

bryg. dr hab. **Marzena Półka**, prof. nadzw. SGSP¹
st. kpt. dr inż. **Bożena Kukfisz**¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 11.05.2016;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 23.05.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

Analiza wybranych parametrów wybuchowości par heksanu w podwyższonych temperaturach²

Analysis of Selected Explosion Parameters of Hexane Vapour at Elevated Temperatures

Анализ некоторых параметров взрывоопасности паров гексана при повышенных температурах

ABSTRAKT

Cel: W pracy przeprowadzono analizę wpływu temperatury na wartości parametrów wybuchowości. Celem artykułu jest określenie podstawowych parametrów wybuchowości tj. maksymalnego ciśnienia wybuchu, maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu, dolnej granicy wybuchowości par n-heksanu w podwyższonych temperaturach do 50°C i 100°C. Znajomość parametrów mieszanin palnych, a w szczególności dolnej granicy zapalności ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa przebiegu wielu procesów przemysłowych. Maksymalne ciśnienie wybuchu oraz maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu, w miarę podwyższania się temperatury zmniejszają swoją wielkość, co świadczy o tym, iż wybuch heksanu w takich warunkach staje się mniej gwałtowny. Zgodnie z szacowaniami teoretycznymi, wartość dolnej granicy wybuchowości ulega obniżeniu wraz ze wzrostem temperatury, co oznacza, iż użytkowanie substancji niebezpiecznych o właściwościach zapalnych, w podwyższonych temperaturach wiąże się z większym zagrożeniem wybuchem.

Materiał i metoda: Badania przeprowadzono w sferycznej komorze „metodą bomby” zgodnie z normami PN-EN 15967:2011 Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu gazów i par oraz PN-EN 1839:2013 Oznaczanie granic wybuchowości gazów i par [1-2]. Dzięki przeprowadzeniu pomiarów metodą B (bomby), uzyskano wielkości nadciśnienia wywołanego zapłonem substancji o odpowiednim stężeniu.

Wyniki: Wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia dla par heksanu w temperaturach 50°C i 100°C malały wraz ze wzrostem temperatury. Oznaczono je odpowiednio dla stężeń 1,675% mol oraz 1,870% mol substancji palnej. Wielkość dolnych granic wybuchowości w miarę wzrostu temperatury ulegała obniżeniu, osiągając wartość 0,881% mol w temp. 50°C, zaś 0,800% mol w temp. 100°C.

Osiągnięto maksymalne ciśnienie wybuchu wynoszące 7,160 bar oraz prędkość narastania ciśnienia 396,28 bar/s, co odpowiadało stężeniu 1,87% mol par heksanu w temperaturze 50°C oraz 5,645 bar z prędkością 369,985 bar/s dla stężenia 1,675% mol.

Wnioski: Zaleca się uwzględnianie wpływu temperatury na parametry wybuchowości, w szczególności z uwagi na poszerzenie zakresu wybuchowości pod wpływem wzrostu temperatury.

Słowa kluczowe: parametry wybuchowości par, PN-EN 15967, PN-EN 1839

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

ABSTRACT

Aim: The work comprised of a review of the impact of temperature on the values of explosiveness parameters. The aim of the publication is to determine essential explosiveness parameters, i.e. the maximum explosion pressure, maximum rate of explosion pressure rise of n-hexane vapours at elevated temperatures up to 50°C and 100°C.

The knowledge of the parameters of combustible mixtures, and in particular lower flammability limit is important for the safety of the course of many industrial processes. When the temperature increases, the maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise reducing its value, which proves that the explosion of hexane in such conditions becomes less rapid. According to theoretical estimations the lower explosion limit is reduced when temperature increases, which means that the use of hazardous substances with inflammable properties at elevated temperatures is associated with a higher risk of explosion.

Material and method: The testing was conducted in a spherical chamber in accordance with the following standards standards: PN-EN 15967:2011 The determination of the maximum explosion pressure and maximum rate of explosion pressure rise of gases and vapours and PN-EN 1839:2013 Determination of explosion limits of gases and vapours [1-2].

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej / The Main School of Fire Service; Warsaw, Poland; mpolka@sgsp.edu.pl;

² Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu / The authors contributed equally to this article;

Measurements were made using B (bomb) method which helped to obtain the volume of excess pressure induced by ignition of the substance having appropriate concentration.

Results: The value of maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise for hexane vapours at temperatures of 50°C and 100°C decreased with the growth of temperature, and has been determined for concentration of 1.675%mol and 1.870%mol of flammable substance respectively. The value of the lower explosive limit decreased as the temperature increased, and reached the value of 0.881%mol at the temperature of 50°C, and 0.800%mol at the temperature of 100°C.

Maximum explosion pressure was reached and amounted to 7.160 bar and the rate of pressure rise was 396.28 bar/s, corresponding to the concentration of 1.87 mol% vapour of hexane at 50°C and 5.645 bar at the rate of 369.985 bar/s for concentration of 1.675 mol%.

Conclusions: It is recommended to take into consideration the impact that temperature exerts on explosiveness parameters, in particular owing to the extension of the explosiveness scope under the impact of increases in temperature.

Keywords: parameters of vapour explosiveness, PN-EN 15967, PN-EN 1839

Type of article: original scientific article

АННОТАЦИЯ

Цель: В статье проведен анализ влияния температуры на уровень взрывоопасности. Цель публикации заключается в определении основных параметров взрывоопасности, то есть: максимального давления взрыва, максимальной скорости нарастания давления взрыва, нижнего предела взрывоопасности пара н-гексана при повышенных температурах до 50 и 100°C. Информация о параметрах горючих смесей, а в частности, нижнего предела воспламеняемости, имеет большое значение для обеспечения безопасности хода многих промышленных процессов. Значения максимального давления взрыва и максимальной скорости нарастания давления взрыва уменьшались по мере повышения температуры. Это свидетельствует о том, что взрыв гексана в таких условиях становится не таким сильным. В соответствии с теоретической оценкой, вместе с повышением температуры уменьшается также значение нижнего предела взрывоопасности, что означает повышенную угрозу взрыва при повышенных температурах во время использования легковозраемых опасных веществ.

Материал и метод: Исследование проводилось в сферической камере - «методом бомбы» - в соответствии со стандартами PN-EN 15967:2011 Определение максимального давления взрыва и максимального временного нарастания давления взрыва для газов и паров, а также в соответствии со стандартом PN-EN 1839:2013. Определение пределов взрывоопасности газов и паров [1-2]. Измерения проводились с помощью метода Б (бомбы), в результате которых были получены значения сверхдавления, вызванного воспламенением вещества соответствующей концентрации.

Результаты: Значения максимального давления взрыва и максимальной скорости нарастания давления для паров гексана при температурах 50 и 100°C в случае повышения температуры уменьшались. Они соответствуют концентрации 1,675% моль и 1,870% моль воспламеняющегося вещества. Значения нижних пределов взрывоопасности с повышением температуры уменьшались достигнув 0,881% моль при темп. 50°C и 0,800% моль при температуре 100°C.

Достигнуто максимальное давление взрыва в размере 7,160 бар и скорость нарастания давления – 396,28 бар/с, что соответствует концентрации 1,87% моль паров гексана при темп. 50°C и 5.645 бар при скорости 369,985 ба/с для концентрации 1,675% моль.

Выводы: Рекомендуется учитывать влияние температуры на параметры взрывоопасности, в частности, из-за её расширяющегося диапазона при повышении температуры.

Ключевые слова: параметры взрыва паров, PN-EN 15967, PN-EN 1839

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wprowadzenie

W 2010 roku w Polsce transport materiałów klasy 3, do której należy heksan, pokrywał 70,58% udziałów w rynku przewozów towarów niebezpiecznych. Do najczęściej przewożonych substancji ciekłych zapalnych należą ciecze ropopochodne. Jest to związane z rozwojem przemysłu i motoryzacji, które zwiększają popyt na ropę naftową i produkty jej destylacji. Tak duży obieg tych materiałów przyczynia się do zwiększenia częstotliwości występowania niebezpiecznych zdarzeń z ich udziałem, które wpływają negatywnie na środowisko [15]. Warto podkreślić, iż w związku z mobilnością występowanie tego rodzaju sytuacji jest nieprzewidywalne, co stwarza dodatkowe zagrożenia. Na rycinie 1 zostały przedstawione liczby zdarzeń z udziałem substancji ropopochodnych [3].

2. Analiza zagrożeń par węglowodorów

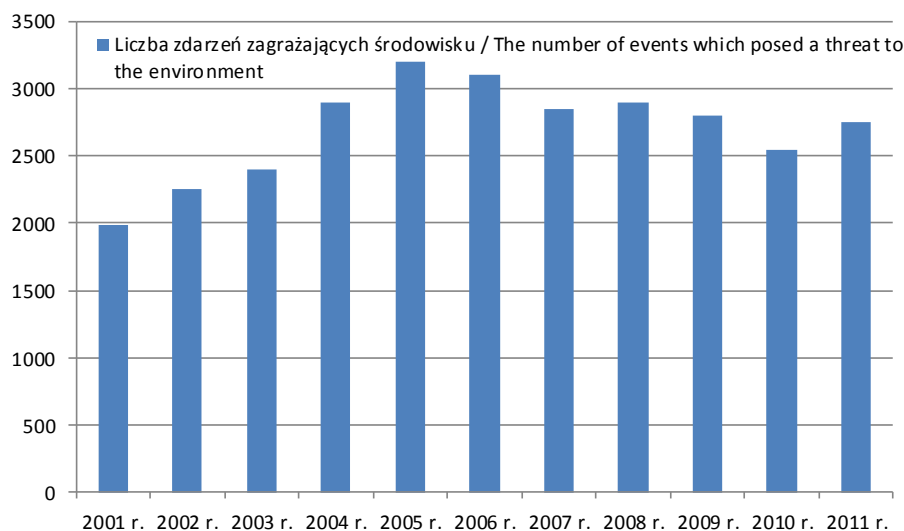
Gazowe związki węgla z wodorem w odpowiednich zakresach stężeń mają właściwości wybuchowe. Związki te wraz z powietrzem lub substancjami o właściwościach utleniających tworzą mieszaniny zapalne, które cechuje szeroki, stężeniowy zakres wybuchowości. Węglowodory zawierające w swych łańcuchach od sześciu do ośmiu atomów węgla są łatwopalnymi cieczami, których pary mają zdolność do tworzenia niebezpiecznych atmosfer wybuchowych. Cechują się one znacznie węższymi zakresami wybuchowości, jednak wielkości ich dolnych granic wybuchowości są niższe niż w przy-

padku wspomnianych związków gazowych. W związku z tym, grupa węglowodorów oznaczanych jako C6-C8 jest z punktu widzenia zagrożenia wybuchem bardziej niebezpieczna. Substancje należące do niej stosowane są jako rozpuszczalniki organiczne w wielu procesach chemicznych. Stanowią one również komponenty dla przemysłu energetycznego oraz motoryzacyjnego. Ilość zastosowań węglowodorów C6-C8, w połączeniu z ich właściwościami, wiąże się ze znaczącym poziomem zagrożenia wybuchem. Zapobieganie powstawaniu atmosfer wybuchowych w tych przypadkach jest więc niezwykle istotne. W związku z powyższym, konieczne jest zapoznanie się z wartościami charakterystyk wybuchowości tych związków, także w warunkach temperatur podwyższonych [4].

3. Zagrożenie wybuchowe – podstawowe definicje

Jako maksymalne ciśnienie wybuchu należy rozumieć największe zmierzone ciśnienie osiągnięte podczas wybuchu. Parametr jest wyznaczany doświadczalnie przez rejestrację w funkcji czasu przyrostu ciśnienia wybuchu mieszaniny gazowej lub parowo-powietrznej umieszczonej w zamkniętej komorze [5]. Parametr ten dla gazów i par wyrażony jest jako ciśnienie absolutne.

Maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu jest parametrem wyznaczanym doświadczalnie podczas badań przeprowadzanych w zbiorniku zamkniętym. Jego poziom



Ryc. 1. Liczby zdarzeń o charakterze poważnej awarii przemysłowej z udziałem węglowodorów [15]
Fig. 1. The number of events of a serious industrial accident involving hydrocarbons [15]

odpowiada największej wielkości szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, określonego w funkcji czasu, podczas procesu wybuchu, kiedy ilość palnych substancji w mieszaninie jest modyfikowana [6]. Znaczącą wielkość powyższej właściwości, można uzyskać informację na temat charakteru dynamicznego wybuchu danej mieszaniny.

Istotny jest fakt, iż pomiary maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu nie są w pełni rzetelne, a więc konieczne jest uwzględnienie marginesu błędów. Niezgodności w wynikach badań wynikają z zależności między analizowaną wielkością a objętością zbiornika. Dostrzegana jest prawidłowość, że im większa objętość reaktora, tym mniejsza jest rejestrowana prędkość przyrostu ciśnienia. W celu uwierzytelnienia pomiarów należy posługiwać się współczynnikiem K, który w teorii nie zależy od objętości reaktora, a wyznacza się go na podstawie zależności opisanej we wzorze (1). Badania potwierdziły, iż w zakresie objętości zbiornika nawet do 1000 m³ współczynnik ten można uznać za parametr stały [7].

$$K = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \times V^{1/3} \quad (1)$$

gdzie:

K- współczynnik stały [bar x m/s]
 $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max}$ - maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia [bar/s]
 V- objętość zbiornika [m³]

Dla wybranych związków nie zauważa się podobnego poziomu wielkości tego parametru jak w przypadku maksymalnego ciśnienia wybuchu. Różnice pomiędzy niektórymi wielkościami tego współczynnika sięgają nawet 500 bar x m/s [8].

Zakresem wybuchowości nazywamy przedział wielkości stężenia substancji palnej lub mieszaniny substancji palnej z powietrzem bądź z jego mieszaniną z gazem obojętnym w danych warunkach badawczych. W jego granicach istnieje prawdopodobieństwo nastąpienia wybuchu. Do wyznaczenia korelacji między utleniaczem oraz paliwem dla mieszaniny palnych cieczy lub gazów stosuje się parametry nazywane granicami wybuchowości. Granicami wybuchowości nazywa się więc najmniejsze lub największe możliwe zawartości czynnika palnego w mieszaninie zawierającej utleniacz, przy których istnieje prawdopodobieństwo nastąpienia zapłonu wskutek inicjacji bodźcem energetycznym. Ich jednostką jest

najczęściej % objętościowy, rzadziej g/m³ [8]. Dolna granica wybuchowości (DGW) odpowiada wielkości minimalnej stężenia zakresu wybuchowości, dla której może nastąpić wybuch. Górna granica wybuchowości (GGW) odpowiada wielkości maksymalnej stężenia zakresu wybuchowości, dla której może nastąpić wybuch [9]. Granice wybuchowości nie są parametrami stałymi, lecz zależą od szeregu czynników, między innymi temperatury, ciśnienia, impulsu inicjującego i składu mieszaniny [10]. Na rozbieżność zakresów wybuchowości wpływa temperatura, której wzrost, nawet w przypadku początkowej mieszaniny, znacząco rozszerza próg palności. Ważnym aspektem jest również ciśnienie, gdyż podczas jego spadku granice zapalności ulegają zwężeniu do punktu, poniżej którego nie jest możliwe zainicjowanie zapłonu. Istotną rolę pełni również skład mieszaniny. Obecność niewielkiej nadwyżki składnika łatwopalnego w stosunku do utleniacza zwiększa zakres palności. Zmniejszenie rozbieżności granic wybuchowości uzyskujemy zaś przez zwiększenie zawartości składnika inertnego. Ważne znaczenie ma również zawartość tlenu w mieszaninie, ponieważ w miarę jego wzrostu zwiększa się zakres górnej granicy wybuchowości, natomiast jej zmniejszenie minimalnie obniża zakres dolnej granicy zapłonu. Ostatnim czynnikiem jest impuls inicjujący. W przypadku zwiększenia jego mocy, zwiększa się również zakres palności. Kluczowe jest także miejsce zapoczątkowania procesu zapłonu i jego kierunek propagacji.

Znajomość parametrów mieszanin palnych, a w szczególności dolnej granicy zapalności ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa przebiegu wielu procesów przemysłowych [11]. Należy posługiwać się nimi, aby ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia wybuchu.

Zgodnie z § 33 ust. 5 rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 roku w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz. U. Nr 80, poz. 563) [8], jeśli w danym pomieszczeniu istnieje możliwość wytworzenia się z mieszaniny ciśnienia przekraczającego 5 kPa, jest ono klasyfikowane jako zagrożone wybuchem. Jeśli istnieje prawdopodobieństwo pojawienia się mieszaniny wybuchowej o objętości co najmniej 0,01 m³ w zwartej przestrzeni, obowiązku jest wyznaczenie stref zagrożenia [12].

Klasyfikacja miejsc niebezpiecznych określona jest w normie PN-EN 11271-1:1997 Zapobieganie wybuchowi i ochro-

na przed wybuchem, pojęcia podstawowe i metodologia [9]. W celu przyporządkowania zakresu środków niezbędnych do uniknięcia efektywnych źródeł zapłonu, mieszaniny gazów, par oraz mgieł zaliczane są do trzech stref. Podział odbywa się na podstawie częstotliwości i długości czasu występowania w nich atmosfery wybuchowej, stwarzającej niebezpieczeństwo. Kryteria klasyfikacyjne zostały przedstawione w tabeli 1.

Na podstawie danych przedstawionych w poniższej tabeli przyjmuje się, iż opisane warunki występują we wnętrzach rurociągów i zbiorników (strefa 0), bezpośrednim otoczeniu strefy 0, w miejscach zasilania danym surowcem oraz napełniania i opróżniania (strefa 1), a także w bezpośrednim otoczeniu stref 0 i 1 (strefa 2) [9]. Określenie stref zagrożenia pozwalała na dokonanie właściwego wyboru rodzaju urządzeń, które mogą być bezpiecznie użytkowane w danym środowisku [13-14].

4. Metodyka wyznaczania parametrów wybuchowych atmosfer parowo-powietrznych

Do badań został użyty n-heksan cz.d.a firmy CHEMPUR. Zarówno oznaczenia maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu (wg normy PN-EN 15967:2011 [1]) oraz oznaczanie granic wybu-

chowości (wg normy PN-EN 1839:2013 [2]) dla par heksanu w podwyższonych temperaturach zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym zaprezentowanym na ryc. 2. Pomiary zostały wykonane metodą B (bomby), dzięki czemu uzyskano wielkości nadciśnienia wywołanego zapłonem substancji o odpowiednim stężeniu.

Głównym elementem aparatury pomiarowej był zbiornik w kształcie kuli o pojemności 20 litrów. Zostały do niego podłączone czujnik ciśnienia statycznego oraz zawory: pompy próżniowej, powietrza, wentylacji. Stanowisko zostało także wyposażone we wskaźnik temperatury badanej mieszaniny wewnątrz zbiornika. System zapłonu stanowił drucik topikowy umieszczony na elektrodzie oraz dwa podłączone do niej przewody, a także wyzwalacz. Wyniki pomiarów uzyskiwano za pomocą zintegrowanego ze stanowiskiem badawczym komputera obsługującego program ANKO Gas Explosion Plotter Single Measurement wersja 1.0.

4.1. Wyniki badań

Wskaźniki wybuchowości [5] dla heksanu zostały określone w dwóch temperaturach 50°C i 100°C. Wyniki oznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej



Ryc. 2. Aparatura badawcza do pomiarów wybranych parametrów wybuchowości

Fig. 2. Test apparatus for measuring selected explosion characteristics

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 1. Klasyfikacja stref zagrożenia wybuchem dla mieszanin par cieczy, gazów oraz mgieł z powietrzem [7]

Table 1. Classification of hazardous areas for mixtures of vapors, gases and vapors from the air [7]

Strefa / Zone	Kryterium klasyfikacji / Classification criterion
0	Miejsce, w którym istnieje możliwość stałego, częstego lub występującego przez długie okresy pojawiania się atmosfery wybuchowej / A place where there is a possibility of permanent, frequent or long-lasting appearance of an explosive atmosphere.
1	Miejsce, w którym istnieje możliwość pojawiania się atmosfery wybuchowej w trakcie normalnego działania / A place where there is a possibility of the occurrence of an explosive atmosphere during normal operation.
2	Miejsce, w którym nie istnieje możliwość pojawiania się atmosfery wybuchowej w trakcie normalnego działania, jednak jeśli to nastąpi to trwa krótko / A place where there is no possibility of the occurrence of an explosive atmosphere during normal operation, but if it happens it is short.

szybkości narastania ciśnienia wybuchu w temperaturze 50°C zestawiono w tabeli 2.

W przypadku ciśnienia wybuchu uzyskane dane doświadczalne w zależności od stężenia heksanu zostały przedstawione na ryc. 3.

Za maksymalne ciśnienie wybuchu par heksanu przyjęto ciśnienie 7,160 bar dla stężenia heksanu równego 1,870% mol. Maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu wynosi 396,280 bar/s. Wyniki badań maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu w temperaturze 100°C przedstawia tabela 3.

Pomiary ciśnienia wybuchu w funkcji stężenia par heksanu obrazuje ryc. 4.

Maksymalne ciśnienie wybuchu w temperaturze 100°C zostało uzyskane dla stężenia heksanu wynoszącego 1,690% mol i wynosiło ono 5,645 bar. Jednocześnie maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu wynosiła 375,070 bar/s.

Wyniki oznaczeń dolnej granicy wybuchowości w temperaturze 50°C i 100°C zestawiono odpowiednio w tabelach 4 i 5.

Kształtowanie się wyników pomiarów górnej granicy wybuchowości w tych samych warunkach zostało zaprezentowane na ryc. 5.

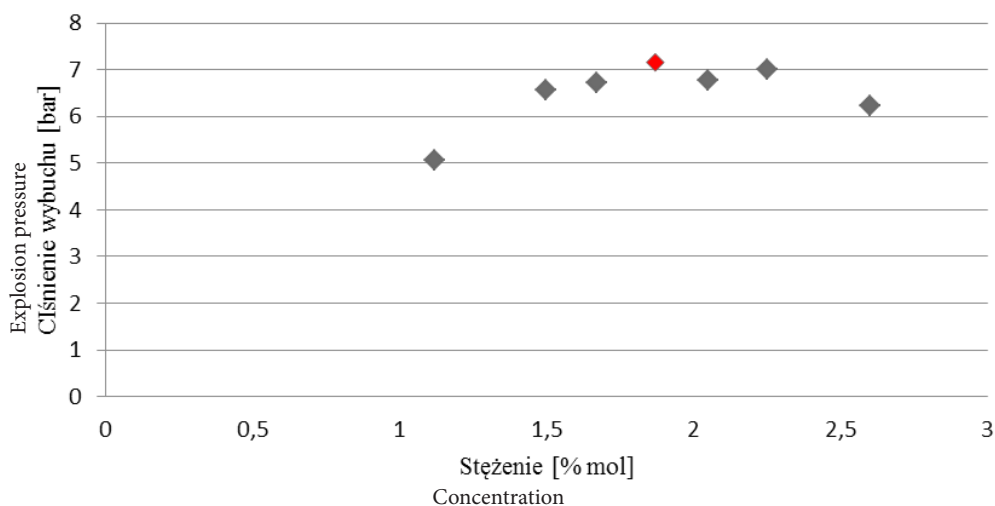
Tabela 2. Uśrednione wyniki badań eksperymentalnych: wyznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu dla par heksanu w temperaturze 50°C

Table 2. Averaged results of experimental studies: determination of maximum explosion pressure and maximum rate of explosion pressure rise for hexane vapours at the temperature of 50°C

Masa heksanu / Hexane mass [g]	Stężenie par heksanu / Vapor concentration of hexane [% mol]	Ciśnienie Wybuchu / Pressure of explosion [bar]	Szybkość narastania ciśnienia wybuchu / The rate of explosion's pressure rise [bar/s]	Współczynnik wybuchowości gazów Kg / Explosive gases Kg factor [bar x m/s]
0,96	1,12	5,06	102,56	27,79
1,30	1,50	6,57	278,80	31,29
1,44	1,67	6,71	333,43	90,36
1,61	1,87	7,16	396,28	104,68
1,76	2,05	6,76	313,81	85,04
1,94	2,25	7,00	357,56	96,90
2,24	2,60	6,24	138,95	37,65

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 3. Zależność ciśnienia wybuchu w funkcji stężenia substancji palnej w postaci par heksanu z powietrzem w temperaturze 50°C
Fig. 3. Dependence of explosion pressure in function of concentration of flammable substance such as hexane and air vapours at the temperature of 50°C

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

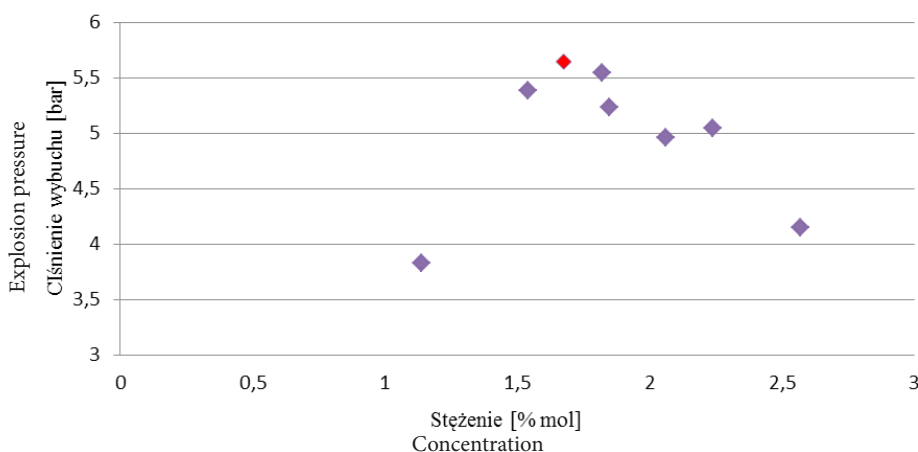
Tabela 3. Uśrednione wyniki badań eksperymentalnych: wyznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu dla par heksanu w temperaturze 100°C

Table 3. Averaged results of experimental studies: determination of maximum explosion pressure and maximum rate of explosion pressure rise for hexane vapours at the temperature of 100°C

Masa heksanu / Hexane mass [g]	Stężenie par heksanu / Vapor concentration of hexane [% mol]	Ciśnienie Wybuchu / Pressure of explosion [bar]	Szybkość narastania ciśnienia wybuchu / The rate of explosion's pressure rise [bar/s]	Współczynnik wybuchowości gazów Kg / Explosive gases Kg factor [bar x m/s]
2,21	2,57	4,15	59,73	16,19
0,98	1,14	3,83	173,28	46,96
1,93	2,23	5,04	211,11	57,21
1,77	2,06	4,96	252,31	63,38
1,60	1,85	5,23	335,57	90,94
1,33	1,54	5,38	344,26	93,29
1,44	1,68	5,65	369,99	100,27
1,57	1,82	5,54	375,07	101,64

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 4. Zależność ciśnienia wybuchu w funkcji stężenia substancji palnej w postaci par heksanu z powietrzem w temperaturze 100°C
Fig. 4. Dependence of explosion pressure in function of concentration of flammable substance such as hexane and air vapours at the temperature of 100°C

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

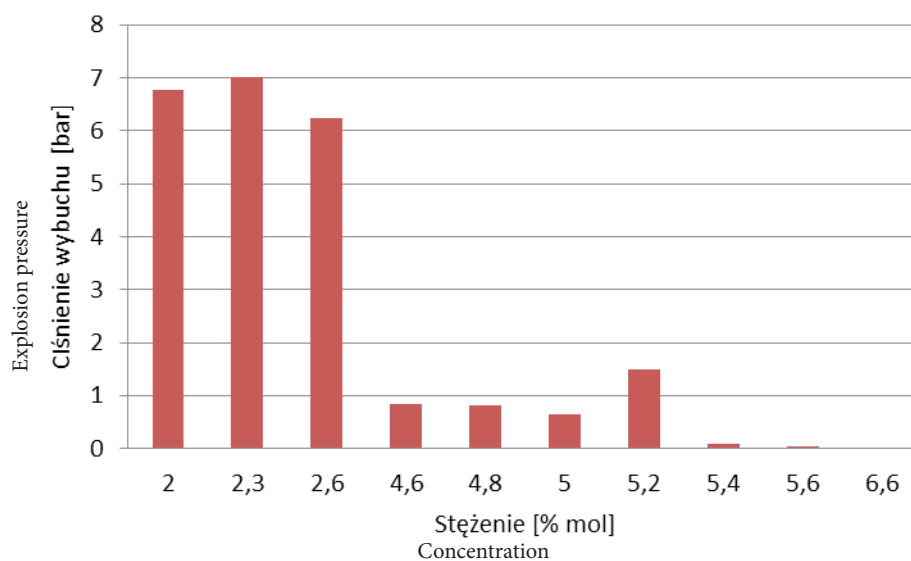
Tabela 4. Uśrednione wyniki badań eksperymentalnych oznaczanie granic wybuchowości par heksanu w temperaturze 50°C

Table 4. Averaged results of experimental studies: determination of explosive limits of hexane vapours at the temperature of 50°C

Masa heksanu Hexane mass [g]	Stężenie par heksanu / Vapor concentration of hexane [% mol]	Ciśnienie Wybuchu / Pressure of explosionm [bar]	Obecność lub brak zapłonu / Ignition or lack of ignition	Granica wybuchowości / Explosive limit
0,44	0,51	0,01	Brak zapłonu / No ignition	
0,65	0,75	0,01	Brak zapłonu / No ignition	
0,76	0,88	1,43	Zapłon / Ignition	DGW
0,87	1,01	4,56	Zapłon / Ignition	
1,60	1,86	7,16	Zapłon / Ignition	
2,24	2,60	6,24	Zapłon / Ignition	
3,98	4,63	0,85	Zapłon / Ignition	
4,14	4,81	0,82	Zapłon / Ignition	
4,31	5,00	0,65	Zapłon / Ignition	

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Wyznaczanie górnej granicy wybuchowości par heksanu w temperaturze 50°C
 Fig. 5. Determination of upper explosiveness limit of hexane vapours at the temperature of 50°C

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Dolna granica wybuchowości par heksanu w temperaturze 50°C występuje dla stężenia paliwa wynoszącego 0,875% mol.

Pomiary dolnej granicy wybuchowości w zależności ciśnienia wybuchu od stężenia par heksanu zostały zobrazowane na ryc. 6.

Uzyskano dolną granicę wybuchowości par heksanu w temperaturze 100°C, przy stężeniu substancji palnej wynoszącym 0,800% mol.

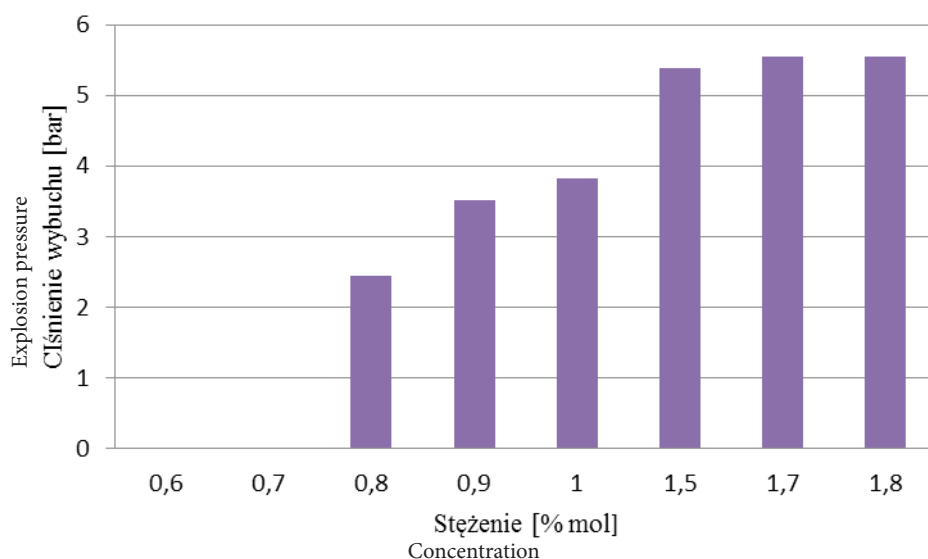
Tabela 5. Uśrednione wyniki badań eksperymentalnych: oznaczanie granic wybuchowości par heksanu w temperaturze 100°C

Table 5. Averaged results of experimental studies: determination of explosive limits of hexane vapours at the temperature of 100°C

Masa heksanu / Hexane mass [g]	Stężenie par heksanu / Vapor concentration of hexane [% mol]	Ciśnienie wybuchu / Pressure of explosion [bar]	Obecność lub brak zapłonu / Ignition or lack of ignition	Granica wybuchowości / Explosive limit
0,42	0,49	0,01	Brak zapłonu / No ignition	
0,60	0,69	0,01	Brak zapłonu No ignition	
0,69	0,80	2,45	Zapłon / Ignition	DGW
0,78	0,90	3,52	Zapłon / Ignition	
0,98	1,14	3,83	Zapłon / Ignition	
1,33	1,54	5,38	Zapłon / Ignition	
1,43	1,66	5,74	Zapłon / Ignition	
1,45	1,69	5,55	Zapłon / Ignition	
1,57	1,82	5,54	Zapłon / Ignition	
2,98	3,47	0,94	Zapłon / Ignition	
3,44	4,00	1,00	Zapłon / Ignition	
3,86	4,49	1,05	Zapłon / Ignition	

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 6. Wyznaczanie dolnej granicy wybuchowości par heksanu w temperaturze 100°C
Fig. 6. Determination of lower explosive limits of hexane vapours at the temperature of 100°C

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

5. Podsumowanie

W artykule przeprowadzono analizę wpływu temperatury dla par heksanu cz.d.a według norm: PN-EN15967:2011 Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu gazów i par oraz PN-EN 1839:2013 Oznaczanie granic wybuchowości gazów i par w podwyższonych temperaturach. Dolna granica wybuchowości wraz ze wzrostem temperatury ulegała obniżeniu. Dla 50°C wyniosła 0,875% mol, natomiast w 100°C 0,800% mol. Parametry maksymalnego ciśnienia wybuchu, jak również maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu wykazały się podobnymi tendencjami. W miarę wzrostu temperatury ich wielkości ulegały obniżeniu. Osiągnięto maksymalne ciśnienie wybuchu wynoszące 7,160 bar oraz prędkość narastania ciśnienia 396,28 bar/s, co odpowiadało stężeniu 1,87% mol par heksanu w temperaturze 50°C oraz 5,645 bar z prędkością 369,985 bar/s dla stężenia 1,675% mol.

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych rezultatów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Maksymalne ciśnienie wybuchu oraz maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu w miarę podwyższenia się temperatury zmniejszają swoją wielkość, co świadczy o tym, iż wybuchu heksanu w takich warunkach staje się mniej gwałtowny. Zgodnie z szacowaniami teoretycznymi wartość dolnej granicy wybuchowości ulega obniżeniu wraz ze wzrostem temperatury, co oznacza, iż użytkowanie substancji niebezpiecznych o właściwościach zapalnych, w podwyższonych temperaturach wiąże się z większym zagrożeniem wybuchem.
- W miarę wzrostu temperatury zakres wybuchowości ulega poszerzeniu.

Literatura

- [1] PN-EN 15967:2011 Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu gazów i par.
- [2] PN-EN 1839:2005 Oznaczanie granic wybuchowości gazów i par.
- [3] Rarata G., *Fenomen Górnej Granicy Wybuchowości (GGW) Paliw w Powietrzu i Tlenie w Warunkach Podwyższonego Ciśnienia i Temperatury*, „Prace Instytutu Lotnictwa” Vol. 204 Nr 2, 2010, 12-22.
- [4] Krawczyk M., *Wybuchowość mieszanin gazowych, czujniki chemiczne do pomiaru wybuchowości*, Wykład – analityka procesowa, Gdańsk 2003, 2, 4.
- [5] Smoleński D., *Teoria materiałów wybuchowych*, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1954, 10-11.
- [6] Wawrzyszko M., *Zagrożenie wybuchem*, „Pod kontrolą” Nr 1, 2010, 7.
- [7] Rojek P., *Badanie możliwości praktycznego zastosowania aerozolu powietrzno-wodnego w ograniczaniu zapylenia w wyrobiskach eksploatacyjnych*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2010, 17.
- [8] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (719) (Dz. U. z dnia 22 czerwca 2010 r., 9116, 9130.
- [9] PN-EN 1127-1 Atmosfery wybuchowe. Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem, Pojęcia podstawowe i metodologia, 9-12, 22-24.
- [10] Wójcicki S., *Spalanie*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969, 39-40.
- [11] Sawicki T., *Wybuchy przestrzenne*, „Bezpieczeństwo Pracy” Nr 11, 2005, 23.
- [12] G. Kałuża (red), *Przyczyny wzrostu ciśnienia wybuchu mieszaniny gazowej we wnętrzu ochrony ognioszczelnej*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2013, 25.
- [13] Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000, 112, 191-121.
- [14] Porowski R., Rudy W., Teodorczyk A., *Analiza metod badawczych granic wybuchowości cieczy palnych*, BiTP Vol. 28 Issue 4, 2012, 66.
- [15] Turek D. (red), *Transport Drogowy w Polsce w latach 2010 i 2011, Informacje i Opracowania Statystyczne*, Główny Urząd Statystyczny w Szczecinie, Warszawa 2013, 181.

Artykuł został opracowany w ramach projektu nr DOB-BIO6/02/50/2014, pt. „Opracowanie metod neutralizacji zagrożenia wybuchu wytypowanych zbiorników z gazami technicznymi, w tym alternatywnymi źródłami zasilania w środowisku pożarowym na potrzeby ratowników biorących udział w akacjach ratowniczo-gaśniczych, (realizacja 2014-2017)” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

* * *

bryg. dr hab. Marzena Półka, prof. nadzw. SGSP – w roku 1992 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Jest profesorem w Zakładzie Teorii Procesów Spalania i Wybuchu oraz Dziekanem Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Specjalność – procesy spalania materiałów polimerowych i ich modyfikacja przeciwogniowa.

st. kpt. dr inż. Bożena Kukfisz – w roku 2005 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, a w roku 2006 na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Jest adiunktem w Zakładzie Teorii Procesów Spalania i Wybuchu Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Specjalność – inżynieria środowiska.