

st. kpt. dr inż. Sylwia Boroń¹⁾
ORCID: 0000-0002-3886-0060

Modelowanie numeryczne CFD w badaniu zmiany ciśnienia w pomieszczeniu chronionym stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi

Numerical modelling CFD in the research of pressure changes in a room protected by fixed gaseous extinguishing systems

DOI: 10.15199/33.2020.12.06

Streszczenie. W artykule zaprezentowano ocenę nowego podejścia do przewidywania zmian ciśnienia podczas wyładowania gazu gaśniczego do pomieszczenia chronionego stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi za pomocą symulacji numerycznych CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Program badawczy składał się z dwóch etapów: pierwszy poświęcony był eksperymentalnym pomiarom zmiany ciśnienia podczas uwolnienia gazu gaśniczego do komory badawczej w skali rzeczywistej (70 m³) z zastosowaniem otworu odciążającego. Drugim etapem było wykonanie symulacji CFD pozwalających wyznaczyć zmiany ciśnienia podczas wyładowania gazu do reprezentowanej numerycznie komory testowej. Oszacowanie poprawności i użyteczności modelu CFD polegało na porównaniu wyników CFD ze standardowymi obliczeniami i pomiarami eksperymentalnymi. **Słowa kluczowe:** inżynieria bezpieczeństwa pożarowego; stałe urządzenia gaśnicze gazowe; gaz gaśniczy; dwutlenek węgla; kłapa odciążająca; obliczeniowa dynamika płynów.

Abstract. The aim of the article is to investigate and evaluate a new approach for prediction of changes of pressure during gas discharge inside the room protected by fixed gaseous extinguishing system by means of CFD simulations (ang. *Computational Fluid Dynamics*). The research program consisted of two stages. The first stage was dedicated to the experimental measurements of pressure changes during extinguishing gas discharge into the test chamber in a real scale (70 m³) with use of relief opening. The next step was about performing CFD simulations allowing to determine pressure changes during gas discharge into the numerically represented test chamber. Estimation of the correctness and usefulness of the CFD model was based on a comparison of the CFD results with standard calculations and experimental measurements.

Keywords: fire safety engineering; fixed gaseous extinguishing system; extinguishing gas; carbon dioxide; pressure-relief damper; Computational Fluid Dynamics.

Bezpieczeństwo pożarowe jest jednym z podstawowych wymagań, jakie muszą spełniać obiekty budowlane oraz ich poszczególne części zgodnie z załącznikiem nr 1 do rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 (CPR) [12]. W celu zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego w pomieszczeniach, w których skutki pożaru lub działania najczęściej stosowanych środków gaśniczych (woda, proszki, piany) mogą spowodować niedopuszczalne straty, zaleca się stosowanie technologii gaszenia gazem za pomocą stałych urządzeń gaśniczych gazowych, zwanych dalej SUG-gazowymi [10]. Urządzenia te są związane na stałe z obiektem, mają zapas środka gaśniczego i są uruchamiane samoczynnie we wczesnej fazie rozwoju pożaru.

¹⁾ Szkoła Główna Służby Pożarniczej; Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności; sboron@sgsp.edu.pl

SUG-gazowe działają najczęściej przez całkowite wypełnienie chronionej przestrzeni gazem gaśniczym. Wyładowanie określonej masy gazu gaśniczego do szczelnego pomieszczenia jest procesem dynamicznym, któremu towarzyszą zjawiska związane ze zmianą ciśnienia w pomieszczeniu. Przedmiotem analizy zaprezentowanej w artykule jest prognozowanie zmiany ciśnienia w pomieszczeniu zabezpieczonym SUG-gazowym na dwutlenek węgla. Procesowi uwolnienia dwutlenku węgla towarzyszy początkowy chwilowy wzrost ciśnienia w pomieszczeniu chronionym związany z wprowadzeniem dodatkowej porcji gazu do szczelnej kubatury. Następnie, rozprężający się gaz gaśniczy ulega schłodzeniu (zużycie ciepła związane z odparowaniem skroplonego gazu), co w efekcie prowadzi do obniżenia ciśnienia w pomieszczeniu. Schłodzony gaz gaśniczy stopniowo ogrzewa się, odbierając ciepło od ścian i powie-

trza, wskutek czego ponownie zwiększa swoją objętość. Jednocześnie w sposób ciągły podawana jest przez dyszę dodatkowa porcja gazu gaśniczego do pomieszczenia chronionego i następuje ponowny wzrost ciśnienia.

Dopuszczalny przyrost ciśnienia w pomieszczeniu chronionym wynosi 100 – 500 Pa, w zależności od wytrzymałości ścian [3, 11]. Po przekroczeniu dopuszczalnych wartości może stanowić zagrożenie dla ludzi, prowadzić do uszkodzenia elementów konstrukcji i wyposażenia znajdującego się w chronionym pomieszczeniu [4, 5, 7]. Ze względu na zmianę ciśnienia podczas wyładowania gazu, pomieszczenie chronione należy wyposażyć w otwory odciążeniowe zamykane kłapami, za pomocą których wyrównane zostanie ciśnienie na zewnątrz i wewnątrz chronionej przestrzeni. Otwory odciążające mogą prowadzić bezpośrednio na otwartą przestrzeń (na zewnątrz budynku) lub

do kanału wentylacyjnego przez otwór odciążający. Otwarcie kłapy na otworze odciążającym powinno nastąpić przed otwarciem zaworu zbiornika gazu gaśniczego. Po zakończeniu wypływu gazu do pomieszczenia należy zamknąć klapę odciążającą w celu uszczelnienia pomieszczenia. Projektant urządzenia gaśniczego jest zobowiązany do przeprowadzenia analizy, która pozwoli na dobranie odpowiedniej powierzchni otworu odciążającego [6].

Podejście normowe

Norma dotycząca systemów gaszenia dwutlenkiem węgla [9] nakłada obowiązek oszacowania maksymalnego nadciśnienia, które może wystąpić podczas wyładowania gazu gaśniczego do pomieszczenia. W razie potrzeby wymaga zaprojektowania otworów zapobiegających wzrostowi ciśnienia przekraczającemu wytrzymałość przegród. Powierzchnia otworu odciążającego jest zwykle identyfikowana analitycznie, zgodnie z równaniem (1) [9]:

$$X = 23,9 Q/\sqrt{p} \quad (1)$$

gdzie:

X –powierzchnia odciążająca;

Q – natężenie przepływu;

p – dopuszczalny przyrost ciśnienia w pomieszczeniu.

Po przekształceniu równania (1) otrzymujemy zależność pozwalającą obliczyć przyrost ciśnienia w pomieszczeniu chronionym w trakcie wyładowania gazu gaśniczego [9]:

$$p = (23,9 Q/X)^2 \quad (2)$$

Wzór podany w normie dotyczy tylko otworów odciążających prowadzących bezpośrednio na zewnątrz obiektu. Wyładowując gaz do kanału wentylacyjnego, uzyskuje się większe wartości ciśnienia w pomieszczeniu w porównaniu z wypływem na otwartą przestrzeń przez otwór o tej samej powierzchni. Dodatkowo wzór nie uwzględnia mechanizmów związanych z wymianą ciepła, co podważa jego wiarygodność w odniesieniu do przypadków gaszenia pomieszczeń dwutlenkiem węgla. Co więcej, wewnętrzne źródło ciepła, w tym ogień, może wpływać na wzrost ciśnienia podczas wyładowania gazu. Weryfikacja zastosowanego równania sugeruje rozbieżności między zmierzonymi i zidentyfikowanymi wartościami

przewidywanych zmian ciśnienia. Założenia przyjęte do równań (1) i (2) nie uwzględniają zjawiska powstawania okresowego podciśnienia w pomieszczeniu w wyniku zmniejszenia objętości dwutlenku węgla, który ochładza się w trakcie uwolnienia do pomieszczenia. Standardowe równanie szacuje tylko maksymalny wzrost ciśnienia w pomieszczeniu. Pominięcie wpływu podciśnienia może prowadzić do uszkodzenia, a nawet zniszczenia elementów konstrukcyjnych oraz zamknięć otworów drzwiowych i okiennych, gdy zastosowana klapa odciążająca przystosowana jest tylko do odciążania w kierunku nadciśnienia. W instalacjach SUG-gazowych na dwutlenek węgla należy stosować dwukierunkową klapę odciążającą, otwierającą się w obu kierunkach – na zewnątrz i do wewnątrz chronionego pomieszczenia.

Projektowanie zjawisk przepływowych w obiektach budowlanych często nastęrcza wiele trudności. Narzędziem umożliwiającym rozwiązanie tego problemu jest prognozowanie zmiany ciśnienia z wykorzystaniem zaawansowanych metod obliczeniowej mechaniki płynów CFD.

Metoda badań

Celem przeprowadzonych badań była analiza zmiany ciśnienia w trakcie uwalniania dwutlenku węgla w pomieszczeniu chronionym SUG-gazowym. W ramach kryterium oceny poprawności i użyteczności zaproponowanego modelu CFD porównano wyniki CFD ze standardowymi obliczeniami i pomiarami eksperymentalnymi.

W pierwszym etapie przeprowadzono badania eksperymentalne. Stanowisko badawcze składało się ze specjalnej, częściowo przeszklonej komory o wymiarach 5 x 5 x 2,8 m i kubaturze 70 m³ (fotografia). W górnej części komory, na wysokości 2 m, znajdował się kanał upustowy o przekroju 40 x 40 cm. Niezbędną powierzchnię odciążającą, zapewniającą wzrost ciśnienia nie większy niż 200 Pa, uzyskano przez otwór o łącznej powierzchni 208,42 cm². W celu jej uzyskania światło kanału zostało zasłonięte zasuwą o szerokości 34,8 cm. Komorę wyposażono w stałe urządzenie gaśnicze gazowe na dwutle-



Widok komory badawczej
View of the research chamber

nek węgla oraz przyrząd do jednopunktowego pomiaru zmian ciśnienia. Punkt pomiarowy znajdował się na wysokości 1,5 m. Do pomiaru różnicy ciśnienia wewnątrz i na zewnątrz stanowiska testowego wykorzystano przetwornik APR-2000G o zakresie pracy od -1 kPa do 1 kPa z dopuszczalnym błędem względnym $\leq \pm 0,4\%$. Pomiary powtórzone dwukrotnie.

Masa dwutlenku węgla skroplonego w butli pod ciśnieniem 50 barów, wykorzystana do zabezpieczenia komory badawczej wynosiła 26 kg, a wyładowanie gazu trwało 40 s. Przyjęte założenia pozwalały na osiągnięcie stężenia projektowego dwutlenku węgla wewnątrz stanowiska badawczego na poziomie ok. 20% v/v. Było to stężenie niższe niż wskazane w normach. Jako uproszczenie ekonomiczne przyjęto mniejszą masę środka gaśniczego. Eksperymenty dotyczyły pomieszczenia, które można uznać za reprezentatywne dla serwerowni, centrów danych lub podobnych pomieszczeń komputerowych.

Założenia modelu numerycznego

Symulacje numeryczne wyładowania dwutlenku węgla do pomieszczenia chronionego SUG-gazowym zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent 18.2 [1]. Model numeryczny uwzględniał różnicowanie warunków atmosferycznych na zewnątrz i wewnątrz komory pomiarowej, co w znacznym stopniu de-

terminowało gęstość powietrza i gazów gaśniczych przyjętych do obliczeń (tabela 1). W badaniu nie uwzględniono żadnych źródeł ciepła ani przepływu powietrza (ognia, grzejników, zasilaczy, wentylatorów itp.), które mogą zwiększać ciśnienie wewnątrz stanowiska badawczego. Należy pamiętać, że w przeciwieństwie do istniejących metod analitycznych, solver CFD jest w stanie modelować strumienie cieplne. Obliczenia numeryczne zainicjowano w momencie odpowiadającym rozpoczęciu wypływu gazu gaśniczego z dyszy.

Tabela 1. Lista warunków początkowych przyjętych do symulacji

Table 1. List of initial conditions taken for simulation

Gaz gaśniczy	Masa molowa gazu M	Powierzchnia odciążająca [cm ²]	Wlot przepływu masowego [kg/min]	Czas wypływu [s]	Temperatura:			p [hPa]
					zewnątrzna [K]	wewnętrzna [K]	Gradient ΔT [K]	
CO ₂	44,01	208,42	39	40	291,15	290,15	0,40	1015
CO ₂	44,01	208,42	39	40	293,15	292,15	0,52	1014

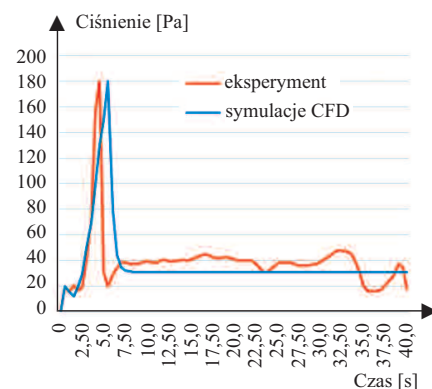
Dyskretyzację czasową przeprowadzono ze stałym dyskretnym krokiem czasowym 0,5 s. Przyjęto następujące kryteria zbieżności: 10^{-3} w przypadku ciągłości, transportu masy, energii kinetycznej turbulencji (k) i rozpraszania energii kinetycznej turbulencji (ϵ) oraz 10^{-6} w przypadku zachowania energii. W celu zapewnienia równowagi między czasem obliczeniowym a dokładnością wyników, w badaniach numerycznych wykorzystano model turbulencji Realizable $k-\epsilon$ [2, 8]. W celu sprzężenia ciśnienia z prędkością wybrano schemat numeryczny SIMPLE. **Dyskretyzację przestrzenną** przeprowadzono za pomocą schematów second-order upwind. Gradient obliczono za pomocą twierdzenia Green – Gaussa na podstawie wartości węzłów. Domena zewnętrzna została zamknięta warunkami brzegowymi typu ściana. Komorę badawczą zamodelowano elementami ściennymi ze szkła ($\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Temperaturę początkową wewnątrz i na zewnątrz komory ustalono na podstawie pomiarów z badań eksperymentalnych przeprowadzonych w pełnej skali. Otwór odciążający zamodelowano jako element powierzchniowy typu wewnętrznego.

Wyniki badań

W przypadku procesu wyładowania gazu gaśniczego z SUG-gazowego w pomieszczeniu chronionym, wartość

ciśnienia i jego zmiana w czasie budzą wiele obaw. Sprawdzenie, czy zaproponowany model numeryczny może opisywać czasowe zmiany ciśnienia, ma kluczowe znaczenie w przypadku oceny jego wydajności. Dotychczasowe badania koncentrowały się jednak na ocenie standardowych równań umożliwiających analizę jedynie wzrostu ciśnienia podczas wyładowania gazu. Konieczne stało się więc stworzenie nowego modelu i przeprowadzenie pełnej jego walidacji na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych zarówno podczas

wanego podczas eksperymentu zarówno w odniesieniu do wartości, jak i przebiegu zmian (rysunek).



Zmiana ciśnienia podczas badań eksperymentalnych i symulacji CFD; powierzchnia otworu odciążającego 208,42 cm²

Changes in pressure during experimental tests and CFD simulations; area of the relief-opening 208,42 cm²

wzrostu, jak i spadku ciśnienia występującego w strefie chronionej podczas procesu gaszenia. W prezentowanych badaniach zwalidowano przewidywane zmiany ciśnienia uzyskane za pomocą modelu numerycznego CFD na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych w punkcie pomiaru ciśnienia wewnątrz komory badawczej umieszczonej na wysokości 1,5 m.

W badaniach eksperymentalnych gaz gaśniczy przechowywany był w butlach w stanie ciekłym i doprowadzany był do pomieszczenia za pomocą SUG-gazowego ze stałym natężeniem przepływu. Gaz gaśniczy powodował powstanie początkowego wzrostu ciśnienia w komorze badawczej o wartości ok. 20 Pa. Następnie gaz schładzał się w wyniku rozprężania. Temperatura wewnątrz komory zmniejszyła się średnio o 10°C, co spowodowało przejściowy spadek ciśnienia w pomieszczeniu do wartości ok. 15 Pa. Następnie gaz ogrzał się, odbierając ciepło ze ścian i powietrza oraz zwiększył swoją objętość. Doprowadziło to do ponownego wzrostu ciśnienia, który podczas wypuszczenia gazu gaśniczego wyniósł 180 Pa. Po zakończeniu etapu wyładowania gazu ciśnienie zostało wyrównane. Model numeryczny opisywał proces zmian ciśnienia w trakcie wyładowania dwutlenku węgla do komory badawczej w sposób zbliżony do rzeczywistego zjawiska obserwo-

Model CFD przewiduje zarówno wzrost, jak i spadek ciśnienia na dobrym poziomie zgodności z wynikami eksperymentalnymi. Znacznym ograniczeniem równania normowego jest brak możliwości wyznaczenia najniższej wartości ciśnienia osiąganego w pomieszczeniu chronionym. Błąd zastosowanych metod badawczych oszacowano przez porównanie maksymalnego oraz minimalnego ciśnienia zmierzonego eksperymentalnie z wartościami oszacowanymi na podstawie równania normowego oraz wyznaczonymi metodą CFD (tabela 2 i 3).

W odniesieniu do maksymalnych wartości ciśnienia osiąganych w pomieszczeniu chronionym, model CFD prognozował wartości ciśnienia ze średnim błędem względnym $\delta = 2,4\%$ (tabela 2). Wartość średniego błędem względnym w przypadku ciśnienia minimalnego wynosiła $\delta = 17,1\%$ (tabela 3). Równanie normowe pozwalało na oszacowanie maksymalnej wartości ciśnienia ze średnim błędem względnym $\delta = 19,3\%$, każdorazowo przekraczając wartość rzeczywistą osiągniętą w trakcie eksperymentu (tabela 2). Ponadto podejście normowe nie pozwalało na wyznaczenie minimalnej wartości ciśnienia w pomieszczeniu (tabela 3).

Przyczyną oszacowanych błędów mogła być ograniczona dokładność przyrządów pomiarowych zastosowanych w badaniach eksperymentalnych

Tabela 2. Maksymalne ciśnienie podczas wyładowania gazu gaśniczego

Table 2. Maximum pressure during extinguishing gas discharge

Gaz gaśniczy	Powierzchnia odciążająca [cm ²]	Ciśnienie maksymalne			Błąd względny δ [%]	
		eksperyment [Pa]	NFPA.12, 2018 [Pa]	CFD [Pa]	równanie normowe	CFD
CO ₂	208,42	180	200	180	11,1	0
CO ₂	208,42	172	200	180	16,3	4,7

Tabela 3. Minimalne ciśnienie podczas wyładowania gazu gaśniczego

Table 3. Minimum pressure during extinguishing gas discharge

Gaz gaśniczy	Powierzchnia odciążająca [cm ²]	Ciśnienie maksymalne			Błąd względny δ [%]	
		eksperyment [Pa]	NFPA.12, 2018 [Pa]	CFD [Pa]	równanie normowe	CFD
CO ₂	208,42	15	–	12	–	20
CO ₂	208,42	14	–	12	–	14,2

(układ pomiarowy wyznaczył ciśnienie z podanym przez producenta względnym błędem $\leq \pm 0,4\%$).

Normowe podejście do oszacowania wartości osiąganego ciśnienia zawiera pewne uproszczenia w opisie wzrostu ciśnienia w pomieszczeniach podczas uwalniania gazu gaśniczego. Takie podejście może pomijać ważne cechy rzeczywistego układu, co wpływa na dokładność poszukiwanego rozwiązania. W związku z tym **wartość wzrostu ciśnienia prezentowana w podejściu normowym może różnić się od wartości rzeczywistej**. W teorii metod numerycznych błąd obliczeniowy może wynikać z początkowych założeń upraszczających oraz błędów związanych z ograniczeniami przyjętego modelu obliczeniowego.

Podsumowanie i wnioski

Prawidłowe prognozowanie zmiany ciśnienia podczas uwalniania gazu gaśniczego ma ogromny wpływ na bezpieczeństwo chronionych obiektów. Wyładowanie dwutlenku węgla to złożony proces. Po początkowym wzroście następuje chwilowy spadek ciśnienia spowodowany efektem schłodzenia się gazu, a następnie kolejny wzrost ciśnienia w pomieszczeniu w wyniku napływu kolejnych porcji gazu. Zawyżenie wartości spodziewanego wzrostu ciśnienia może skutkować przyjęciem zbyt dużej powierzchni odciążającej, nato-

miast nieuwzględnienie podciśnienia prowadzi do uszkodzenia elementów konstrukcyjnych pomieszczeń. W związku z tym kluczową kwestią jest przewidywanie zmiany ciśnienia w chronionym pomieszczeniu z zastosowaniem wiarygodnych metod. W celu zweryfikowania tej koncepcji wykonałam obliczenia CFD uwolnienia dwutlenku węgla z SUG-gazowego do chronionego pomieszczenia testowego. Walidację wyników modelowania numerycznego przeprowadziłam na podstawie analizy porównawczej wartości zmiany ciśnienia, w trakcie wyładowania gazu w komorze badawczej, uzyskanych w drodze symulacji komputerowych z wynikami eksperymentów fizycznych i obliczeń z wykorzystaniem standardowego równania.

Uzyskane wyniki wskazują, że prognozowane numerycznie zmiany ciśnienia w komorze testowej są zgodne z danymi eksperymentalnymi. Natomiast wyniki uzyskane metodą standardową obarczone są większym błędem oraz nie ma możliwości szacowania wartości spadku ciśnienia występującego okresowo w pomieszczeniu.

Należy podkreślić, że zastosowanie metod CFD nie oznacza eliminacji podejścia teoretycznego i eksperymentalnego, ale może być ich uzupełnieniem. Model numeryczny CFD może odwzorowywać zmianę ciśnienia podczas wy-

ładowania gazu gaśniczego w pomieszczeniu chronionym przez SUG-gazowe. Dobór odpowiedniej powierzchni odciążającej za pomocą metod numerycznych może pomóc w poprawie bezpieczeństwa pożarowego przy niższych kosztach. W przyszłości wykorzystanie metody obliczeniowej dynamiki płynów CFD stanie się nowym ważnym narzędziem inżynierskim w badaniach obejmujących ochronę obiektów gazowymi urządzeniami gaśniczymi.

Literatura

- [1] ANSYS Fluent 18.2 (2017), Users Guide Manual, ANSYS Inc, USA.
- [2] Boroń Sylwia, Wojciech Węgrzyński, Przemysław Kubica, Lech Czarniecki. 2019. „Numerical modelling of the fire extinguishing gas retention in small compartments”. *Applied Sciences*, Vol. 9 No. 4, 663.
- [3] Fiejko Krzysztof. 2009. „Zagrożenia w stosowaniu SUG”. *Ochrona Przeciwpożarowa*, Vol. 28 nr 2.
- [4] Genge Colin. 2011. *Clean agent enclosures design optimization for peak pressures and agent retention*. Proceedings of the SFPE Engineering Technology Conference, Portland, OR, USA.
- [5] John, James and Keith Theo. 2006. *Gas Dynamics*, 3rd ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New York.
- [6] Krupa Rafał, Przemysław Kubica. 2011. „Relief openings in rooms protected by Fixed Extinguishing System-gaseous”. *Ochrona Przeciwpożarowa*, Vol. 3.
- [7] Kubica Przemysław. 2014. *Retention time of gaseous extinguishing systems in the Fire Safety of Compartments*. Rozprawa doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, Poland.
- [8] Kubica Przemysław, Lech Czarniecki, Sylwia Boroń, Wojciech Węgrzyński. 2016. „Maximizing the retention time of inert gases used in fixed gaseous extinguishing systems”. *Fire Safety Journal*, Vol. 80.
- [9] NFPA 12. 2018. „Standard of Carbon Dioxide Extinguishing Systems”. NFPA: Quincy, MA, USA.
- [10] PN-ISO 8421-4 (1998). *Ochrona przeciwpożarowa. Terminologia. Wyposażenie gaśnicze*. PKN: Polska”; PKN: Polska.
- [11] Robin Mark, Eric Forssell, Vimal Sharma. 2005. *Pressure dynamics of clean agent discharges*, NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [12] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG.

Przyjęto do druku: 22.11.2020 r.

Partner działu: **PROMAT TOP Sp. z o.o.**
www.promat.com

Promat