

kpt. dr inż. Piotr Tofiło*

Określanie obszaru krytycznego promieniowania cieplnego na potrzeby ustalenia minimalnej odległości między budynkami

Establishing the extent of critical heat flux for the purpose of building separation due to fire

Streszczenie. Ustalanie wymaganych odległości między budynkami w Polsce odbywa się obecnie wg reguł podanych w Rozporządzeniu o warunkach technicznych. Wymagania tam określone uzależniają minimalną odległość między dwoma budynkami od kilku czynników. W istocie wymagania te podejmują próbę kategoryzacji budynków pod względem potencjalnego strumienia ciepła, któremu może być poddany sąsiedni budynek i od tego uzależniają wymaganą odległość między budynkami. Artykuł stanowi analizę wymagań krajowych i zagranicznych oraz metodologii obliczeń strumienia ciepła. Jako jeden ze sposobów przeprowadzenia obliczeń omówiony zostanie autorski program komputerowy FireRAD.

Słowa kluczowe: strumień ciepła, odległość między budynkami, usytuowanie budynków, promieniowanie cieplne.

Abstract. Establishing safe distances is currently based in Poland on fire regulations which depend on a number of parameters. The requirements actually attempt to categorize buildings using potential heat flux from a burning building and they adjust the distance accordingly. As current requirements are quite old and not questioned for many years they need revision. Some most important aspects and problems will be discussed. Modern approach to building separation requires detailed heat flux assessment. The paper will discuss various international approaches to provide safe distances and methodologies of heat flux calculations. A new program FireRad will be presented and discussed.

Keywords: radiative heat flux, external fire spread, distances between buildings.

Pożar może przenieść się pomiędzy budynkami na skutek bezpośredniego kontaktu płomieni, promieniowania cieplnego działającego na odległość, przez lotne żagwie pochodzące z budynku objętego pożarem lub przez pośrednie skupiska materiałów palnych, takie jak roślinność oraz pojazdy stojące między budynkami. Prawdopodobieństwo lotnych żagwi jest trudne do oszacowania i w dużym stopniu można je ograniczyć, stosując ściany i dachy z materiałów nierozprzestrzeniających ognia. Natomiast zagrożenie związane z promieniowaniem cieplnym jest możliwe do oszacowania, lecz wiąże się z kilkoma istotnymi założeniami i dość złożonymi obliczeniami.

Historia wymagań ujętych w Rozporządzeniu o warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie sięga lat 60. i 70. XX wieku, kiedy powstawały istotne krajowe opracowania obejmujące m.in. kwestie związane z odległością między budynkami (Lindner i Struś) [2]. Opracowanie [2] wykorzystywało różne

źródła literatury światowej, m.in. angielskie, francuskie, włoskie i amerykańskie. Już wówczas wskazywano w nim na dużą złożoność tej problematyki.

Wymagania krajowe i zagraniczne

Obecne Rozporządzenie o warunkach technicznych [1] w § 271 uzależnia wymaganą odległość między budynkami od kategorii zagrożenia budynków i występującej w nich gęstości obciążenia ogniowego, stopnia przeszklenia fasady (procentu powierzchni chronionej), stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany i dach, wyposażenia budynku w stałe urządzenia gaśnicze oraz występowania zagrożenia wybuchem.

Podstawowe wymagania brytyjskie zawarte są w Approved Document B oraz BS 9999. Dokumenty te zawierają dwie proste metody wyznaczenia minimalnej odległości do sąsiednich budynków oraz wskazują na inne możliwe metody alternatywne zawarte w standardzie BR187. Metody alternatywne oparte są pośrednio lub bezpośrednio na wyliczeniach krytycznego strumienia ciepła docierającego do fasady narażonego budynku. Jedną z możli-

wych jest **metoda tzw. prostokąta ograniczającego**, polegająca na tym, że wszystkie otwory niechronione, które w obrębie strefy pożarowej mogą w przypadku pożaru promieniować ciepło, otacza się prostokątem, posiadającym swoją wysokość i szerokość. Następnie wylicza się procent powierzchni niechronionych w ramach tego prostokąta. Ostatni krok polega na wyznaczeniu, z dość obszernej tabeli, minimalnej odległości do innego budynku zależnej od wymiarów prostokąta, procentu niechronionego i typu obiektu (ZL-handlowe lub PM+handlowe). Metoda prostokąta ograniczającego jest dość trudna do zastosowania w przypadku bardziej złożonych geometrycznie fasad budynków zawierających wnęki, występy czy fragmenty ustawione pod różnym kątem. Ma też swój inny wariant, w którym zamiast dużej tabeli korzysta się z dodatkowych wzorów algebraicznych i mniejszej tabeli.

Pozostałe metody inżynierskie polegają na szczegółowym wyliczeniu strumienia cieplnego promieniowanego w kierunku sąsiedniego budynku. Metody te bazują na obliczeniach współczynników konfiguracji promieniujących powierzchni względem punktu, w którym wylicza się pa-

* Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

dający strumień ciepła. BR187 pozwala, by w uzasadnionych przypadkach temperatura maksymalna pożaru (i w konsekwencji strumień emitowany) mogła być wyliczona z wykorzystaniem odpowiednich wzorów normowych.

Wymagania amerykańskie (nie są jednolicie stosowane w USA) zawarte są w normie NFPA 80A, bazującej na podobnych założeniach jak wymagania brytyjskie. Główne różnice to np. konieczność uwzględnienia dodatkowej odległości związanej z wyrzutem płomieni.

Tabela zawiera zestawienie danych fizycznych, koniecznych do określenia obszaru krytycznego strumienia ciepłego, ujętych w przepisach i standardach zagranicznych oraz danych występujących w polskich źródłach.

Porównanie danych fizycznych stosowanych do obliczeń strumieni ciepłych i odległości między budynkami

	PL (WT, Lindner)	UK (ADB i BR187)	USA (NFPA 80A)
Gęstość obciążenia ogniowego	<1000 MJ/m ² 1000 – 4000 MJ/m ² >4000 MJ/m ²	<500 MJ/m ² >500 MJ/m ²	<650 MJ/m ² 650 – 1400 MJ/m ² >1400 MJ/m ²
Temperatura	1000 °C	830 °C 1040 °C	847°C, 1059 °C, 1311 °C
Strumień emitowany	150,6 kW/m ²	84 kW/m ² 168 kW/m ²	89,3 kW/m ² 178,6 kW/m ² 357,1 kW/m ²
Strumień krytyczny	8,4 kW/m ²	12,6 kW/m ²	12,5 kW/m ²

Dyskusja na temat adekwatności polskich wymagań

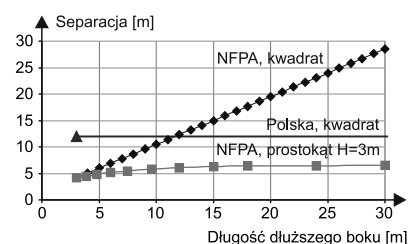
Na podstawie przykładów przepisów i standardów zagranicznych oraz literatury technicznej można stwierdzić, że w polskich przepisach:

- nie ma jasno określonego obszaru fasady biorącego udział w wymianie ciepła przez promieniowanie;
- nie ma wpływu rozmiarów fasady – prowadzi to do przeszacowania zagrożenia od małych budynków i niedoszacowania zagrożenia od dużych (w których nie ma podziału na strefy między kondygnacjami);
- nie ma odliczeń niewielkich niechronionych otworów; są one niedopuszczalne w ścianach oddzielenia pożarowego;
- nie ma odliczeń zabezpieczonych klatek schodowych;
- skokowy wpływ procentu powierzchni niechronionej i kąta, co może skutkować mniej optymalnym usytuowaniem budynków;
- brak wpływu przeszkód (zacienień, wnęk, występów itp.);
- trudności w interpretacji złożonych geometrii fasad i nierównomiernego stopnia

przeszklenia prowadzące potencjalnie do nieoptymalnego usytuowania;

- odmienne od światowej wiedzy technicznej założenia dotyczące obciążenia ogniowego, temperatury, strumienia emitowanego i krytycznego (lub zupełny brak takich danych);
- nieuwzględnienie czasu trwania pożaru i temperatury – brak wpływu systemów SSP i monitoringu umożliwiających szybki przyjazd straży pożarnej (SSP).

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wymagań amerykańskich i polskich na fasady w kształcie kwadratu oraz prostokąta o wysokości jednej kondygnacji. Widać, że wymagania amerykańskie są mniej rygorystyczne od polskich w przypadku niewielkich fasad, ale bardziej rygorystyczne dla większych. Natomiast wymagana odległość w przypadku fasady budynku, w którym każda kondygnacja jest strefą, są mniejsze od wymagań polskich.



Rys. 1. Porównanie wymagań, 50% powierzchni chronionej
[Źródło: opracowanie własne]

Program FireRAD

W obecnych realiach inżynierskich często zachodzi potrzeba optymalizacji projektu pod względem usytuowania budynku i formy architektonicznej elewacji zewnętrznej. Najbardziej precyzyjne obliczenia w zakresie strumieni ciepłych można potencjalnie przeprowadzić z użyciem technik CFD [5], lecz często nie jest to praktyczne rozwiązanie z wielu powodów. Alternatywnym rozwiązaniem jest autorski program komputerowy FireRAD, który można wykorzystać do obliczeń krytycznego strumienia ciepła w dowolnej konfiguracji geometrycznej dwóch budynków o dowolnie złożonym kształcie fasad.

Sposoby wyliczenia strumienia ciepła – algorytmy programu FireRAD. Największe zastosowanie w omawianym obszarze ma wzór na współczynnik konfiguracji w układzie prostokąt i punkt leżący na prostej prostopadłej do jednego z jego wierzchołków. Tak zdefiniowany współczynnik konfiguracji można addytywnie wykorzystywać przez umiejętnie dodawanie i odejmowanie różnych prostokątów i dzie-

ki temu uzyskiwać bardziej złożone konfiguracje promieniujących figur lub inne lokalizacje punktu, dla którego wyliczany jest współczynnik konfiguracji.

Dużo większą elastyczność i możliwości obliczeń złożonych geometrii można uzyskać, stosując trójkąt jako podstawową figurę, gdyż dzięki niej można odwzorować obiekt przestrzenny o dowolnym kształcie. Dzięki temu promieniująca powierzchnia może mieć bardziej złożony układ przestrzenny jak np. strefa płomieni kolumny konwekcyjnej, struktura płomieni wychodzących poza otwory pomieszczeń. Współczynnik konfiguracji trójkąta promieniującego w kierunku punktu można obliczyć z wykorzystaniem kilku metod. Dosyć prosta jest koncepcja trójkąta sferycznego, czyli takiego, który leży na powierzchni sfery i powstaje jako projekcja trójkąta płaskiego z punktu ułożonego w centrum sfery (rysunek 2). Mając do dyspozycji kąty środkowe tak utworzonego trójkątnego wycinka kuli, można wyliczyć kąty trójkąta sferycznego zgodnie ze wzorami:

$$A = \arccos((\cos(a) - \cos(b) * \cos(c)) / (\sin(b) * \sin(c)))$$

$$B = \arccos((\cos(b) - \cos(a) * \cos(c)) / (\sin(a) * \sin(c)))$$

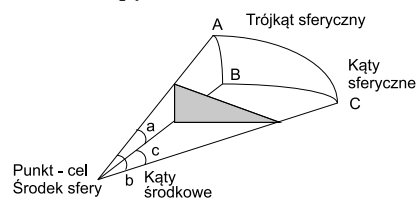
$$C = \arccos((\cos(c) - \cos(b) * \cos(a)) / (\sin(b) * \sin(a)))$$

Po obliczeniu kątów sferycznych, współczynnik konfiguracji można wyliczyć z dwóch wzorów (A i B):

$$f_{2-1} = \frac{S(\cos\theta_a + \cos\theta_b + \cos\theta_c)}{3\pi} \quad (A)$$

gdzie: $S = A + B + C - \pi$
lub

$$f_{2-1} = (A + B + C - \pi) / \pi \quad (B)$$



Rys. 2. Obliczanie współczynnika konfiguracji metodą trójkąta sferycznego
[Źródło: opracowanie własne]

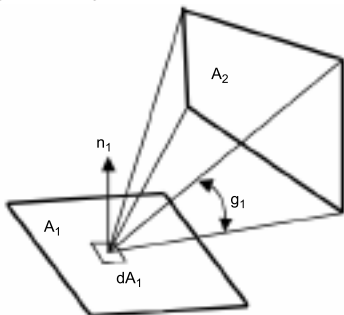
Mankamentem tych wzorów jest ich mniejsza dokładność w przypadku bliskiej odległości do punktu centralnego w porównaniu z wyprowadzonymi wzorami fundamentalnymi. Większa jest dokładność wzoru B, który już w przypadku odległości równej trzem najdłuższymi bokami trójkąta charakteryzuje się błędem jedynie 0,9%.

Najbardziej precyzyjnym sposobem otrzymania współczynnika konfiguracji jest wykorzystanie wyprowadzonych wzorów dla prostych konfiguracji, tzn. prostokąta lub trójkąta, i zastosowanie zasady superpozycji lub addytywności współczynników konfigu-

racji (rysunek 3). Równie dobra jest metoda całkowania z wykorzystaniem twierdzenia Stokesa wg wzoru

$$f_{2-1} = \frac{1}{2\pi} \int_{A_2} \sum_{i=1}^{E_2} \vec{g}_i \cdot \vec{n}_i,$$

w którym wektor \vec{g}_i ma moduł równy kątowi utworzonemu przez wektory prowadzące od badanego punktu do wierzchołków odpowiedniej krawędzi wielokąta.



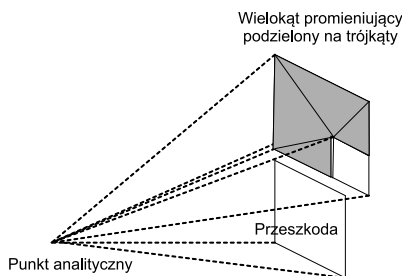
Rys. 3. Otrzymywanie współczynnika konfiguracji wg zasady superpozycji lub addytywności [Źródło: opracowanie własne]

Uwzględnianie przeszkód i pola widzenia

Najtrudniejszym elementem obliczeń, związanych ze strumieniem ciepła promieniowania, jest konieczność uwzględnienia przeszkód, które mogą zmniejszać współczynnik konfiguracji lub w całości blokować promieniowanie ciepłe w kierunku niektórych części fasady. Algorytm uwzględniający te aspekty jest stosunkowo złożony. Jego działanie polega na tym, że w przypadku każdej możliwej kombinacji powierzchni promieniującej analizowana jest obecność innych elementów geometrycznych (wielokątów) zasłaniających całkowicie lub częściowo bieg promieni. W sytuacji częściowego przesłonięcia analizowana jest figura powstała ze zrzutowania figury – przeszkody na płaszczyznę zawierającą trójkąt promieniujący. Powstała figura poddawana jest triangularyzacji, tzn. podzielenia na trójkąty, tak by w ostateczności efekt przesłonięcia był w całości uwzględniony przez promieniowanie jedynie części niezacienionej promiennika (rysunek 4).

Program FireRad charakteryzuje się następującymi możliwościami:

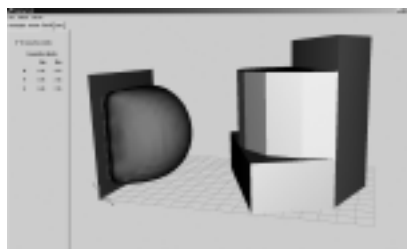
- dowolność geometrii budynków;
- import budynku (AutoCAD, Revit i inne) lub proste ręczne wprowadzenie rozpatrywanych powierzchni;
- uwzględnienie kątów padania promieni;
- uwzględnienie kształtów powierzchni emitujących i narażonych oraz przeszkód, zacienień, wnęk, występów itp.;



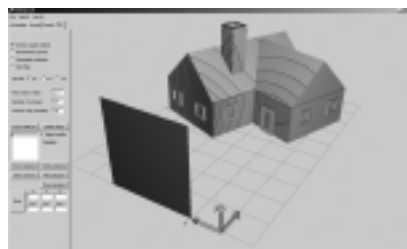
Rys. 4. Sposób prowadzenia obliczeń współczynnika konfiguracji w przypadku zasłonięcia powierzchni promieniującej przeszkodą [Źródło: opracowanie własne]

- możliwość ustalenia strumienia ciepła emitowanego lub temperatury pożaru;
- wizualizacja 3D obszaru krytycznego w przestrzeni i rozkładu strumienia padającego na powierzchnie;
- możliwość uwzględnienia zagrożenia w obu kierunkach i dla wielu scenariuszy pożaru;
- prosta obsługa i szybki wynik obliczeń (kilka sekund lub minut).

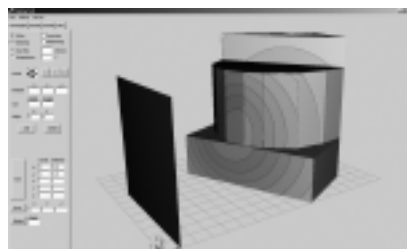
Rysunki 5 – 9 prezentują kilka najważniejszych możliwości programu.



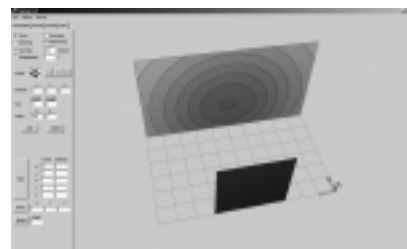
Rys. 5. Zasięg strumienia krytycznego w przestrzeni w odniesieniu do sąsiedniego budynku [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 6. Możliwość wykorzystania (importu) istniejących modeli budynków [Źródło: opracowanie własne]

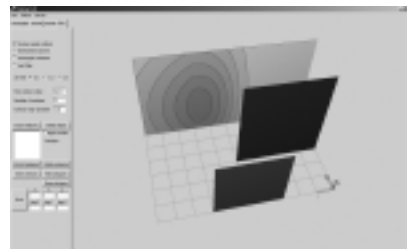


Rys. 7. Wskazanie obszarów o krytycznym strumieniu ciepła [Źródło: opracowanie własne]



Rys. 8. Rozkład strumienia na płaszczyźnie odbierającej (bez przeszkód)

[Źródło: opracowanie własne]



Rys. 9. Rozkład strumienia po uwzględnieniu wpływu przeszkody

[Źródło: opracowanie własne]

Podsumowanie i wnioski

Problem usytuowania budynków jest złożony i wymaga zaawansowanych narzędzi w celu szczegółowej oceny wielkości strumienia ciepła. Krajowe wymagania są bardzo uproszczone, mało elastyczne i niekiedy nieadekwatne do uwarunkowań budowlanych. Każdą sytuację można dokładnie zbadać z użyciem narzędzia FireRad, ocenić w świetle aktualnej wiedzy światowej i zaproponować adekwatne rozwiązanie. Omawiane podejście inżynierskie może zapewnić większą optymalizację projektu pod względem wykorzystania terenu i koniecznych zabezpieczeń. Program FireRad wymaga dalszych prac w zakresie optymalizacji algorytmów w celu osiągnięcia jak najlepszej wydajności pozwalającej na badanie sytuacji i modeli o dużej liczbie elementów.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [2] Lindner J., Struś W., Bezpieczeństwo pożarowe budynków, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1965 r.
- [3] BR187 External fire spread: building separation and boundary distances, 2nd edition, BRE, 2014.
- [4] NFPA 80A Recommended Practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures, 2012.
- [5] Mozer V., „Modelling fire severity and evacuation in tunnels”, Communications 4/2013, ISSN: 1335-4205.