

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Obciążenie falą podmuchową projektowanych przegród roślinnych

Tomasz Gajewski<sup>1</sup>, Robert Studziński<sup>2</sup>, Michał Malendowski<sup>1</sup>, Piotr Peksa<sup>1</sup>,  
Wojciech Sumelka<sup>1</sup>, Piotr W. Sielicki<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instytut Analizy Konstrukcji, Politechnika Poznańska

<sup>2</sup>Instytut Budownictwa, Politechnika Poznańska

email: tomasz.gajewski@put.poznan.pl, robert.studzinski@put.poznan.pl, michal.malendowski@put.poznan.pl, piotr.peksa@put.poznan.pl  
wojciech.sumelka@put.poznan.pl, piotr.sielicki@put.poznan.pl

**STRESZCZENIE:** W literaturze pokazano, że żywopłoty mają potencjał, aby chronić przed falą uderzeniową w przypadku umiarkowanych ładunków wybuchowych. W pracy przeprowadzono badania wybranych drzew żywopłotowych, tj., tuj (*Thuja occidentalis* „Smaragd”) w testach poligonowych w pełnej skali, których wyniki można zaadaptować na zgromadzenia publiczne na otwartej przestrzeni. Rozważano kilka pozycji za żywopłotami, w których mierzono nadciśnienie podczas czterech niezależnych detonacji. Zastosowano sześć czujników ciśnienia. Dwie kamery rejestrowały ruch żywopłotu w dwóch płaszczyznach. Potwierdzono redukcję nadciśnienia i impulsu nadciśnienia na poziomie kilkunastu procent po porównaniu wyników z przypadkiem, w którym nie było przegrody roślinnej. Potwierdzono, że żywopłot z tuj jest odpowiedni do ochrony podczas ataków bombowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** improwizowane urządzenia wybuchowe, testy poligonowe, tłumienie fali podmuchowej, bezpieczeństwo imprez masowych

#### 1. Wprowadzenie

We współczesnej historii zamachy bombowe na tzw. „miękkie” cele mają miejsce na obszarach silnie zurbanizowanych, takich jak lotniska (atak na lotnisko Ataturk w Stambule w 2016 r., 41 zabitych) lub stacje metra/kolejowe (wybuch metra w Petersburgu w 2017 r., 15 zabitych). Zapobieganie tego typu przestępczości poprzez celowe projektowanie środowiskowe może zwiększyć bezpieczeństwo ludzi w przestrzeni publicznej. Na przykład odpowiednie ukrycie przed falą uderzeniową za rogiem budynku może znacząco zmniejszyć niebezpieczeństwo ataku bombowego [1].

Naukowcy i inżynierowie poszukują innowacyjnych materiałów i konstrukcji do zastosowania jako bariery ochronne podczas ataków bombowych. Grupa prof. Hao badała stalowe słupy, które mogą być używane jako bariery ochronne tłumiące podmuch fali uderzeniowej [2]. Z kolei, w badaniach numerycznych grupy prof. Gebbekena [3] wykazano, że pleciona siatka drucziana może zmniejszyć nadciśnienie fali podmuchowej i impuls nadciśnienia odpowiednio o około 30% i 40%. Ta sama grupa badała również różne stalowe słupki pod kątem ich potencjału ochronnego [4, 5]; stwierdzono, że zarówno nadciśnienie, jak i impuls nadciśnienia uległy zmniejszeniu w zależności od przypadku o około 11% do około 33%.

Ponadto, zespół prof. Gebbekena zainicjował stosowanie barier roślinnych w celu zmniejszenia szkodliwych skutków ataków bombowych. Pierwsze eksperymenty przeprowadzono w 2017 roku [6]. W testach uzyskano redukcję nadciśnienia nawet o 62% dla tuj i 45% dla laurowiśni wschodniej. Badania kontynuowano w pracy z 2020 r. [7], w której oprócz tuj analizowano bambus,

berberys i cis. Dla cisu uzyskano redukcję nadciśnienia na poziomie 45%, podczas gdy dla tuj redukcja wyniosła 38%, dla berberysu 25%, a dla bambusa 25%.

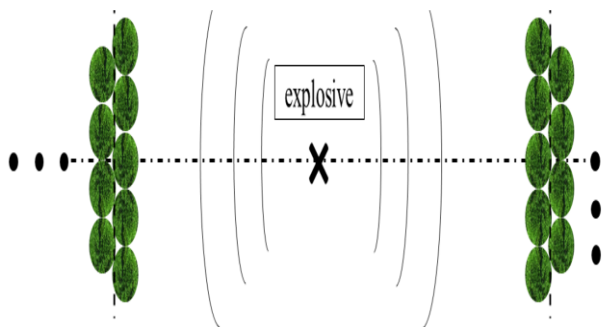
W prezentowanych badaniach częściowo powtórzono konfigurację eksperymentów z testów zespołu prof. Gebbekena (odległości i ekwiwalent materiału wybuchowego), ale przeprowadziliśmy próby dla mniejszych ścian i tylko dla tuj. Tuje zostały wybrane, ponieważ, wg [6, 7], ich potencjał tłumienia fali podmuchowej jest największy. Co więcej, jest to łatwo dostępne i tanie drzewo, dzięki czemu jest wygodne w użyciu podczas publicznych zgromadzeń lub w zastosowaniach miejskich. Wykorzystano mniejsze drzewa, ponieważ są one łatwo dostępne, a na zurbanizowanych, ograniczonych terenach łatwiej jest je ustawić, nie ograniczając ciągów komunikacyjnych. Dodatkowo, tuja jest drzewem iglastym i jak pokazano w [6, 7] zachowuje igły po przejściu fali podmuchowej, co jest korzystne przy wielokrotnych atakach bombowych.

#### 2. Metody i materiały

Badania przeprowadzono na poligonie na dwóch żywopłotowych ścianach z tuj (*Thuja occidentalis* „Smaragd”), wykonano testy polowe w pełnej skali. Pomiarów ciśnienia fali podmuchowej dokonywano w kilku odległościach za żywopłotem i kilku pozycjach wzdłuż żywopłotu, patrz rys. 1. Nadciśnienie mierzono na wysokości klatki piersiowej dorosłego mężczyzny od poziomu gruntu, tj., 135 cm. Mur żywopłotowy miał około 2,0 m długości i 0,55 m głębokości. Nominalna wysokość każdego drzewa wynosiła 1,5 m. Drzewa posadzono w dwóch naprzemiennych rzędach, zgodnie ze schematem

na rys. 1. Użytym materiałem wybuchowym był trotyl, masa ładunku wybuchowego wynosiła 5 kg, ładunek wybuchowy miał prostopadłościenny kształt.

Wykonano cztery detonacje i pomierzono nadciśnienia za pomocą sześciu czujników ciśnienia uzyskując wykresy nadciśnienia w czasie w różnych pozycjach i odległościach za żywopłotami. Ponadto dwie kamery do rejestracji szybkich procesów nagrywały ruch żywopłotów w przestrzeni, patrz rys. 2. Dzięki temu wyznaczono ruch z płaszczyzny wybranych punktów żywopłotu w czasie.



Rys. 1. Ogólny schemat stanowiska testowego w widoku z góry (zielone koła reprezentują drzewka żywopłotowe; czarne punkty odzwierciedlają pozycję czujników ciśnienia)

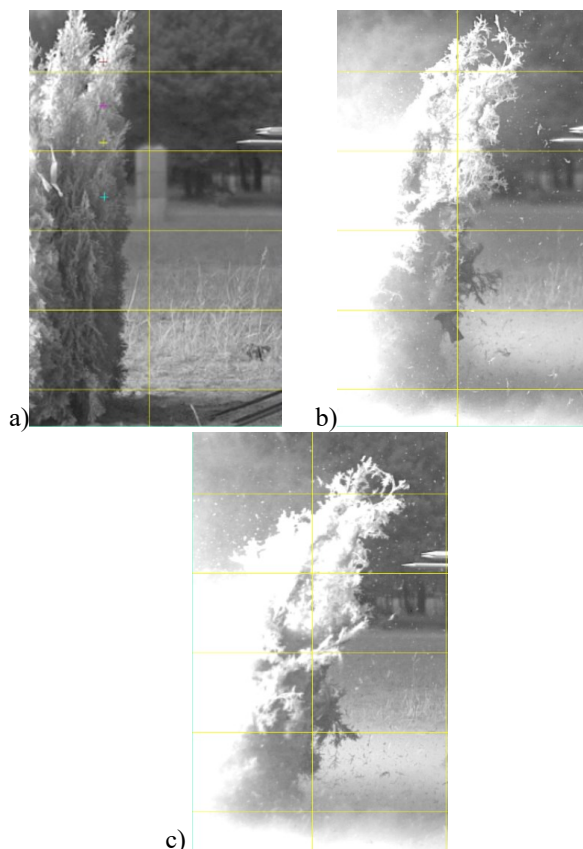
### 3. Wyniki badań

Zarejestrowano nadciśnienia i impulsy nadciśnienia w różnych pozycjach/odległościach za żywopłotowymi ścianami i porównano je z ich referencyjnymi odpowiednikami, tj. z przypadkami, w których nie było muru żywopłotowego. W naszym badaniu uzyskano redukcję nadciśnienia nawet o 22%. Potwierdzono, że żywopłot z tuj jest odpowiedni do ochrony przed wielokrotnymi atakami bombowymi, ponieważ po kilku strzałach z każdego drzewa została usunięta jedynie niewielka ilość igliwia. Przeprowadzono również testy dla uschniętych tuj, które już nie posiadały tej cechy, tracąc znaczną ilość igieł po jednym przejściu fali podmuchowej.

Nasze badania wykazały, że żywopłot z tuj może istotnie zmniejszyć szkodliwość improwizowanych urządzeń wybuchowych średniej wielkości, takich jak walizka, plecak lub bomba rurowa w związku z ekspozycją dorosłego człowieka na falę uderzeniową. Uzyskano mniejsze wartości tłumienia nadciśnienia i impulsu nadciśnienia w porównaniu do literatury, należy jednak podkreślić, że wymiary ściany w obu przypadkach były inne. Pełny raport z badań dostępny jest w publikacji autorów [8].

### 4. Podsumowanie

W naszym artykule zweryfikowaliśmy potencjał tłumienia fali podmuchowej żywopłotów z tuj w rzeczywistym scenariuszu. Potwierdzono przydatność żywopłotów z tuj do poprawy bezpieczeństwa ludności cywilnej w związku z atakiem bombowym podczas imprezy masowej na otwartej przestrzeni.



Rys. 2. Ujęcia z bocznej kamery obrazujące ruch żywopłotu z płaszczyzny w różnych chwilach czasu od detonacji: (a) 6,227 ms, (b) 27,678 ms oraz (c) 37,455 ms.

*Praca współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Konkursu nr 10/2019 na wykonanie projektów w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.*

### Literatura

- [1] Gajewski, T., Sielicki, P.W., *Experimental study of blast loading behind a building corner*, 2020, Shock Waves, 30(4), pp. 385-394.
- [2] M. Jin, Y. Hao, H. Hao, *Numerical study of fence type blast walls for blast load mitigation*, 2019, International Journal of Impact Engineering, Volume 131, pp. 238-255.
- [3] W. Xiao, M. Andrae, N. Gebbeken, *Numerical study of blast mitigation effect of innovative barriers using woven wire mesh*, 2020, Engineering Structures, 213, p. 110574, DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110574.
- [4] W. Xiao, M. Andrae, N. Gebbeken, *Experimental and numerical investigations of shock wave attenuation effects using protective barriers made of steel posts*, 2018, J. Struct. Eng., 144 (11), 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002194.
- [5] W. Xiao, M. Andrae, N. Gebbeken, *Numerical study on impulse reduction performance of protective barriers made of steel posts*, 2020, J. Struct. Eng., 146 (10), 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002782.
- [6] P. Warnstedt, N. Gebbeken, *Innovative protection of urban areas – Experimental research on the blast mitigating potential of hedges*, 2020, Landscape and Urban Planning, 202:103876, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103876.
- [7] N. Gebbeken, P. Warnstedt, L. Rüdiger, *Blast protection in urban areas using protective plants*, 2018, International Journal of Protective Structures, vol. 9(2), DOI: 10.1177/2041419617746007.
- [8] Gajewski, T., Peksa, P., Studziński, R., Malendowski, M., Sumelka, W., Sielicki, P.W. *Application verification of blast mitigation through the use of thuja hedges*, 2021, International Journal of Protective Structures.