

dr inż. Małgorzata Majder-Łopatka¹
dr Tomasz Węsierski¹
kpt. mgr inż. Wiktor Wąsik¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 11.05.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 30.05.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

Wpływ typu dyszy rozpylającej na skuteczność absorpcji obłoku amoniaku powstałego w wyniku awarii przemysłowej²

Effect of Nozzle Structure on the Absorption Efficiency of the Ammonia Cloud Formed as a Result of Industrial Accidents

Влияние типа распылительного сопла на эффективность поглощения облака аммиака, образованного в результате промышленной аварии

ABSTRAKT

Wstęp: W przypadku awarii przemysłowej amoniak ze względu na swoje właściwości oraz stopień wykorzystania stwarza poważne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi. Badania prowadzone w kraju i za granicą wskazują, że absorpcja (proces wymiany masy) jest skutecznym sposobem neutralizacji tej substancji.

Cel: W artykule przedstawiono wpływ rodzaju zastosowanych urządzeń rozpylających (dysz) na przebieg procesu absorpcji amoniaku.

Metody: Realizacja celu wymagała przeprowadzenia badań określających szybkość zmiany stężenia amoniaku w obszarze zamkniętym w czasie działania dyszy rozpylającej. Badania wykonano na stanowisku, którego głównym elementem była komora badawcza (sześciąt wykonany z przezroczystego tworzywa o długości boku 1200 mm) z umieszczoną wewnątrz dyszą rozpylającą. Badania rozpoczynano po ustabilizowaniu się w komorze stężenia NH_3 . W czasie podawania cieczy z urządzenia rozpylającego dokonywano pomiaru stężenia amoniaku za pomocą detektora fotojonizacyjnego (PID). Dla wybranych parametrów przepływu cieczy oraz stopnia rozdrobnienia kropeł wody na podstawie uzyskanych wyników określono pozorną szybkość absorpcji (k_p) oraz czas połowicznej redukcji stężenia ($t_{1/2}$) w zakresie kinetycznym charakteryzującym maksymalną chłonność. W badanych użyto trzech rodzajów dysz: spiralnej, mgłowej i o pełnym stożku zraszania.

Wyniki: Przeprowadzone badania wskazują, że parametry przepływu cieczy (ciśnienie i wydajność) oraz średnia średnica powierzchniowa kropeł w strumieniu rozproszonym uzależnione są od rodzaju użytego urządzenia rozpylającego. Stwierdzono, że w zależności od zastosowanej dyszy, przy stałej wielkości wydajności wodnej ($V=130 \text{ dm}^3/\text{h}$), stopień rozdrobnienia kropeł wody jest znacząco różny. Uzyskano średnie średnice powierzchniowe kropeł (D_s) od 185 mm do 600 mm.

Wykonane badania wskazują na liniową zależność pomiędzy pozorną szybkością absorpcji i czasem połowicznej redukcji stężenia amoniaku w zakresie kinetycznym, charakteryzującym maksymalną chłonność, a średnicą kropeł D_s . W przypadku dyszy o pełnym stożku zraszania stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia (w zakresie 2-8 bar) i wydajności wody od $100 \text{ dm}^3/\text{h}$ do $180 \text{ dm}^3/\text{h}$ maleje wartość $t_{1/2}$, a wzrasta k_p przy niemal stałej wartości D_s .

Wnioski: Absorpcja jest powszechną metodą neutralizacji zagrożeń związanych z niekontrolowanym uwolnieniem amoniaku w wyniku awarii przemysłowej. Skuteczność procesu uzależniona jest od charakteru utworzonego strumienia rozproszonego wody, na który znaczny wpływ ma rodzaj zastosowanych dysz rozpylających.

Słowa kluczowe: absorpcja, amoniak, wypływ, dysza rozpylająca, rozdrobnienie kropeł wody

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

ABSTRACT

Introduction: Ammonia, due to its properties and degree of use, poses a serious threat to life and health in the event of industrial accidents. Research carried out in Poland and abroad indicates that absorption (the process of exchange of mass) is an effective way to neutralize this substance.

Aim: The article shows the influence of used spraying equipment (nozzles) on the ammonia absorption process.

Methods: In order to reach the aim it was necessary to carry out tests to determine the rate of change of the concentration of ammonia in a closed area during operation of the nozzle. The tests were performed at a test stand. The main element of the stand was a test chamber made of transparent plastic with a side length of 1200 mm. The nozzle was located in this chamber. The study started when concentrations of NH_3

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej/ The Main School of Fire Service; mmajder@sgsp.edu.pl

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

inside the chamber were stabilized. During the leak of liquid from the atomizer, the level of ammonia was measured using a photoionization detector (PID).

The apparent speed of absorption (k_p) and the half time of the reduction on concentration ($t_{1/2}$) in kinetic areas with maximum absorbency were determined for the selected liquid parameters and the degree of fragmentation of the drops of water on the basis of the obtained results. Three types of nozzles were used in the tests: spiral, mist and full cone spray.

Results: Studies indicate that the liquid flow parameters (pressure and efficiency) and the average surface diameter of water drops in a distributed flow are dependent on the type of device used in the injection. At a constant value of water efficiency ($V = 130 \text{ dm}^3/\text{h}$), the degree of water droplets fragmentation differed depending on the type of nozzle. The average droplet surface diameters varied from 185 mm do 600 mm.

A significant influence of the size of water droplets on the rate of absorption of ammonia has been indicated. Studies show a linear relationship between apparent speed of absorption, time of half reduction of the ammonia concentration in kinetic area with maximum absorbency and the diameter of the drop D_s . In case of full nozzle cone misting, it was discovered that with increasing pressure (in the range of 2-8 bar) and water efficiency ($100 \text{ dm}^3/\text{h}$ to $180 \text{ dm}^3/\text{h}$) the value of $t_{1/2}$ decreases and k_p increases at almost constant value of D_s .

Conclusions: Absorption is a common method of risk neutralization associated with an uncontrolled release of ammonia as a result of industrial accidents. The efficiency of the process depends on the characteristics of the created diffuse water stream. The type of spraying nozzles affects this diffused water stream.

Keywords: absorption, ammonia, leak, nozzle, fragmentation of water drops

Type of article: original scientific article

АННОТАЦИЯ

Введение: В случае промышленной аварии аммиак из-за своих свойств и частоты использования представляет собой серьезную угрозу для жизни и здоровья людей. Исследования, проводимые в стране и за рубежом, свидетельствуют о том, что поглощение (процесс переноса массы) является эффективным способом нейтрализации этого вещества.

Цель: В статье представлено влияние типа используемых распылительных устройств на процесс поглощения аммиака.

Методы: Реализация этой цели была связана с необходимостью проведения исследований, которые определяют скорость изменения концентрации аммиака в замкнутом пространстве во время работы распылительного сопла. Исследование проводилось на испытательном стенде, главным элементом которого была испытательная камера (куб, сделанный из прозрачного пластика, длина стороны 1200 мм) с расположенным в ней распылительным соплом. Исследования начинались после стабилизации в камере концентрации NH_3 . Во время подачи жидкости из распылительного устройства концентрация аммиака измерялась с помощью фотоионизационного детектора (ФИД). Для выбранных параметров потока жидкости и степени рассеивания капель воды на основании полученных результатов было определено кажущееся значение скорости поглощения (k_p) и частичной редукции концентрации ($t_{1/2}$) в кинетическом диапазоне максимального поглощения. В исследованиях были использованы три типа сопла: спиральные, туманные и полного конуса.

Результаты: Проведенные исследования указывают, что параметры потока жидкости (давление и эффективность), а также средний диаметр поверхности капель в рассеянном потоке зависят от вида распылительного устройства. Было установлено, что в зависимости от используемого сопла при постоянном значении подачи воды ($V = 130 \text{ dm}^3/\text{ч}$), уровень рассеивания капель воды значительно отличается. Были получены средние диаметры поверхности капель (D_s) от 185 мм до 600 мм.

Проведенные исследования показывают на линейную зависимость между приблизительной скоростью поглощения (абсорбции) и временем частичной редукции концентрации аммиака при кинетическом диапазоне, характерным для максимального поглощения и с диаметром капель D_s . В случае сопла полного конуса было установлено, что вместе с увеличением давления (в диапазоне 2-8 бар) и подачи воды (от $100 \text{ dm}^3/\text{ч}$ до $180 \text{ dm}^3/\text{ч}$) уменьшается значение $t_{1/2}$, а k_p увеличивается уже при постоянном значению D_s .

Выводы: Поглощение является распространенным методом нейтрализации угроз неконтролируемого выброса аммиака в результате промышленной аварии. Эффективность процесса зависит от характера созданного рассеянного потока воды, который в значительной степени зависит от типа используемого сопла.

Ключевые слова: поглощение, аммиак, утечка, распылительное сопло, раздробленность капель воды

Вид статьи: оригинальная научная статья

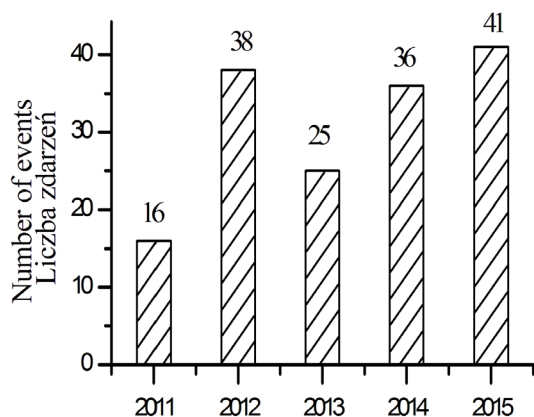
1. Wprowadzenie

Amoniak (NH_3) jest substancją palną o właściwościach toksycznych i żrących [1-3], którą powszechnie stosuje się w przemyśle. Wykorzystuje się go w 85% do wytwarzania nawozów, a w 15% do produkcji tworzyw sztucznych, kwasu azotowego (V), hydrazyny, środków farmaceutycznych, materiałów wybuchowych oraz w branży chłodniczej [4]. W Polsce produkcja syntetycznego amoniaku gazowego i ciekłego (w przeliczeniu na 100%) w roku 2014 wyniosła odpowiednio 1288 000 Mg i 1194 000 Mg [5].

NH_3 ze względu na skalę wykorzystania oraz swoje właściwości w przypadku niekontrolowanego wypływu stwarza poważne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi. Analiza danych statystycznych Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej wskazuje, że największa liczba interwencji związanych z niekontrolowanym uwolnieniem gazowych substancji niebezpiecznych dotyczy zdarzeń z udziałem amoniaku. Liczbę interwencji podmiotów PSP w zdarzeniach z udziałem tej substancji w latach 2011-2015 przedstawiono na rys.1.

Badania przeprowadzone w kraju [7] oraz poza jego granicami [8–12] wskazują, że skuteczną metodą ograniczania skutków awarii z udziałem gazów niebezpiecznych zarówno w pomieszczeniach, jak i w przestrzeni otwartej jest ich absorpcja w wodzie. Istotą absorpcji jest proces wymiany masy polegający na przenoszeniu cząsteczek z jednej fazy (gazowej) przez granicę faz do fazy drugiej (cieczy) [13]. Warunkiem niezbędnym przebiegu procesu absorpcji jest różnica stężeń pomiędzy fazami, gwarantuje ona bowiem pochłanianie substancji niebezpiecznych (takich amoniak) przez wodę.

Szybkość procesu absorpcji amoniaku przez strumień rozproszony wody jest wprost proporcjonalna do współczynnika binarnego dyfuzji amoniaku w powietrzu [14]. Zależy ona od parametrów przepływu cieczy (ciśnienia i wydajności) oraz stopnia rozdrobnienia kropli wody i cyrkulacji wewnętrznej [15-16], czyli rodzaju użytego urządzenia rozpylającego (dyszy). Celem artykułu jest określenie wpływu typu dyszy na skuteczność absorpcji amoniaku.



Ryc.1. Liczba interwencji podmiotów PSP w zdarzeniach z udziałem amoniaku w latach 2011-2015

Fig. 1. The number of State Fire Service (SFS) responses to events with ammonia in the years 2011-2015

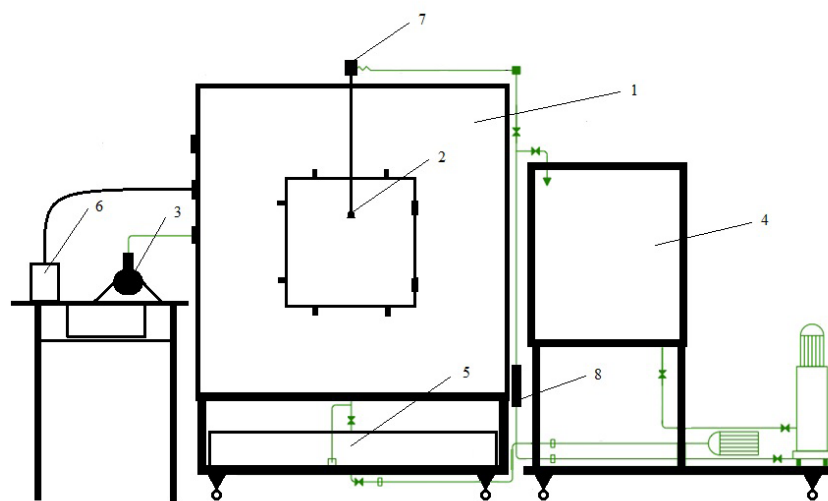
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6].
Source: Own elaboration on the basis of [6].

2. Metodyka badań

Badanie skuteczności procesu absorpcji w zależności od rodzaju użytej dyszy rozpylającej wykonano na stanowisku przedstawionym na ryc. 2.

Głównymi elementami stanowiska badawczego są:

- komora (1) wykonana z przezroczystego tworzywa, w formie sześcianu o długości boku 1200 mm,
- dysza rozpylająca (2),
- układ doprowadzenia amoniaku do komory badawczej, składający się z czaszy grzejnej i kolby (3) oraz przewodu doprowadzającego o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej i odporności chemicznej. W badaniach amoniak otrzymywano w wyniku desorpcja NH_3 z 25 % wody amoniakalnej,
- układ zasilania wodą ze zbiornikiem o pojemności 0,25 m^3 (4), umożliwiający ustawienie i regulację parametrów przepływu cieczy – ciśnienia i wydajności,



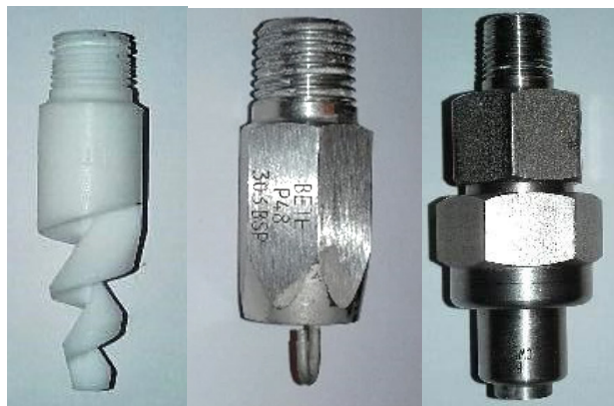
Ryc. 2. Schemat stanowiska badawczego; 1 – komora badawcza, 2 – dysza rozpylająca, 3 – czasza grzejna z kolbą, 4 – zbiornik z wodą, 5 – zbiornik zrzutowy, 6 – detektor fotojonizacyjny PID, 7 – czujnik ciśnienia, 8 – przepływomierz

Fig. 2. Test stand; 1 – chamber, 2 – nozzle, 3 – hotplate with flask, 4 – water tank, 5 – waste tank, 6 – photoionization detector, 7 – pressure sensor, 8 – flow meter

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

- zbiornik zrzutowy (5), do którego w czasie trwania badania spływał powstały odpad,
- analizator gazów (6), rejestrujący stężenie amoniaku w komorze badawczej w funkcji czasu.

W badaniach użyto dysz rozpylających TF 6, CW-50 F, P48 firmy BETE Deutschland GmbH (ryc. 3). Wybrane dysze posiadały różną konstrukcję i charakteryzowały się parametrami przedstawionymi w tabeli 1.



Ryc. 3. Dysze rozpylające: TF 6, CW-50 F, P48

Fig. 3. Nozzle: TF 6, CW-50 F, P48

Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

W toku prowadzonych badań określono zmianę stężenia amoniaku w funkcji czasu wypływu wody z dyszy rozpylającej. Badania rozpoczynano po ustabilizowaniu się stężenia amoniaku (przy braku wahań wskazań przyrządu pomiarowego). W czasie podawania cieczy za pomocą detektora fotojonizacyjnego MX 6 firmy Industrial Scientific mierzono zawartość NH_3 w komorze badawczej.

3. Wyniki badań i dyskusja

Zmiana stężenia amoniaku w komorze badawczej w czasie podawania wody przez dysze rozpylające miała charakter zbliżony do zaniku eksponentyjnego i zgodnie z [7] może być opisana równaniem:

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_p [C]$$

gdzie:

C - stężenie amoniaku w komorze [ppm],

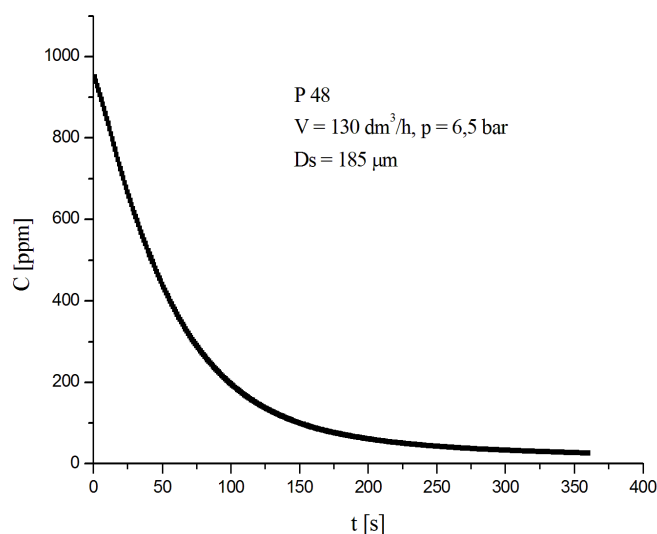
k_p - pozorna stała szybkości procesu pochłaniania [s^{-1}].

Pozorna stała szybkość pochłaniania uzależniona jest od parametrów przepływu cieczy oraz stopnia rozdrobnienia kropli wody. Przykładowy przebieg zmiany stężenia amoniaku w komorze badawczej przedstawiono na ryc. 4.

Wyniki pomiarów przedstawiono w formie wykresów obrazujących zależności stężenia amoniaku w komorze badawczej w funkcji czasu podawania wody (ryc. 5-7). Na wykresach zastosowano skalę logarytmiczną z prostą regresji w zakresie kinetycznym charakteryzującym okres maksymalnej chłonności.

Analiza wartości pozornej szybkości absorpcji k_p i czasu połowicznej redukcji stężenia $t_{1/2}$ (tabela 1) wskazuje, że rodzaj dyszy ma istotny wpływ na szybkość zmiany stężenia amoniaku wewnątrz komory badawczej.

Typ dyszy oraz parametry przepływu strumienia cieczy wpływają na średnią średnicę powierzchniową powstających kropli. W badaniach przeprowadzonych przy stałym ciśnieniu wypływu wody (ryc. 5) i stałej wydajności (ryc. 6) w zależności od budowy dyszy uzyskano różny stopień rozdrobnienia kropli w strumieniu cieczy. W badaniach przy $V = 130 \text{ dm}^3/\text{h}$ otrzymano średnie średnice kropli: $600 \mu\text{m}$, $235 \mu\text{m}$, $185 \mu\text{m}$ kolejno dla dyszy TF-6, CW-50 F, P 48. W przypadku dyszy o pełnym stożku zraszania CW-50 F nie stwierdzono wpływu zmiany parametrów przepływu cieczy na stopień rozproszenia podawanej wody (ryc. 7).

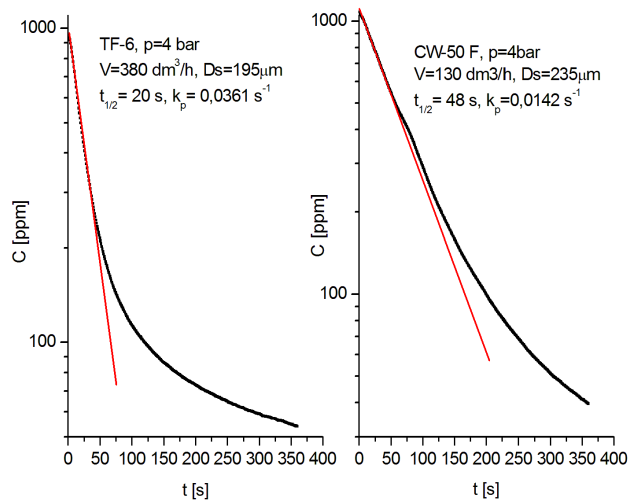


Ryc. 4. Krzywa zależności stężenia amoniaku w funkcji czasu podawania wody z dyszy P 48

Fig. 4. The curve of ammonia concentration versus time discharge of P48 nozzle

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

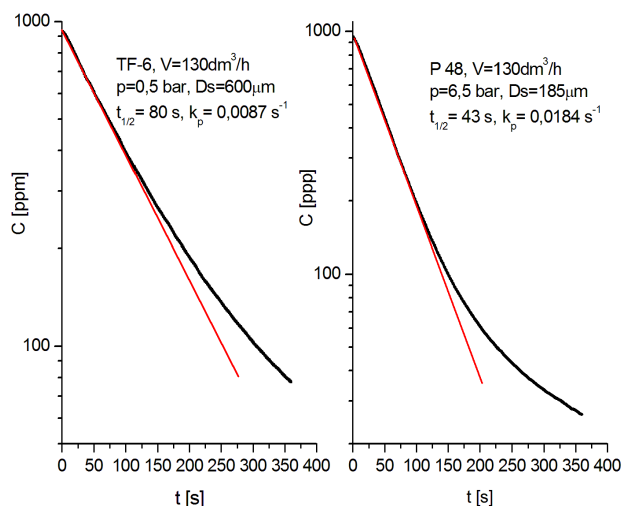


Ryc. 5. Zmiana stężenia amoniaku w funkcji czasu działania dyszy TF-6 i CW-50F, $p = 4 \text{ bar}$ – skala logarytmiczna

Fig. 5. The change of ammonia concentration versus time performance of TF-6 and CW-50F nozzles, $p = 4 \text{ bar}$ – logarithmic scale

Źródło: Opracowanie własne.

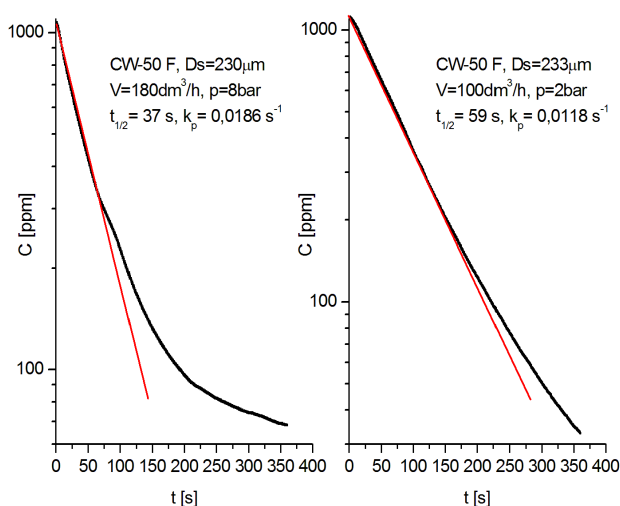
Source: Own elaboration.



Ryc. 6. Zmiana stężenia amoniaku w funkcji czasu działania dyszy TF-6 i P 48, $V=130 \text{ dm}^3/\text{h}$ – skala logarytmiczna
Fig. 6. The change of ammonia concentration versus time performance of TF-6 and P 48 nozzles, $V=130 \text{ dm}^3/\text{h}$ – logarithmic scale

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 7. Zmiana stężenia amoniaku w funkcji czasu działania dyszy CW-50F, $D_s=230\pm 5 \text{ mm}$ – skala logarytmiczna

Fig. 7. The change of ammonia concentration versus time performance of CW-50F nozzle, $D_s=230\pm 5 \text{ mm}$ – logarithmic scale

Źródło: Ppracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 1. Wielkość pozornej szybkości absorpcji k_p i czasu połowicznej redukcji stężenia amoniaku $t_{1/2}$ w zakresie kinetycznym charakteryzującym maksymalną chłonność

Table 1. Apparent speed of absorption k_p and the time of half reduction of the ammonia concentration $t_{1/2}$ in kinetic area with maximum absorbency

Rodzaj dyszy Type of nozzle	Model	Ciśnienie Pressure	Wydajność Capacity	Średnia średnica powierzchniowa kroplek Average droplet diameter surface	$t_{1/2}$	k_p
		p [bar]	V [dm ³ /min]	Ds [µm]		
Dysza spiralna	TF 6	0,5	130	600	80	0,0087
		4	380	195	20	0,0361
Dysza o pełnym stożku zraszania	CW-50 F	2	100	233	59	0,0118
		4	130	235	48	0,0142
		8	180	230	37	0,0186
Mgłowa	P48	6,5	130	185	43	0,0164

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Badania przeprowadzone przy stałej wydajności wodnej dyszy ($V = 130 \text{ dm}^3/\text{h}$) wskazują, że wraz ze wzrostem wielkości kropeł (ryc. 8, 9) pozorna szybkość absorpcji (k_p) maleje, a czas połowicznej redukcji stężenia ($t_{1/2}$) rośnie. Przy mniejszych średnicach kropeł w strumieniu rozproszonym wody odnotowano szybszą zmianę stężenia amoniaku w komorze badawczej.

Dla dyszy o pełnym stożku zraszania CW-50F stwierdzono, że wraz ze wzrostem ciśnienia wody podawanej z urządzenia rozpylającego zwiększa się efektywność procesu absorpcji (ryc. 10, 11) przy niemal stałej wielkości D_s .

Zmniejszenie czasu połowicznej redukcji stężenia amoniaku w zakresie kinetycznym charakteryzującym maksymalną chłonność następuje wraz ze wzrostem objętościowej szybkości podawania prądu wody. W badaniach przy stałej wartości ciśnienia $p = 4 \text{ bar}$ dla dyszy TF-6 ($V = 380 \text{ dm}^3/\text{h}$) otrzymano $t_{1/2}$ niemal 2,5 raz mniejsze niż w przypadku dyszy CW-50F ($V=130 \text{ dm}^3/\text{h}$) (ryc. 5).

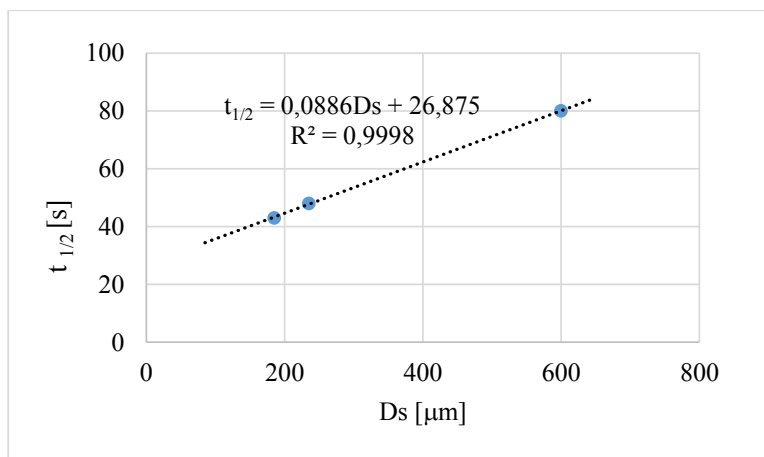
4. Wnioski

Absorpcja jest powszechną metodą neutralizacji amoniaku w przypadku awarii przemysłowej. Rozproszony strumień

cieczy wykorzystywany jest zarówno przez służby ratownicze, jak i w systemach zabezpieczeń procesów technologicznych. Przeprowadzone badania wskazują, że rodzaj zastosowanego urządzenia rozpalającego w znaczący sposób determinuje przebieg procesu wymiany masy między fazą ciekłą i gazową.

Konstrukcja dyszy rozpylającej w znacznym stopniu wpływa na rozkład kropli w strumieniu rozproszonym. W zależności od rodzaju dyszy przy stałej wielkości jednego z parametrów przepływu cieczy (wydajności wodnej bądź ciśnienia) rozkład kropeł w strumieniu rozproszonym jest różny. Wynika to zarówno z ruchu kropeł powstałych w komorze badawczej w wyniku atomizacji cieczy, jak i cyrkulacji wewnętrznej. Po utworzeniu, krople mają dużą prędkość w stosunku do medium, co powoduje wystąpienie dużych naprężeń tnących. Wskutek tych naprężeń może powstać w kropli cyrkulacja wewnętrzna, która może istotnie wpływać na adsorpcję amoniaku tj. szybkość przenoszenia masy. Zjawisko to występuje zwłaszcza wtedy, gdy dominujący opór przenoszenia masy leży w fazie ciekłej.

Stwierdzono, że znaczny wpływ na szybkość zmiany stężenia amoniaku w przestrzeni zamkniętej ma średnia średnica powierzchniowa kropeł (D_s), objętościowa szybkość poda-

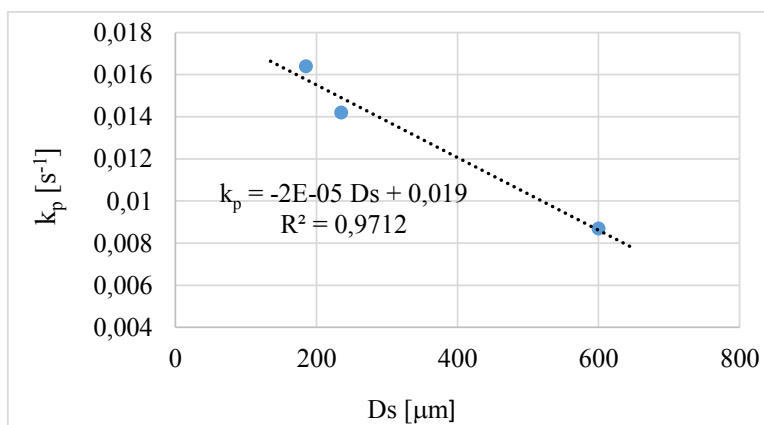


Ryc. 8. Czas połowicznej redukcji stężenia w funkcji średnicy kropeł wody D_s .

Fig. 8. The time of half reduction of concentration as a function of water drop diameter D_s

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

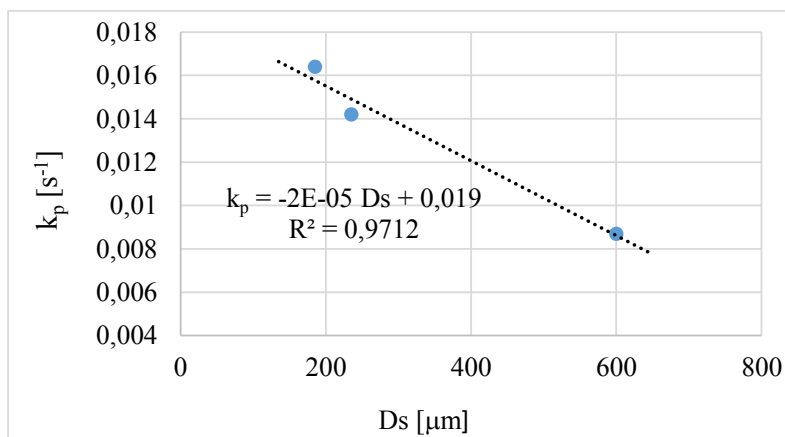


Ryc. 9. Pozorna szybkość absorpcji w funkcji średnicy kropeł wody D_s .

Fig. 9. Apparent speed of absorption as a function of water drop diameter D_s

Źródło: Opracowanie własne.

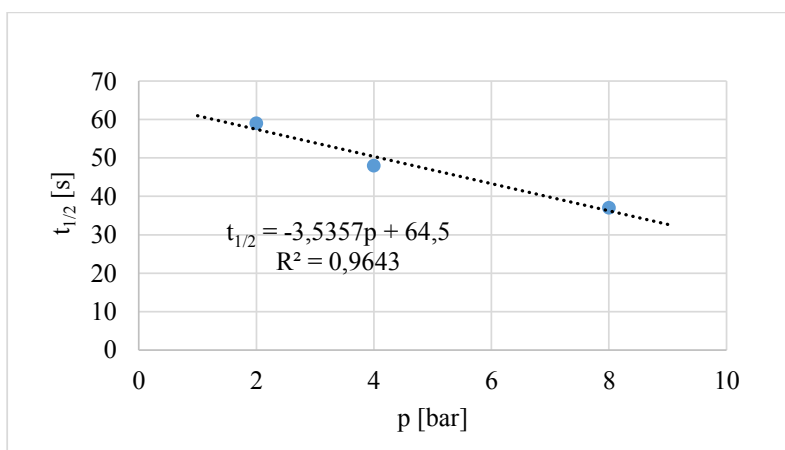
Source: Own elaboration.



Ryc. 10. Pozorna szybkość absorpcji w funkcji ciśnienia dla dyszy CW-50F
 Fig. 10. Apparent speed of absorption as a function of pressure for CW-50F nozzle

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 11. Czas połowicznej redukcji stężenia w funkcji ciśnienia dla dyszy CW-50F
 Fig. 11. The time of half reduction of concentration as a function of pressure for CW-50F nozzle

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

wania prądu wody z dyszy rozpylającej (V) oraz ciśnienie cieczy (p). Pozorna szybkość absorpcji (k_p) w zakresie kinetycznym charakteryzującym maksymalną chłonność jest większa, im mniejsze są średnice kropeł w strumieniu rozproszonym wody. Wielkość k_p rośnie wraz ze wzrostem parametrów przepływu cieczy. Odwrotną zależność stwierdzono dla czasu połowicznej redukcji stężenia. Zmniejszenie $t_{1/2}$ w zakresie kinetycznym charakteryzującym maksymalną chłonność następuje wraz ze wzrostem ciśnienia cieczy oraz objętościowej szybkości podawania prądu wody.

Artykuł został opracowany w ramach realizacji projektu na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa nr DOB-BIO6/06/113/2014.

Literatura

- [1] Amshel C.E., Fealk M.H., Phillips B.J., Caruso D.M., *Anhydrous ammonia burns case report and review of the literature*, "Burns" Vol. 26 Issue 5, 2000, pp. 493-497.
- [2] Pritchard J.D., *Compendium of chemical hazards ammonia*, Health Protection Agency, London 2011.
- [3] Kuleta P., Stęplewska U., *Monitoring wycieków amoniaku w zakładach przemysłu chłodniczego*. Centralne Laboratorium Chłodnictwa, „Agro Przemysł” nr 6, 2007, 52-55.
- [4] *The Essential Chemical Industry-online*, www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/ammonia [dostęp: 09.04.2015].
- [5] *Rocznik statystyczny przemysłu 2014*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2015.
- [6] *Dane statystyczne Komendy Głównej PSP*, www.straz.gov.pl [dostęp: 14.03.2015].
- [7] Węsierski T., Majder-Łopatka M., Matuszkiewicz R., Porowski R., *Badanie efektywności kurtyn wodnych przy zwalczaniu par amoniaku podczas jego niekontrolowanego uwolnienia*, „Przemysł Chemiczny” nr 7, 2012, 1424-1426.
- [8] Bandyopadhyay A.N., Biswas M.N., *Modeling of SO₂ scrubbing in spray towers*, “Science of the Total Environment” Vol. 383, 2007, 25-40.
- [9] Cheng Ch., Tan W., Du H., Liu L., *A modified steady-state model for evaluation of ammonia concentrations behind a water curtain*, “J. Loss Prev. Ind. Industries”, Vol. 36, 2015, 120-124.
- [10] Husted B.P., Holmstedt G., Hertzberg T., *The physics behind water mist system*, Proc. IWMA Conference, Rome 2004.
- [11] Isnard O., Soulhac L., Dusserre G., *Numerical simulation of ammonia dispersion around a water curtain*, “J. Loss Prev. Ind. Industries” Vol. 12, 1999, 471-477.

- [12] Bara A., Dusserre G., *The use of water curtains to protect fireman in case of heavy gas dispersion*, "J. Loss Prev. Ind. Industries" Vol. 10, 1997, 179-183.
- [13] Zarzycki R., *Wymiana ciepła i ruchu masy w inżynierii środowiska*, WNT, Warszawa 2005.
- [14] Twomey S., *Atmospheric aerosols*, Elsevier Scientific Publishing Co., New York 1977.
- [15] Gierczak M., *Analiza wpływu stopnia rozdrobnienia kropeł wody na szybkość absorpcji gazów*, Praca inżynierska, Warszawa 2015.
- [16] Bird R.B. et al., *Transport Phenomena, 3rd ed.*, Wiley, New York 1960.

* * *

mł. bryg. dr inż. Małgorzata Majder-Lopatka – absolwentka Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego SGSP (2002) i Wydziału Inżynierii, Chemii i Fizyki Technicznej WAT (2003). Tytuł doktora w dyscyplinie ochrona i kształtowanie środowiska otrzymała w 2013 roku. Obecnie jest kierownikiem Pracowni Pomiarów Parametrów Środowiska w Katedrze Działań Ratowniczych Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Obszary zainteresowań naukowych: inżynieria i ochrona środowiska, inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.

mł. kpt. dr Tomasz Węsierski – w 2007 roku obronił pracę doktorską na Wydziale Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Od 2008 roku związany z PSP. Specjalizuje się w zakresie ratownictwa chemicznego. Obecnie adiunkt w Zakładzie Fizyki i Chemii w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Obszary zainteresowań naukowych: inżynieria środowiska, inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.

kpt. mgr inż. Wiktor Wąsik – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej (Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego). W latach 2007-2011 pracownik Zespołu Laboratoriów Technicznego Wyposażenia Straży Pożarnej i Technicznych Zabezpieczeń Przeciwożarowych w CNPOB-PIB. Od 2011 roku asystent w Zakładzie Sprzętu Ratowniczo-Gaśniczego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Autor publikacji z zakresu sprzętu ratowniczo-gaśniczego. Obszar zainteresowań zawodowych: pompy pożarnicze, pojazdy pożarnicze, sprzęt do wytwarzania pian gaśniczych, stałe urządzenia gaśnicze, ratownictwo chemiczne i ekologiczne.