonowania systemu w zakresie dotrzymania parametrów powietrza wewnętrznego. Jako docelowe parametry przyjęto oczekiwane przez użytkownika parametry powietrza wewnętrznego w rozpatrywanych pomieszczeniach.

Wśród rozpatrywanych rozwiązań znalazły się następujące warianty:

- uzupełnienie systemu przygotowania powietrza w centrali wentylacyjnej o stopień nagrzewnicy wtórnej umieszczonej za chłodnicą powietrza,
- zastosowanie osuszaczy wewnętrznych (pomieszczeniowych),
- zmiana sposobu sterowania urządzeniami do nawilżania powietrza (nawilżaczami parowymi).

### Zastosowanie dodatkowej nagrzewnicy wtórnej

Analizowane pomieszczenia obsługiwane są przez centralę zawierającą w części nawiewnej:

- nagrzewnicę wodną powietrza o parametrach wody  $60/45^\circ\text{C}$ ,
- chłodnicę wodną powietrza o parametrach wody  $7/11^\circ\text{C}$ .

Z karty doboru centrali wynika, że chłodnica w warunkach obliczeniowych została dobrana przy następujących parametrach:

- temperatura powietrza przed chłodnicą:  $32^\circ\text{C}$ ,
- wilgotność względna powietrza przed chłodnicą: 40%,
- temperatura powietrza za chłodnicą:  $15^\circ\text{C}$ ,
- wilgotność względna powietrza przed chłodnicą: 81,4%.

Poprawność pracy rozpatrywanego układu urządzeń z chłodnicą i nagrzewnicą wtórną będzie uzyskana tylko wtedy, jeżeli za chłodnicą zostanie osiągnięta odpowiednia zawartość wilgoci. W celu analizy efektywności osuszania powietrza za pomocą zainstalowanej chłodnicy przeprowadzono ponowny dobór urządzenia przy rzeczywistych dostępnych w obiekcie parametrach wody zasilającej  $7,5^\circ\text{C}$ .

Niestety, wynikowa zawartość wilgoci w punkcie za chłodnicą wynosząca 9,7 g/kg nadal przewyższy zakres oczekiwany w pomieszczeniu konserwacji  $6,5 \div 9 \text{ g/kg}$  i znacznie przewyższy zakres oczekiwany dla magazynu eksponatów  $4,5 \div 7 \text{ g/kg}$ .

Aby oszacować maksymalne możliwości osuszania powietrza w zainstalowanej chłodnicy wodnej, dokonano także doboru

urządzenia dla jego maksymalnej mocy, przy jednocześnie odpowiednio zwiększonym przepływie wody. Należy oczywiście w tym przypadku sprawdzić w układzie hydraulicznym zasilania chłodnicy możliwość odpowiedniego zwiększenia strumienia wody.

Z przeprowadzonego doboru wynika, że zainstalowana chłodnica nie ma możliwości osuszenia powietrza do poziomu niskiej zawartości wilgoci wymaganej w magazynie eksponatów, natomiast używana za chłodnicą zawartość wilgoci 7,8 g/kg może być już wystarczająca dla pomieszczenia konserwacji.

Podsumowując, należy stwierdzić, że samo dodanie do układu nagrzewnicy wtórnej nie zapewni jednoczesnego dotrzymania różnych parametrów oczekiwanych w dwóch analizowanych pomieszczeniach, szczególnie w magazynie eksponatów. Jednak zastosowanie nagrzewnicy może być korzystne i w zasadzie konieczne w przypadku zwiększenia stopnia osuszenia powietrza w chłodnicy i tym samym obniżenia temperatury powietrza za chłodnicą.

Ponadto zastosowanie nagrzewnicy wtórnej zwiększyłoby elastyczność systemu w zakresie niezależnej regulacji wilgotności i temperatury powietrza wewnętrznego.

W analizowanym przypadku, zmodernizowanie układu poprzez dodanie nagrzewnicy wtórnej będzie nadal wymagało stosowania osuszaczy powietrza w pomieszczeniach, jednak ich wymagana wydajność może być zmniejszona po uzyskaniu maksymalnego możliwego stopnia osuszenia w chłodnicy.

### Zastosowanie osuszaczy wewnętrznych

Rozpatrywany wariant dotyczy możliwości osiągnięcia odpowiednich parametrów powietrza wewnętrznego, szczególnie w zakresie zawartości wilgoci, bez rozbudowy układu centrali wentylacyjnej, ale z zastosowaniem dodatkowych urządzeń w pomieszczeniach.

Jak wykazały przeprowadzone pomiary oraz analiza zapisów trendów BMS, parametry powietrza nawiewanego, wewnętrznego oraz usuwanego w praktyce nie różnią się. Spowodowane jest to stosowaniem w układzie stosunkowo dużych strumieni powietrza wentylacyjnego.

Strumień objętości powietrza nawiewanego oraz krotność wymiany powietrza wynoszą:

- magazyn eksponatów: 4000 m<sup>3</sup>/h, co stanowi 11 h<sup>-1</sup>,
- pomieszczenie konserwacji: 3500 m<sup>3</sup>/h, co stanowi 26 h<sup>-1</sup>.

Przy tak dużej ilości powietrza, wystę-

pujące w pomieszczeniach zyski ciepła i wilgoci wykazują mały wpływ na zmianę parametrów powietrza wewnętrznego w stosunku do parametrów powietrza nawiewanego. Pomijając aspekt ekonomiczny, takie rozwiązanie byłoby korzystne pod warunkiem doprowadzenia już z centrali wentylacyjnej powietrza o wymaganych parametrach, oczekiwanych w pomieszczeniach. Jednak w przypadku konieczności zastosowania dodatkowych urządzeń klimatyzacyjnych wewnątrz pomieszczeń, tak duże ilości powietrza wentylacyjnego będą zwiększały wymaganą wydajność tych urządzeń. Jak stwierdzono powyżej, użytkowane w pomieszczeniach osuszacze powietrza wewnętrznego, ze względu na ich zbyt niską wydajność, w praktyce nie wpływały na zmianę zawartości wilgoci.

Dlatego też, chcąc zastosować wariant z urządzeniami wewnętrznymi, należy wziąć pod uwagę możliwość zredukowania ilości powietrza.

Zgodnie z przytaczanymi wcześniej oczekiwaniami sformułowanymi przez użytkowników, strumień powietrza wentylacyjnego doprowadzany do magazynu może być ograniczony do minimum, które spełni wymagania higieniczne związane z czasowym przebywaniem w tym pomieszczeniu 1 osoby.

Natomiast w pracowni konserwacji, ze względu na wykonywanie czynności konserwatorskich z wykorzystaniem substancji chemicznych oraz możliwość występowania drobnoustrojów, niezbędny jest duży strumień powietrza wentylacyjnego, jednocześnie spełniający wymagania higieniczne związane z równoczesnym przebywaniem maksymalnie 3 pracowników. Z kolei w założeniach zawartych w projekcie znalazł się zapis o minimalnych ilościach powietrza wentylacyjnego na poziomie opisanym poprzez minimalną krotność wymian w magazynie eksponatów 0,6 h<sup>-1</sup> i w pomieszczeniu konserwacji: 2,0 h<sup>-1</sup>.

Wydaje się, że oparcie się wyłącznie na powyższych wymaganiach minimalnych, w konkretnym analizowanym przypadku dałoby w wyniku zbyt małe strumienie powietrza nawiewanego.

Ostateczne sprecyzowanie wymaganych ilości powietrza jest istotne z punktu widzenia docelowych parametrów systemu i wymaganych wielkości urządzeń. Podawane w literaturze wymagania dla pomieszczeń muzealnych, bibliotek, archiwów sformułowane są różnie, w rozpiętości od 4 przez 8 do 12 h<sup>-1</sup>. Do rozważań wstępnych można przyjąć, że w pomieszczeniu magazynowym trzeba zapewnić minimum 6 h<sup>-1</sup>, a w pracowni konserwacji

minimum 10 h<sup>-1</sup>. Strumienie objętości powietrza będą wtedy wynosić odpowiednio: 2200 m<sup>3</sup>/h w pomieszczeniu magazynu i 1350 m<sup>3</sup>/h w pracowni konserwacji. Dałoby to w sumie 3700 m<sup>3</sup>/h powietrza nawiewanego, co stanowi około 50% obecnej wydajności centrali.

Przy tak sformułowanych przykładowych założeniach można oszacować wymaganą wydajność dodatkowych osuszaczy pomieszczeniowych.

Zakładając utrzymanie obecnych zaprojektowanych parametrów za centralą nawiewną w okresie letnim, osuszacze powinny dodatkowo obniżyć zawartość wilgoci w pomieszczeniu magazynowym o 2÷3 g/kg, a w pomieszczeniu konserwacji o 1 g/kg. W związku z tym wydajność urządzeń powinna wynosić 5,4÷8,0 kg/h w magazynie eksponatów i 1,6 kg/h w pracowni konserwacji.

Powyższe założenia nie stanowią rekomendacji konkretnych wartości strumieni objętości powietrza, jakie powinny być przyjęte w poszczególnych pomieszczeniach, a jedynie wskazują na ścisłą zależność pomiędzy ilością powietrza wentylacyjnego, a wydajnością ewentualnych urządzeń wewnętrznych.

Dodatkowo w przypadku przyjęcia rozwiązania polegającego na obniżeniu wydajności centrali należy sprawdzić zakres możliwych zmian wydajności zainstalowanych w centrali wentylatorów. Należy także w bilansie powietrza dla pomieszczenia konserwacji, w tym konkretnym analizowanym przypadku, uwzględnić istniejący wywiew poprzez digestorium w ilości 600 m<sup>3</sup>/h.

Niniejszy wariant uwzględniający zastosowanie dodatkowych urządzeń wewnątrz pomieszczeń będzie podobny do możliwości zastosowania na przykład dodatkowych szaf klimatyzacji precyzyjnej w pomieszczeniach.

### Sterowanie urządzeniami do nawilżania powietrza

W analizowanym systemie przygotowania powietrza pracowały dwa nawilzacze parowe elektrodowe, o wydajności 9÷45 kg/h pary każdy. Z informacji uzyskanych od użytkowników obiektu wynikało, że sterowanie nawilżaniem nie przebiegało w sposób płynny. Potwierdziły to także wyniki rejestracji parametrów powietrza. Także analiza trendów wskazywała, że w układzie nie był realizowany algorytm z płynną zmianą wydajności procesu nawilżania.

Zastosowane nawilzacze posiadały możliwość sterowania proporcjonalnego w zakresie 20÷100% wydajności maksy-

malnej, jako opcję do wykonania standardowego, co powinno być odpowiednio wykorzystane. Można w tym miejscu dodać, że jeszcze wyższą precyzję regulacji i większy zakres zmian wydajności 5÷100%, dałoby zastosowanie innego typu nawilzaczy, wyposażonych w oporowy element grzejny.

## Podsumowanie

Utrzymanie oczekiwanych wartości parametrów powietrza jest w przypadku analizowanych pomieszczeń i istniejących instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych, charakteryzujących się opisanymi w artykule właściwościami, zagadnieniem wymagającym rozważenia najsensowniejszego i w miarę prostego rozwiązania polegającego na zastosowaniu dodatkowych urządzeń wentylacyjnych, pozwalających na uzyskanie wymaganej wilgotności powietrza, przy różnych wartościach temperatury powietrza wewnętrznego w obu pomieszczeniach zasilanych z tej samej centrali.

Na podstawie podjętych analiz nie można sformułować wniosków pozwalających na zastosowanie jednego elementu lub urządzenia, które zdecyduje o osiągnięciu w każdych warunkach poprawnych parametrów powietrza wewnętrznego. W omawianym przypadku podejmowane działania powinny mieć charakter szerszy, uwzględniający zarówno rozbudowę centrali wentylacyjnej oraz dodanie innych elementów w formie urządzeń strefowych.

Jak wykazano, dodanie do układu nagrzewnicy wtórnej nie zapewni pełnego dotrzymania parametrów oczekiwanych, jednak będzie korzystne ze względu na

pełniejsze możliwości regulacji wilgotności i temperatury.

Należy się liczyć z tym, że niezależnie od modyfikacji elementów centrali, będzie także wymagane zastosowanie dodatkowo urządzeń wewnętrznych w samych pomieszczeniach, np. osuszaczy powietrza. W przypadku ich stosowania korzystne będzie zmniejszenie strumieni powietrza wentylacyjnego.

Oddzielnym problemem jest uzyskanie oczekiwanych przez użytkownika, odmiennych parametrów w pomieszczeniu konserwacji i magazynie eksponatów. Parametry te różnią się zarówno w zakresie oczekiwanej temperatury, jak i wilgotności powietrza od wartości projektowych. Przygotowanie powietrza w centrali pod kątem wymagań jednego z pomieszczeń, będzie wymagało dodatkowych urządzeń strefowych dla pomieszczenia drugiego. W analizowanym przypadku w okresie lata wydaje się korzystniejsze doprowadzenie powietrza w centrali do wymaganej zawartości wilgoci odpowiedniej dla pomieszczenia konserwacji, a następnie dodatkowe osuszanie w pomieszczeniu magazynu.

Oczekiwania użytkownika różnią się także w zakresie wymaganej w pomieszczeniach temperatury powietrza. W tym przypadku także należy się liczyć z koniecznością dodatkowego, strefowego ogrzewania lub ochładzania powietrza na nawiewie do danego pomieszczenia lub w samym pomieszczeniu.

Na przykładzie przedstawionego studium przypadku wydaje się pewne, że analizowanie metod spełnienia oczekiwań i potrzeb użytkowników pomieszczeń muzealnych zapewniających właściwe

warunki środowiskowe do magazynowania czy prowadzenia prac konserwatorskich lub przeznaczonych na cele ekspozycji dzieł sztuki, nie jest możliwe bez bliskiej współpracy konserwatorów i inżynierów, czego dowodem stały się omówione w artykule badania.

## LITERATURA:

- [1] Bonvicini C., La conservazione preventiva nel contesto degli standard museali italiani, w: Conservazione preventiva e controllo microclimatico nel contesto degli standard museali, Regione Toscana, Stampa Vanzani Industrie Grafiche, 2010, s. 19-27.
- [2] Charkowska A., Warunki środowiskowe w salach wystawowych i magazynach muzeów, Instal 3/2020, s. 26-31, DOI 10.36119/15.2020.3.3.
- [3] Czajka A., Jak przechowywać, transportować i eksponować dzieła sztuki na podłożach papierowych - Konserwacja profilaktyczna w praktyce, Seminarium pn. „Transport i ekspozycja obiektów sztuki współczesnej”, Materiały z projektu „To nie jest wystawa”, Zachęta Narodowa Galeria Sztuki, Warszawa, 26.02 - 4.05.2008.
- [4] Fic-Lazor A., Magazynowanie zbiorów muzealnych. Rekomendacje dla mniejszych muzeów, w: ABC profilaktyki konserwatorskiej w muzeum, Ochrona Zbiorów zeszyt nr 3 /2013, Seria wydawnicza Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, s. 18-35
- [5] Świącka E., Dokumentowanie stanu zachowania obiektu, w: ABC profilaktyki konserwatorskiej w muzeum, seria wydawnicza Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Ochrona Zbiorów zeszyt nr 3 /2013, Seria wydawnicza Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, s. 5.
- [6] Świącka E., Marek Rogowski M., Wstęp, w: ABC profilaktyki konserwatorskiej w muzeum, seria wydawnicza Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, Ochrona Zbiorów zeszyt nr 3 /2013, Seria wydawnicza Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów, s. 2-4.

Komitet Naukowy oraz Komitet Organizacyjny serdecznie zapraszają do udziału w V Konferencji Naukowej

## „Bezpieczeństwo energetyczne – filary i perspektywa rozwoju”

Termin Konferencji został przesunięty na

**12-13 października 2020 r.**



Konferencja odbędzie się na  
**Politechnice Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza**

Celem Konferencji jest wniesienie wkładu w dyskusję naukową i ekspercką dotyczącą **polityki energetycznej, bezpieczeństwa energetycznego oraz szeroko pojętego sektora energii.**

Planujemy, aby tematyka V edycji Konferencji stanowiła kontynuację rozpoczętej we wcześniejszych edycjach **dyskusji naukowej o polityce dostaw gazu ziemnego, w tym LNG i ropy naftowej, elek-**

**tromobilności, elektroenergetyki, energetyki wiatrowej offshore, energetyki jądrowej, a także rozpoczęcie dyskusji na temat sztucznej inteligencji.**

Szczegółowe informacje o Konferencji znajdują się na stronie internetowej:

<http://www.institutpe.pl/konferencja2020/>

W poprzednich czterech edycjach Konferencji wzięło udział **760 uczestników** reprezentujących **43 ośrodki naukowe, 3450 studentów** oraz blisko **13000 internautów**. Wśród uczestników gościliśmy **31 przedstawicieli administracji publicznej**, a także **90 reprezentantów spółek energetycznych.**

### Partnerzy Konferencji:

**Sponsor główny:** PGE Polska Grupa Energetyczna S.A., PKN Orlen S.A.

**Partner Srebrny:** Województwo Podkarpackie, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, MPWiK Rzeszów, ML-SYSTEM, Polska Spółka Gazownictwa, Towarowa Giełda Energii, PERN

**Partner Brązowy:** Gas-Trading S.A., Asseco Poland, Fundacja Muzeum Przemysłu Naftowego i Gazowniczego im. Ignacego Łukasiewicza w Bóbrce, Inżynieria Rzeszów S.A.

**SERDECZNIE ZAPRASZAMY!**