

mgr inż. Iwona Orłowska<sup>a)</sup>; prof. dr hab. inż. Marek Dziubiński<sup>a)\*</sup>

<sup>a)</sup>Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka / Faculty of Process and Environmental Engineering, Lodz University of Technology

\*Autor korespondencyjny / Corresponding author: ivona2005@wp.pl

## Porównanie modelowych czasów ewakuacji z przeprowadzonymi eksperymentami

A comparison between model-based evacuation times and experimental data

Сравнение расчетного времени эвакуации с проведенными экспериментами

### ABSTRAKT

**Cel:** Celem niniejszego artykułu było porównanie otrzymanych czasów ewakuacji z budynków użyteczności publicznej za pomocą wybranych modeli matematycznych z czasami eksperymentalnie przeprowadzonych ewakuacji.

**Wprowadzenie:** W artykule przedstawiono wybrane modele matematyczne do szacowania czasu ewakuacji. Należą do nich: model krytycznego czasu ewakuacji, model Togawy, model Melinek i Booth, model Galbreatha oraz model Paulsa. W celu porównania poprawności obliczania czasów ewakuacji ludzi z budynków w czasie pożaru za pomocą modeli matematycznych opisanych w dostępnej literaturze przedmiotu przeprowadzono i przeanalizowano ewakuacje z budynków: Instytutu Chemii Przemysłowej w Warszawie, Telewizji Polskiej SA Oddział w Łodzi, Urzędu Marszałkowskiego w Łodzi oraz Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Pabianicach. Uzyskane eksperymentalnie czasy ewakuacji porównano z czasami obliczonymi za pomocą wybranych modeli matematycznych oraz czasami otrzymanymi dzięki symulacji komputerowej wykonanej za pomocą programu Pathfinder.

**Wnioski:** Opisane w dostępnej literaturze równania matematyczne dają możliwość szybkiego szacowania czasu przemieszczania się ewakuujących się ludzi. Jednak ze względu na prostotę tych równań otrzymane za ich pomocą czasy ewakuacji obarczone są błędem w porównaniu z czasami rzeczywistymi uzyskanymi podczas przeprowadzonych eksperymentów. Występujące różnice między modelowymi czasami ewakuacji a czasami otrzymanymi eksperymentalnie mogą wynikać z tego, że autorzy modeli nie wymagali podzielenia drogi ewakuacyjnej na odcinki poziomych i pionowych dróg ewakuacyjnych, na których ludzie poruszają się z różnymi prędkościami. Wskazane modele nie odnoszą się do konieczności uwzględnienia zagęszczenia ludzi na drogach ewakuacyjnych, gdzie wraz z jego wzrostem prędkość przemieszczania się osób maleje. Modele te pozwalają swobodnie założyć prędkość, z jaką mają poruszać się ewakuujące się osoby, co można zrobić na podstawie dostępnej literatury.

**Znaczenie dla praktyki:** Przeprowadzone eksperymenty umożliwiły porównanie poprawności otrzymanych czasów ewakuacji obliczonych za pomocą modeli matematycznych, co pozwoliło na określenie wiarygodności tak otrzymanych wyników. Dodatkowo uzyskane czasy ewakuacji porównano z czasami otrzymanymi za pomocą symulacji komputerowych wykonanych w programie Pathfinder. Z przeprowadzonej analizy porównawczej wynika, że do czasów ewakuacji uzyskanych eksperymentalnie najbardziej zbliżone były te czasy ewakuacji otrzymane dzięki symulacji komputerowej, które obliczono przy wykorzystaniu modelu zmienno-sterującego.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, zachowanie się ludzi, prędkość przemieszczania się, eksperyment

**Typ artykułu:** doniesienie wstępne

---

Przyjęty: 19.02.2018; Zrecenzowany: 29.06.2018; Zatwierdzony: 05.07.2018;

Procentowy wkład merytoryczny: I. Orłowska – 80%; M. Dziubiński – 20%;

Identyfikator ORCID autorów: I. Orłowska – 0000-0002-7134-0542; M. Dziubiński – 0000-0002-0208-3570;

Proszę cytować: BiTP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 108–119, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.8;

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

---

### ABSTRACT

**Purpose:** The aim of this article was to compare the evacuation times obtained from public buildings, using selected mathematical models, with times of evacuations carried out experimentally.

**Introduction:** In the article, various mathematical models are presented in order to prove their use in fire evacuation time estimates. These include the critical evacuation time model, the Togava model, the Melenik and Booth model, the Galbreath model and the Pauls model. In order to compare the accuracy of the fire evacuation time estimates obtained by means of the above-mentioned methods, which are meticulously described in professional sources, a variety of real-life evacuations have been analysed, including evacuations from the Institute of Industrial Chemistry in Warsaw, the Public Television building in Lodz, the Marshal's Office in Lodz, and the Local Fire Rescue Unit in Pabianice. The time checks obtained experimentally during the abovementioned fire drills have been set against the estimates obtained through mathematical analysis and the Pathfinder software computer simulation.

**Conclusions:** professional literature on the subject-matter provides various mathematical formulas which can be put into use to quickly estimate the movement time of evacuees. However, the simplicity of the formulas and, therefore, the simplicity of both the analysis and results, can often lead to calculation errors, especially when compared with real-life time checks. The discrepancy between the model-based time estimates and the estimates obtained through real-life experimentation can be rooted in the ignorance displayed by mathematicians as to the necessity of incorporating several critical parameters into their models, such as the structure of vertical/horizontal escape routes and the volume of human traffic within them. Different escape routes and traffic levels may result in highly varied movement speeds and can deeply affect the evacuation time estimates. The mathematical models are, for the most part, oblivious of such detailed aspects of evacuation and only take into consideration the general assessments which can be found in professional printed sources.

**Practical significance:** Evacuation experiments which have been carried out in real life have given us the chance to juxtapose the time checks obtained through mathematical simulation with the factual data, which in turn enabled the critical review of the reliability of the models. What is more, the time estimates have been re-processed with the use of Pathfinder software. In conclusion, the comparative analysis has proven that the Pathfinder software, which incorporates the variable-control mathematical model, provides the most accurate and true to life evacuation time estimates.

**Keywords:** evacuation, human behaviour, speed of movement, experiment

**Type of article:** short scientific report

Received: 19.02.2018; Reviewed: 29.06.2018; Accepted: 05.07.2018;

Percentage contribution: I. Orłowska – 80%; M. Dziubiński – 20%;

Authors' ORCID IDs: I. Orłowska – 0000-0002-7134-0542; M. Dziubiński – 0000-0002-0208-3570;

Please cite as: BiTP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 108–119, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.8;

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

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Целью данной статьи является сравнение времени эвакуации из общественных зданий, с использованием отобранных математических моделей со временем эвакуаций, проведенных экспериментально.

**Введение:** В статье представлены отдельные математические модели для оценки времени эвакуации. К ним относятся: модель критического времени эвакуации, модель Тогава, модель Мелинека и Бута, модель Галбрета и модель Паулса. Чтобы сравнить правильность расчета времени эвакуации людей из зданий во время пожара с помощью математических моделей, описанных в доступной литературе, эвакуации из зданий: Института промышленной химии в Варшаве, филиала Телевидения Польши СА в Лодзи, Администрации Маршалка в Лодзи и спасательного подразделения Противопожарного районного штаба Государственной пожарной службы в Пабянице. Полученное экспериментально время эвакуации сравнивались со временем, рассчитанным с помощью выбранных математических моделей, а иногда и с помощью компьютерного моделирования, выполняемого с использованием программы Pathfinder.

**Выводы:** Математические уравнения, описанные в доступной литературе, дают возможность быстро оценить время эвакуации людей. Однако из-за простоты этих уравнений время эвакуации, полученное с их использованием, подвержено ошибкам по сравнению с результатами реального времени, полученного в ходе экспериментов. Различия между расчетным временем эвакуации и полученным экспериментально, могут быть результатом того, что авторам моделей не требовалось разделять маршрут эвакуации на секции горизонтальных и вертикальных маршрутов эвакуации, где люди движутся с разной скоростью. В указанных расчетах не учитывается плотность людей на маршрутах эвакуации, где в связи с ее увеличением скорость движения людей уменьшается. Эти модели позволяют свободно предположить скорость перемещения эвакуированных, что может быть сделано на основе доступной литературы.

**Значение для практики:** Проведенные эксперименты позволили сравнить правильность времени эвакуации, полученное по математическим расчетным моделям, что позволило определить надежность полученных результатов. Кроме того, полученное время эвакуации сравнивались со временем, полученным с помощью компьютерного моделирования, проведенного в программе Pathfinder. Сравнительный анализ показывает, что время эвакуации, полученное экспериментально, было наиболее близким ко времени эвакуации, полученному благодаря компьютерному моделированию, которое было рассчитано с использованием модели с переменным управлением.

**Ключевые слова:** эвакуация, поведение людей, скорость движения, эксперимент

**Вид статьи:** предварительный отчет

Принята: 19.02.2018; Рецензирована: 29.06.2018; Одобрена: 05.07.2018;

Процентное соотношение участия в подготовке статьи: I. Orłowska – 80%; M. Dziubiński – 20%;

Идентификаторы ORCID авторов: I. Orłowska – 0000-0002-7134-0542; M. Dziubiński – 0000-0002-0208-3570;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BiTP Vol. 50 Issue 2, 2018, pp. 108–119, doi: 10.12845/bitp.50.2.2018.8;

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/>).

## Wstęp

Jednym z podstawowych wymagań dotyczących bezpieczeństwa pożarowego jest zapewnienie ludziom możliwości ewakuacji z pomieszczenia objętego pożarem [1]. Warunki techniczne szczegółowo określają parametry, jakim muszą odpowiadać powierzchnia, szerokość i wysokość pomieszczeń oraz dróg

## Introduction

One of the essential requirements for fire safety is to make it possible for people to evacuate from rooms on fire [1]. Technical conditions determine the detailed parameters of the area, width and height of both rooms and escape routes in order to satisfy the minimum requirements for fire safety, ensuring safe

ewakuacyjnych, aby spełnione zostały minimalne wymagania z zakresu ochrony przeciwpożarowej zapewniające bezpieczną ewakuację. Mimo to dziedzina, jaką jest inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, ciągle rozwija się bardzo dynamicznie, ponieważ bezpieczeństwo ludzi w niespotykanej dotąd skali zależy od zainstalowanych w budynkach urządzeń technicznych wykorzystywanych w ochronie przeciwpożarowej. Ich liczba, rodzaj, sposób zastosowania oraz – co niezwykle ważne – stan techniczny decydują o naszym zdrowiu, życiu i mieniu w przypadku wystąpienia zagrożenia pożarowego. Zabezpieczenia stosowane w budynku zależą od jego przeznaczenia i sposobu użytkowania. W przypadku zmiany sposobu jego użytkowania lub przebudowy, rozbudowy, nadbudowy obiekt istniejący należy dostosować do obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych.

W artykule do celów porównawczych wykorzystano następujące modele matematyczne: model krytycznego czasu ewakuacji, model Togawy, model Melinek i Booth, model Galbreatha oraz model Paulsa. Modele te poddano analizie pod kątem poprawności otrzymanych czasów w porównaniu z rzeczywistymi czasami ewakuacji uzyskanymi podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych.

## Porównanie modelowych czasów ewakuacji z przeprowadzonymi eksperymentami

W celu porównania poprawności obliczania czasów ewakuacji ludzi z budynków w czasie pożaru za pomocą modeli matematycznych opisanych w dostępnej literaturze przedmiotu przeprowadzono i przeanalizowano ewakuacje z budynków:

- Instytutu Chemii Przemysłowej w Warszawie (IChP w Warszawie) – cztery warianty ewakuacji po pionowej drodze ewakuacyjnej,
- Telewizji Polskiej SA Oddział w Łodzi (TVP w Łodzi) – ewakuacja całego siedemnastokondygnacyjnego budynku,
- Urzędu Marszałkowskiego w Łodzi (UM w Łodzi) – ewakuacja całego siedemnastokondygnacyjnego obiektu,
- Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej Komendy Powiatowej Państwowej Straży Pożarnej w Pabianicach (JRG KP PSP) (ewakuacja zmiany służbowej, budynku dwukondygnacyjnego).

Czasy ewakuacji uzyskane eksperymentalnie porównano z czasami ewakuacji obliczonymi za pomocą wspomnianych modeli oraz czasami otrzymanymi dzięki symulacji komputerowej wykonanej w programie Pathfinder.

### Przykładowy eksperyment. Charakterystyka obiektu

Budynek IChP w Warszawie, przedstawiony na rycinie 1, jest dziesięciopiętrowym biurowcem zakwalifikowanym do kategorii zagrożenia ludzi ZL III.

evacuation. Nonetheless, fire safety engineering continues to form a dynamically developing domain, considering that human safety depends on the technical fire safety devices installed in buildings to such a large extent as never before. The number, type, application and, what is exceptionally important, technical condition of such devices are crucial to our health, life and property when it comes to fire risk. The actual protective measures employed in a building depend on its purpose and use. In the case of modifying the building's purpose, or performing its reconstruction or extension, the existing building should be adjusted to the binding technical and construction regulations.

The following mathematical models have been used in the article for comparison purposes: the critical evacuation time model, Togawa model, Melnik and Booth model, Galbreath model and Pauls model. The models were analysed in terms of the accuracy of the obtained evacuation times when compared with real-life evacuation times based on experimental data.

## A comparison between model-based evacuation times and experimental data

In order to compare the accuracy of the fire evacuation time estimates obtained by means of the mathematical models described in professional sources, a variety of real-life evacuations have been conducted and analysed, including evacuations from:

- The Institute of Industrial Chemistry in Warsaw (IChP in Warsaw) – four evacuation variants of along a vertical escape route,
- Telewizja Polska S.A. – the Public Television building in Lodz (TVP in Lodz) – evacuation of the entire seventeen-floor building,
- Marshal's Office in Lodz (UM in Lodz) – evacuation of the entire seventeen-floor building,
- Local Fire Rescue Unit of the District Headquarters of the State Fire Brigade in Pabianice (JRG KP PSP) – evacuation of the shift from a two-floor building.

The evacuation times obtained in the experiments were compared with the evacuation time estimates based on the abovementioned models, and with times obtained through computer simulation performed using Pathfinder software.

### An experiment – building characteristics

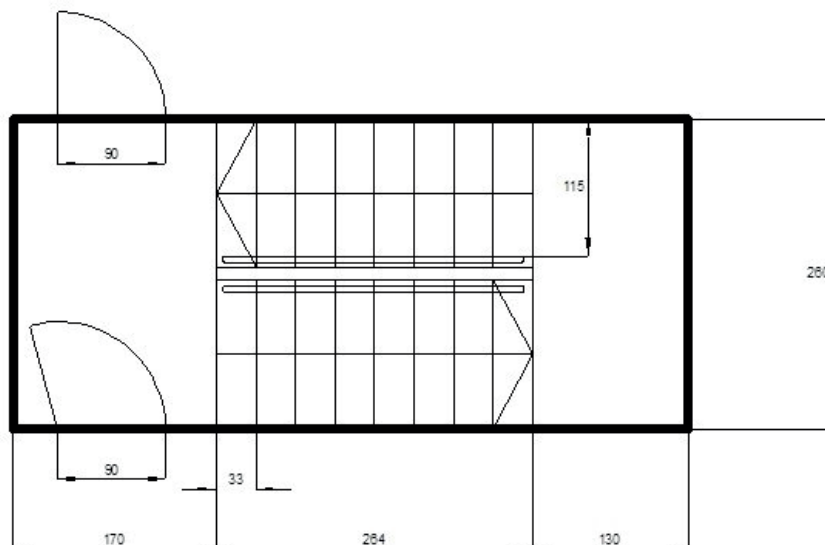
The IChP building in Warsaw, as shown in Figure 1, is a ten-floor office building classified in human threat category ZL III.



**Rycina 1.** Widok budynku IChP w Warszawie z zewnątrz [2, 3]  
**Figure 1.** A view of the Institute's building from the outside [2, 3]

Doświadczenia przeprowadzono poza godzinami pracy instytutu w jednej z dwóch klatek schodowych, której widok przedstawiono na rycinie 2.

The experiments were conducted outside the Institute's working hours in one of two staircases, the view of which is shown in Figure 2.



**Rycina 2.** Widok rzutu poziomego badanej klatki schodowej [2, 3]  
**Figure 2.** A view of the horizontal projection of the staircase under investigation [2, 3]

### Metodyka badania przebiegu ewakuacji ludzi

Zgodnie z przyjętą metodyką badań ewakuację rozpoczęto po usłyszeniu sygnału dźwiękowego. Całkowity czas ewakuacji mierzono od momentu jej rozpoczęcia do czasu przekroczenia wyjścia ewakuacyjnego przez ostatniego uczestnika ewakuacji.

### A method of analysing the evacuation route

In line with the adopted method, the evacuation started after hearing an acoustic signal. The total evacuation time was measured from the evacuation start to the moment of the last evacuee passing the emergency exit.

W celu rejestracji danych zainstalowano specjalnie przygotowaną aparaturę pomiarową. Składała się ona z czujnika IR przy drzwiach wyjściowych połączonego wraz z jednostką liczącą do komputera z odpowiednim oprogramowaniem, co przedstawiono na rycinie 3. Czujnik był zamontowany w górnej części ramy drzwi. Przy każdym przejściu osoby w kierunku zewnętrznym podawał impuls do licznika. Był on wyskalowany w taki sposób, żeby notować tylko przypadki przejścia obiektu o wysokości większej niż 1,4 m i żeby nawet przy dużym zagęszczeniu wszyscy ludzie zostali policzeni.



**Rycina 3.** Aparatura pomiarowa składająca się z czujnika zamontowanego w górnej części ramy drzwi połączonego wraz z jednostką liczącą do komputera z odpowiednim oprogramowaniem [2, 3]

**Figure 3.** Measuring apparatus consisting of a sensor mounted in the upper part of the door frame connected, together with the counting unit, to the computer with the appropriate software [2, 3]

Dodatkowo – w celu rejestracji zachowań ludzi podczas przemieszczania się pionowymi drogami ewakuacyjnymi – wykorzystano kamerę, którą umieszczono na pierwszym piętrze. Kamera ta była obsługiwana przez wyznaczoną osobę i znajdowała się na wysokości jej klatki piersiowej, co pozwalało na swobodną obsługę urządzenia.

### Dane z przebiegu obserwacji ewakuacji

W eksperymencie uczestniczyły 73 osoby. Była to grupa studentów ze Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Osoby te można uznać za wiarygodne, gdyż poza pełnieniem funkcji strażaka nie były specjalnie przygotowane i nie uczestniczyły w podobnych ewakuacjach.

W każdym badaniu przeprowadzonym w IChP w Warszawie (4 warianty) uczestniczyło tyle samo studentów. Zajmowali oni segmenty schodów w celu uzyskania odpowiedniego zagęszczenia ludzi na schodach. Im mniejsze zagęszczenie było badane, tym więcej segmentów schodów było zajętych, co przedstawiono na rycinie 4.

Start każdej próby ewakuacji był sygnalizowany głośnym gwizdkiem słyszalnym dla wszystkich ludzi na klatce schodowej. Osoby uczestniczące w badaniu miały poruszać się normalnym, spokojnym krokiem. W przypadku pozostałych eksperymentów ewakuacja rozpoczynała się po zadziałaniu systemu sygnalizacji pożarowej lub nadaniu komunikatu głosowego.

With a view to recording the data, specially prepared measuring apparatus was installed, comprising an IR sensor at the exit door which was connected, together with a counting unit, to a computer with the appropriate software, as shown in Figure 3. The sensor was installed in the upper part of the door frame. With each person's leaving the building through the door, it sent an impulse to the counting unit. It was calibrated to record all passages of objects higher than 1.4 m, which ensured that all people were counted despite the substantial volume of human traffic.

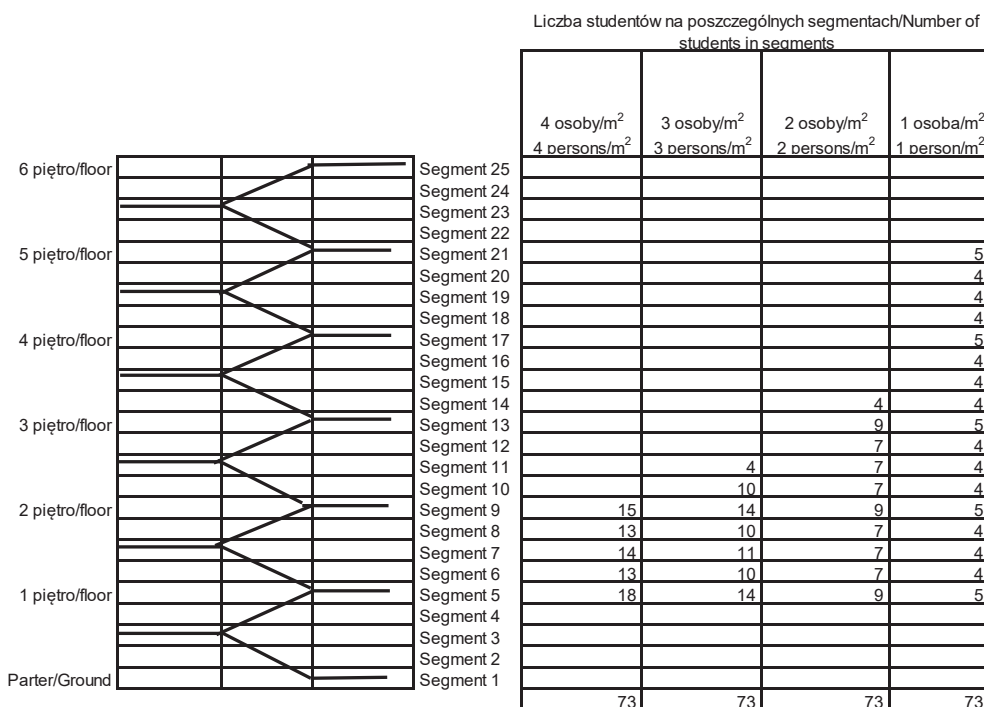
In addition, with the aim of recording human behaviours while moving along the escape routes, a camera installed on the first floor was used. It was operated by a person appointed for that purpose, who held it at chest height, which enabled a convenient operation of the device.

### Evacuation observation data

The experiment was attended by 73 people – students of the Main School of Fire Service in Warsaw. They can be treated as constituting a reliable group, given the fact that, apart from serving as fire-fighters, they were not specially prepared for, and had not taken part in, similar evacuations.

The same number of students participated in each analysis performed in IChP in Warsaw (four variants). They occupied various segments in the staircase in order to ensure the adequate volume of human traffic on the stairs. The lower the volume, the more staircase segments were occupied, as shown in Figure 4.

The start of each evacuation was signalled with a loud whistle that was heard by all people in the staircase. The participants were requested to move at their normal (calm) pace. In the case of the remaining experiments, evacuations started after triggering a fire detection system or sending a voice message.



Rycina 4. Widok ustawienia studentów na poszczególnych segmentach klatki schodowej [2, 3]

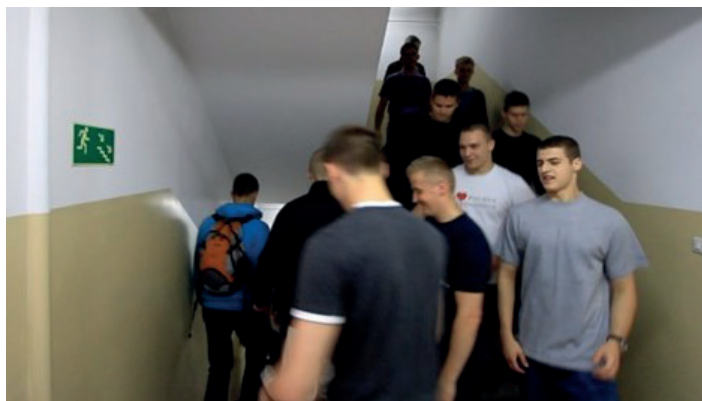
Figure 4. A view of students' arrangements in individual staircase segments [2, 3]

**Przebieg eksperymentu**

Ekspertyment I zakładał ustawienie studentów w sposób gwarantujący powstanie na schodach zagęszczenia ludzi wynoszącego 1 osoba/m<sup>2</sup>. Kolejne eksperymenty zakładały, że zagęszczenie ludzi na schodach będzie wynosić kolejno 2, 3 i 4 osoby/m<sup>2</sup>. Ewakuacja rozpoczęła się na sygnał dźwiękowy, a jej przebieg przedstawiono na przykładowej rycinie 5.

**The course of the experiment**

The first experiment assumed arranging students in such a way to ensure the volume of human traffic in the staircase amounting to 1 person/m<sup>2</sup>. The subsequent experiments assumed the following volumes: 2, 3 and 4 people/m<sup>2</sup>. The evacuation started after hearing an acoustic signal, and its course is exemplified in Figure 5.



Rycina 5. Uczestnicy badania poruszający się po pionowej drodze ewakuacyjnej

Figure 5. A view of the movement along a vertical escape route

Źródło: opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Analiza poklatkowa zebranego materiału z przebiegu eksperymentu I pozwoliła na określenie całkowitego czasu ewakuacji pionową drogą ewakuacyjną, który – z piątego piętra klatki schodowej – wyniósł 67 s.

The stop-motion analysis of the material collected during the first experiment made it possible to determine the total time of evacuation along a vertical escape route which amounted – from the fifth floor – to 67 s.

### Komputerowa symulacja ewakuacji wykonana w programie Pathfinder

W celu porównania obliczeniowych (modele ewakuacji), rzeczywistych i symulacyjnych (otrzymanych za pomocą modeli komputerowych) czasów ewakuacji z budynku wykorzystano program Pathfinder [4, 5]. Program ten jest specjalnym typem symulatora, w którym każdy zdefiniowany użytkownik ma szereg indywidualnych cech mogących wpływać na jego ruchy i decyzje podczas symulacji niezależnie od innych osób.

Technika poruszania się użyta w programie Pathfinder (zmiennie-sterująca) jest wariantem w oryginalnej technice sterowania, która pozwala modelom uciekających ludzi wybierać takie cząstkowe kierunki poruszania się, żeby ich indywidualny czas ewakuacji był jak najkrótszy. W każdym kolejnym kroku czasowym każdy ewakuujący się użytkownik budynku wybiera najkorzystniejszą dla siebie drogę ucieczki. Aktualizacja modelu zmiennie-sterującego następuje po 0,1 s. Model ten uwzględnia możliwość kolizji i bezwładność. Pathfinder zawiera również alternatywny model poruszania się tłumu bazujący na równaniach opisanych w literaturze przedmiotu [6]. Pozwala to na szybkie określenie czasu ewakuacji dla modelu budynku, a nawet dla modelu dużego kompleksu budynków. W programie domyślne ustawienie generuje postać ludzką, która porusza się z prędkością 1,19 m/s i której szerokość ramion wynosi 0,4558 m.

W celu przeprowadzenia symulacji eksperymentu 1 wykonanego w IChP w Warszawie zbudowano podesty spoczników, które połączono schodami. Następnie rozmieszczono poszczególne osoby zgodnie z ryciną 4. Dla każdego eksperymentu wykonano dwie symulacje komputerowe: jedną z wykorzystaniem modelu SFPE (ryc. 6-8) oraz drugą z wykorzystaniem modelu zmiennie-sterującego.

### A computer simulation of the evacuation, performed using Pathfinder software

With the aim of comparing the calculated (based on evacuation models), real and simulated (obtained through computer models) times of evacuations from buildings, Pathfinder software was used [4, 5]. The software is a special-type simulator in which all pre-defined users are assigned a range of individual features that may influence their movements and decisions in the simulation, independently of other people.

The (variable-control) movement technique used in the software is a variant of an original control technique which enables the evacuee models to choose such partial movement directions that keep their individual evacuation times as short as possible. With each subsequent step, the user evacuating from the building chooses the most convenient escape route. The variable-control model is updated at 0.1-second intervals, taking into account potential collisions and inertia. Pathfinder also comprises an alternative model of movement, based on the formulas described in literature on the subject-matter [6]. It enables a prompt determination of the evacuation time for a model building, including a large building complex. Based on default settings, a human model is generated that moves with a speed of 1.19 m/s and has a shoulder width of 0.4558 m.

In order to perform the simulation for experiment I in IChP in Warsaw, landings were constructed and connected to one another with stairs. Then, individual people were arranged as shown in Figure 4. For each experiment, two computer simulations were performed – one using the SFPE model (Figs. 6–8) and the other based on the variable-control model.



0/73

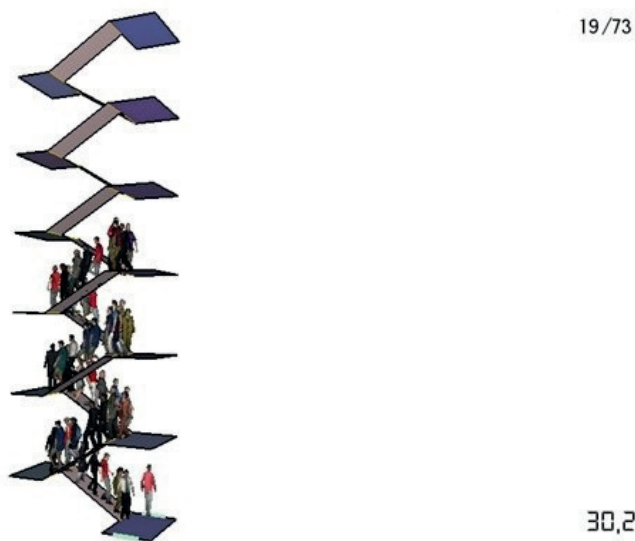
0,0

Rycina 6. Rozpoczęcie symulacji ewakuacji – eksperyment I w IChP w Warszawie

Figure 6. Starting the evacuation simulation – experiment I in IChP in Warsaw

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

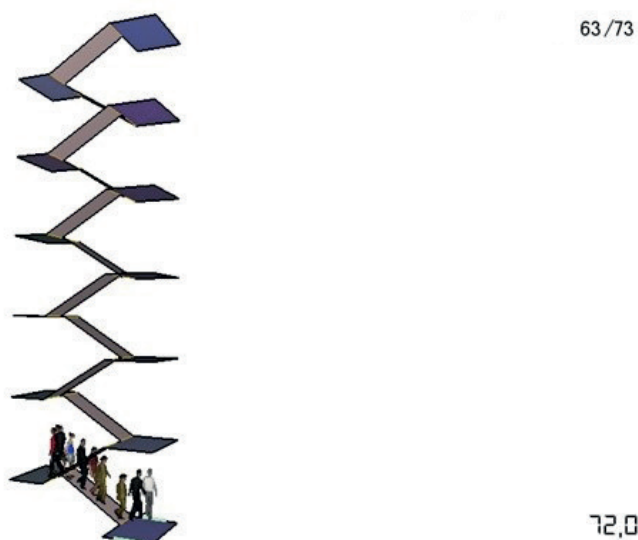


**Rycina 7.** Widok przebiegu ewakuacji. Czas  $t = 30,2$  s od momentu rozpoczęcia ewakuacji – eksperyment I w IChP w Warszawie

**Figure 7.** A view of the evacuation route. Time  $t = 30.2$  s from the beginning of the evacuation – experiment I in IChP in Warsaw

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.



**Rycina 8.** Końcowy etap ewakuacji. Czas  $t = 72$  s od momentu rozpoczęcia ewakuacji – eksperyment I w IChP w Warszawie

**Figure 8.** Final stage of the evacuation. Time  $t = 72$  s from the beginning of the evacuation – experiment I in IChP in Warsaw

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Zgodnie z przeprowadzoną symulacją eksperymentu I w IChP w Warszawie przy wykorzystaniu modelu zachowania SFPE czas ewakuacji 73 osób po pionowej drodze ewakuacyjnej wyniósł 81,5 s, natomiast przy wykorzystaniu modelu zmiennie-sterującego – 64,3 s. Dla pozostałych eksperymentów postąpiono analogicznie.

Based on the simulation for experiment I in IChP in Warsaw, the evacuation time for 73 people moving along a vertical escape route amounted to 81.5 s using the SFPE model, and to 64.3 s using the variable-control model. Identical procedures were performed for the remaining experiments.



### Skrócony opis pozostałych eksperymentów

Jak już wspomniano, przeprowadzono symulacje ewakuacji także z budynków: TVP w Łodzi, UM w Łodzi oraz JRG KP PSP w Pabianicach.

W budynkach TVP w Łodzi oraz UM w Łodzi ewakuacja rozpoczęła się po uruchomieniu sygnalizatorów akustycznego systemu sygnalizacji pożarowej, natomiast w budynku JRG KP PSP w Pabianicach – po ogłoszeniu komunikatu głosowego przez głośniki. W ewakuacji uczestniczyło odpowiednio 136 (TVP w Łodzi), 226 (UM w Łodzi) i 10 osób (JRG KP PSP w Pabianicach). Osoby te przemieszczały się z pomieszczeń korytarzami o szerokości 1,4 m, następnie zaś klatkami schodowymi, w których szerokość biegu schodów wynosiła 1,2 m, a szerokość spoczników na zewnątrz budynków – 1,5 m.

W celach porównawczych, podobnie jak w przypadku eksperymentów przeprowadzonych w IChP w Warszawie, wykonano symulacje komputerowe w programie Pathfinder. W zbudowanych modelach rozmieszczano poszczególnych uczestników ewakuacji zgodnie z listą obecności osób uczestniczących w eksperymencie, przyporządkowując ich do wskazanych miejsc pracy.

### Porównanie czasów ewakuacji uzyskanych z wykorzystaniem wybranych modeli matematycznych i symulacji komputerowej

Czasy ewakuacji ludzi z budynków otrzymane eksperymentalnie porównano z czasami analogicznych ewakuacji z budynków obliczanymi teoretycznie za pomocą wybranych, dostępnych w literaturze modeli:

- krytycznego czasu ewakuacji [7, 8],
- Togawy [7, 9–12],
- Melinek i Booth [12, 13],
- Galbreatha [7, 14],
- Paulsa [7, 11, 12, 14] oraz
- symulacji komputerowej wykonanej w programie Pathfinder.

W celu sprawdzenia, za pomocą którego modelu otrzymano najbardziej zbliżone wyniki czasu ewakuacji, do przeprowadzonych badań wykorzystano obliczenie odchylenia wyniku [15], które wyznaczono zgodnie z równaniem (1):

$$O_x = \frac{|x_{rz} - x_p|}{x_{rz}} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$O_x$  – odchylenie wyniku,

$x_{rz}$  – wartość rzeczywista (w naszym przypadku – czas ewakuacji uzyskany w badaniach),

$x_p$  – wartość zmierzona (w naszym przypadku – czas ewakuacji uzyskany za pomocą modeli obliczeniowych).

Czasy ewakuacji otrzymane za pomocą modeli matematycznych opisanych w dostępnej literaturze oraz za pomocą symulacji komputerowych wykonanych w programie Pathfinder wraz z wyznaczonymi odchyleniami wyników w stosunku do czasów eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 1.

### A brief description of the remaining experiments

As mentioned above, evacuation simulations were also performed for the following buildings: the Public Television building in Lodz, the Marshal's Office building in Lodz and the building of the Local Fire Rescue Unit in Pabianice.

In the Public Television and Marshal's Office buildings in Lodz, the evacuations started after triggering acoustic signalling devices, forming part of the fire signalling systems, whereas in the building of the Local Fire Rescue Unit in Pabianice it began after sending a voice message through loudspeakers. The evacuations were attended by 136, 226 and 10 people, respectively, in the Public Television building in Lodz, the Marshal's Office building in Lodz and the building of the Local Fire Rescue Unit in Pabianice. These people moved along 1.4-metre-wide corridors, and then on staircases with the flight width of 1.2 m and the external landing width of 1.5 m.

For comparative purposes, as in the case of the experiments conducted in IChP in Warsaw, computer simulations were performed using Pathfinder software. In the constructed models, individual participants of the evacuation were arranged in line with the attendance lists of people taking part in the experiment, by assigning them to their indicated work posts.

### A comparison of the evacuation times obtained by means of selected mathematical models and computer simulations

The times of evacuating people from buildings, obtained through experimentation, were compared with the corresponding evacuation times calculated theoretically by means of the selected models described in literature, including:

- the critical evacuation time model [7, 8],
- the Togawa model [7, 9–12],
- the Melinek and Booth model [12, 13],
- the Galbreath model [7, 14],
- the Pauls model [7, 11, 12, 14], and
- computer simulations performed using Pathfinder software.

With the aim of verifying which model provided the most accurate evacuation times, the result deviation was applied [15], which was determined as follows (1):

$$O_x = \frac{|x_{rz} - x_p|}{x_{rz}} \times 100\% \quad (1)$$

where:

$O_x$  – deviation of the result,

$x_{rz}$  – the actual value (in our case – the evacuation time obtained through experimentation),

$x_p$  – the estimated value (in our case – the evacuation time obtained by means of mathematical models).

The evacuation times obtained by means of the mathematical models described in professional literature as well as through computer simulations performed using Pathfinder software are presented in Table 1, together with the result deviations determined in relation to the experimental times.

**Tabela 1.** Porównanie czasów ewakuacji uzyskanych eksperymentalnie z czasami ewakuacji otrzymanymi za pomocą modeli matematycznych  
**Table 1.** A comparison of the evacuation times obtained through experimentation with the evacuation times obtained by means of mathematical models

Miejsce eksperymentu/ Place of the experiment	Czas ewakuacji - eksperyment [s]/ Time of the evacuation - experiment [s]		Model krytycznego czasu ewakuacji/ The critical evacuation time model		Model Togawa/ The Togawa model		Model Melinek i Booth/ The Melnik and Booth model		Model Galbreatha/ The Galbreath model		Model Paulsa/ The Pauls model		Symulacja w programie Pathfinder - model SFPE/Simulation in Pathfinder software - the SFPE model		Symulacja w programie Pathfinder - model zmiennostrujący/ Simulation in Pathfinder software - the variable-control model	
	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]	Czas ewakuacji [s]/ Evacuation time [s]	Odczylenie wyniku [%]/ Deviation of the result [%]
Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie (1 osoba/m <sup>2</sup> )/The Institute of Industrial Chemistry in Warsaw (1 person/m <sup>2</sup> )	67.0	40.5	39.5	40.4	74.2	10.7	58.5	12.6	171.0	155.2	81.5	21.6	64.3	64.3	4.0	
Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie (2 osoby/m <sup>2</sup> )/The Institute of Industrial Chemistry in Warsaw (2 persons/m <sup>2</sup> )	61.0	40.5	33.6	56.3	70.7	15.9	49.5	18.8	171.0	180.3	100.0	63.9	64.8	64.8	6.2	
Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie (3 osoby/m <sup>2</sup> )/The Institute of Industrial Chemistry in Warsaw (3 persons/m <sup>2</sup> )	60.0	40.5	32.5	64.0	92.4	54.0	80.4	34.0	171.0	185.0	102.0	70.0	64.3	64.3	7.1	
Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie (4 osoby/m <sup>2</sup> )/The Institute of Industrial Chemistry in Warsaw (4 persons/m <sup>2</sup> )	51.0	40.5	20.5	65.0	136.2	167.0	107.2	110.1	171.0	235.2	100.0	96.0	64.3	64.3	26.0	
Budynek Telewizji Polskiej SA Oddział w Łodzi/ The Public Television building in Lodz	292.0	158.3	45.7	45.4	360.6	23.4	82.7	71.6	215.4	26.2	177.0	39.3	179.5	179.5	38.5	
Urząd Marszałkowski w Łodzi/ The Marshal's Office building in Lodz	434.0	170.8	60.6	60.2	365.2	15.8	221.8	48.8	278.4	35.8	239.5	44.8	197.8	197.8	54.4	
Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Pabianicach/ The District Headquarters of the State Fire Brigade in Pabianice	41.5	25.4	38.7	36.8	48.7	17.3	15.3	63.1	126.0	203.6	43.0	3.6	40.3	40.3	2.8	

**Źródło:** Opracowanie własne.  
**Source:** Own elaboration.

Z przedstawionego zestawienia można wywnioskować, że czasy ewakuacji obliczone za pomocą modeli matematycznych są obciążone różnej wielkości błędem w porównaniu z czasami ewakuacji uzyskanymi podczas przeprowadzonych eksperymentów. Do czasów ewakuacji uzyskanych eksperymentalnie najbardziej zbliżone były te czasy ewakuacji otrzymane dzięki symulacji komputerowej wykonanej za pomocą programu Pathfinder, które obliczono przy wykorzystaniu modelu zmienno-sterującego. W ten sposób uzyskane czasy ewakuacji były obciążone błędem w stosunku do wszystkich przeprowadzonych doświadczalnie ewakuacji – od 2,8% (badanie w JRG KP PSP w Pabianicach) do 54,4% (badanie w UM w Łodzi). Najmniejsze odchylenia wyników w stosunku do czasów rzeczywistych otrzymano w przypadku symulacji wykonanych dla obiektów, które miały nieskomplikowaną geometrię i w których zagęszczenie osób znajdujących się na drogach ewakuacyjnych było małe.

Największe odchylenia wyników – od 26,2% dla czasu ewakuacji z budynku TVP w Łodzi aż do 235,2% dla czasu ewakuacji z budynku IChP w Warszawie, przy zagęszczeniu osób na drodze ewakuacyjnej wynoszącym 4 osoby/m<sup>2</sup> – uzyskano za pomocą modelu Paulsa. Może to wynikać z założeń modelowych dotyczących liczby ludzi ewakuujących się z budynku przypadającej na metr efektywnej szerokości drogi ewakuacyjnej.

Analizując tabelę 1, można zauważyć tendencję, że wraz ze wzrostem zagęszczenia osób na drogach ewakuacyjnych otrzymane za pomocą równań matematycznych czasy ewakuacji obciążone są większym błędem. Podobnie jest z geometrią układu ewakuacyjnego – im prostszy układ i mniejsza liczba ewakuujących się osób, tym czasy ewakuacji są obciążone są mniejszym błędem w stosunku do czasów uzyskanych podczas eksperymentów.

## Wnioski

Opisane w dostępnej literaturze równania matematyczne pozwalają szybko oszacować czas przejścia ewakuujących się ludzi. Jednak ze względu na prostotę tych równań otrzymane za ich pomocą czasy ewakuacji obciążone są znacznym błędem w porównaniu z czasami rzeczywistymi uzyskanymi podczas eksperymentów.

Występujące różnice między modelowymi czasami ewakuacji a czasami otrzymanymi eksperymentalnie mogą wynikać z tego, że autorzy modeli nie wymagali podzielenia drogi ewakuacyjnej na odcinki poziomych i pionowych dróg ewakuacyjnych, na których ludzie poruszają się z różnymi prędkościami. Wskazane wcześniej modele nie odnoszą się do konieczności uwzględnienia zagęszczenia ludzi na drogach ewakuacyjnych, gdzie wraz z jego wzrostem prędkość przemieszczania się osób maleje. Modele te pozwalają swobodnie założyć prędkość, z jaką mają poruszać się ewakuujący się ludzie, co można zrobić na podstawie dostępnej literatury.

Based on the presented compilation, a conclusion can be drawn that the evacuation times calculated using the mathematical models are flawed to various degrees, when compared to the evacuation times obtained through experimentation. The evacuation times obtained through computer simulations performed using Pathfinder software, which were based on the variable-control model, proved to be the most consistent with the evacuation times obtained through experimentation. The evacuation times obtained through simulations were affected by errors, in relation to all evacuations performed experimentally, ranging from 2.8% (for the experiment conducted in the Local Fire Rescue Unit in Pabianice) to 54.4% (for the experiment conducted in the Marshal's Office building in Lodz). The smallest deviations of the results, in relation to actual values, were obtained for the simulations performed for the buildings which had non-complex geometry, and for which the volume of human traffic along the escape paths was low.

The largest deviations of the obtained results – ranging from 26.2% for the time of evacuation from the Public Television building in Lodz to 235.2% for the time of evacuation from the Institute's building in Warsaw, with the volume of human traffic along the escape route amounting to 4 people/m<sup>2</sup> – were obtained using the Pauls model. This may result from the model assumptions regarding the number of people escaping from the building per 1 metre of an effective width of the escape route.

By analysing the data presented in Table 1, it can be noted that the increasing volume of human traffic along the escape routes, as determined using the mathematical formulas, leads to evaluation times affected by larger errors. A similar trend is observed for the evacuation system geometry – simpler arrangements and lower numbers of evacuees result in less biased evaluation time estimates, in relation to the actual values obtained through experimentation.

## Conclusions

The mathematical formulas described in the available literature enable quick estimations of the movement times of evacuees. However, given the simplicity of these formulas, the evacuation times obtained in this way are significantly flawed, when compared with the actual time checks obtained through experimentation.

The discrepancy between the model-based evacuation times and the times obtained through experimentation can result from the fact that the authors of the models failed to employ a division into horizontal and vertical escape routes, along which people move with different speeds. In addition, the above-mentioned models do not recognise the necessity of incorporating the volume of human traffic, and the fact that the movement speed tends to decrease with increased volume. However, the models allow for making straightforward assumptions of the movement speed of evacuees, based on the available literature.

Ze względu na stochastyczny charakter zjawiska do otrzymanych czasów ewakuacji należy podchodzić z pewnym dystansem, ponieważ nie jesteśmy w stanie przewidzieć, jaka grupa ludzi będzie się ewakuować, która z płci będzie w niej dominować, jaki będzie wiek osób czy ich kondycja fizyczna.

Due to the stochastic nature of the phenomenon, the obtained evaluation time estimates should be approached with caution, as we are not able to foresee the evacuation patterns of a specific group of people, and their prevalent gender, age or physical condition.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn zm).
- [2] Cłapa I., Cisek M., Tofiło P., Dziubiński M., *Firefighters ascending and evacuation speeds during counter flow on staircase*, „Safety Science” 2015, 78, 35–40.
- [3] Tofiło P., Cisek M., Lacki K., *The study on the effects of the counter-flow on the evacuation of people from tall buildings*, w: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, Edytorzy: Peacock R., Kuligowski E., Averill J., Springer, Londyn 2014, 509–520.
- [4] <http://www.pyrosim.pl/pathfinder-symulacja-ewakuacji-z-budynku/budownictwo-ogrzewnictwo.html> [dostęp: 4.05.2015].
- [5] *Pathfinder 2011, instrukcja obsługi – wersja 2011.2*, Thunderhead Engineering, Stigo.
- [6] *Engineering guide to human behavior in fire*, SFPE, 2003.
- [7] Cłapa I., Porowski R., Dziubiński M., *Wybrane modele obliczeniowe czasów ewakuacji*, BiTP Vol. 24 Issue 4, 2011.
- [8] Shih N.J., Lin C.Y., Yang C.H., *A virtual-reality-based feasibility study of evacuation time compared to the traditional calculation method*, „Fire Safety Journal” 2000(34), 377–391.
- [9] Mizieleński B., *Systemy oddymiania budynków wentylacja*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [10] *Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób, niż to określono w przepisach techniczno-budowlanych, w przypadkach wskazanych w tych przepisach, oraz stosowania rozwiązań zamiennych*, Komenda Główna PSP, Warszawa 2008.
- [11] Cote A.E., *Fire Protection Handbook*, National Fire Protection Association, Quincy, MA 2003.
- [12] Cłapa I., *Analysis of selected calculation models for evacuation times*, w: *Emergency Evacuation of People from Buildings*, P. Kępką, W. Jaskółowski (red.), BEL Studio, Warszawa 2011, 71–81.
- [13] Siikonen M.L., Hakonen H., *Efficient evacuation methods in tall buildings*, „Elevator World” 2003, 8, 117–123.
- [14] Pauls J., *Calculating evacuation times for tall buildings*, „Fire Safety Journal” 1987, 12.
- [15] <http://www.wstt.edu.pl/pliki/materialy/fizyka/pomiarfizyczny.pdf> [dostęp: 12.03.2017].

**MGR INŻ. IWONA ORŁOWSKA** – absolwentka Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej. Obecnie jest doktorantką na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Jako przedmiot swoich zainteresowań naukowych wybrała modelowanie numeryczne procesów ewakuacji oraz inżynierię bezpieczeństwa pożarowego.

**PROF. DR HAB. INŻ. MAREK DZIUBIŃSKI** – pracownik naukowy Politechniki Łódzkiej. Na tej uczelni obecnie pełni funkcję kierownika Katedry Inżynierii Chemicznej na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska. Naukowo interesuje się: przepływami wielofazowymi ze szczególnym uwzględnieniem przepływów dwufazowych cieczy – gaz cieczy newtonowskich i nienewtonowskich, reologią i reometrią techniczną, elementami ryzyka i bezpieczeństwa procesowego (wypływy jedno- i dwufazowe z rurociągów i zbiorników) oraz utrzymaniem emulsji i ich właściwościami.

**IWONA ORŁOWSKA, M.ENG.** – she graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in Warsaw. She is an officer of the State Fire Service. Currently a Ph.D. student at the Faculty of Process and Environmental Engineering of the Lodz University of Technology. Her principal research interests involve the numerical modelling of evacuation processes and fire safety engineering.

**PROF. MAREK DZIUBIŃSKI, D.SC. ENG.** – a research fellow at the Lodz University of Technology, currently serves as the Head of the Department of Chemical Engineering at the Faculty of Process Engineering and Environmental Protection. His scientific interests revolve around multiphase flows, with particular emphasis on Newtonian and non-Newtonian liquid-gas liquid flows, rheology and technical rheometry, risk and process safety elements (single- and two-phase outflows from pipelines and reservoirs), and the maintenance of emulsions and their properties.



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego

Stworzenie anglojęzycznych wersji oryginalnych artykułów naukowych wydawanych w kwartalniku „BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” – zadanie finansowane w ramach umowy 658/P-DUN/2018 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.