



Wybuch gazu w budynkach mieszkalnych. Wybuch wentylowany

TADEUSZ CHYŻY

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Katedra Mechaniki Konstrukcji,
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45E, t_chyzy@interia.pl

Streszczenie. W artykule zaprezentowano istotne informacje związane z tzw. wentylowanym wybuchem gazu. Wybuch wentylowany to wybuch, w trakcie którego następuje zniszczenie określonych, najczęściej najsłabszych elementów budynku, takich jak okna czy drzwi. Poprzez powstałe otwory (powierzchnie odprężające) wypływają zarówno spaliny, jak i niespalona część mieszanki gazowej. W konsekwencji może nastąpić znaczna redukcja ciśnienia względem ciśnienia, które uzyskano by w obszarze całkowicie zamkniętym. Maksymalny pik ciśnienia wybuchu odprężonego (wentylowanego) określa się jako ciśnienie zredukowane P_{red} .

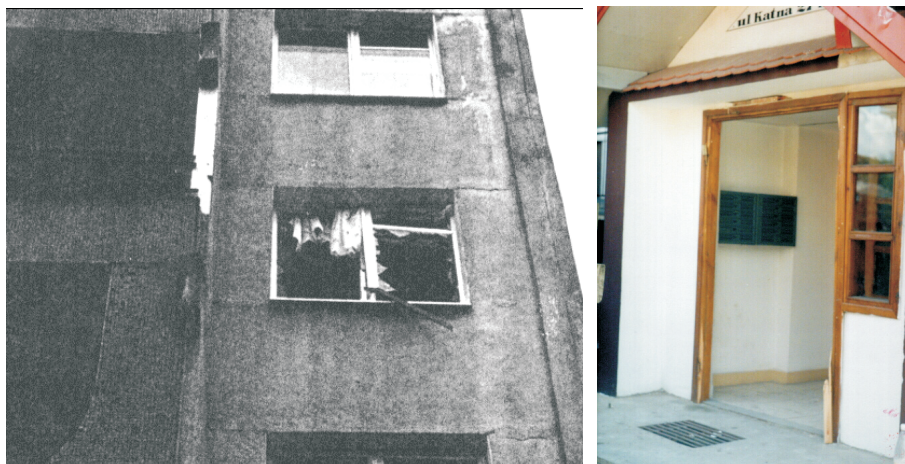
Słowa kluczowe: gaz, wybuch gazu, spalanie, powierzchnie odprężające

DOI: 10.5604/12345865.1116933

1. Wstęp

Jedną z głównych wad paliwa gazowego jest jego podatność na zaistnienie zjawiska wybuchu, które może mieć katastrofalne skutki dla bezpieczeństwa obiektu i zamieszkujących w nim ludzi. Badania przyczyn zaistnienia wybuchów gazu wskazują, że istotną rolę odgrywa tzw. czynnik ludzki, czyli ludzka nieuwaga, nieświadomość zagrożenia i niefrasobliwość. Z tego względu nawet najnowocześniejsze elektroniczne systemy ostrzegania i zabezpieczeń nie są w stanie całkowicie wyeliminować tego zagrożenia. Jak zatem zminimalizować skutki wybuchu? Jednym ze sposobów jest wykorzystanie efektu odprężania ciśnienia wybuchu, czyli zmniejszenia obciążenia, jakie wywiera wybuch na elementy konstrukcji. Jest to tzw. wybuch wentylowany, czyli przypadek, gdy część powierzchni zamykającej obszar wybuchu otwiera się w trakcie

jego trwania, umożliwiając wypływ produktów spalania lub nawet mieszanki jeszcze niespalonej [1]. Powoduje to zmianę parametrów funkcji wybuchu, w konsekwencji zmniejszenie obciążenia elementów konstrukcji do poziomu ciśnienia zredukowanego P_{red} [6, 9]. W pomieszczeniach mieszkalnych takimi naturalnymi powierzchniami odprężającymi (upustowymi, nazywanymi dalej w skrócie wentylami) mogą być powierzchnie okien lub drzwi [10, 13] czy nawet lekkich przegród działowych.



a) wybite szyby okienne

b) „wyrwane” drzwi

Rys. 1. Przykład wentyli, które „zadziałały” — otwór okienny i drzwiowy

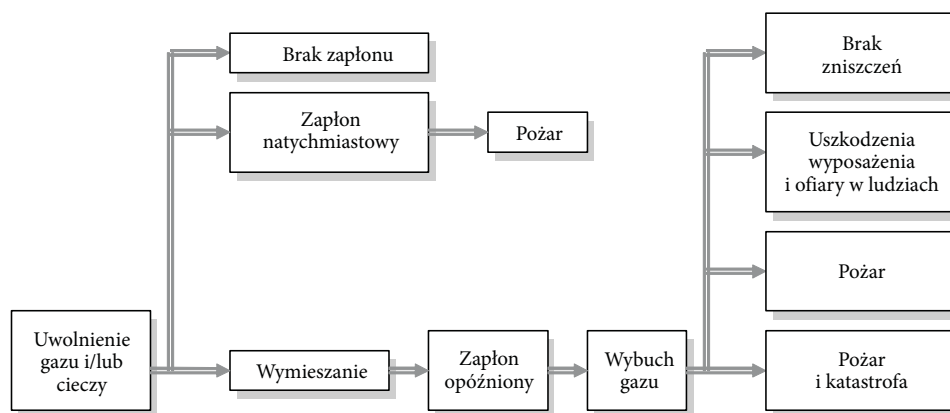
O skuteczności powierzchni odprężających (wentyli) decyduje szereg czynników, z których najistotniejsze to: powierzchnia wentyla A_v , bezwładność wentyla w (rozumiana jako jego gęstość powierzchniowa) czy ciśnienie otwarcia wentyla P_v .

Przebieg czasowy funkcji ciśnienia wybuchu wentylowanego oraz jego zależność od wybranych parametrów są przedstawione w artykule.

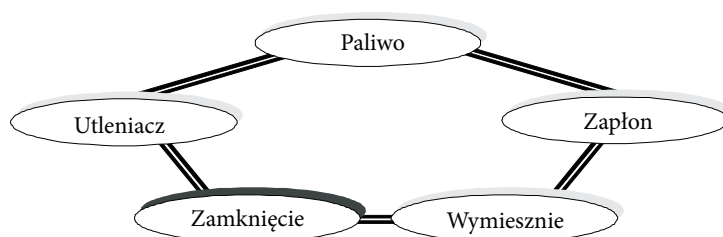
2. Charakterystyka funkcji wybuchu wentylowanego

Zjawisko wybuchu gazu następuje po spełnieniu pewnych określonych warunków. Ilustruje to diagram pokazany na rysunku 2, nazywany drzewem zależności [3].

Drugim ważnym warunkiem powstania wybuchu jest fizyczne zamknięcie jego obszaru, gdyż w otwartej przestrzeni proces spalania może być traktowany jako izobaryczny (z wyjątkiem reakcji szybkich, prowadzących do detonacji [28]). Wprowadzono zatem pojęcie pięciokąta wybuchowości (rys. 3), gdzie warunkiem



Rys. 2. Drzewo zależności



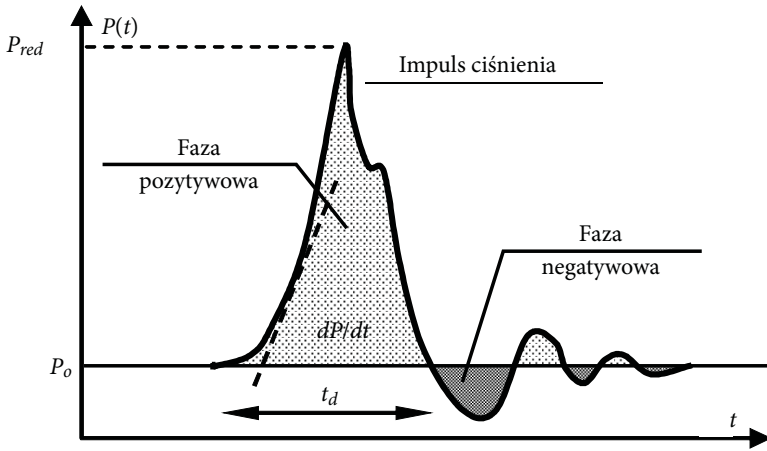
Rys. 3. Pięciokąt wybuchowości

koniecznym do powstania wybuchu jest jego fizyczne zamknięcie [16]. Dla budynku oznacza to obszar ograniczony na przykład ścianami i stropami pomieszczenia.

Samo zjawisko wybuchu ma przebieg deflagacyjny, tzn. spalanie następuje z prędkością nie większą niż prędkość dźwięku w mieszance gazowej przed zapłonem, pod warunkiem że pomieszczenia mają regularne kształty (maksymalnie zbliżone do opisu sfery). Poszczególne wymiary pomieszczeń mieszkalnych (długość, szerokość, wysokość) są w zasadzie do siebie zbliżone i można założyć, że spełniają te warunki.

W przypadku natomiast obszarów wydłużonych, typu tunel, rurociąg czy korytarz piwniczny w budynku, wybuch może mieć przebieg bardziej złożony, w skrajnych przypadkach prowadząc nawet do powstawania fali uderzeniowej.

Dla procesów deflagacyjnych przykładową postacią funkcji czasowej ciśnienia wybuchu wentylowanego pokazano na rysunku 4. Charakteryzuje ją oscylacyjna, gasnąca zmienność wartości ciśnienia wokół punktu równowagi, jakim jest wartość ciśnienia początkowego P_0 . Czas, w którym wartość ciśnienia jest większa od ciśnienia początkowego (nadciśnienie), określa się mianem fazy pozytywowej, gdy zaś ciśnienie jest mniejsze od wartości początkowej (podciśnienie), to stan ten określa

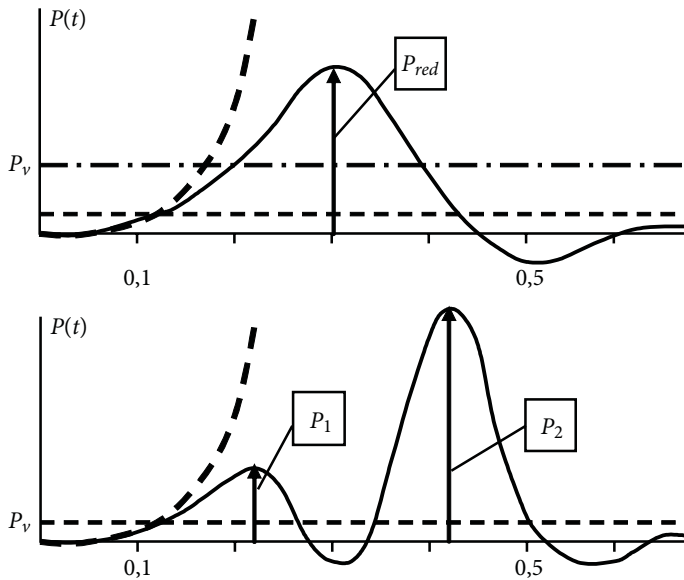


Rys. 4. Przykład rzeczywistej zależności ciśnienie–czas przy wybuchu gazu

się jako fazę negatywną. W większości zagadnień związanych z oddziaływaniem wybuchu na elementy budowli istotna jest faza pozytywna. W dalszych rozważaniach utożsamia się ją z funkcją ciśnienia wybuchu $P(t)$.

Charakterystycznymi elementami funkcji ciśnienia wybuchu są:

- wartość maksymalna ciśnienia wybuchu wentylowanego P_{red} ,
- czas jej trwania t_d i związany z nim gradient przyrostu ciśnienia dP/dt (dynamika wybuchu).

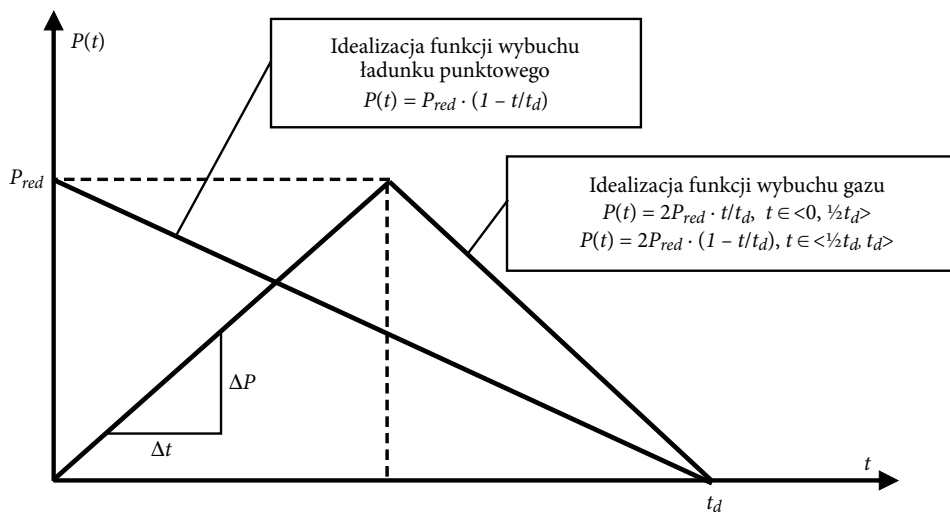


Rys. 5. Postacie fali wybuchu wentylowanego

W przypadku wewnętrznego wentylowanego wybuchu gazu typowe funkcje czasowe ciśnienia wybuchu przedstawiono na rysunku 5. W celach porównawczych charakterystyki wybuchu ograniczono do jednego lub dwóch pików ciśnienia w różnej konfiguracji.

Na rysunku 6 przedstawiono uproszczone, często stosowane w obliczeniach komputerowych aproksymacje funkcji ciśnienia wybuchu gazu. Zaprezentowano aproksymację dla wewnętrznego wybuchu gazu oraz porównawczo wybuchu ładunku punkтового. Wybuch ładunku punkтового znacznie różni się od wybuchu gazu [5]. Spowodowane jest to znacznie szybszym procesem spalania materiału wybuchowego w stosunku do szybkości spalania gazu. Dlatego często w aproksymacji wybuchu ładunku punkтового pomija się jego czas narastania, przyjmując, że jest on nieskończenie krótki. Natomiast czas narastania ciśnienia przy wybuchu gazu jest bardzo istotny, gdyż decyduje on o tzw. dynamiczności procesu. Definiuje się go parametrem określającym przyrost ciśnienia w czasie i na rysunku 4 oraz rysunku 6 jest oznaczony jako dP/dt lub $\Delta P/\Delta t$. Przyjmuje się często, że:

$$\Delta P/\Delta t = (dP/dt)_{\max}. \quad (1)$$



Rys. 6. Idealizacja charakterystyk wybuchu

3. Ciśnienie maksymalne wybuchu wentylowanego P_{red}

Ze względu na stosunkowo powolny przebieg czasowy funkcji ciśnienia wybuchu (mieszanki metanowe i propanowe), jego ciśnienie zredukowane P_{red} okazuje się być najważniejszym parametrem decydującym o bezpieczeństwie obiektu. Jest to możliwe i uzasadnione faktem, że charakterystyki funkcji ciśnienia mają stosunkowo

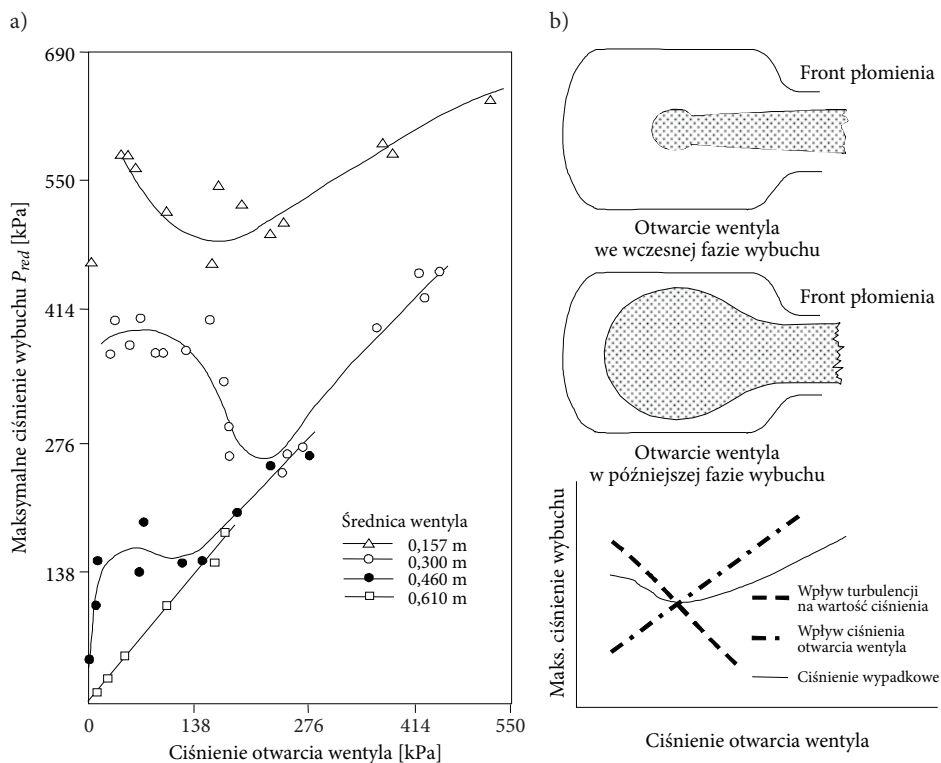
„powolny” przebieg czasowy w korelacji do charakterystyk częstotliwościowych budynków i ich elementów. Często w przypadku wybuchu takich gazów jak metan czy propan obciążenie dynamiczne powoduje wyężenie odpowiadające wartości statycznej równej ciśnieniu zredukowanemu $P_{stat} \approx P_{red}$. Nie można jednak tego stwierdzenia rozszerzać na inne gazy. Przykładowo dla wodoru (paliwo przyszłości) i innych gazów dynamiczność funkcji wybuchu może być kilkukrotnie większa w stosunku do dynamiczności wybuchu metanu czy propanu.

Większość gazów palnych i palnych par cieczy w stężeniu stechiometrycznym, zapalone w pomieszczeniu całkowicie zamkniętym, wytwarza produkty spalania, osiągając maksymalne ciśnienie P_{max} około 7÷8 barów (w przybliżeniu 700÷800 kPa). Tu dla celów porównawczych należy podać przykładową odporność ścian nośnych budynków, która wynosi kilkanaście, i zwykle nie więcej niż kilkadziesiąt kPa. Jak można zauważyć, ciśnienie maksymalne odniesione do obszaru zamkniętego jest destrukcyjne dla budynków. Tak ważne zatem dla bezpieczeństwa konstrukcji jest wykorzystanie otworów dekompresyjnych, które umożliwiają redukcję ciśnienia do wartości P_{red} .

Otwory dekompresyjne redukują ciśnienie wybuchu dlatego, że część niespalonego jeszcze medium gazowego zostaje wypchana na zewnątrz ciśnieniem wytworzonym przez część gazu spaloną po przejściu frontu płomienia. Jednocześnie wyrzucane są na zewnątrz produkty spalania, co redukuje ciśnienie za frontem płomienia. W efekcie rzeczywiste maksymalne ciśnienie wybuchu wentylowanego jest znacznie mniejsze od ciśnienia wybuchu tej samej mieszaniny w pomieszczeniu zamkniętym.

Pomimo prostej definicji wybuchu wentylowanego, w rzeczywistości, w wyniku spalania turbulentnego, zjawisko to jest bardzo złożone i trudne do poprawnego opisu matematycznego. Jako przykład wpływu turbulencji na parametry wybuchu można podać wyniki badań przeprowadzonych przez Harrisa i Briscoe [15], zaprezentowane na rysunku 7. Dotyczą one wpływu ciśnienia otwarcia wentyla P_v na wartość maksymalnego ciśnienia wybuchu wentylowanego P_{red} , gdzie ciśnienie P_v rozumiane jest jako wartość statyczna ciśnienia, przy którym powierzchnia odprężająca (wentyl) ulega zniszczeniu (otwarceniu). Charakterystycznym zjawiskiem jest tu nieliniowa zależność pomiędzy maksymalnym ciśnieniem wybuchu gazu P_{red} a ciśnieniem otwarcia wentyla P_v . Końcowy efekt wybuchu jest zawsze funkcją wypadkową wielu czynników, również w przypadku opisywanego doświadczenia, w którym wykres funkcji ciśnienia tłumaczy się jako wynik sumowania wpływu ciśnienia otwarcia wentyla i wpływu procesu spalania turbulentnego. Zjawisko to zobrazowano na rysunku 7b.

Analizując wyniki eksperymentu Harrisa i Briscoe [15], można zauważyć, że gdy powierzchnia wentyla A_v jest duża oraz ciśnienie otwarcia wentyla P_v jest duże, to zredukowane ciśnienie wybuchu P_{red} jest limitowane przez ciśnienie P_v . Natomiast kiedy współczynnik wentylacji K jest duży przy niskim ciśnieniu P_v , to ciśnienie wybuchu znacznie przekracza ciśnienie otwarcia wentyla. Zjawisko to



Rys. 7. Zależność ciśnienia wybuchu od ciśnienia otwarcia wentyla dla mieszanki 2,50 mola pentanu z powietrzem

tłumaczy się dużym przyrostem powierzchni płomienia, kiedy wentyl otwiera się we wczesnej fazie wybuchu, co prowadzi do intensyfikacji płomienia i związanego z tym przyrostu ciśnienia. Kiedy obie wielkości K i P_v są duże, przyrost frontu płomienia jest nieznaczny, ponieważ płomień już wcześniej zdążył wypełnić dużą część zbiornika.

Ze względu na złożoność zjawiska wentylowanego wybuchu gazu poprawny jego opis matematyczny, wynikający z podstaw analitycznych, jest utrudniony. Mimo to powstało szereg metod określających ciśnienie maksymalne, przykładowo:

- metoda Bensona i Burgoyne'a [2],
- metoda Bradleya i Mitchesona [4],
- metoda Fairweather'a i Vaseya [14],
- metoda Mulpuru i Wilkina [20],
- metoda Pittsburgska [22],
- metoda Sapko [26],
- metoda Yao [27],
- i inni Canu [7], Chippett [8], Mołkow [19].

Metody analityczne uważa się w zastosowaniach praktycznych za zbyt złożone, ich realizację za uciążliwą, a wynik działań z ich użyciem nie musi zawsze być zadowalający. Często zatem zainteresowanie badaczy skupia się na maksymalnym ciśnieniu wybuchu wentylowanego, które można uzyskać znacznie prostszymi metodami, opracowanymi na bazie wielu eksperymentów i analizy zaistniałych przypadków wybuchów. Są to tzw. metody empiryczne i półempiryczne, dla których analizy porównawcze można znaleźć m.in. w pracach [17, 25]. Jest to uzasadnione, ponieważ, jak już wspomniano wcześniej, dynamiczność fali ciśnienia wybuchu niektórych gazów użytkowych jest stosunkowo mała w korelacji do parametrów częstotliwościowych konstrukcji budowlanych i ich części.

Poniżej zaprezentowano przykładowe metody empiryczne i półempiryczne używane do wyznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu wentylowanego P_{red} . Jako pierwszą metodę zaprezentowano równanie Rasbasha [23]. Stwierdza on, że ciśnienie maksymalne wybuchu wentylowanego P_{red} (przy pewnych warunkach) można opisać poprzez trzy główne składniki: ciśnienie otwarcia wentyla P_v , ciśnienie związane z bezwładnością wentyla i opór związany z wypływem gazu przez wentyl. Można zapisać to w postaci następującego wzoru:

$$P_{red} = A \cdot P_v + P_l + B \cdot K, \quad (2)$$

gdzie trzy składniki wzoru po prawej stronie równania reprezentują, podane wyżej, trzy wielkości determinujące przebieg wybuchu wentylowanego. Bezwładność wentyla wynika z ruchu masy, jaką fizycznie stanowi powierzchnia odprężająca. W procesie dynamicznym masa wentyla determinuje zatem szybkość „udostępniania” pełnej powierzchni odprężającej. Ruch masy wentyla rozpoczyna się z chwilą osiągnięcia ciśnienia otwarcia wentyla P_v , w przypadku budynku przykładowo może to być pęknięcie i rozrzućenie odłamków szyb okiennych. Bezwładność wentyla oznacza się parametrem w określającym stosunek masy wentyla do jego powierzchni.

Kolejny parametr K jest współczynnikiem wentylacji zdefiniowanym jako stosunek iloczynu dwóch krótszych boków pomieszczenia prostopadłościennego L_1 i L_2 do powierzchni wentyla A_v :

$$K = \frac{L_1 \cdot L_2}{A_v}. \quad (3)$$

Wielkości A i B są stałymi, przy czym na podstawie badań z mieszaną propa-nowo-powietrzną Rasbash ustalił wartość stałej $A = 1,5$, a stałej $B = 5,56$. Ciśnienie P_l zaproponował wyznaczać ze wzoru:

$$P_l = \frac{(0,20 \cdot K \cdot w + 1,17)}{V^{1/3}}. \quad (4)$$

Ciśnienie zredukowane można zatem opisać wzorem:

$$P_{red} = 1,5 \cdot P_v + S_u (P_l + 2,5 \cdot K) / 0,45. \quad (5)$$

Stosowalność tych równań jest ograniczona do następujących warunków:

$$K = 1 \div 5, \quad w < 24 \text{ kg/m}^2, \quad P_v < 7 \text{ kN/m}^2, \quad L / D < 3. \quad (6)$$

Powyższe równania mogą być sprowadzone do głównego wzoru empirycznego o postaci:

$$P_{red} = 1,5 \cdot P_v + \frac{0,20 \cdot K \cdot w \cdot S_u}{0,45 \cdot V^{1/3}} + \frac{1,17 \cdot S_u}{0,45 \cdot V^{1/3}} + \frac{2,5 \cdot S_u \cdot K}{0,45}, \quad (7)$$

gdzie: P_{red} — maksymalne ciśnienie wybuchu wentylowanego;
 P_v — ciśnienie otwarcia wentyla [kPa]; jest to wartość statyczna ciśnienia, które powoduje jego otwarcie, a w przypadku okien lub innych elementów konstrukcji budowlanej — ich zniszczenie;
 K — współczynnik wentylacji;
 w — parametr bezwładności wentyla [kg/m^2];
 S_u — prędkość spalania mieszaniny [m/s];
 V — objętość strefy wybuchu [m^3];
0,45 — współczynnik skalujący względem podstawowej prędkości spalania propanu w powietrzu.

Kolejne wyrażenia zaproponował Rasbash w pracy [24], pomijając bezwładność wentyla jako mało istotny czynnik:

$$P_{red} = P_v + 7,76 S_u K, \quad (8)$$

lub

$$P_{red} = S_u (P_v + 7,76 K). \quad (9)$$

Cubbage i Marshall [11] z kolei proponują wyrażenie o postaci:

$$P_{red} = P_v + 2,44 (K w S_u^2 / V^{1/3}), \quad (10)$$

a Burgoyne i Wilson [6] wyniki własnych doświadczeń dla mieszaniny pentanu z powietrzem opisują wzorem:

$$P_{red} = 68 \log_{10}(1 / K) - 28,6, \quad (11)$$

gdzie wynik podawany jest w [psi].

Ponieważ wybuch wentylowany może przybierać postać funkcji czasowej z jedną lub więcej wartościami pikową ciśnienia, z tego powodu niektórzy badacze zalecają stosowanie wyrażen na pierwszy i drugi pik ciśnienia. Cubbage i Simmonds [12] proponują, bazując na badaniach wybuchów gazu miejskiego i metanu, wyznaczyć pierwszy i drugi pik ciśnienia ze wzorów:

$$P_1 = \frac{0,43K_w S_u}{V^{1/3}} + \frac{2,817S_u}{V^{1/3}}, \quad P_2 = 5,8S_u K. \quad (12)$$

przy czym maksymalne ciśnienie wybuchu może wystąpić w którymś z nich. Jak łatwo zauważyć, we wzorach nie uwzględnia się ciśnienia otwarcia wentyla.

Wyrażenia podobne do wzoru (7) zaproponował Dragosavic [13]. Wzory na dwie szczytowe wartości ciśnienia mają postać (przytoczone wg Lunna [17]):

$$P_1 = P_v + C, \quad P_2 = AP_v + B / \Psi^2 + C, \quad (13)$$

$$\Psi = A_v / V, \quad A = 0,5, \quad B = 0,04 \text{ kN/m}^4, \quad C = 3,0 \text{ kN/m}^2.$$

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że wszystkie zaprezentowane metody empiryczne są mocno zdeterminowane przez warunki samego eksperymentu. Z tego powodu, mimo że dobrze opisują dany eksperyment, nie są uniwersalne, a ich stosowanie musi podlegać ograniczeniom.

4. Analiza porównawcza

Wybrane metody empiryczne poddano weryfikacji, w której wykorzystano konkretne przypadki wybuchu gazu. Użyto wyników analiz własnych autora dla jednego z rzeczywistych przypadków wybuchu gazu w budynku w Warszawie [9] oraz przypadek literaturowy dotyczący wybuchu w budynku Ronan Point [18]. W analizie pominięto metody nieuwzględniające zjawiska turbulizacji gazu w czasie procesu spalania, ponieważ w przypadku pomieszczeń mieszkalnych parametr ten jest istotny. Wyniki badań wybranych metod empirycznych i półempirycznych zaprezentowano w tabelach 1 i 2.

Zaprezentowane w tabelach wyniki badań zweryfikowano pod względem przewidywanego zakresu ciśnienia, ustalonego na podstawie skutków wybuchu, oraz dodatkowo podano wyniki otrzymane z metody opracowanej przez autora, nazwanej Funkcją Wybuchu Gazu — FWG [9].

TABELA 1

Parametry wybuchu wentylowanego — budynek w Warszawie [9]

Wyrażenie		Współczynnik turbulizacji			
		$\chi = 1,0$	$\chi = 2,65$	$\chi = 5,0$	$\chi = 10,0$
Rasbash [23]	[kPa]	15,90	27,30	43,50	78,00
Rasbash [24]	[kPa]	13,30	25,30	42,30	78,70
Cubbage i Marshall [11]	[kPa]	8,87	26,13	77,68	292,7
Cubbage i Simmonds [12]	[kPa]	1,69* 5,43*	4,49* 14,40*	8,47* 27,16*	16,94* 54,32*
Przewidywana wartość ciśnienia wybuchu	[kPa]	21÷33			
Metoda FWG P_{red} [9]	[kPa]	13,23	26,54	44,82	84,12
Metoda FWG dP/dt_{max}	[kPa/s]	83,988	326,892	891,567	2821,79

* odpowiednio pierwszy i drugi pik ciśnienia

Parametry wybuchu:

- gaz ziemny metanowy, stężenie 9,5%,
- $P_v = 6,0$ kPa — ciśnienie otwarcia wentyla,
- $K = 1,735 \times 2,50/1,95 \approx 2,23$ — współczynnik wentylowania,
- $A_v = 1,95$ m²,
- $w = 7,2$ kg/m² — bezwładność otwarcia wentyla,
- $S_u = 0,42$ m/s — prędkość spalania,
- $V = 14$ m³ — objętość strefy wybuchu przy wymiarach 1,735 × 2,50 × 3,30 m,
- $L_{max}/L_{min} = 1,902$,
- $\zeta = 0,125$ — stały w całym procesie,
- $\kappa = 1,4$,
- $\rho_o^u = 1,23$ kg/m³,
- $P_{at} = 101,3$ kPa,
- $P_o = 101,3$ kPa,
- $\eta = 1$,
- $\lambda = 1$,
- χ — wsp. turbulizacji równy 1,0; 2,65; 5,0 i 10,0.

TABELA 2

Parametry wybuchu wentylowanego — budynek Ronan Point [18]

Wyrażenie		Współczynnik turbulizacji			
		$\chi = 1,5$	$\chi = 2,65$	$\chi = 5,0$	$\chi = 8,0$
Rasbash [23]	[kPa]	20,75	28,61	44,66	65,16
Rasbash [24]	[kPa]	16,74	24,21	39,48	58,96
Cubbage i Marshall [11]	[kPa]	17,02	38,28	118,4	292,1
Cubbage i Simmonds [12]	[kPa]	3,23*	5,71*	10,77*	17,24*
		7,28*	12,86*	24,27*	38,83*
Przewidywana wartość ciśnienia wybuchu	[kPa]	17,5÷35			
Metoda FWG P_{red} [9]	[kPa]	19,8732	30,478	52,553	80,6632
Metoda FWG dP/dt_{max}	[kPa/s]	174,851	391,995	1101,62	2428,82

* odpowiednio pierwszy i drugi pik ciśnienia

Parametry wybuchu:

- gaz — propan, stężenie 4%,
- $P_v = 7,0$ kPa — ciśnienie otwarcia wentyla,
- $K = 2,40 \times 3,30/4,25 \approx 1,86$ — współczynnik wentylowania,
- $A_v = 4,25$ m²,
- $w = 14,96$ kg/m² — bezwładność otwarcia wentyla, o masie równej 63,6 kg,
- $S_u = 0,45$ m/s — prędkość spalania,
- $V = 29,4$ m³ — objętość strefy wybuchu, wymiary kuchni 3,70 × 2,40 × 3,30 m,
- $L_{max}/L_{min} = 1,54$,
- $\zeta = 0,125$ — stały w całym procesie,
- $\kappa = 1,4$,
- $\rho_o'' = 1,3216$ kg/m³,
- $P_{at} = 101,3$ kPa,
- $P_o = 101,3$ kPa,
- $\eta = 1$,
- $\lambda = 1$,
- χ — wsp. turbulizacji równy 1,5; 2,65; 5,0 i 8,0.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano podstawowe i istotne informacje determinujące parametry tzw. wybuchu wentylowanego. Na przebieg zjawiska wybuchu gazu wpływa cały szereg czynników [10], które praktycznie czynią ten proces losowym.

Precyzyjne odtworzenie czy przewidzenie charakterystyki czasowej funkcji wybuchu w złożonych układach aranżacyjno-konstrukcyjnych, a do takich zaliczamy pomieszczenia mieszkalne, przy nieprecyzyjnie określonych parametrach początkowych, jest wciąż niemożliwe na drodze analitycznej. Dlatego aktualnie większym powodzeniem cieszą się metody doświadczalne (empiryczne, ewentualnie półempiryczne).

Metody te umożliwiają z dobrym przybliżeniem określenie zarówno funkcji wybuchu gazu, przykładowo opracowana przez autora metoda FWG [9], czy też tylko określenie zredukowanego ciśnienia wybuchu P_{red} . W praktyce inżynierskiej znajomość zredukowanego ciśnienia wybuchu P_{red} jest często wystarczająca, gdyż ze względu na małą dynamiczność funkcji ciśnienia wyteżenie odpowiadające wartości statycznej odpowiada ciśnieniu zredukowanemu $P_{stat} \approx P_{red}$.

W artykule porównano wybrane metody empiryczne, wykorzystując rzeczywiste przypadki wybuchów gazu w budynkach mieszkalnych. Odniesiono je do ciśnienia wybuchu określonego na podstawie jego skutków. Stwierdzono, że dobrym odzworowaniem charakteryzują się metody, które umożliwiają wprowadzenie tzw. współczynnika turbulizacji. Uzasadnienie wartości współczynnika turbulizacji przedstawiono w pracy [9].

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że metody empiryczne są mocno zdeterminowane przez warunki samego eksperymentu. Z tego powodu, mimo że dobrze opisują dany eksperyment, nie są uniwersalne, a ich stosowanie musi podlegać ograniczeniom.

Artykuł finansowany z Pracy Statutowej nr S/WBiIS/5/2013 „Efektywne metody i algorytmy numerycznej analizy konstrukcji budowlanych z uwzględnieniem etapów studialno-projektowych, realizacji i eksploatacji”, Politechnika Białostocka, 2013.

Artykuł wpłynął do redakcji 3.03.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 12.05.2014 r.

LITERATURA

- [1] ANTHONY E.J., *The use of venting formulae in the design and protection of building and industrial plant from damage by gas or vapour explosions*, J. Hazardous Materials, 2, 23, 1977/78.
- [2] BENSON R.S., BURGOYNE J.H., British Shipbuilding Research Association, Report No 76, 1951.
- [3] BJERKETVEDT D., BAKKE J.R., WINGERDEN K., *Gas explosion handbook*, ver. 1.2, Bergen, 1993.
- [4] BRADLEY D., MITCHESON A., *The venting of gaseous explosions in spherical vessels. Theory*, Combustion and Flame, 32, 1978, 221-236.
- [5] BULSON P.S., *Explosive loading of engineering structures*, E&FN SPON, 1992.
- [6] BURGOYNE J.H., WILSON M.J.G., *The relief of pentane vapour-air explosions in vessels*, IChemE Symposium on Chemical Process Hazards, 1960, 25.
- [7] CANU P., ROTA R., CARRA S., MORBIDELLI M., *Vented Gas Deflagrations. A Detailed Mathematical Model Tuned on a Large Set of Experimental Data*, Combustion and Flame, 80, 1990, 49-64.
- [8] CHIPPETT S., *Modeling of Vented Deflagration*, Combustion and Flame, 55, 1984, 127-140.

- [9] CHYŻY T., *Metoda analizy budynków mieszkalnych obciążonych nadciśnieniem w strefie wewnętrzznego wybuchu gazu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2009.
- [10] CHYŻY T., CHOLEWICKI A., *Zjawisko wybuchu gazu w budynkach mieszkalnych — analiza zaistniałych przypadków katastrof*, Materiały I Ogólnopolskiego Sympozjum „Kompleksowa ochrona budynków przed zagrożeniem wybuchem gazu”, Katowice, 26 X 1999.
- [11] CUBBAGE P.A., MARSHALL M.R., *Pressures generated by explosions of gas-air mixtures in vented enclosures*, Institution of Gas Engineers, Communication, 926, 1973.
- [12] CUBBAGE P.A., SIMMONDS W.I., *An investigation of explosions reliefs for industrial drying ovens*, Gas Council Research Communications, GC 23, 1955, GC 43, 1957.
- [13] DRAGOSAVIC M., *Structural measures against of natural gas in multi-storey residential buildings*, Heron, 19(4), 1973.
- [14] FAIRWEATHER M., VASEY M.W., *Mathematical model of the prediction of overpressures generated by totally confined and vented explosions*, 19th Symposium (Int) on Combustion, Haifa, 1982, 47.
- [15] HARRIS G.F.P., BRISCOE P.G., *The venting of pentane-air explosions in a large vessel*, “Combust Flame”, 11(4), 1967, 329.
- [16] KRZYSTOLIK P.A. i in., *Ochrona budynków przed zagrożeniem wybuchem gazu*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2002.
- [17] LUNN G., *Venting gas and dust explosions — a review*, An Icheme Industrial Fellowship report.
- [18] MOLKOW V.V., *Explosions in buildings: modeling and interpretation of real accidents*, Fire Safety Journal, 33, 1999, 45-56.
- [19] MOLKOW V.V., DOBASHI R., SUZUKI M., HIRANO T., *Modeling of vented hydrogen-air deflagrations and correlations for vent sizing*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 12, 1999, 147-156.
- [20] MULPURU S.R., WILKIN G.B., *A Model for Vented Deflagration of Hydrogen in a Volume*, Atomic Energy of Canada Ltd., AECL-6826, 1982.
- [21] PAPPAS J.A., *Venting of large-scale volume*, Proceedings from the Control and Prevention of Gas Explosions, Oyez/IBC, 1983.
- [22] NAGY J., VERAKIS H.C., *Development and Control of Dust Explosions*, Occupational Safety and Health, vol. 8, Marcel Dekker inc. New York and Basel, 1983.
- [23] RASBASH D.J., DRYSDALE D.D., KEMP N., *Design of an Explosion Relief System for a building handling liquified fuel gases. Process Industry Hazards*, IChemE. Symposium Series, 47, 145, 1976.
- [24] RASBASH D.J., ROGOWSKI Z.W., *Gaseous explosions vented ducts*, Comb. and Flame, 4, 301, 1960.
- [25] RAZUS D., KRAUSE U., *Comparison of empirical and semi-empirical calculation methods for venting of gas explosions*, Fire Safety Journal, 36, 2001, 1-23.
- [26] SAPKO M.J., FURNO A.L., KUCHTA J.M., *Flame and pressure development of large scale CH₄-air-N₂ explosions. Bouyancy effects and venting requirements*, Bureau of Mines Report of Investigations R18176, 1976.
- [27] YAO C., DE RIS J., BAJOLAI S.N., *Evaluation of protection from explosion over-pressure in AEC gloveboxes*, Factory Mutual Research Corp., Ser. No 16215, 1969.
- [28] WŁODARCZYK E., *Plane expansion of real detonation products, Closed form solutions*, J. Tech. Phys, 25, 3/4, 1984.

T. CHYŻY

Gas explosion in domestic buildings. The vented gas explosion

Abstract. In this paper, the basic information, related to the so-called vented gas explosion, has been presented. The vented explosion it is an explosion, during which the destruction of the weakest elements of the structure occurs. Through the resulting holes (decompressing surfaces) can flow both combustion products and non-burned gas mixture. In consequence, reduction of the maximum explosion pressure P_{red} may be significant. Often, a gas explosion occurs inside residential buildings. In this case, natural vents are window and door openings.

Keywords: gas, explosion, combustion, explosion vents