

dr Anna Zielicz^{a)}, mł. bryg. dr inż. Tomasz Drzymala^{a)}, dr inż. Sylwester Kieliszek^{a)},
dr Aneta Łukaszek-Chmielewska^{a)}

^{a)}Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego / The Main School of Fire Service,
Faculty of Fire Safety Engineering

*Autor korespondencyjny/Corresponding author: t.drzymala@sgsp.edu.pl

Model matematyczny zmian stężenia wodoru w atmosferze. Rzeczywista sytuacja obliczeniowa dla obiektu z systemem wentylacji

A Mathematical Model of the Change of Hydrogen Concentration.
Sample Computations for a Real-Life Situation in a Ventilated Room

Математическая модель изменения концентрации водорода в атмосфере.
Расчёт реальной ситуации для объекта с системой вентиляции

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest analiza zmian stężenia wodoru w atmosferze w dużych pomieszczeniach lub obiektach, w których przewiduje się ciągłą niewielką emisję tego gazu. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do obiektu z systemem wentylacji, w którym znaczna część powietrza wyciąganego jest zwracana do pomieszczenia, w celu zapewnienia odzysku ciepła. Świeże powietrze stanowi niewielką część powietrza nawiewanego. W hali nie występują źródła emisji substancji szkodliwych. Analiza dotyczy całej objętości pomieszczenia, a nie stref w pobliżu źródła emisji. Efektem końcowym jest określenie zmian stężenia wodoru w pomieszczeniu w funkcji czasu i odniesienie uzyskanych wyników do granic wybuchowości. W szczególności wyznaczono, po jakim czasie stężenie wodoru osiągnie poziom krytyczny.

Metody: Artykuł napisano w oparciu o opracowany model obliczeniowy. W modelu uwzględniono: wydajność źródła emisji, wydajność wentylacji, objętość pomieszczenia, udział powietrza zwracanego w powietrze nawiewanym. W celu uzyskania wzorów opisujących, jak zmienia się zawartość wodoru (lub innej wydzielanej substancji) w pomieszczeniu, wykorzystano równania różniczkowe. Równania te wyznaczają zależność między nieznaną funkcją a jej pochodnymi. Obecnie prowadzi się szereg badań nad kolejnymi schematami rozwiązywania równań różniczkowych, gdyż mają one wiele zastosowań praktycznych.

Wyniki: Po opracowaniu modelu matematycznego dla analizowanego przypadku obliczeniowego sporządzono reprezentatywne wykresy. Otrzymane wykresy pozwalają prognozować zmiany stężenia wodoru w pomieszczeniu, w funkcji czasu oraz określić, kiedy stężenie wodoru osiągnie poziom krytyczny. Przedstawiona metodyka może być przydatna w ocenie zagrożenia wybuchem, a w wielu przypadkach może rozwiązać wiele wątpliwości związanych z tym tematem. Model matematyczny może być stosowany bez ograniczeń w odniesieniu do substancji tworzących z powietrzem mieszaniny wybuchowe; powietrze zawierające substancje szkodliwe nie powinno być zwracane.

Wnioski: Na podstawie analizy danych obliczeniowych zarysowano wnioski dotyczące regulacji prawnych. Wskazana jest nowelizacja rozporządzenia w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. W oparciu o przedstawiony model, poparty obliczeniami dla rozpatrywanego przykładu, sformułowano wnioski końcowe. Zaproponowany model matematyczny stanowi przydatne narzędzie inżynierskie. Przy jego pomocy można określić dla pomieszczenia maksymalną ilość substancji palnej, której gęstość względem powietrza ≤ 1 oraz powiązać objętość krytyczną H_{kr} z wydajnością wentylacji. Model pozwala również określić czas, po którym zostanie przekroczona H_{kr} ; ma to znaczenie w przypadku konieczności oszacowania czasu reakcji. Przedstawione ilustracje potwierdzają poprawność modelu.

Słowa kluczowe: zagrożenie wybuchem, wentylacja, ochrona przeciwpożarowa, model matematyczny

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 06.02.2018; Zrecenzowany: 22.03.2018; Zatwierdzony: 10.04.2018;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu;

Proszę cytować: BiTP Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 66–74, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.6;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRACT

Objectives: The aim of this article is to analyse the change of concentration of hydrogen in the atmosphere of large closed spaces with a constant but small emission of hydrogen. The analysis has been conducted for a room equipped with a ventilation system where, in order to retain heat, a significant portion of the exhaust air is recycled and turned back into the room. Thus, fresh air makes up only a part of the air blown into the room. Moreover, it is

assumed that there are no sources of harmful substances in the room. In our analysis, we consider the entire room and not only the spaces near the source of emission. Our investigation allowed us to describe how the concentration of hydrogen changes in time and to relate these results to the explosive limits. In particular, we were able to determine the time after which the hydrogen concentration would reach a critical level.

Methods: A calculation model was developed for the purposes of this paper. This model takes into account the efficiency of the source of emission, the efficiency of the ventilation system, the volume of the room and the portion of the exhaust air which is recycled. In order to obtain formulas describing how the content of hydrogen (or other emitted substance) changes, differential equations were used in the room. These equations determine the relationship between an unknown function and its derivatives. Currently, a number of studies are being conducted to develop further models for solving differential equations, as they have many practical applications.

Results: Once the mathematical model was developed, a set of representative diagrams has been plotted using data from a real-life situation. The graphs which we obtained make it possible to predict how hydrogen concentration changes as a function of time, and to determine when the concentration reaches a critical level. The methods presented here can be useful in assessing the explosion hazard, and in many cases could clarify many doubts related to this issue. The mathematical model is applicable without restrictions for substances that form explosive mixtures with air; air containing harmful substances should not be recycled.

Conclusion: Based on the analysis of the obtained data, we drew conclusions regarding current legal regulations in Poland. We recommend that the existing regulation regarding the fire protection of buildings and other structures and areas. Based on the presented model, supported by calculations for the example under consideration, the final conclusions were formulated. The proposed mathematical model is a useful engineering tool and can be useful in determining the maximum amount of substance with air density ≤ 1 in room atmosphere and allows the critical volume H_{kr} to be linked to ventilation efficiency. The model can also be used to determine the time after which H_{kr} will be exceeded; this is important for the estimation of the response time. The presented figures confirm that the model is correct.

Keywords: explosion hazard, ventilation, fire protection, mathematical model

Type of article: original scientific article

Received: 06.02.2018; Reviewed: 22.03.2018; Accepted: 10.04.2018;

The authors contributed equally to this article;

Please cite as: BITP Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 66–74, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.6;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

АННОТАЦИЯ

Цель: Цель статьи – анализ изменения концентрации водорода в атмосфере в больших помещениях или на объектах, где предусматривается постоянный небольшой выброс этого газа. Анализ проводился относительно объекта с системой вентиляции, в котором значительная часть отработанного воздуха возвращается в помещение для обеспечения рекуперации тепла. Свежий воздух составляет незначительную часть подаваемого воздуха. В помещении отсутствуют источники выброса вредных веществ. Анализ применяется ко всему объему помещения, а не к зонам, находящимся вблизи источника выброса. Конечным результатом является определение изменений концентрации водорода в помещении, в зависимости от времени, и сравнение полученных результатов со шкалой взрывоопасности. В частности, было определено сколько времени понадобится, чтобы концентрация водорода достигла критического уровня.

Методы: Статья была разработана на основе подготовленной расчетной модели. Модель включает: эффективность источника выбросов, мощность вентиляции, объем помещения и количество рециркулируемого воздуха в подаваемом воздухе. Для определения формул, описывающих изменение содержания в помещении водорода (или другого выделяемого вещества), использовались дифференциальные уравнения. Эти уравнения определяют связь между неизвестной функцией и ее производными. В настоящее время проводится ряд исследований по последовательным схемам решения дифференциальных уравнений, так как их можно активно использовать на практике.

Результаты: После подготовки математической модели для анализируемой расчетной ситуации были подготовлены репрезентативные диаграммы. Они позволяют предсказать изменения концентрации водорода в помещении в зависимости от времени и определить, когда концентрация водорода достигнет критического уровня. Представленная методология может применяться при оценке взрывоопасности, а во многих случаях помочь рассеять многочисленные сомнения, связанные с этой темой. Математическая модель может использоваться без ограничений для веществ, образующих вместе с воздухом взрывоопасные смеси; воздух, содержащий вредные вещества, не должен возвращаться в помещение.

Выводы: На основе анализа расчетных данных были представлены выводы относительно действующих правовых норм. Рекомендуется ввести поправку в Распоряжение о противопожарной защите зданий, других строительных объектов и зон. На основе представленной модели, подтвержденной расчетами, были сформулированы окончательные выводы для рассматриваемого примера. Предлагаемая математическая модель является действенным инженерным инструментом и может быть использована при определении максимального количества вещества в атмосфере помещения, имеющего плотность по отношению к воздуху ≤ 1 . Кроме того, позволяет соотнести критический объем H_{kr} к эффективности вентиляции. Модель также позволяет указать время, по истечении которого превышает значение H_{kr} ; это важно, если необходимо определить время реакции. Представленные иллюстрации подтверждают правильность модели.

Принята: 06.02.2018; Рецензирована: 22.03.2018; Одобрена: 10.04.2018;

Авторы внесли одинаковый вклад в создание статьи;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BITP Vol. 49 Issue 1, 2018, pp. 66–74, doi: 10.12845/bitp.49.1.2018.6;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Wprowadzenie

Podstawowe zasady dotyczące wentylacji pomieszczeń są określone w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 czerwca 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1]. Zgodnie z § 147 ust. 1 tego rozporządzenia wentylacja powinna zapewnić „odpowiednią jakość środowiska wewnętrznego, w tym wielkość wymiany powietrza, jego czystość, temperaturę, wilgotność względną, prędkość ruchu w pomieszczeniu przy zachowaniu przepisów odrębnych i wymagań Polskich Norm dotyczących wentylacji, a także warunków bezpieczeństwa pożarowego i wymagań akustycznych określonych w rozporządzeniu”. Paragraf 151. ust. 1 dokumentu stanowi, „że w urządzeniach wentylacji ogólnej nawiewno-wywiewnej lub klimatyzacji komfortowej o wydajności powyżej 500 m³/h należy stosować urządzenia do odzyskiwania ciepła z powietrza wywiewanego w ilości co najmniej 50% lub recyrkulację, gdy jest to dopuszczalne”. Stosując recyrkulację powietrza, należy też przestrzegać przepisów ochrony przeciwpożarowej. W pomieszczeniach zagrożonych wybuchem powinny znajdować się urządzenia wstrzymujące automatycznie pracę wentylatorów w razie powstania pożaru i sygnalizujące ich wyłączenie, jeżeli działanie wentylatorów mogłoby przyczynić się do rozprzestrzeniania pożaru. W każdym pomieszczeniu zagrożonym wybuchem należy stosować oddzielną instalację wyciągową (§ 269 ust. 1 i 2 rozporządzenia [1]). Zgodnie z § 35 ust. 4 rozporządzenia MSWiA z 7.06.2010 r. [2] w systemach ogrzewczych lub wentylacyjnych recyrkulacja powietrza nie jest dopuszczalna, jeżeli mogłaby powodować wzrost zagrożenia wybuchem.

Z cytowanych przepisów wynika, że recyrkulacja powietrza jest dopuszczalna przy spełnieniu dwóch warunków: 1) świeże powietrze stanowi co najmniej 10% powietrza nawiewanego recyrkulacja powietrza nie jest dopuszczalna; 2) recyrkulacja nie powoduje wzrostu zagrożenia wybuchem. Pierwszy warunek jest łatwy do zachowania. Problemem jest interpretacja zapisu „nie powoduje wzrostu zagrożenia wybuchem”. Jeżeli w zawracanym powietrzu znajduje się pewna ilość substancji tworzącej z powietrzem mieszaninę wybuchową, jest oczywiste, że w atmosferze pomieszczenia koncentracja tej substancji będzie większa niż w przypadku zastosowania wentylacji bez recyrkulacji. W analizie jako krytyczne stężenie przyjęto stężenie odpowiadające 10% dolnej granicy wybuchowości, które powszechnie uważane jest za bezpieczne. Prezentowana w artykule analiza dotyczy zmian stężenia w czasie substancji tworzącej mieszaninę wybuchową z powietrzem. Zakłada się przy tym, że niewielka emisja zachodzi w sposób ciągły oraz w warunkach panujących w wentylowanym pomieszczeniu. Recyrkulacja nie dotyczy substancji o gęstości względem powietrza > 1 . Substancje o gęstości względnej < 1 tworzą z powietrzem mieszaniny prawie jednorodne (różnica stężeń w odniesieniu do wysokości pomieszczenia jest pomijalna) [3]. W analizie autorzy zakładają więc, że emitowana substancja ma gęstość względną < 1 . Oczywiście recyrkulacja może dotyczyć substancji, które nie są szkodliwe dla zdrowia, złotone itp.

W związku z powyższymi uwarunkowaniami przeprowadzana analiza może dotyczyć tylko substancji obojętnych dla

środowiska [3]. Za taką substancję uważany jest wodór. Do analizy wybrano ten gaz tym bardziej, że w wielu zakładach jest on okresowo emitowany przez eksploatowane urządzenia. Przykładem są wózki akumulatorowe stosowane w transporcie wewnętrznym. Bardzo rzadko baterie ich akumulatorów ładowane są w wyznaczonych pomieszczeniach. Często odbywa się to na wydzielonych stanowiskach w hali produkcyjnej lub magazynowej. Podczas ładowania akumulatorów występuje emisja niewielkiej ilości wodoru. Należy zaznaczyć, że z reguły jest to emisja z kilku lub kilkunastu źródeł rozproszonych. Stanowiska ładowania zwykle nie są wyposażone w odrębne wyciągi, co powoduje, że wydzielający się wodór miesza się z atmosferą pomieszczenia. Przedstawiona metodyka może być przydatna w ocenie zagrożenia wybuchem, a w wielu przypadkach może rozwiać wszelkie związane z nim wątpliwości.

Szeroko stosowane obecnie narzędzia informatyczne do modelowania zjawisk oraz procesów fizyko-chemicznych oparte o numeryczną mechanikę płynów, są w większości bardzo skomplikowane i dość trudne do zastosowania w analizowanym przypadku. Dostępne modele numeryczne dają możliwość przeprowadzenia skomplikowanych symulacji uwzględniających wpływ różnych czynników oddziałujących na bezpieczeństwo np. projektowanie wentylacji w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Programy te pozwalają na wykonywanie szerokich analiz obejmujących dużą liczbę procesów fizycznych i chemicznych. Takie programy komputerowe są również przydatne w celu rozwiązania ważnych problemów projektowych [4]. Niestety wymagają dużych mocy obliczeniowych oraz specjalistycznego oprogramowania, na które większość użytkowników nie może sobie pozwolić. Zaproponowany model matematyczny cechuje się stosunkowo dużą prostotą. Autorzy wykorzystują uproszczoną metodykę w oparciu o stacjonarne i niestacjonarne równania różniczkowe. Dodatkowo jednym z głównych celów autorów było udowodnienie na podstawie zaprezentowanej sytuacji obliczeniowej i analizy otrzymanych wyników, że w założonych warunkach nigdy nie zaistnieje zagrożenie wybuchem w wentylacji, a stężenia wodoru w powietrzu wentylacyjnym będą bezpieczne (poniżej 10% DGW). Zamieszczone w dalszej części artykułu wykresy potwierdzają poprawność modelu. Wszystkie rozwiązania są jakościowo zgodne z oceną intuicyjną.

Zastosowane założenia i uproszczenia uzasadnia się chęcią stworzenia praktycznego i szybkiego narzędzia do przeprowadzenia tego typu obliczeń i symulacji.

Przedmiot i cel opracowania

Przedmiotem opracowania jest ocena zagrożenia wybuchem w pomieszczeniu, w którym może występować stała emisja gazu tworzącego z powietrzem mieszaninę wybuchową (w tym wypadku wodoru). Jednym ze sposobów zabezpieczenia przed wybuchem jest niedopuszczenie do powstania stężenia wybuchowego (tzn. pomiędzy dolną i górną granicą wybuchowości). Stan taki można osiągnąć poprzez

hermetyzację procesu, czyli ograniczenie emisji lub zastosowanie odpowiednio wydajnej wentylacji. Wentylacja pozwala na ograniczenie objętości zalegania atmosfery wybuchowej. Najlepsze efekty uzyskuje się poprzez wentylowanie fizycznie ograniczonej przestrzeni, w której występuje emisja (np. poprzez umieszczenie instalacji stanowiącej źródło emisji np. w dygestorium lub poprzez umieszczenie instalacji w przestrzeni zewnętrznej).

W praktyce zdarzają się niewielkie źródła emisji, do których nie stosuje się wentylacji lokalnej. Wentylacja pomieszczenia ma charakter wentylacji ogólnej. Nie przewiduje się również wentylacji awaryjnej, ponieważ emisja nie może wzrosnąć skokowo.

Szczególnym przypadkiem jest system wentylacji ogólnej, w którym tylko część wyciąganego powietrza jest usuwana na zewnątrz. Pozostała część jest zwracana do hali w celu zapewnienia odzysku ciepła. Powietrze zwracane zostaje uzupełnione świeżym powietrzem. Zatem świeże powietrze napływające do pomieszczenia stanowi tylko część powietrza nawiewanego. Część powietrza, która jest zwracana do pomieszczenia, zawiera pewne ilości substancji palnej emitowanej do atmosfery wewnątrz pomieszczenia. **Powstaje zatem pytanie: Po jakim czasie w atmosferze pomieszczenia, a właściwie w powietrzu wywiewanym, może powstać stężenie w granicach wybuchowości?**

Zakładamy, że substancja emitowana do atmosfery (np. wodór, gaz ziemny) jest lżejsza od powietrza, co oznacza, że będzie tworzyła z powietrzem mieszaninę jednorodną (przy nieskończonym czasie mieszania dyfuzyjnego; wówczas różnice stężeń wzdłuż wysokości pomieszczenia są pomijalne przy wysokościach tego rzędu). Ważnym założeniem jest przyjęcie, że objętość zalegania atmosfery wybuchowej w otoczeniu źródła emisji jest mała w stosunku do objętości pomieszczenia.

Poniżej wyszczególniono wielkości stałe i regulowane przyjęte do modelu oraz wielkość poszukiwaną:

Wielkości stałe: objętość pomieszczenia, w którym występuje emisja V [m^3], wydajność źródła emisji q [kg/s],

Wielkości regulowane: wydajność wentylacji Q [m^3/s], współczynnik określający udział powietrza zwracanego do pomieszczenia k , współczynnik określający udział powietrza świeżego w powietrzu nawiewanym $1-k$.

Wielkości poszukiwane: czas, po którym stężenie substancji palnej (wybuchowej) w wyciąganym powietrzu przekroczy poziom uważany za bezpieczny, tzn. 10% DGW (DGW – dolna granica wybuchowości, ang. LEL – Lower Explosive Limit) T_{kr} [s].

Przykładowa sytuacja obliczeniowa

W magazynie o objętości $26\,500\,m^3$ zastosowano wentylację mechaniczną, o wydajności $40\,000\,m^3/h$. W porze nocnej i w dni wolne od pracy wydajność wentylacji jest ograniczona do 40%, co oznacza pracę z wydajnością $16\,000\,m^3/h$. W celu odzyskania ciepła 90% powietrza jest zwracane ponownie do hali; świeże powietrze z zewnątrz stanowi 10% powietrza nawiewanego do magazynu. Emisja wodoru wynosi ok. $0,5\,m^3/h$.

Model matematyczny Modelowanie za pomocą równania różniczkowego

W celu uzyskania wzorów opisujących, jak zmienia się zawartość wodoru (lub innej wydzielanej substancji) w pomieszczeniu, zaczęto od zbudowania następującego równania różniczkowego.

$$\frac{dH}{dt} = -\varphi H + q \quad \text{gdzie:} \quad \varphi = \frac{Q}{V} \times (1-k) \quad (1)$$

Równania różniczkowe wyznaczają zależność między nieznaną funkcją a jej pochodnymi. Obecnie prowadzi się szereg badań nad kolejnymi schematami rozwiązywania równań różniczkowych, gdyż mają one wiele zastosowań praktycznych [5–8].

Przyjęte oznaczenia:

$H = H(t)$ – ilość wodoru (lub innej wydzielanej substancji), która znajduje się w pomieszczeniu o czasie t [m^3];

$S = S(t)$ – stężenie wodoru (lub innej wydzielanej substancji) w pomieszczeniu o czasie t ;

t – czas [s];

$q = q(t)$ – wydajność źródła emisji wodoru (lub innej wydzielanej substancji) [m^3/s];

φ – współczynnik opisujący jak tempo odprowadzania wodoru przez wentylację o czasie t , zależy od ilości wodoru znajdującego się w pomieszczeniu o czasie t ;

Q – wydajność wentylacji [m^3/s];

V – objętość pomieszczenia [m^3];

k – współczynnik określający udział powietrza zwracanego do pomieszczenia w powietrzu nawiewanym;

$1-k$ – współczynnik określający udział powietrza świeżego w powietrzu nawiewanym.

Równanie różniczkowe (1) opisuje, w jaki sposób zmienia się ilość wodoru (lub innej wydzielanej substancji) w pomieszczeniu. Na zmianę ilości gazu w pomieszczeniu składają się dwa procesy. Z jednej strony obserwujemy ubytek gazu spowodowany procesem wentylacji. Ubytek gazu jest proporcjonalny do ilości gazu, jaka w danym momencie znajduje się w pomieszczeniu. Ten komponent zmiany ilości gazu jest opisany jako $-\varphi H$ w równaniu różniczkowym (1). Z drugiej strony obserwujemy napływ gazu pochodzącego ze źródła emisji. Ilość napływającego gazu jest równa wydajności źródła emisji q . Ten drugi komponent zmiany ilości gazu jest opisany jako $+q$ w równaniu różniczkowym (1). Gaz w powietrzu zwracanym nie jest zaliczany do gazu napływającego. Zwracanie części powietrza powoduje zmniejszenie ubytku gazu. Wpływ tego procesu został uwzględniony we współczynniku φ .

Wyprowadzenie wzoru na $H(t)$

Funkcję $H(t)$, która opisuje, jak ilość wodoru (lub innej wydzielanej substancji) w pomieszczeniu zmienia się w zależności od czasu t , uzyskamy poprzez rozwiązanie równania różniczkowego (1). Rozwiązanie otrzymujemy się szczególnie prosto przy założeniu, że wydajność źródła emisji $q(t)$ się nie zmienia – czyli w przypadku, gdy funkcja $q(t)$ jest funkcją stałą. Jednak również dla wielu rodzajów zmiennej emisji wyprowadzenie

wzoru funkcji $H(t)$ nie sprawia problemów. Rozpoczęto od wprowadzenia wzoru dla stałej emisji $q(t) = q$. Następnie opisano, w jaki sposób można uzyskać wzory dla zmiennej emisji $q(t)$, wskazując, dla jakich rodzajów zmiennej emisji jest to możliwe.

Emisja stała

Założono, że wydajność źródła emisji jest stała – to znaczy wartość funkcji $q(t) = q$ nie zależy od czasu t . W tym przypadku równanie różniczkowe (1) można rozwiązać za pomocą czynnika całkującego $G(t) = e^{\int \varphi dt}$ w następujący sposób.

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= -\varphi H + q \\ \frac{dH}{dt} + \varphi H &= q \\ \frac{dH}{dt} e^{\varphi t} + \varphi H e^{\varphi t} &= e^{\varphi t} q \\ \frac{d}{dt} (H e^{\varphi t}) &= e^{\varphi t} q \\ \int \frac{d}{dt} (H e^{\varphi t}) dt &= \int e^{\varphi t} q dt \\ H e^{\varphi t} &= \frac{q}{\varphi} e^{\varphi t} + c \\ H &= \frac{q}{\varphi} + c e^{-\varphi t} \end{aligned}$$

Jeżeli $H(0) = H_0$, czyli o czasie $t = 0$ w pomieszczeniu znajduje się H_0 gazu

$$H_0 = \frac{q}{\varphi} + c e^{-\varphi \cdot 0}$$

Pozwala to wyznaczyć stałą c .

$$c = H_0 - \frac{q}{\varphi}$$

Otrzymujemy więc następujący wzór:

$$H(t) = \frac{q}{\varphi} + H_0 e^{-\varphi t} - \frac{q}{\varphi} e^{-\varphi t}$$

Po przekształceniu:

$$H(t) = H_0 e^{-\varphi t} + \frac{q}{\varphi} (1 - e^{-\varphi t}) \quad (2)$$

Po podziale obu stron równania przez objętość pomieszczenia V możemy również otrzymać wzór na stężenie wodoru (lub innej substancji) w pomieszczeniu.

$$S(t) = \frac{H_0}{V} e^{-\varphi t} + \frac{q}{V\varphi} (1 - e^{-\varphi t}) = S_0 e^{-\varphi t} + \frac{q}{Q(1-k)} (1 - e^{-\varphi t})$$

Należy pamiętać, że w powyższych wzorach $\varphi = \frac{Q}{V} \times (1-k)$.

Emisja zmienna

W przypadku, gdy wydajność źródła emisji nie jest stała, czyli wartość funkcji $q(t)$ zależy od czasu t , tak jak poprzednio można użyć czynnika całkującego $G(t) = e^{\int \varphi dt}$, otrzymując:

$$H e^{\varphi t} = \int e^{\varphi t} q dt$$

Wyprowadzenie wzoru funkcji $H(t)$ sprowadza się do obliczenia całki $\int e^{\varphi t} q dt$. Dla pewnych typów funkcji $q(t)$ będzie to w miarę łatwe, na przykład dla funkcji postaci $q(t) = e^{at}$, $a \in \mathbb{R}$.

Stosując metodę całkowania wielokrotnie, uzyskamy wzór dla wielu innych typów funkcji $q(t)$. Wystarczy, że dla jakiegoś $n \in \mathbb{N}$ jesteśmy w stanie obliczyć całkę postaci $\frac{1}{\varphi^n} \int e^{\varphi t} \frac{d^n q}{dt^n} dt$ (np. $q(t) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$) lub że dla jakiegoś $n \in \mathbb{N}$ całka $\frac{1}{\varphi^n} \int e^{\varphi t} \frac{d^n q}{dt^n} dt$ jest wielokrotnością całki $\int e^{\varphi t} q dt$ (np. $q(t) = a \sin(bt)$, $a, b \in \mathbb{R}$ i $q(t) = a \cos(bt)$, $a, b \in \mathbb{R}$).

Rozwiązanie przykładowego problemu

Aby zilustrować, w jaki sposób wzór (2) można wykorzystać w praktyce, użyto go do rozwiązania przykładowego problemu.

Przykładowy problem

W magazynie o kubaturze 26 500 m³ zastosowano wentylację mechaniczną o wydajności 40 000 m³/h. W porze nocnej i w dni wolne od pracy wydajność wentylacji jest ograniczona do 40%, co oznacza pracę z wydajnością 16 000 m³/h. W celu odzyskania ciepła 90% powietrza jest zawracane ponownie do hali; natomiast świeże powietrze z zewnątrz stanowi 10% powietrza nawiewanego do magazynu. Emisja wodoru wynosi około 0,5 m³/h. Czy stężenie wodoru przekroczy uważany za bezpieczny poziom 10% DGW? Po jakim czasie to nastąpi?

W powyższym problemie założono, że:

$$q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\max} = 40\,000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\min} = 16\,000 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 26\,500 \text{ m}^3$$

$$k = 0,9$$

$$\phi_{\max} = \frac{40000}{26500} \times 0,1 [1/h] = \frac{8}{53} [1/h]$$

$$\phi_{\min} = \frac{16000}{26500} \times 0,1 [1/h] = \frac{16}{265} [1/h]$$

Ilość wodoru odpowiadająca 10% DGW (DGW równe 4%) oznaczamy przez H_{kr} i obliczamy w następujący sposób.

$$H_{kr} = 0,1 \times 0,04 \times V = 0,004 \times 26500 \text{ m}^3 = 106 \text{ m}^3$$

Należy zauważyć, że w powyższym problemie wartości q , Q_{\max} oraz Q_{\min} są podane nie w m³/s tylko m³/h. Można używać wzoru (2) niezależnie od użytych jednostek. Przy użyciu jednostki m³/s czas t we wzorze (2) jest liczony w sekundach natomiast przy użyciu jednostki m³/h czas t we wzorze (2) jest liczony w godzinach.

Zastosowanie wzoru na $H(t)$ w przykładowym problemie

Wzór (2) można stosować wtedy, gdy wartość Q , a tym samym wartość φ , się nie zmienia. Dlatego należy wprowadzać rozróżnienie między czasem pracy, gdy $Q = Q_{\max}$ i $\varphi = \varphi_{\max}$ a czasem wolnym od pracy oraz porą nocną, gdy $Q = Q_{\min}$ i $\varphi = \varphi_{\min}$. W każdym przedziale czasu, w którym wartość φ jest stała, możemy stosować wzór (2), przy czym H_0 należy interpretować wtedy jako ilość wodoru na początku przedziału.

Analizując wzór (2), można dokładnie opisać, w jaki sposób zmienia się ilość wodoru $H(t)$ z uwzględnieniem wpływu wartości poszczególnych parametrów. Zaobserwujemy dwie

asymptoty $\frac{q}{\varphi_{min}}$ oraz $\frac{q}{\varphi_{max}}$, przy czym $\frac{q}{\varphi_{max}} < \frac{q}{\varphi_{min}}$. W przedziale, w którym wartość $\varphi = \varphi_{max}$ ilość wodoru będzie się zbliżała do wartości $\frac{q}{\varphi_{min}}$. Natomiast, w przedziale, w którym wartość $\varphi = \varphi_{min}$, ilość wodoru będzie się zbliżała do wartości $\frac{q}{\varphi_{min}}$. Jeśli ilość wodoru na początku przedziału będzie wyższa niż wartość asymptoty, to będzie ona w tym przedziale malała, a jeśli będzie niższa od wartości asymptoty, to będzie w tym przedziale rosła.

Dokładne wyznaczenie czasu krytycznego T_{kr}

Zakładamy, że w przykładowym problemie pora nocna to czas od 18:00 do 6:00, natomiast czas od 18:00 w piątek do 6:00 w poniedziałek jest czasem wolnym od pracy. Ponadto w badanym okresie nie występują żadne dodatkowe dni wolne od pracy. Jako czas $t = 0$ wybieramy godzinę 18:00 w piątek. Zakładamy również, że początkowa ilość wodoru $H_0 = H(0) = 0$.

Musimy rozpatrywać oddzielnie przedziały czasu, w których wartość $\varphi = \varphi_{max}$ oraz przedziały czasu, w których wartość $\varphi = \varphi_{min}$. Obliczenia prowadzimy więc przedział po przedziale, otrzymując za każdym razem ilość wodoru na końcu danego przedziału.

Dla n-tego przedziału oznaczamy przez t_{n-1} czas na początku przedziału, przez t_n czas na końcu przedziału, a przez $H_n = H(t_n)$ ilość wodoru na końcu danego przedziału. Wartość H_n obliczamy za pomocą wzoru (2) w następujący sposób:

$$H_n = H_{n-1}e^{-\varphi t} + \frac{q}{\varphi}(1 - e^{-\varphi t})$$

W powyższym wzorze używamy $t = t_n - t_{n-1}$, co odpowiada długości rozpatrywanego przez nas przedziału czasu. Używamy też $\varphi = \varphi_{min}$ lub $\varphi = \varphi_{max}$ w zależności od tego, czy rozpatrywany przedział jest czasem pracy czy czasem wolnym od pracy.

Obliczenia kontynuujemy w kolejnych przedziałach do momentu, gdy wartość stężenia wodoru H_n przekroczy wartość H_{kr} . W tym celu warto użyć programu komputerowego z pętlą. Jeżeli H_n przekroczy H_{kr} , oznacza to, że ilość wodoru H_{kr} została przekroczona w ostatnim rozpatrywanym przedziale czasu, czyli w przedziale od t_{n-1} do t_n . Możemy wtedy wyznaczyć dokładny czas T_{kr} . Czas T_{kr} będzie równy $T_{kr} = t_{n-1} + t_{kr}$, gdzie t_{kr} wyprowadza się z poniższego równania.

$$H_{kr} = H_{n-1}e^{-\varphi t_{kr}} + \frac{q}{\varphi}(1 - e^{-\varphi t_{kr}})$$

W równaniu używamy $\varphi = \varphi_{min}$ lub $\varphi = \varphi_{max}$ w zależności od tego, czy rozpatrywany przedział od t_{n-1} do t_n jest czasem pracy czy czasem wolnym od pracy. Otrzymamy:

$$T_{kr} = t_{n-1} - \frac{1}{\varphi} \ln \left(\frac{H_{kr} - \frac{q}{\varphi}}{H_{n-1} - \frac{q}{\varphi}} \right)$$

W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że w przypadku ogólnym T_{kr} nie zawsze istnieje. Zostanie to dokładniej omówione w kolejnej sekcji. W przykładowym problemie wartość $H(t)$ jest zawsze ograniczona w następujący sposób:

$$H(t) \leq H_0 e^{-\varphi_{min} t} + \frac{q}{\varphi_{min}}(1 - e^{-\varphi_{min} t}) \leq \frac{q}{\varphi_{min}}$$

Gdyż $H_0 = 0$ oraz $0 < e^{-\varphi_{min} t} \leq 1$. Otrzymamy więc:

$$H(t) \leq \frac{q}{\varphi_{min}} = 0,5 \times \frac{265}{16} \text{ m}^3 < 106 \text{ m}^3 = H_{kr}$$

Dlatego kontynuując obliczenia H_n , nigdy nie otrzymalibyśmy wartości H_n przekraczającej H_{kr} .

Wyznaczanie przybliżonej wartości czasu krytycznego T_{kr}

W zaprezentowanym powyżej rozwiązaniu przykładowego problemu wyznaczenie kolejnych wartości H_n jest dość pracochłonne. Komplikacje wynikają z faktu, że wartość parametru Q jest inna dla czasu pracy i dla czasu wolnego od pracy. Zauważmy, że tak naprawdę interesujące są nie same wartości $H(t)$, a jedynie informacja o tym, czy i kiedy wartość $H(t)$ może przekroczyć wartość krytyczną H_{kr} . W związku z tym w praktyce o wiele efektywniejsze będzie oszacowanie czasu T_{kr} . Zamiast wyznaczać dokładną wartość T_{kr} , określimy jedynie zakres czasu, w którym ilość wodoru $H(t)$ przekroczyłaby poziom krytyczny H_{kr} .

W poniższych rozważaniach zakładamy, że początkowa ilość wodoru H_0 nie przekracza wartości krytycznej H_{kr} . Wartość czasu krytycznego T_{kr} oszacujemy, wyznaczając czasy T_{min} oraz T_{max} takie, że $T_{min} \leq T_{kr} \leq T_{max}$. Dolna granica T_{min} będzie określona z założeniem minimalnej wartości dla parametru Q , czyli $Q = Q_{min}$, natomiast górna granica T_{max} przy założeniu maksymalnej wartości parametru Q – czyli $Q = Q_{max}$. Dla każdego t wartość $H(t)$ jest ograniczona od dołu i od góry w następujący sposób:

$$H_0 e^{-\varphi_{max} t} + q \frac{(1 - e^{-\varphi_{max} t})}{\varphi_{max}} \leq H(t) \leq H_0 e^{-\varphi_{min} t} + q \frac{(1 - e^{-\varphi_{min} t})}{\varphi_{min}}$$

T_{min} oraz T_{max} wyznaczamy poprzez rozwiązanie poniższych równań:

$$H_{kr} = H_0 e^{-\varphi_{min} T_{min}} + \frac{q}{\varphi_{min}}(1 - e^{-\varphi_{min} T_{min}})$$

oraz

$$H_{kr} = H_0 e^{-\varphi_{max} T_{max}} + \frac{q}{\varphi_{max}}(1 - e^{-\varphi_{max} T_{max}})$$

Otrzymamy poniższe wzory:

$$T_{min} = -\frac{1}{\varphi_{min}} \ln \left(\frac{H_{kr} - \frac{q}{\varphi_{min}}}{H_0 - \frac{q}{\varphi_{min}}} \right)$$

oraz

$$T_{max} = -\frac{1}{\varphi_{max}} \ln \left(\frac{H_{kr} - \frac{q}{\varphi_{max}}}{H_0 - \frac{q}{\varphi_{max}}} \right)$$

Jeżeli $H_{kr} \geq \frac{q}{\varphi_{min}}$, to T_{min} nie jest zdefiniowane. Podobnie, jeśli $H_{kr} \geq \frac{q}{\varphi_{max}}$, to T_{max} nie jest zdefiniowane. Należy wtedy przyjąć odpowiednio $T_{min} = \infty$ oraz $T_{max} = \infty$. Zachodzi wtedy sytuacja, w której przy stałej wydajności wentylacji Q , równej odpowiednio Q_{min} lub Q_{max} , nigdy nie zostałyby przekroczone krytyczne

BADANIA I ROZWÓJ

poziom ilości wodoru H_{kr} . Jeśli $T_{min} = T_{max} = \infty$ to przy wydajności wentylacji zmieniającej się (w dowolny sposób) w zakresie pomiędzy Q_{min} a Q_{max} , ilość wodoru $H(t)$ nigdy nie przekroczyłaby poziomu krytycznego H_{kr} . Taka sytuacja będzie miała miejsce w przykładowym problemie.

Z powyższej analizy wynika, że jeżeli $\frac{q}{\varphi V} = \frac{q}{Q(1-k)}$ jest mniejsze niż 0,04, to stężenie wodoru pozostanie zawsze na bezpiecznym poziomie 10% DGW.

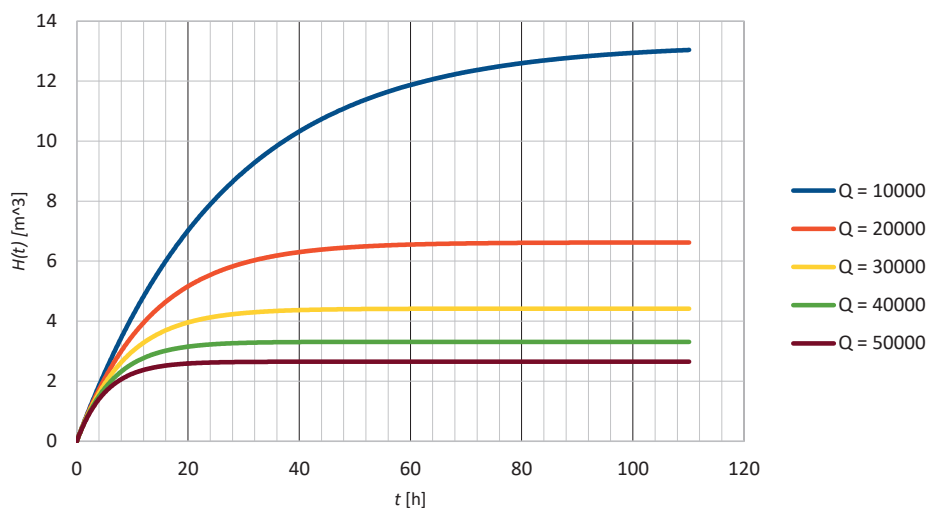
Zależność czasów T_{min} i T_{max} od wydajności źródła q

Wzory na T_{min} i T_{max} , które uzyskaliśmy pozwalają na przeanalizowanie, w jaki sposób zakres okna czasowego, w którym nastąpi przekroczenie krytycznego poziomu ilości wodoru H_{kr} zależy od wydajności źródła q . Otrzymane wyprowadzenie nie zależy od wybranych wartości parametrów q , Q_{max} , Q_{min} , V , k , φ_{max} , φ_{min} i wykorzystuje jedynie założenie, że $H_0 < H_{kr}$.

Przyjmując zatem, że wszystkie wartości parametrów z wyjątkiem q są takie jak w przykładowym problemie, możemy sporządzić za pomocą otrzymanych wzorów wykres przedstawiający, jak czasy T_{min} i T_{max} zmieniają się w zależności od wartości wydajności źródła q . Dla poszczególnych wartości q możemy narysować pionową linię przechodzącą przez daną wartość q , a wtedy miejsca przecięcia z wykresami dla T_{min} i T_{max} wyznaczą okno czasowe, w którym zostanie przekroczony krytyczny poziom ilości wodoru H_{kr} .

Graficzna ilustracja otrzymanych wyników

Wyniki obliczeń dla określonych we wstępie warunków przedstawiono na rycinach od 1 do 3. Na ryc. 1 przedstawiono zależność całkowitej ilości wodoru w atmosferze rozpatrywanego pomieszczenia w funkcji czasu przy różnej, ale niezmiennej w czasie wydajności wentylacji.



Rycina 1. Całkowita objętość wodoru w atmosferze rozpatrywanego pomieszczenia określona przy stałej emisji przy różnych wydajnościach wentylacji w funkcji czasu

Figure 1. Total hydrogen volume in the atmosphere of the room concerned determined at constant emissions at various ventilation capacities as a function of time

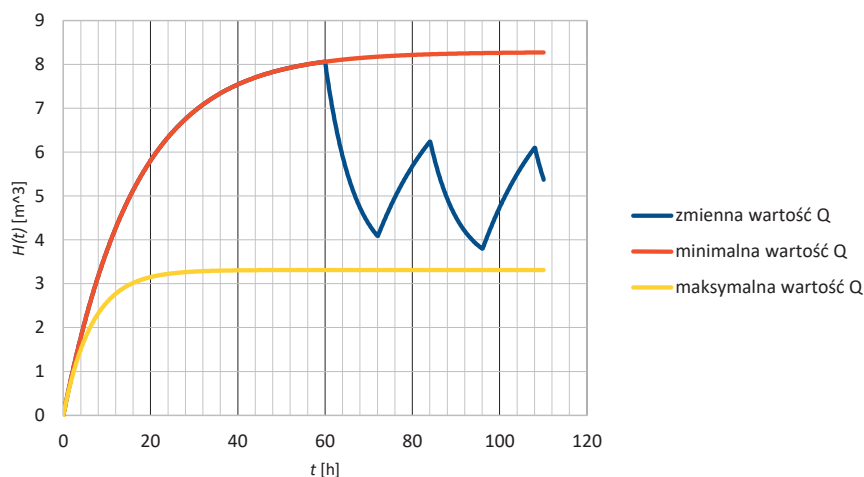
Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wykres na ryc. 1 potwierdza oczywistą tezę, że całkowita ilość wodoru w atmosferze pomieszczenia zależy wprost od wydajności wentylacji. Z przebiegu przedstawionych zależności wynika, że dynamika wzrostu zawartości wodoru w atmosferze pomieszczenia maleje; po pewnym czasie, różnym dla poszczególnych wydajności wentylacji, praktycznie stabilizuje się. W rozpatrywanym przypadku nie jest możliwe, aby objętość wodoru osiągnęła wartość krytyczną.

Na ryc. 2 przedstawiono jakościowo zmiany objętości wodoru w atmosferze pomieszczenia przy cyklicznie zmiennej wydajności wentylacji. Powyższe odpowiada zmniejszeniu wentylacji w czasie nocnym i podczas dni wolnych oraz wyższej wydajności w dni robocze.

Ilustrację sposobu określenia przedziału czasowego, w którym możliwe jest osiągnięcie zawartości wodoru równej H_{kr} w zależności od wydajności emisji q przedstawiono na ryc. 3. Dolną granicę T_{min} wyznaczmy, zakładając minimalną wartość dla parametru Q (wydajność wentylacji) czyli $Q = Q_{min}$, natomiast górną granicę T_{max} , zakładając maksymalną wartość parametru Q czyli $Q = Q_{max}$. Jeżeli znana jest wielkość emisji wodoru, przedział czasowy, w którym może być osiągnięte H_{kr} , można wyznaczyć, prowadząc pionową linię $q = const$ do przecięcia z liniami $T_{min} = f(q)$ i $T_{max} = f(q)$; przedział ten jest zawarty między punktami przecięcia tych zależności linią $q = const$.

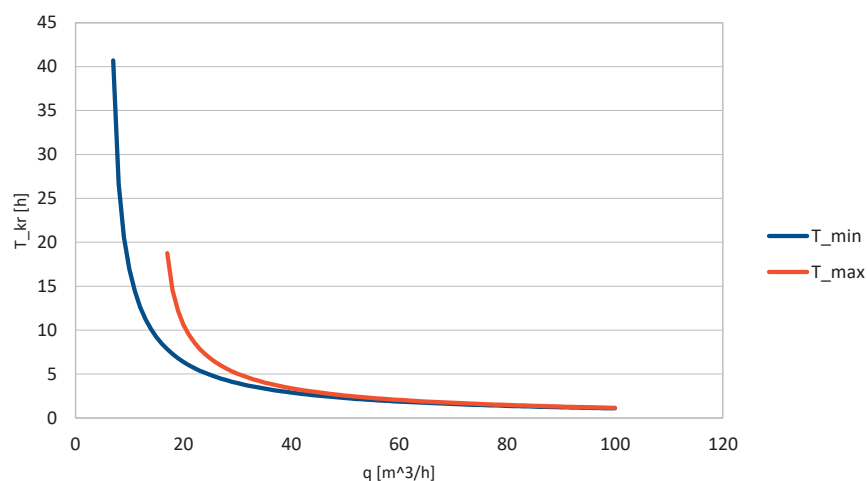


Rycina 2. Zmiany całkowitej objętości wodoru w atmosferze pomieszczenia przy cyklicznych zmianach wydajności wentylacji

Figure 2. Changes in the total hydrogen volume in room atmosphere under periodic changes in ventilation efficiency

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Rycina 3. Sposób wyznaczenia przedziału czasowego, w którym możliwe jest przekroczenie H_{kr} w zależności od wydajności źródła emisji

Figure 3. The method of determining the time interval in which H_{kr} can be exceeded depending on the efficiency of the emission source

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przedstawionego modelu, popartego przykładem obliczeniowym, można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Zaproponowany model matematyczny może być przydatny do określenia maksymalnej ilości substancji palnej o gęstości względem powietrza ≤ 1 w atmosferze pomieszczenia.
2. Zaproponowany model obliczeniowy pozwala powiązać objętość krytyczną H_{kr} z wydajnością wentylacji, w tym przy uwzględnieniu zmiennej wydajności wentylacji.
3. Przedstawiony model pozwala stwierdzić, czy w określonych warunkach można na potrzeby odzysku ciepła zawracać część powietrza wentylacyjnego, nie powodując przy tym wzrostu zagrożenia wybuchem. Stanowi zatem przydatne narzędzie inżynierskie.
4. Model pozwala określić czas, po którym zostanie przekroczona H_{kr} ; ma to znaczenie w przypadku konieczności oszacowania czasu reakcji.
5. Z analizy wyników otrzymanych dla rozpatrywanego przykładu wynika, że w założonych warunkach nigdy nie zaistnieje zagrożenie wybuchem w wentylacji; stężenia wodoru w powietrzu wentylacyjnym będą bezpieczne (poniżej 10% DGW).

6. Model może być stosowany bez ograniczeń w odniesieniu do substancji tworzących z powietrzem mieszaniny wybuchowe; powietrze zawierające substancje szkodliwe nie powinno być zawracane.
7. Przedstawione ilustracje potwierdzają poprawność modelu; wszystkie rozwiązania są jakościowo zgodne z oceną intuicyjną.
8. Model może być przydatny w ocenie zagrożenia wybuchem, w szczególności do wykazania, że w wielu przypadkach zagrożenie wybuchem nie istnieje.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 czerwca 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.).
- [2] Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz. U. z 2010 r. Nr 109, poz. 719).
- [3] Kieliszek S., Tomasz S., Wrotek J., *Kinetyka parowania cieczy z powierzchni swobodnych*, „Zeszyty Naukowe SGSP”, 95(2).
- [4] Fliszkiewicz M., Krauze A., Maciak T., *Możliwości stosowania programów komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego*, BiTP Vol. 29 Issue 1, 2013, pp. 47–60.
- [5] Braun M., *Differential Equations and Their Applications*, “Applied Mathematical Science” 1983, Vol. 15.
- [6] Serrano S.E., *Differential Equations. Applied Mathematical Modeling, Nonlinear Analysis, and Computer Simulation in Engineering and Science*, HydroScience Inc. 2016.
- [7] Chicone C., *Invitation to Applied Mathematics: Differential Equations, Modeling and Computation*, Elsevier Inc. 2017.
- [8] Holmes M.H., *Introduction to the Foundations of Applied Mathematics*, “Texts in Applied Mathematics” 2009, Vol. 56, Springer-Verlag New York Inc.

DR ANNA ZIELICZ – jest absolwentką studiów z zakresu matematyki teoretycznej na Uniwersytecie św. Andrzeja w Szkocji. Studiowała również na Wydziale Matematyki Uniwersytetu Fryderyka-Wilhelma w Bonn, a w 2015 roku ukończyła studia doktoranckie na Uniwersytecie w Bremie. Od 2015 r. pracuje jako adiunkt w Katedrze Nauk Ścisłych w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, gdzie zajmuje się działalnością dydaktyczną i badawczą. Jej zainteresowania dotyczą teorii systemów dynamicznych, wykorzystania modeli matematycznych w zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem.

MŁ. BRYG. DR INŻ. TOMASZ DRZYMAŁA – jest absolwentem Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Od 2011 roku zajmuje stanowisko kierownika Zakładu Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych w Katedrze Bezpieczeństwa Budowli i Rozpoznawania Zagrożeń. W ramach rozwoju naukowego uczestniczy z referatami w konferencjach krajowych i zagranicznych, publikuje w czasopiśmie fachowych. Jest autorem oraz współautorem kilkudziesięciu artykułów i publikacji naukowych o tematyce dotyczącej ochrony przeciwpożarowej oraz budownictwa. Jego główne zainteresowanie skupia się obecnie na komputerowym modelowaniu procesów gaszenia oraz badaniu wpływu wysokich temperatur na zmianę właściwości materiałów kompozytowych.

DR INŻ. SYLWESTER KIELISZEK – ukończył Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Posiada uprawnienia rzeczoznawcy ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych. Od ukończenia studiów jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym WOSP, a następnie SGSP. W latach 1988–1999 oraz 2002–2016 zajmował stanowisko kierownika Katedry Techniki Pożarniczej. Prowadzi zajęcia z przedmiotów: hydromechanika i przeciwpożarowe zaopatrzenie w wodę, termodynamika. W pracy naukowej zajmuje się głównie badaniem własności przepływowych sprzętu pożarniczego. Jest autorem i współautorem szeregu artykułów oraz wielu ekspertyz z zakresu ochrony przeciwpożarowej.

DR ANETA ŁUKASZEK-CHMIELEWSKA – ukończyła studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Adiunkt w Zakładzie Fizyki i Chemii w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Prowadzi badania naukowe związane z palnością i dymotwórczością materiałów polimerowych, a także radioaktywnością komponentów środowiska.