

prof. dr hab. inż. ROBERT KOSIŃSKI  
 dr hab. inż. ANDRZEJ GRABOWSKI, prof. CIOP-PIB  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy  
 – Państwowy Instytut Badawczy

# Matematyczne modelowanie i badania symulacyjne zachowania się ludzi podczas ewakuacji z budynków



Fot. Robert Hillman / Bigstockphoto

W artykule przedstawiono problemy dotyczące przeprowadzania ewakuacji budynków w przypadkach zagrożenia wywołanego katastrofami budowlanymi, zamachami terrorystycznymi i wybuchami. Opisano metodę matematycznego modelowania procesów ewakuacji i komputerowych badań symulacyjnych. Prezentowany model matematyczny opiera się na równaniach Langevina, które są równaniami ruchu ewakuujących się ludzi. Równania te uzupełnione są o składnik *social force*, reprezentujący składową mentalną w ruchu ewakuowanych osób, determinowaną głównie przez poczucie poziomu zagrożenia w czasie ewakuacji. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ewakuacji wybranych pojedynczych pomieszczeń i dwóch budynków wielokondygnacyjnych, dla różnych poziomów zagrożenia, oraz przedyskutowano czynniki wpływające na czasy ewakuacji i umożliwiające zminimalizowanie liczby ewentualnych ofiar w ludziach.

## The results of mathematical modeling of human behavior during the evacuation from buildings

This paper presents the problems of carrying out the evacuation of buildings in case of an emergency caused by construction disasters, terrorist attacks and explosions. It describes the method of mathematical modeling and numerical simulations. The presented mathematical model is based on the Langevin equations, which are motion equations of pedestrians, with an additional term *social force*. Social force represents the mental component of the pedestrians, driven primarily by a sense of the level of risk during the evacuation. The article presents the results of numerical simulations of evacuation from selected individual rooms and two multi-storey buildings for different levels of risk. It also discusses factors affecting evacuation time and minimizing the number of possible casualties.

## Wstęp

Ewakuacje ludzi z budynków przeprowadza się na skutek powstania sytuacji niebezpiecznych rozmaitego rodzaju np. wybuchu pożaru, eksplozji gazu, zamachu terrorystycznego czy wybuchu. Są to więc akcje, które od lat przeprowadza się na całym świecie, a ich podstawowym celem jest uratowanie jak największej liczby osób, które

znajdują się w budynku w momencie zaistnienia zagrożenia. Na efektywność tego procesu ma wpływ wiele czynników – do najważniejszych należą czas dostępny na przeprowadzenie ewakuacji (co zależy od rodzaju zagrożenia), rozkład pomieszczeń w budynku oraz poziom zagrożenia odczuwany przez ludzi opuszczających budynek (zwanych dalej pieszymi). Z tego

względu na wzrost efektywności ewakuacji mają wpływ architekci projektujący budynek, a także odpowiednie szkolenia jego użytkowników, przeprowadzane przez służby pożarnicze.

W czasie procesu ewakuacji ludzie mający przekonanie, że zagrażające im niebezpieczeństwo jest niewielkie, poruszają się w kierunku wyjść z budynku szybko i w sposób płynny. Nie dochodzi więc do gwałtownego kontaktu z innymi pieszymi i z przeszkodami architektonicznymi. Jednak w przypadkach poczucia znacznego niebezpieczeństwa piesi chcą jak najszybciej wydostać się z budynku, w крайowych przypadkach mają poczucie bliskiego zagrożenia śmiercią. W takiej sytuacji, w stanie paniki, dochodzi do niekontrolowanych i gwałtownych zakłóceń w ruchu strumieni ludzkich. Piesi traktują innych pieszych jak przeszkody fizyczne, a w oddziaływaniach pomiędzy sobą nawzajem i między pieszymi a ścianami oraz innymi elementami architektury budynku dochodzi do powstawania wielkich ciśnień o wartościach do ~ 4.5 kPa. Mogą one doprowadzić do urazów, a nawet do ofiar śmiertelnych na skutek zaduszenia bądź stratowania [1, 2]. W takich warunkach zburzeniu mogą ulec słabsze konstrukcyjnie ściany, metalowe ogrodzenia wygiąć się, a szklane ścianki działowe – stłuc. Z całą pewnością stan paniki znacząco wydłuża czas ewakuacji ludzi z danego budynku w stosunku do przypadków ewakuacji odbywających się bez poczucia wysokiego zagrożenia.

W ostatnich latach w tego typu incydentach na świecie zginęły tysiące osób, a wielokrotnie więcej odniosło obrażenia. Szczególnie ważnym wydarzeniem był zamach na World Trade Center (WTC) w Nowym Jorku w 2001 r., największy w historii zamach terrorystyczny ze względu na skalę i liczbę ofiar. Tragedia ta stała się też bodźcem do szerokiego zainteresowania problematyką ruchu ludzi w przypadkach zagrożenia życia i pogłębionych badań procesów ewakuacji budynków użyteczności publicznej i innych obiektów tego typu. W wyniku badań

amerykańskich związanych z wydarzeniami, jakie wystąpiły po spowodowanych wybuchach stwierdzono m. in., że [1]:

- rozplanowanie wnętrza istniejących dużych budynków umożliwia efektywną ewakuację tylko w przypadku zlokalizowanych zagrożeń (np. pożar kilku pomieszczeń położonych na jednym piętrze)

- na podstawie ponad 3000 indywidualnych wywiadów przeprowadzonych przez amerykański National Institute of Standards and Technology, stwierdzono, że w przypadku całkowitego zapełnienia jednego wieżowca World Trade Center (20 000 osób) zablokowanie istniejących klatek schodowych doprowadziłoby do stratowania ponad 10 000 osób

- skutecznymi nowymi rozwiązaniami redukującymi straty ludzkie mogłyby być m.in. winda o specjalnej konstrukcji czynna w czasie pożaru, system pionowych poręczy na zewnątrz budynku, rozpinane, wiszące pomosty do innych budynków, rękawy ewakuacyjne.

Ogólnie, na podstawie wielu analiz pożarów budynków, w których wystąpiły bardzo duże straty (w tym wspomnianego pożaru WTC) można stwierdzić, że pomimo wzrastających standardów bezpieczeństwa zagrożenia związane z nagłą ewakuacją z budynku są nadal znaczne. Bardzo wiele dużych budynków (co jest szczególnie ważne w przypadku gmachów użyteczności publicznej) ma wnętrza zaprojektowane bez uwzględnienia konieczności skutecznej i szybkiej ewakuacji oraz niewłaściwie oznaczone drogi ewakuacji [1-3].

Wzrost wiedzy o przebiegu procesów ewakuacji i jej upowszechnienie może znacząco wpłynąć na ograniczenie ryzyka występującego w procesie ewakuacji i zmniejszenie jej czasu. Badania w tym zakresie są prowadzone od kilku lat w wielu ośrodkach naukowych i mają charakter tak eksperymentalny, jak i teoretyczny, a ich wyniki były przedmiotem licznych publikacji [1-7]. Jedną z metod badania procesów ewakuacji jest konstrukcja odpowiednich modeli matematycznych opisujących ruch ludzi w czasie ewakuacji. Symulacje komputerowe oparte na takich modelach umożliwiają określenie wielu ważnych parametrów ewakuacji budynków o dowolnych wnętrzach (takich jak np. całkowity czas ewakuacji), a także wizualizację tego procesu w wybranych miejscach w budynku, co przedstawiono w artykule.

## Charakterystyka ruchu pieszych

Ruch pieszych odbywający się w pomieszczeniach zamkniętych może przybierać dwie postaci. Jedną z nich jest **ruch laminarny**, czyli płynny, odbywający się bez zawirowań – piesi poruszają się wolno lub z umiarkowaną prędkością (spacer – poniżej 1 m/s, lub szybki marsz – do ok. 1,5 m/s), bez nadmiernego zbliżania się do innych osób i przeszkód architektonicznych (ścian, kolumn itp.). Nie dochodzi wtedy do miejscowych stłoczeń ludzi (ang. termin używany w literaturze –

*clogging*), wzajemnego popychania się, zastępowania sobie drogi i używania rąk we wzajemnych interakcjach. Piesi nie mają poczucia zagrożenia życia (np. możliwości wystąpienia wybuchu, rozszerzenia się pożaru w budynku).

Prawa ruchu pieszych w przypadku laminarnym sformułowane zostały w 1985 r. przez Gippa i Marksjo [4]. Pieszy:

- porusza się w pobliżu najkrótszej drogi łączącej punkt początkowy i punkt docelowy ruchu
- unika kolizji z przeszkodami stałymi
- unika nadmiernego zbliżania się do innych (złamanie tego prawa prowadzi do pewnego dyskomfortu psychicznego, co jest odczuwalne np. w zatłoczonej windzie)

- unika gwałtownych zmian kierunku ruchu
- ma tendencję do ruchu w pobliżu bocznego ograniczenia ciągu komunikacyjnego dla ruchu pieszych, jednak nie za blisko tej granicy (np. na korytarzu nie za blisko ściany).

Architektura budynku może stanowić naturalną przeszkodę dla laminarnego i bezkolizyjnego ruchu pieszych. W przypadku małej liczby osób przebywających w pomieszczeniach (np. mieszkalnych), niezależnie od ich geometrii, na ogół żadne zaburzenia związane z poruszaniem się poszczególnych osób nie występują.

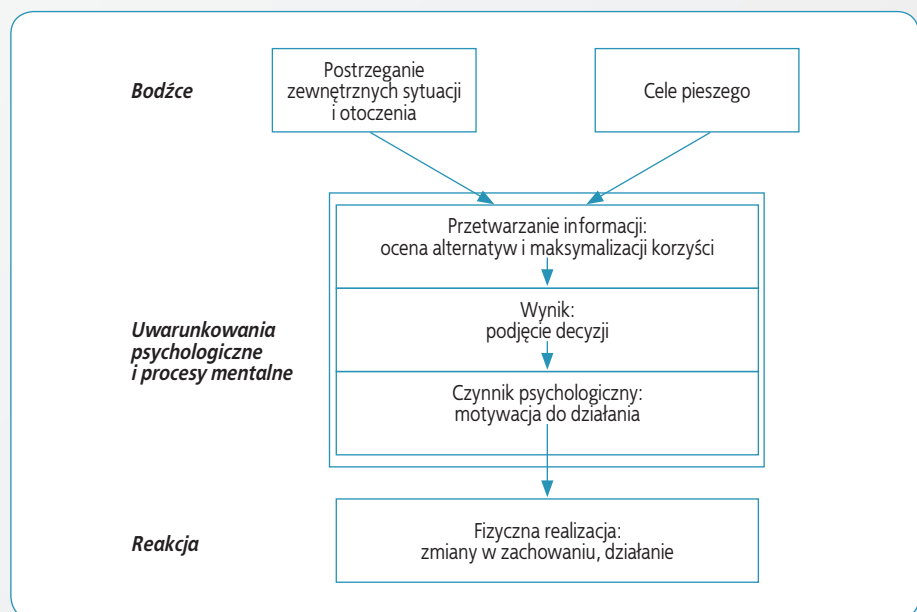
Drugą postacią ruchu pieszych jest **ruch turbulentny**, pojawiający się w przypadkach dużego zatłoczenia i najczęściej w dużych budynkach, szczególnie w niewłaściwie zaprojektowanych wewnętrznych ciągach komunikacyjnych. Piesi poruszają się z dużą prędkością – biegiem, czasami wręcz z największą możliwą do rozwinięcia w danych warunkach prędkością. Dochodzi wtedy do gwałtownych kolizji między pieszymi i z elementami architektury wewnątrz, a nawet do walki o dostęp do drzwi, wind, schodów.

Piesi mogą też upadać, stając się przeszkodami w ruchu, są eksponowani na urazy czy wręcz na stratowanie. Tego typu ruch pieszych występuje w stanach krańcowego poczucia zagrożenia i maksymalnej paniki [1-3, 5]. Wewnętrzne rozplanowanie pomieszczeń, w szczególności układ drzwi oraz położenie wyjść awaryjnych ma w takim przypadku zasadnicze znaczenie.

## Komponenta psychiczna w ruchu pieszych

W obydwu przypadkach ruchu – laminarnym i turbulentnym – ogromną rolę odgrywa psychika ludzka. U każdego człowieka, w momencie zaobserwowania innego pieszego, zachodzi określona reakcja psychiczna, często nieuświadomiona i trudna do opisu ilościowego. Zależy ona przy tym od ogólnej sytuacji w otoczeniu pieszego – jest w zasadniczy sposób determinowana przez to, czy ruch odbywa się w normalnych spokojnych warunkach, czy w dużym zatłoczeniu i pośpiechu, czy w przypadku zagrożenia bezpieczeństwa w budynku (ogłoszonego np. przez system ostrzegawczy). Ten psychiczny aspekt w sprzężeniu z reakcjami behawioralnymi przedstawia schemat opracowany przez Helbinga i Molnara (rys. 1.), [6].

Te determinujące ruch pieszego procesy powodują, że pieszy musi być traktowany w modelu jako cząstka aktywna, obdarzona zdolnością do autonomicznej zmiany parametrów swojego ruchu, niezależnie od fizycznych oddziaływań z otoczeniem. Jednakże w przypadku zagrożenia i wystąpienia ruchu turbulentnego przedstawiony schemat procesów mentalnych i zachowań ulega pewnym modyfikacjom. Związane jest to z tym, że piesi starają się wtedy jak najszybciej opuścić pomieszczenie, w którym się znajdują, traktując



Rys. 1. Schemat procesów prowadzących do zmian zachowania się pieszego  
Fig. 1. Scheme of processes leading to changes in the behavior of pedestrians

innych jak martwe, ale ruchome przeszkody, a następnie wydostać się z budynku. W tym przypadku komponenta psychiczna wg 3. prawa Gippsa i Marksjo związana z interakcjami między pieszymi ulega daleko idącej redukcji [7, 8].

### Wybrany model matematyczny ruchu pieszych

Jest wiele metod matematycznego modelowania ruchu pieszych [3-7, 9]. W badaniach prowadzonych w Zakładzie Techniki Bezpieczeństwa CIOP-PIB wykorzystywany jest model oparty na równaniach różniczkowych Langevina, które służą jako równania ruchu poszczególnych pieszych, przy czym każde z nich jest uzupełnione o składnik *social force*, zaproponowany przez Helbinga [6, 7, 10] i obrazujący komponentę psychiczną w ruchu pieszego, a także opisujący oddziaływanie pieszego z otoczeniem architektonicznym i z innymi pieszymi. Czasami stosuje się mniej uniwersalne i dokładne metody oparte na automatach komórkowych lub równaniach Naviera-Stokesa (opisujących mechanikę płynów).

Składnik *social force* zawiera parametr  $v_0$  (czyli prędkość zamierzoną pieszego), który może być traktowany jako miara poczucia zagrożenia człowieka w czasie ewakuacji. Prędkość zamierzona to prędkość, jaką ktoś chce rozwinąć w czasie ewakuacji i nie zawsze równa się rzeczy-

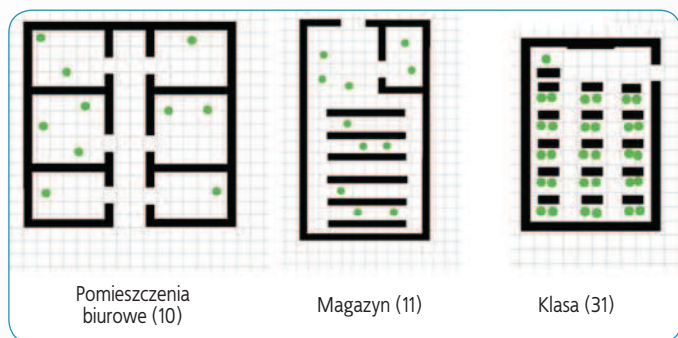
wistej prędkości  $v_R$  tej osoby. Tak jest tylko przy niskich poziomach zagrożenia (gdy ruch pieszych jest laminarny), natomiast przy wyższych, gdy pieszy chce poruszać się bardzo szybko, jego oddziaływanie na inne szybko poruszające się osoby i na elementy otoczenia powodują, że ruch staje się turbulentny i jego prędkość rzeczywista może być znacznie niższa niż prędkość zamierzona. Można przyjąć, że  $v_0 = 1$  m/s oznacza brak poczucia zagrożenia, a  $v_0$  ok. 2,5 m/s oznacza już relatywnie duży poziom zagrożenia (porównanie wzajemnego stosunku prędkości rzeczywistej i zamierzonej będzie przedstawione dalej).

Program numeryczny rozwiązujący taki układ  $N$  sprzężonych ze sobą równań opisuje ruch zbiorowości  $N$  pieszych w czasie ewakuacji z budynku, którego wewnątrz jest zapisane przez użytkownika programu w postaci odpowiednich warunków brzegowych. Jako rozwiązania otrzymujemy położenia każdego pieszego w czasie  $t_i$  ( $t$ ), gdzie  $i = 1, 2, \dots, N$ . Na tej podstawie możemy obserwować trajektorie wszystkich (albo wybranych) pieszych w czasie ewakuacji budynku, którego rozkład wewnętrzny jest wprowadzony przez użytkownika w formie odpowiedniego bloku programowego. Umożliwia to ocenę przebiegu ewakuacji w poszczególnych fragmentach budynku, przy danym poziomie zagrożenia określonym parametrem  $v_0$ , a także obliczenie wielkości syntetycznie opisujących całość procesu ewakuacji, takich jak całkowity czas ewakuacji  $T$ .

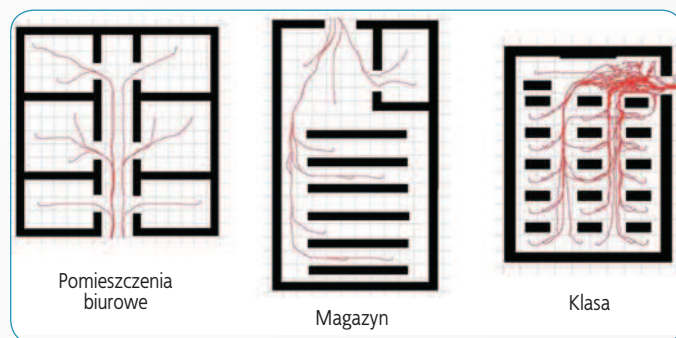
### Przykładowe wyniki badań symulacyjnych ewakuacji ludzi z wybranych pomieszczeń

Do przedstawienia przebiegu procesu ewakuacji ludzi z pomieszczeń oraz czynników szczególnie wpływających na czas ewakuacji wybrano następujące trzy przykładowe pomieszczenia: biuro, magazyn i klasę szkolną. Ich rozkłady przestrzenne przedstawione zostały na rys. 2., który pokazuje liczby i położenia początkowe pieszych. Badania symulacyjne, oparte na opisanym wcześniej modelu matematycznym, pozwalają na określenie położenia każdego pieszego w czasie ewakuacji, na podstawie obliczanych numerycznie rozwiązań równań ruchu pieszych. Obliczone trajektorie pieszych dla tych przypadków przedstawia rys. 3.

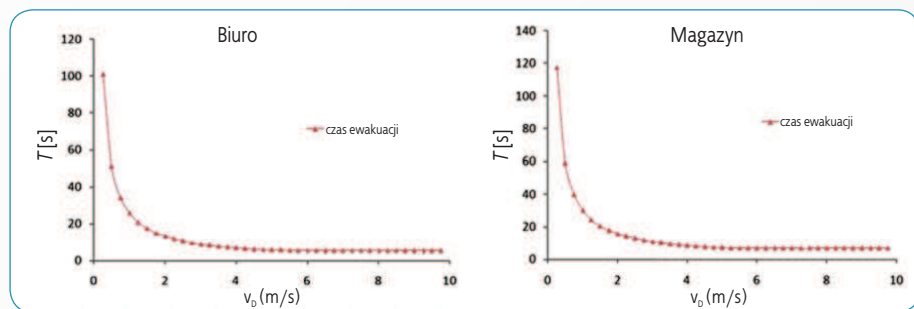
Jak widać, w przypadku braku zagrożenia ( $v_0 = 1$  m/s) we wszystkich pomieszczeniach, z wyjątkiem klasy, ruch pieszych odbywa się laminarnie – bez zakłóceń przy przemieszczaniu się od swoich położenia początkowych do wyjścia. Jednak w klasie szkolnej widoczne są turbulencje w ruchu pieszych w pobliżu drzwi, wywołane znaczną liczbą pieszych obecnych w tym pomieszczeniu docierających w pobliże drzwi mniej więcej w tym samym czasie. Wychodzenie z klasy jest utrudnione ze względu na zbyt małą szerokość drzwi, co skutkuje stłoczeniem. Wpływ



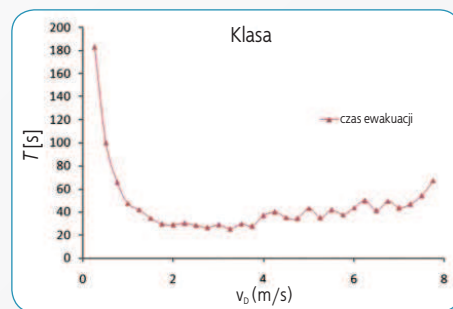
Rys. 2. Rozkłady pomieszczeń wybranych do badania procesu ewakuacji; w nawiasach liczba osób w pomieszczeniach, ich początkowe położenia pokazują zielone kropki  
Fig. 2. Geometry of the rooms under investigation and initial positions of pedestrians (green dots). The number of pedestrians is shown in parentheses



Rys. 3. Trajektorie ruchu pieszych w procesie ewakuacji wybranych pomieszczeń, w przypadku braku zagrożenia –  $v_0 = 1$  m/s. W ewakuacji klasy widoczne turbulencje w ruchu pieszych w pobliżu drzwi  
Fig. 3. Trajectories of pedestrians obtained in numerical simulations with  $v_0 = 1$  m/s. Turbulent flow is visible in the case of a classroom



Rys. 4. Czasy ewakuacji  $T$  w funkcji prędkości zamierzonej dla przypadku dwóch badanych pomieszczeń  
Fig. 4. Times of evacuation  $T$  as a function of desired velocity



Rys. 5. Czas ewakuacji  $T$  w funkcji prędkości zamierzonej dla przypadku klasy  
Fig. 5. Times of evacuation  $T$  as a function of desired velocity in the case of a classroom.

szerokości drzwi zostanie omówiony w dalszej części artykułu (rys. 12.).

Na rys. 4. przedstawiono porównanie czasów ewakuacji  $T$  w funkcji prędkości zamierzonej pieszych  $v_0$  – której wartość jest miarą poziomu zagrożenia w czasie ewakuacji – w odniesieniu do magazynu i biura. Jak widzimy, we wszystkich tych przypadkach wzrost zagrożenia, czyli wzrost prędkości  $v_0$  do ok. 5 m/s zmniejsza czas ewakuacji. Dalszy wzrost prędkości zamierzonej nie powoduje już zmniejszenia czasu ewakuacji, gdyż rzeczywista prędkość pieszych  $v_1$  już nie wzrasta ze względu na wzajemne oddziaływanie ludzi oraz rolę elementów architektonicznych.

W przypadku klasy czas ewakuacji w funkcji prędkości zamierzonej przedstawiony jest na rys. 5. Widzimy, że do prędkości  $v_0 = 2,5$  m/s czas  $T$  spada monotonicznie ze wzrostem  $v_0$ . Przy dalszym wzroście prędkości  $v_0$  są widoczne niemonotoniczności, będące efektem występujących zakłóceń ruchu o charakterze turbulencji. Ich przyczyną jest wspomniany wyżej *clogging* powstający w otoczeniu zbyt wąskich drzwi.

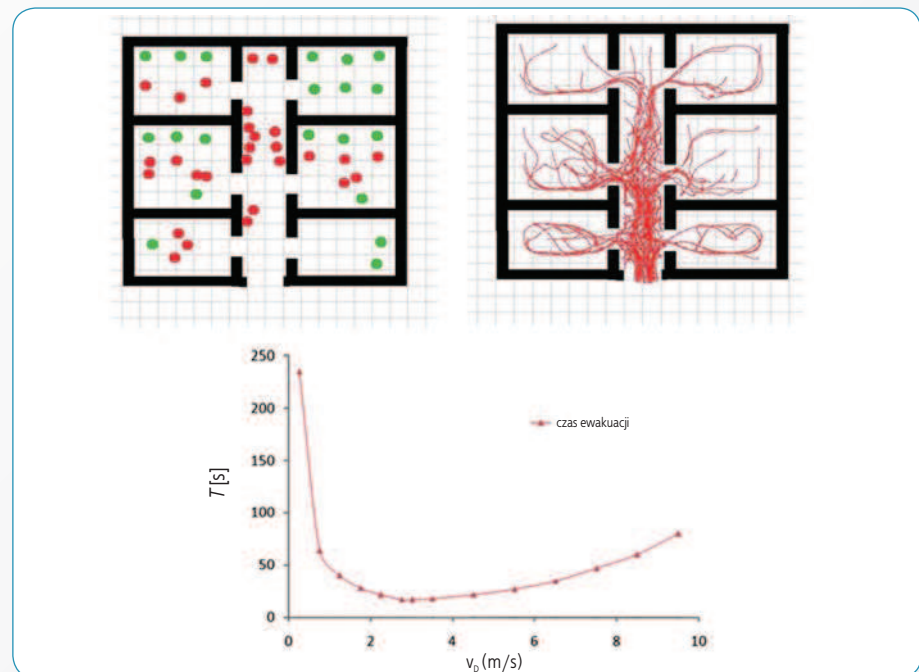
Tabela przedstawia porównanie czasów ewakuacji w odniesieniu do badanych pomieszczeń i wobec dwóch wartości prędkości zamierzonej  $v_0 = 1$  m/s, czyli braku zagrożenia i prędkości  $v_0 = 2$  m/s, czyli umiarkowanego zagrożenia. Z tabeli wynika, że niewielki wzrost poziomu zagrożenia powoduje skrócenie czasu ewakuacji, a ruch pieszych jest laminarny. Jednak duże względne zatłoczenie pomieszczeń lub znaczny wzrost poziomu zagrożenia mogą prowadzić do powstawania ruchu turbulentnego, co wywołuje wydłużenie czasów ewakuacji. Przykładem takiej sytuacji jest przypadek klasy szkolnej, w którym mamy do czynienia z najdłuższym czasem ewakuacji w odniesieniu do obu wartości prędkości  $v_0$ . Jest to spowodowane znaczną liczbą pieszych przypadających na  $1\text{ m}^2$ , ma na to wpływ także znaczna liczba mebli (ławek szkolnych) w pomieszczeniu, obniżających rzeczywistą prędkość uciekających.

Tabela. Porównanie czasów ewakuacji badanych pomieszczeń dla dwóch wartości  $v_0$

Table. Comparison of evacuation times for investigated rooms for two different values of desired velocity  $v_0$

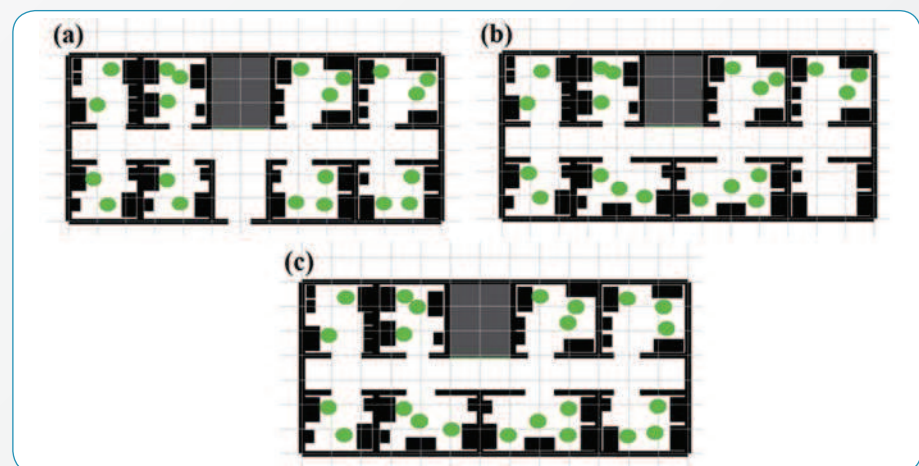
Rodzaj pomieszczenia	$v_0 = 1$ m/s	$v_0 = 2$ m/s
Biuro	26	13
Magazyn	30	17
Klasa	45	30

Ze względu na to, że liczba osób na  $1\text{ m}^2$  powierzchni w pomieszczeniu znacząco wpływa na czas ewakuacji, zbadano dokładniej ten wpływ w sposób ilościowy. W tym celu symulowano ewakuację 47 osób z pomieszczeń biurowych (o 37 więcej niż w przypadku poprzednich symulacji). Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 6., gdzie zauważyć można początkowe położenie pieszych, obliczone trajektorie w czasie ewakuacji i czas ewakuacji w funkcji prędkości zamierzonej. Najważniejszą cechą tego przypadku jest pojawienie się silnych turbulencji w krótkim korytarzu,



Rys. 6. Ewakuacja pomieszczeń biura ze zwiększoną liczbą pieszych wewnątrz; prędkość zamierzona  $v_0 = 2$  m/s. U góry przedstawiono początkowe położenia pieszych i trajektorie w czasie ewakuacji, a niżej – czasy ewakuacji w funkcji prędkości zamierzonej

Fig. 6. Evacuation from an overcrowded office; desired velocity  $v_0 = 2$  m/s. Initial positions and trajectories of pedestrians are presented above the evacuation time as a function of desired velocity



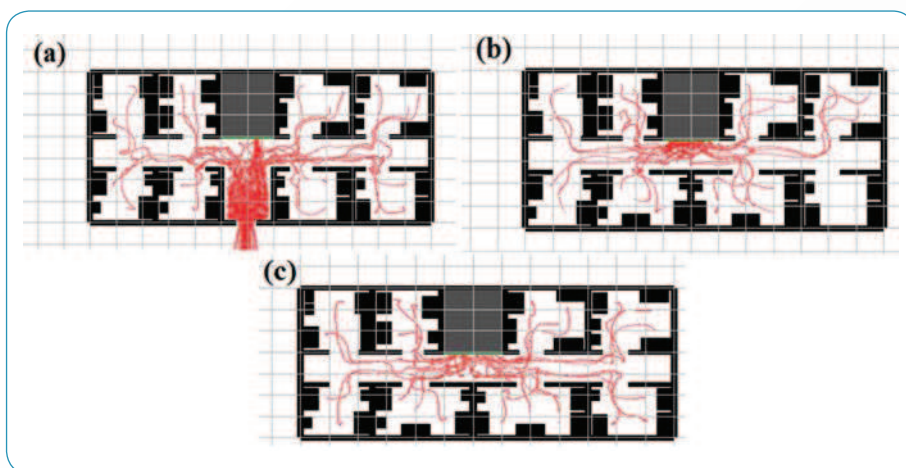
Rys. 7. Rozkłady pomieszczeń w wielokondygnacyjnym budynku biurowym: (a) – rozkład parteru, (b) i (c) – pierwsze i drugie piętro. Klatka schodowa jest zaznaczona kolorem szarym, początkowe położenia pieszych – zielonymi kropkami  
Fig. 7. The geometry of a 3-storey office building; (a) first floor; (b) second and third floors. A gray rectangle denotes the stairs. Green dots denote initial positions of pedestrians

na który wychodzą drzwi z sześciu pokoiów tworzących pomieszczenia biurowe, i stłoczenie pieszych przy drzwiach. Są to zjawiska podobne do tych, które obserwuje się w przypadku ewakuacji klasy szkolnej.

Porównując czasy ewakuacji z biura 10 (rys. 1.) i 47 osób (rys. 6.) oraz średniego poziomu zagrożenia ( $v_0 = 2$  m/s) widzimy ponad dwukrotny wzrost czasu ewakuacji: z 13 do 25 sekund (por. tab. i rys. 6.). Podobny wpływ wzrostu liczby pieszych w innych pomieszczeniach na czas ewakuacji obserwuje się w praktyce i potwierdzają to nasze symulacje.

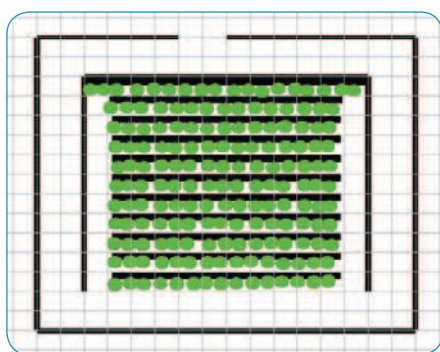
### Przykładowe wyniki badań symulacyjnych ewakuacji ludzi z budynków

Za kolejny przykład posłuży symulacja ewakuacji niewielkiego budynku biurowego z trzema kondygnacjami. Rozkłady przestrzenne pomieszczeń na wszystkich piętrach są podobne (rys. 7.), a kondygnacje są połączone klatką schodową (zaznaczoną kolorem szarym). Trzeba podkreślić, że w badaniach ewakuacji budynków wielokondygnacyjnych bardzo ważny jest opis ruchu między piętrami – na klatkach schodowych, gdyż



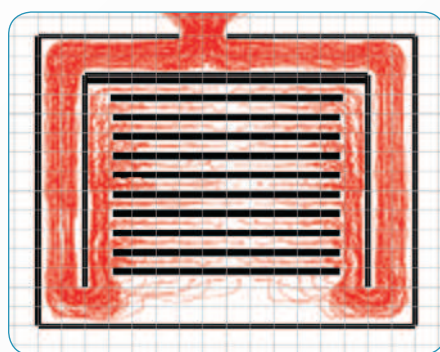
Rys. 8. Trajektorie pieszych w czasie ewakuacji budynku wielokondygnacyjnego, przy prędkości zamierzonej  $v_0 = 2,5$  m/s (oznaczenia a, b i c jak na rys.7.)

Fig. 8. Trajectories of pedestrians during evacuation from a 3-storey office building for  $v_0 = 2,5$  m/s (cf. fig. 7.).



Rys. 9. Rozkład przestrzenny wnętrza budynku kinowego. Pokazano położenia początkowe 168 pieszych

Fig. 9. Geometry of a movie theater with initial position of 168 pedestrians



Rys. 10. Obliczone trajektorie pieszych w czasie ewakuacji budynku kina z prędkością zamierzoną  $v_0 = 2,5$  m/s

Fig. 10. Pedestrians' trajectories during the evacuation of a movie theater auditorium,  $v_0 = 2,5$  m/s

w przypadku zagrożenia pożarowego na ogół windy ulegają zablokowaniu. W opisywanym modelu w równaniu opisującym ruch pieszego na klatce schodowej uwzględniana jest dodatkowa, pionowa siła przyspieszająca ten ruch, co jest oryginalnym rozwiązaniem [11].

Trajektorie pieszych obliczone w trakcie symulacji numerycznych przedstawiono na rys. 8. Jak widać, ruch na wyższych kondygnacjach, w obrębie poszczególnych pomieszczeń, jest laminarny.

Pewne turbulencje pojawiają się w pobliżu wejścia na klatkę schodową na pierwszym piętrze, co jest spowodowane jej zatłoczeniem przez schodzących pieszych. Największe turbulencje pojawiają się jednak na parterze, przy drzwiach wyjściowych, gdyż tu spotykają się strumienie pieszych ze wszystkich kondygnacji. Przy większych poziomach zagrożenia ( $v_0 > 3,5$  m/s) powoduje to wyraźny wzrost czasu ewakuacji

– jak to widać na rys. 11. z lewej strony. Podobne zjawisko występowało podczas ewakuacji klasy.

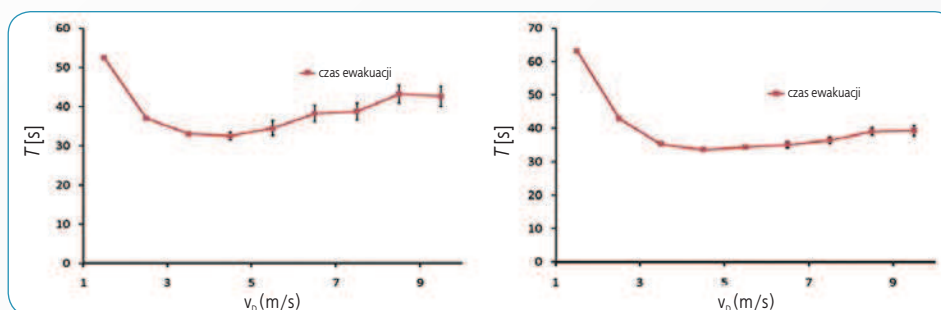
Drugim badanym budynkiem był budynek kina. W czasie seansu może w nim przebywać 168 osób. Rozkład przestrzenny budynku i początkowe położenie pieszych przedstawiono na rys. 9.

Trajektorie pieszych obliczone dla przypadku prędkości zamierzonej  $v_0 = 2,5$  m/s pokazuje rys. 10. Jak widzimy, strumienie pieszych zagęszczają się stopniowo między rzędami foteli, co kulminuje się w bocznych przejściach prowadzących do drzwi. Jednak mimo tej znacznej gęstości, przy prędkości  $v_0 = 2,5$  m/s (dość znaczny poziom zagrożenia), w strumieniach pieszych występuje raczej niewielka liczba turbulencji. Jest to spowodowane regularnym rozkładem przestrzennym budynku oraz wpływem rzędów foteli, które porządkująco wpływają na ruch pieszych.

Czasy ewakuacji w funkcji prędkości zamierzonej dla budynku kinowego przedstawia wykres z prawej strony rys. 11.

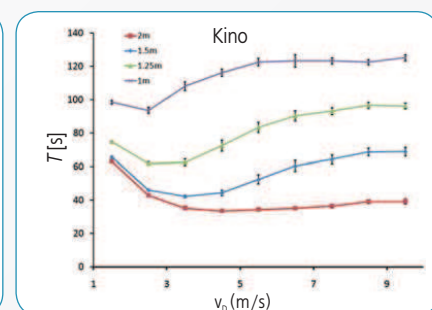
W tym przypadku niemonotoniczności nie są obserwowane. Pozytywnie i porządkująco na strumienie pieszych wpływa układ rzędów foteli. Obserwuje się jednak stopniowy wzrost czasu ewakuacji dla  $t > 5$  m/s, wywołany wzrastającym stłoczeniem pieszych w sąsiedztwie drzwi. W miejscu tym, w miarę wzrostu  $v_0$ , wzrasta gęstość pieszych, gdyż przybywają oni tam coraz szybciej, natomiast przepustowość drzwi utrzymuje się na stałym i, dla większych wartości  $v_0$ , zbyt małym poziomie.

Jak można zatem zauważyć, przepustowość drzwi gra zasadniczą rolę w efektywności procesu ewakuacji. Z tego względu autorzy niniejszego opracowania przeprowadzili badania wpływu szerokości drzwi na czas ewakuacji. Na rys. 12. przedstawiono zależność czasu ewakuacji budynku kina od prędkości zamierzonej wobec kilku wartości szerokości drzwi. Jak można było się spodziewać, wpływ szerokości drzwi ma znaczenie zasadnicze. Dostatecznie szerokie drzwi (2 m lub więcej) nie powodują wzrostu czasu ewakuacji nawet przy wysokich wartościach  $v_0$ . Jednak im węższe drzwi, tym dłuższy ten czas przy wyższych poziomach zagrożenia, tj.  $v_0 > \sim 3$  m/s. Na przykład, przy znacznym po-



Rys. 11. Czas ewakuacji T w funkcji prędkości zamierzonej dla budynku wielokondygnacyjnego (wykres po lewej stronie) i kinowego (wykres po prawej stronie)

Fig. 11. Times of evacuation T as a function of desired velocity  $v_0$  for office rooms (left) and a movie theater auditorium (right)



Rys. 12. Czas ewakuacji budynku kina w funkcji prędkości zamierzonej dla kilku wartości szerokości drzwi

Fig. 12. Times of cinema building evacuation in a function of velocity measured for several widths of doors

ziomie zagrożenia dwukrotne zwężenie drzwi do 1 m powoduje ponad 3,5-krotny wzrost czasu ewakuacji.

Wynika z tego ogólny wniosek, że odpowiednia szerokość drzwi ma zasadnicze znaczenie dla przeprowadzenia sprawnej ewakuacji i uniknięcia ewentualnych ofiar, co na dodatek jest stosunkowo tanim rozwiązaniem. Podobne znaczenie ma wprowadzanie dodatkowych drzwi awaryjnych (oczywiście odpowiednio oznakowanych i otwartych!).

## Podsumowanie

Matematyczne modelowanie zachowania się ludzi w czasie ewakuacji i badania symulacyjne umożliwiają ocenę procesu ewakuacji i obserwację ruchu pieszych w wybranych fragmentach budynku. To z kolei pozwala na ujawnienie „wąskich gardeł”, pojawiających się w czasie ewakuacji w badanym budynku i hamujących ten proces. Eliminacja takich miejsc – w trakcie symulacji komputerowych – umożliwi ocenę, na ile wpływa to na wzrost efektywności procesu ewakuacji. Jest też możliwe porównanie czasów ewakuacji przy różnych rozwiązaniach architektonicznych wnętrz budynków. W szczególności stwierdzono, że czas ewakuacji zależy m. in. od: rozkładu wewnętrznego pomieszczenia, rodzaju i liczby mebli we wnętrzu, liczby osób przebywających w pomieszczeniu bądź budynku, liczby kondygnacji w budynku, i oczywiście od prędkości zamierzonej, czyli poziomu zagrożenia pieszych w czasie ewakuacji. Wpływy wymienionych wyżej czynników na czas ewakuacji są ze sobą w znacznym stopniu skorelowane.

Ogólnie można stwierdzić, że najmniejsze czasy ewakuacji występują w pomieszczeniach o prostym rozkładzie wewnętrznym, w których liczba osób na m<sup>2</sup> powierzchni jest niewielka. Wzrost poziomu zagrożenia do pewnego poziomu przyspiesza proces ewakuacji, gdyż ludzie poruszają się szybciej i w sposób laminarny. Jednak wzrost poziomu zagrożenia – czyli wartości  $v_0$  powyżej pewnej charakterystycznej dla danego przypadku wartości krytycznej prowadzi do wzrostu oddziaływań pieszego z innymi pieszymi i z elementami otoczenia architektonicznego i powstania turbulencji w ruchu pieszych. Wtedy czasy ewakuacji silnie wzrastają.

Metoda modelowania matematycznego i badania symulacyjne mogą być przydatne przy szkoleniu służb aktywnych w czasie zagrożeń bezpieczeństwa budynków, w szczególności służb pożarniczych, oraz przy projektowaniu i oznaczaniu dróg ewakuacji w budynkach.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Bohannon J. *Directing the Herd: Crowds and the Science of Evacuation*. "Science" 2005, 310: 219- 221
- [2] Helbing D., Farkas I., Vicsek T. *Simulating Dynamical Features of Escape Panic*. "Nature" 2000, 407: 487-490
- [3] Schweitzer F. *Brownian Agents and Active Particles*. Springer, Berlin 2003
- [4] P.G. Gipps, B. Marksjo A *microsimulation model for pedestrian flows*. "Mathematics and Computers in Simulation", 1985, 27: 95-105
- [5] Parisi D. R., Doroso C. O. *The Role of Panic in the Room Evacuation Process*. "Int. J. Mod. Phys. C", 2006, 17: 419-434
- [6] Helbing D., Molnar P. *Social force model for pedestrian dynamics*. "Phys. Rev. E" 1995, 51: 4282-4286 (1995)
- [7] Helbing D. *Quantitative Sociodynamics: Models of Social Interaction Processes*. Kluwer Academic, 1995
- [8] Parisi D.R., Dorso C.O. *Microscopic dynamics of pedestrian evacuation*. "Physica A" 2005, 354, 606
- [9] Jaskółowski W. i Kęпка P. *Emergency evacuation of people from buildings*. Bell Studio, Warszawa, 2011
- [10] Helbing D., Johansson A. and Al-Abideen H.-Z. "Phys. Rev. E", 2007, 75, 046109
- [11] Kosiński R.A., Grabowski A. *Langevin equations for modeling evacuation processes*. "Acta Phys. Polon. B" Proc. Supplement, 2010, 3: 365- 376

*Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

Znajdziesz nas w Internecie: [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl), e-mail: [bpredakcja@ciop.pl](mailto:bpredakcja@ciop.pl)

