

st. kpt. dr inż. **Piotr Tofiło**¹
dr hab. inż. **Vladimir Mozer**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 03.06.2016;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 05.09.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

Prognozowanie strumienia ciepła na zewnątrz budynku z użyciem różnych wariantów obliczeniowych w odniesieniu do danych eksperymentalnych³

Estimating the Heat Flux Outside a Building Using Various Calculation Approaches with Respect to the Experimental Data

Прогнозирование величины теплового потока снаружи здания в случае внутреннего пожара. Сравнение вариантов расчета с экспериментальным данным

ABSTRAKT

Cel: Zbadanie charakterystyki i dokładności modeli promieniowania cieplnego względem dostępnych danych eksperymentalnych. Porównanie różnych metod obliczania promieniowania cieplnego

Projekt i metody: Ocena wielkości zewnętrznego strumienia ciepła pochodzącego z pożaru w budynku i przedostającego się do innego budynku lub innej części tego samego budynku jest ważną częścią inżynierii ochrony przeciwpożarowej. Jednocześnie nie jest to problem łatwy do rozwiązania, ponieważ wiąże się ze złożonymi procesami charakterystycznymi dla w pełni rozwiniętego pożaru, o dynamice kontrolowanej dostępem powietrza i występowaniem zewnętrznych płomieni. Obliczanie zasięgu krytycznego strumienia ciepła pozwala ustanowić minimalne wymagane odległości pomiędzy budynkami. Chociaż istnieje wiele zaawansowanych metod numerycznych, jak np. CFD, które mogą być użyte do obliczania strumienia promieniowania ciepła, w praktyce w rutynowych badaniach inżynierowie bezpieczeństwa pożarowego stosują jedynie najprostsze metody szacunków. Niektóre najnowsze badania doświadczalne wskazują, że metody te mogą być niedokładne, ponieważ nie obejmują promieniowania pochodzącego od płomieni zewnętrznych. Promieniowanie to jest ujęte w niektórych istniejących metodologiach obliczeniowych, takich jak Eurokod, czy norma amerykańska NFPA 80A. Metoda wskazana w Eurokodzie uwzględnia wiele parametrów wejściowych, takich jak geometria pomieszczenia, otworów, obciążenie ogniowe i warunki wentylacji, a jej dane wyjściowe to temperatura pomieszczenia oraz geometria i rozkład temperatury płomieni zewnętrznych. W artykule wszystkie metody obliczeniowe oparte na współczynniku konfiguracji, czyli zarówno metoda promieniującego prostokąta, jak i metody uwzględniające zewnętrzne płomienie, zostały zbadane z użyciem programu autorskiego FireRad, który umożliwia stosowanie dowolnych kształtów przestrzennych jako zestawu promieniujących powierzchni. W artykule wykorzystano dostępne publicznie literaturowe dane eksperymentalne z badań kanadyjskich i czeskosłowackich.

Wyniki: Wyniki przedstawiono w formie porównania rozkładów strumienia ciepła uzyskanego w eksperymentach z wynikami badań z użyciem różnych wariantów obliczeniowych promieniowania. Wskazano, które czynniki decydują o większej zbieżności danych eksperymentalnych i obliczeń.

Wnioski: W artykule zebrano i omówiono wyliczenia z użyciem różnych metod oraz podano zalecenia do ostrożnego prognozowania wielkości strumienia ciepła. Program FireRad jest przydatnym narzędziem do obliczeń strumienia cieplnego dla złożonych geometrii.

Słowa kluczowe: promieniowanie cieplne, ochrona przeciwpożarowa, płomień zewnętrzny

Typ artykułu: artykuł z praktyki dla praktyki

ABSTRACT

Goal: To examine the characteristics and the accuracy of the models of thermal radiation in terms of available experimental data. Comparison of different methodologies for calculating thermal radiation.

Project and methods: Estimating the size of the external heat flux from a fire in a building to another building or another part of the same building is an important part of fire protection engineering. At the same time it is not a trivial issue, because it involves complex processes

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej / The Main School of Fire Service, Poland, piotr.tofilo@gmail.com;

² Uniwersytet Žyliński, Słowacja / University of Zilina, Slovak Republic;

³ Procentowy wkład merytoryczny / Percentage contribution: P. Tofiło – 60%, V. Mozer – 40%;

associated with a fully developed fire with dynamics controlled by air access and the presence of external flames. Calculation the range of critical heat flux leads to the establishment of the minimum required distance between buildings. Although there are many advanced numerical methods like CFD which can be used for calculating heat flux of radiation, but for practical purposes only the simplest methods for estimating the heat flux of radiation are routinely applied by fire protection engineers. Some recent experimental studies indicate that these methods may not be accurate, because they do not include radiation from external flames. Radiation from external flames is included in some of the existing computational methodologies like Eurocode or American standard NFPA 80A. The method included in Eurocode includes many input parameters like compartment geometry, characteristics of openings, fire load density and ventilation conditions, and its output parameters are the temperature of the compartment and the geometry and temperature of external flames. In this article, all the methods of calculation based on the configuration ratio, that is both the method of the radiating rectangle, and the methods including external flames, are tested using a copyright program called FireRad which allows the use of any spatial shapes as a set of radiating surfaces. The experimental data used in this paper are public literature data from Canadian and Czechoslovakian experimental programs.

Results: The results are presented as a comparison of the heat flux distributions obtained from experiments to the distributions obtained using various modeling approaches. Factors which determine the increasing convergence of experimental data and calculations were indicated.

Conclusion: The article summarized and discussed calculations using various methods; it also provided recommendations for prudent estimation of the size of the heat flux. FireRad proved to be a useful tool in calculating heat flux for complex geometries.

Keywords: thermal radiation, fire protection, external flame

Type of article: best practice in action

АННОТАЦИЯ

Цель: Изучить характеристику и точность моделей теплового излучения, сравнивая их с имеющимися экспериментальными данными. Сравнение различных методов расчета теплового излучения.

Проект и методы: Оценка размеров внешнего теплового потока пожара в здании, переходящего на другое здание или другую часть данного здания, является важной частью пожарной инженерии. В то же время это не простая задача, поскольку она связана с многими сложными процессами развитого пожара, с контролируемой динамикой доступа воздуха и наличием внешнего пламени. Расчет критической дальности теплового потока позволяет определить минимальное требуемое расстояние между зданиями. Хотя существует много передовых численных методов, таких как, например CFD, которые могут быть использованы для расчета теплового потока, в практике инженеры пожарной безопасности используют обычно самые простые. Некоторые новейшие экспериментальные исследования указывают на то, что эти методы могут быть не точными, так как в них не учитывается излучение от внешнего пламени. Облучение от внешнего пламени включено в некоторые существующие методики вычисления, такие как Еврокод или американский стандарт NFPA 80A.

Метод указанный в Еврокоде учитывает большое количество входных параметров, таких как геометрия помещения, отверстий, пожарная нагрузка и условия вентиляции, а его исходные данные - это температура помещения, а также геометрия и распределение температуры внешнего пламени. В этой статье все методы расчета основаны на коэффициенте конфигурации, то есть методе излучающего прямоугольника и методы учитывающие внешнее пламя были исследованы с помощью авторской программы FireRad, которая позволяет использовать любые пространственные формы как совокупность излучающей поверхности. В статье использованы публично доступны литературные экспериментальные данные: канадские и чехословацкие исследования.

Результаты: Результаты представлены в форме сравнения распределений теплового потока, полученного в результате экспериментов с использованием различных вариантов расчета излучения. Указаны факторы, определяющие возрастающую сходимость экспериментальных данных и расчетов.

Выводы: В статье собраны и описаны расчеты с использованием различных методов, а также даются рекомендации относительно разумного прогнозирования размера теплового потока. Программа FireRad является полезным инструментом для расчета теплового потока для объектов со сложной геометрией.

Ключевые слова: тепловое излучение, пожарная охрана, внешнее пламя

Вид статьи: с практики для практики

1. Wprowadzenie

Promieniowanie ciepłe podczas pożarów wewnętrznych grozi ryzykiem, że ogień rozprzestrzeni się poza budynek. Aby odnaleźć skuteczną metodę wyznaczania strumienia ciepła, na świecie przeprowadzono wiele badań naukowych [1-3]. Niektóre z tych badań posłużyły za podstawę dzisiejszych przepisów prawa budowlanego i norm dotyczących bezpieczeństwa pożarowego.

Istnieją dwa główne czynniki wpływające na wielkość strumienia ciepła: wielkość promiennika i jego temperatura. W rzeczywistych pożarach powierzchnia promieniująca obejmuje zazwyczaj obszar otworu w przegrodach budowlanych oraz płomień zewnętrzny poza otworem. Mimo że niektóre metody obliczania strumienia promieniowania ciepła [1] pomijają płomień zewnętrzny, ich znaczny wpływ potwierdzają badania eksperymentalne [5]. W związku z tym istnieje realna potrzeba oceny i ewentualnej poprawy dokładności szacunków wielkości strumienia ciepła na podstawie charakterystyki budynku i pożaru. Niniejszy artykuł zawiera przegląd wybranych, dostępnych metod, takich jak metoda promieniującego prostokąta, metoda opisana w Eurokodzie

[7] oraz autorskie rozwijane i optymalizowane narzędzie obliczeniowe FireRAD [8]. Metody te zostaną użyte do przewidywania strumienia ciepłych na podstawie rzeczywistych danych doświadczalnych.

2. Dostępne metody inżynierskie

2.1. Promieniujący prostokąt

Najczęściej stosowaną podstawową metodą oceny zewnętrznego strumienia promieniowania jest metoda tzw. promieniującego prostokąta, w którym każde okno w strefie pożarowej jest oddzielnym promiennikiem lub wszystkie okna działają jako jeden promiennik z uwzględnieniem odsetka powierzchni niechronionych. Aby przeprowadzić obliczenia z wykorzystaniem tego podejścia, należy wcześniej ustalić temperaturę prostokąta. Zazwyczaj jest to temperatura wewnątrz pomieszczenia objętego pożarem. Temperatura prostokąta jest następnie przeliczana na strumień ciepła emitowanego przez prostokąt z uwzględnieniem emisyjności, która zakładana jest do celów technicznych jako 1,0 lub 0,9 oraz

współczynnika konfiguracji, obliczanego za pomocą prostych wzorów inżynierskich lub tablic. Przepisy przeciwpożarowe niektórych krajów zakładają dwa lub więcej poziomów strumienia ciepła odpowiadających typom budynków o określonym obciążeniu ogniowym. Zazwyczaj większość budynków mieszkalnych i budynków użyteczności publicznej należy do kategorii o niższej temperaturze (ok. 830°C i 84 kW/m²), podczas gdy budynki przemysłowe i handlowe należą do kategorii wyższej temperatury (ok. 1100°C i 168 kW/m²). To uproszczone podejście opiera się na empirycznych danych z lat 60. i uwzględnia spory rozrzut warunków pożarowych widzianych w wielu danych eksperymentalnych, co ukazano w dokumencie BR187. Zaletą takiego podejścia jest względna prostota konwersji danych geometrycznych na minimalne odległości separacji budynków. Niektóre z ostatnich badań poddają jednak w wątpliwość skuteczność tej nieskomplikowanej metody. Zgodnie z nimi uzyskiwana wartość strumienia ciepła jest niedoszacowana ze względu na nieuwzględnienie w metodzie oddziaływania płomieni zewnętrznych.

2.2. Metody uwzględniające płomienie zewnętrzne

Istnieje pewien zbiór metod wyznaczania strumienia ciepła, które obejmują promieniowanie płomieni zewnętrznych. Najbardziej znaną jest metoda podana w Aneksie B Eurokodu 1991-1-2 [7]. Uproszczona wersja tej metody została niedawno przedstawiona w kanadyjskim badaniu eksperymentalnym [5-6]. W tym podejściu promieniowanie od płomieni dodaje się do promieniowania z wewnątrz pomieszczenia (otworu). W metodzie zawartej w Eurokodzie obliczenia rozpoczynają się od oceny maksymalnej możliwej mocy pożaru (szybkości wydzielania ciepła) w pomieszczeniu, która zależy od wielkości pomieszczenia i jego otworów (równanie 1).

$$Q = \min\left(\frac{A_f \cdot q_{f,d}}{\tau_f}; 3,15 \left(1 - e^{-\frac{0,036}{\sigma}}\right) A_v \left(\frac{h_{eq}}{D/W}\right)^{1/2}\right) \quad (1)$$

Gdzie:

- A_f = powierzchnia podłogi [m²],
- A_v = powierzchnia otworów [m²],
- h_{eq} = średnia wysokość otworów [m],
- $q_{f,d}$ = obciążenie ogniowe [MJ/m²],
- τ_f = czas trwania pożaru [s],
- D/W = stosunek długości ścian pomieszczenia (wylizany na kilka sposobów – patrz Eurokod),

$O = A_v \sqrt{h_{eq}/A_t}$

(współczynnik otworów pomieszczenia – ang. *opening factor of the compartment*).

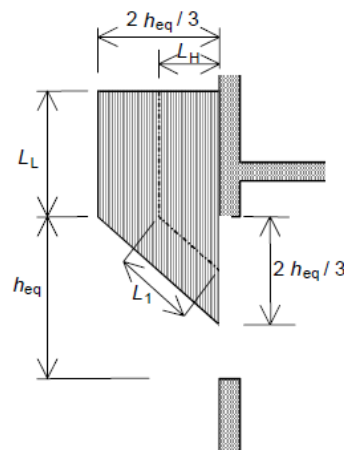
W następnym etapie obliczana jest maksymalna temperatura w pomieszczeniu (równanie 2), która następnie użyta jest do obliczenia promieniowania z wewnątrz pomieszczenia (jako promieniujący prostokąt o temperaturze T_i i emisyjności równej 1).

$$T_f = 6000 \left(1 - e^{-\frac{0,1}{\sigma}}\right) O^{0,5} \left(1 - e^{-0,00286\Omega}\right) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (2)$$

Gdzie: $\Omega = (A_f \cdot q_{t,d}) / (A_v \cdot A_t)^{1/2}$

T_0 – Temperatura otoczenia [K],
 A_t – powierzchnia całkowita przegród wraz z otworami [m²].

Następnie obliczane są parametry geometrii płomieni zewnętrznych zgodnie z ryc. 1.



Ryc.1. Geometria modelu płomieni zewnętrznych [7]
 Fig. 1. Geometry of external flames [7]

Uwzględniana jest w szczególności długość płomienia zewnętrznego obliczana zgodnie z kilkoma dostępnymi wariantami związanymi z obecnością ściany ponad oknem, najczęściej zgodnie z równaniem 3 i 4 (dostępne są także inne warianty, takie jak: brak ściany ponad oknem lub mała szerokość okna, wpływ płomieni wymuszony wentylacją, wpływ balkonów).

$$L_f = L_L + L_1 = L_L + h_{eq}/2 \quad (3)$$

$$L_L = 1,9 \left(\frac{Q}{w_t}\right)^{2/3} - h_{eq} \quad (4)$$

Rozkład temperatury wzdłuż długości płomienia ustala się tak, by możliwe było stworzenie uproszczonej struktury płomienia jako zestawu powierzchni promieniujących. Gradient temperatury jest liniowy i rozpoczyna się wielkością T_w w przekroju okna obliczonej z równania 5 i zmienia się zgodnie z równaniem 6.

$$T_w = \frac{520}{\left(1 - 0,4725 \left(L_f \cdot \frac{w_t}{Q}\right)\right)} + T_0 \quad (5)$$

$$T_z = (T_w - T_0) \left(1 - 0,4725 \left(L_x \cdot \frac{w_t}{Q}\right)\right) + T_0 \quad (6)$$

Gdzie:

- L_f – długość płomieni [m],
- L_x – dystans wzdłuż osi płomieni [m],
- w_t – łączna szerokość otworów [m],
- Q – moc pożaru [kW].

Strumień ciepła promieniowania od płomieni zewnętrznych jest obliczany na podstawie temperatury i emisyjności płomienia, która zależy od grubości płomienia (która z kolei zależy od wysokości okna) i oblicza się ją z równania 7:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f} \quad (7)$$

Gdzie:

d_f – grubość płomienia [m],
 0,3 – współczynnik emisyjności zalecany w Eurokodzie (badania kanadyjskie zalecają współczynnik 0,5 w celu osiągnięcia większej zgodności z ich eksperymentem).

W praktyce trudnością w pełnym zastosowaniu tej metodologii jest to, że zgodnie z jej założeniem temperatura płomienia zmniejsza się wraz z jego długością. Aspekt ten jest rzadko brany pod uwagę, ponieważ wymaga jeszcze większej liczby promieniujących powierzchni i oddzielnych temperatur, co często w praktyce inżynierskiej jest zbyt uciążliwe. Uproszczone podejście zaproponowane przez kanadyjskich naukowców obejmuje tylko dwa dodatkowe promieniujące prostokąty reprezentujące płomienie.

W niniejszym artykule nie przytoczono pełnego opisu metodologii obliczeniowej zawartej w Eurokodzie z uwagi na jej stosunkowo dużą obszerność.

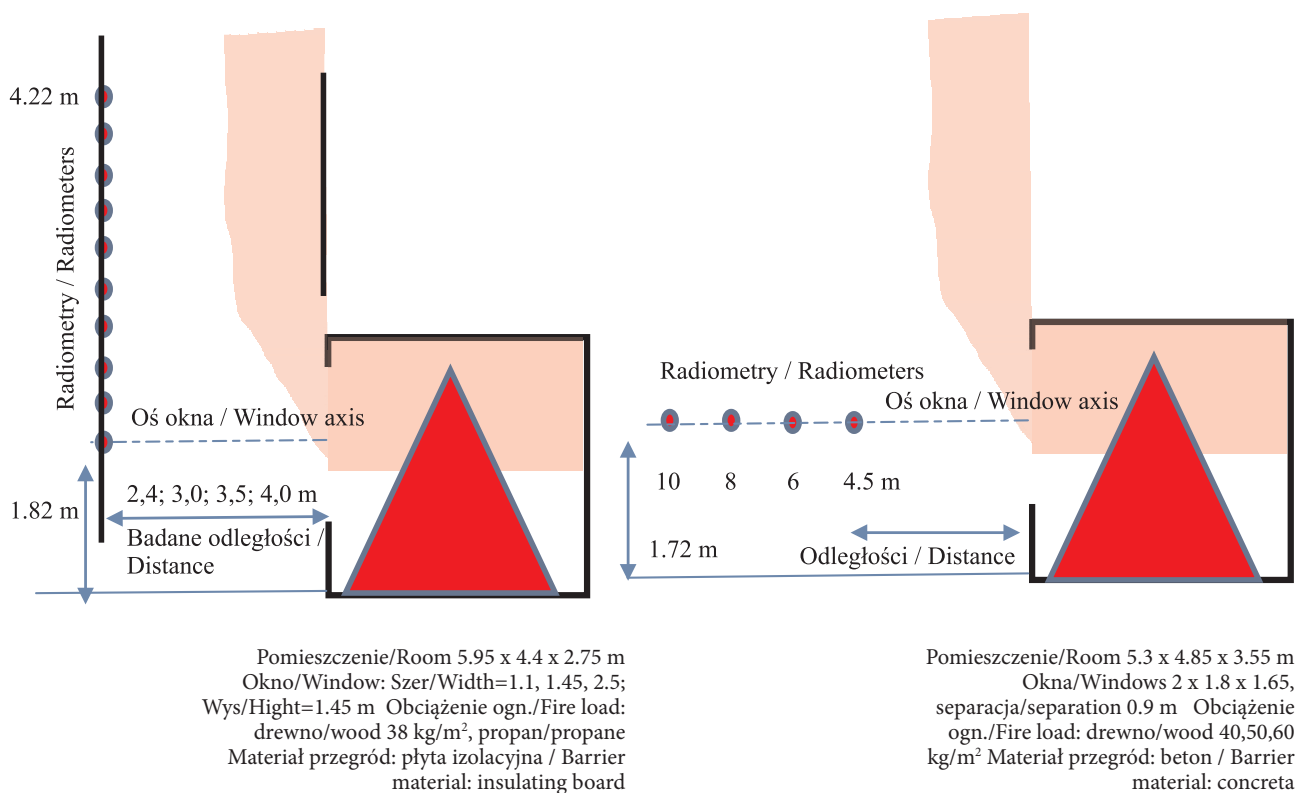
2.3. Algorytm FireRad

Autorski algorytm komputerowy FireRad [8] został stworzony do prowadzenia obliczeń z użyciem współczynników konfiguracji (ang. *view factor*). Może być on wykorzystywany do badania rozkładów strumieni promieniowania w przestrzeni jako izopowierzchnie oraz strumienia padającego na daną powierzchnię w postaci map konturowych. Obliczenia możliwe są dla prostych i złożonych geometrii, również z uwzględnieniem wpływu przeszkód (częściowego i całkowitego zasłonięcia promieniujących powierzchni). FireRad może obliczać rozkład strumienia ciepła emitowanego pierwotnie z różnych powierzchni, takich jak prostokąty, zewnętrzne płomienie, stożki, cylindry lub inne dowolne kształty. W odniesieniu do zewnętrznych płomieni podstawowe ustawienia zakładają podejście zgodne z Eurokodem w zakresie tempe-

ratury pomieszczenia, wielkości płomienia, temperatury płomienia – zarówno początkowej w płaszczyźnie otworu, jak i dalszej, zmieniającej się wzdłuż płomienia. W odniesieniu do rozkładu temperatury wzdłuż płomienia struktura może być podzielona na kilka sekcji, gdzie każda część może charakteryzować się indywidualną temperaturą. Biorąc pod uwagę te możliwości, FireRad to wygodny program do analizy i porównań różnych wariantów modelowania obejmujący zarówno promieniowanie z otworów, jak i płomienie zewnętrzne. W niniejszym artykule program FireRad został wykorzystany do przeprowadzenia wszystkich obliczeń, od najprostszego (prostokąt) do najbardziej złożonego wariantu, tzn. takiego, w którym płomienie zewnętrzne modelowane są jako zestaw powierzchni o różnej temperaturze.

3. Dane eksperymentalne

W celu dokonania oceny dokładności wyżej opisanych metod obliczeniowych do porównania zostały wybrane dwa zestawy danych eksperymentalnych oparte na raportach z badań kanadyjskich [5-6] i czeskosłowackich [4]. Szczegóły obydwu tych eksperymentów przedstawione są na ryc. 2. Zilustrowano w nich pomieszczenie z otworem, symbolicznie przedstawiony pożar z warstwą dymu i płomieniami zewnętrznymi oraz rozmieszczenie aparatury pomiarowej (radiometrów mierzących strumień ciepły). W badaniach czeskosłowackich jako materiał palny wykorzystano drewno, natomiast naukowcy kanadyjscy wykorzystywali drewno i propan. W artykule do porównań przyjęto pożary drewna, gdyż uważa się je za bardziej naturalny rodzaj pożaru.



Ryc. 2. Stanowiska eksperymentalne: a) badania kanadyjskie, b) badania czeskosłowackie
Fig. 2. Experimental station a) Canadian experiments b) Czechoslovakian experiments

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].

Source: Own elaboration based on [5-6].

Tabela 1. Podsumowanie eksperymentów czechosłowackich [4]**Table 1.** Summary of Czechoslovakian experiments[4]

Eksperyment, numer Experiment, number	Exp 1	Exp 2	Exp 3
Obciążenie ogniowe (drewno), [kg] / Fire load (wood) [kg]"	40	50	60
Temperatura w pomieszczeniu [°C] / Compartment Temperature (measured) [°C]	915	957	936
Strumień ciepła, odległość 4,5m [kW/m ²] / Heat flux, distance 4.5m [kW/m ²]	8,7	12,1	12,2
Strumień ciepła, odległość 6,0m [kW/m ²] / Heat flux, distance 4.5m [kW/m ²]	5,4	7	7
Strumień ciepła, odległość 8,5m [kW/m ²] / Heat flux, distance 4.5m [kW/m ²]	2,5	3,4	3,1
Strumień ciepła, odległość 10,0m [kW/m ²] / Heat flux, distance 4.5m [kW/m ²]	1,35	1,8	1,7

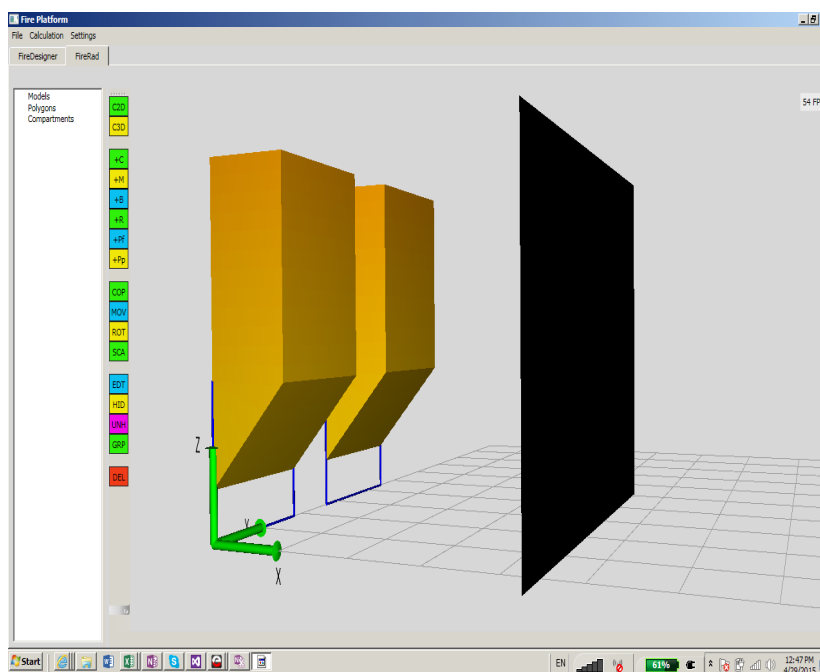
Tabela 2. Podsumowanie badań kanadyjskich [5-6]**Table 2.** Summary of Canadian experiments [5-6]

Eksperyment, numer Experiment, number	Exp 10	Exp 11	Exp 12
Wielkość otworu [m] / Opening size [m]	1.1x1.45	1.45x1.45	2.5x1.45
Temperatura w pomieszczeniu [°C] / Compartment Temperature (measured) [°C]	958	1083	1050
Temperatura płomieni w otworze [°C] / Flame temperature in opening [°C]	942	1010	1079
Wysokość płomieni ponad otworem [m] / Flame length above the opening [m]	3	2,5	3,2
Strumień ciepła, odl. 3,0m, środek [kW/m ²] / Heat flux, dist. 3.0m, centerline [kW/m ²]	11,82	17,49	28,79
Strumień ciepła, odl. 3.0m, max [kW/m ²] / Heat flux, dist. 3.0m, max [kW/m ²]	13,65	19,45	31,47

4. Porównanie obliczeń i danych eksperymentalnych

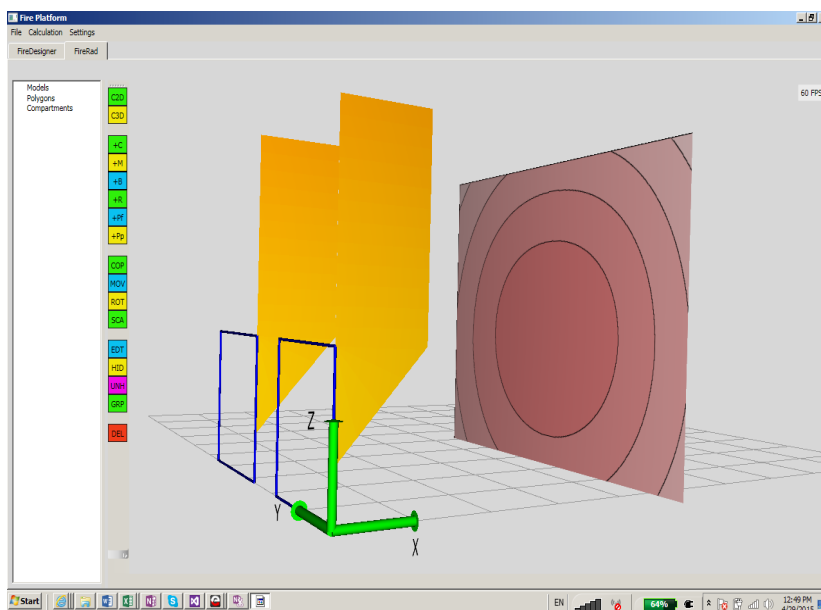
Porównanie wyników obliczeń różnych metod opartych na współczynnikach konfiguracji przeprowadzono przy użyciu programu FireRad. Program ten oblicza rozkłady strumienia ciepła od promieniujących powierzchni o dowolnych kształtach, włączając promieniujące prostokąty i płomień zewnętrzny.

W przypadku płomieni zewnętrznych metodologia zastosowana w programie FireRad opiera się na podejściu zgodnym z Eurokodem, z możliwością podziału płomienia wzdłuż jego długości na wiele sekcji (w przypadku tego badania – 16). Przykład wizualnej konfiguracji eksperymentalnej FireRad i rozkładu strumienia padającego na eksponowaną powierzchnię przedstawiają ryc. 3 i 4. Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabelach 3 i 4 oraz na ryc. 5.

**Ryc. 3.** Układ eksperymentalny badań czechosłowackich ujęty w programie FireRad (zewnętrzne płomień z gradientem temperatury)**Fig. 3.** Czechoslovakian experimental setup included in FireRad(external flames with thermal gradient)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].

Source: Own elaboration based on [5-6].



Ryc. 4. Przykładowe wyniki programu *FireRad* – rozkład strumienia ciepła promieniowania z możliwością odczytu precyzyjnej wielkości strumienia w dowolnym punkcie

Fig. 4. Example results from *FireRad* – heat flux of radiation with a possibility of reading precise size of the flux in any point

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].

Source: Own elaboration based on [5-6].

Tabela 3. Wyniki obliczeń dla danych z badań czechosłowackich
Table 3. The results of calculation for data obtained during Czechoslovakian tests

	Konfiguracje eksperymentalne – obciążenie ogniowe i odległość radiometru Experimental configurations – fire load and measurement distances											
	40 kg				50 kg				60 kg			
	4.5 m	6 m	8 m	10 m	4.5 m	6 m	8 m	10 m	4.5 m	6 m	8 m	10 m
Temperatura (Temperature) [°C]												
w pomieszczeniu - Eurokod (Compartment - predicted by Eurocode)	1021,8				1092,7				1137,7			
w płaszczyźnie otworu okiennego - Eurokod (Window - predicted by Eurocode)	1032,3				1032,3				1032,3			
w pomieszczeniu - eksperyment (Compartment - measured)	915,0				957,0				936,0			
Strumień ciepła - promieniujący prostokąt [kW/m²] (Heat flux - radiating rectangle [kW/m²])												
w oparciu o temperaturę prognozowaną (Eurokod) (based on temperature predicted by Eurocode)	10,01	6,44	4,13	2,76	12,39	7,97	5,11	4,92	14,11	9,08	5,82	3,89
w oparciu o temperaturę mierzoną (eksperyment) (based on measured temperature)	6,98	4,49	2,88	1,92	8,15	5,25	3,36	2,25	7,61	4,90	3,14	3,30
Strumień ciepła - zewnętrzne płomienie [kW/m²] (Heat flux - external flames [kW/m²])												
w oparciu o obliczenia (Eurokod) (based on Eurocode calculations)	4,71	3,11	2,01	1,33	4,71	3,11	2,01	1,33	4,71	3,11	2,01	1,33
Strumień ciepła łączny [kW/m²] (total heat flux [kW/m²])												

Mierzony (<i>measured</i>)	8,70	5,40	2,50	1,35	12,10	7,00	3,40	1,80	12,20	7,00	3,10	1,70
Prognozowany zgodnie z Eurokodem (<i>predicted using Eurocode</i>)	14,73	9,55	6,14	4,09	17,11	11,09	7,12	6,25	18,82	12,19	7,83	5,21
Prognozowany z użyciem temp. Mierzonej (<i>predicted using measured temperature</i>)	11,69	7,60	4,89	3,25	12,87	8,36	5,37	3,57	12,32	8,01	5,15	4,63

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].

Source: Own elaboration based on [5-6].

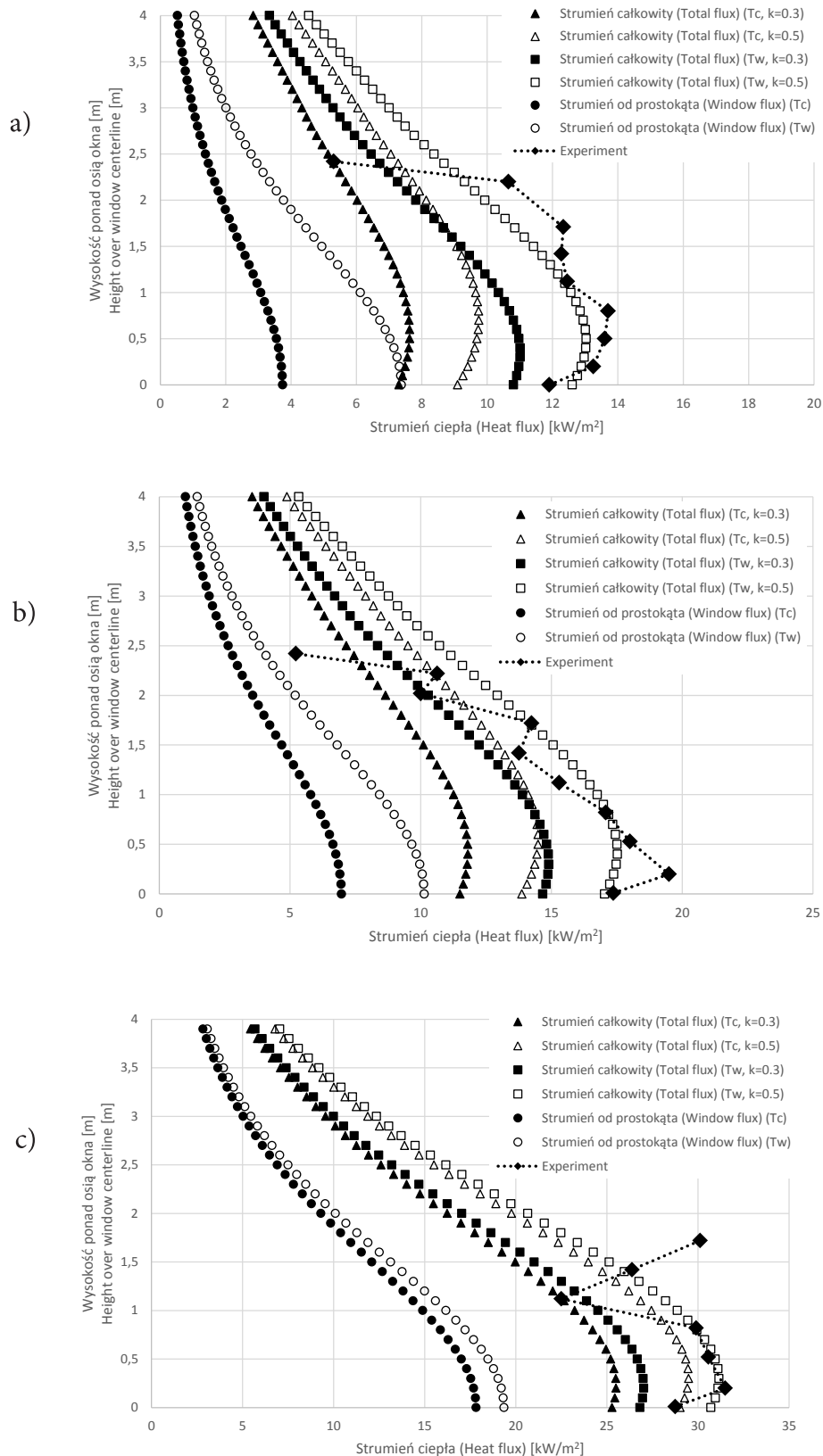
Tabela 4. Wyniki obliczeń dla danych z badań kanadyjskich

Table 4. The results of calculation for data obtained during Canadian tests

	Numer eksperymentu i wielkość otworu (<i>Experiment number and opening size</i>)		
	Exp 10 (1.1 x 1.45 m)	Exp 11 (1.45 x 1.45 m)	Exp 12 (2.5 x 1.45 m)
Temperatura (Temperature) [°C]			
w pomieszczeniu - Eurokod (<i>Compartment - predicted by Eurocode</i>)	791,2	882,1	1023,0
w płaszczyźnie otworu okiennego - Eurokod (<i>Window - predicted by Eurocode</i>)	977,5	995,6	1050,3
w pomieszczeniu - eksperyment (<i>Compartment - measured</i>)"	958,0	1083,0	1050,0
Strumień ciepła - promieniujący prostokąt [kW/m²] (Heat flux - radiating rectangle [kW/m²])			
w oparciu o temperaturę prognozowaną (Eurokod) (<i>based on temperature predicted by Eurocode</i>)"	3,74	6,97	17,82
w oparciu o temperaturę mierzoną (eksperyment) (<i>based on measured temperature</i>)"	7,37	10,13	19,35
Strumień ciepła - zewnętrzne płomienie [kW/m²] (Heat flux - external flames [kW/m²])			
w oparciu o obliczenia (Eurokod) (<i>based on Eurocode calculations</i>)"	3,56	4,53	7,47
Strumień ciepła łączny [kW/m²] (total heat flux [kW/m²])			
Mierzony (<i>measured</i>)	11,82	17,49	28,79
Prognozowany zgodnie z Eurokodem (<i>predicted using Eurocode</i>)	7,30	11,50	25,29
Prognozowany z użyciem temp. Mierzonej (<i>predicted using measured temperature</i>)	10,81	14,67	26,82

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].

Source: Own elaboration based on [5-6].



Ryc. 4. Porównanie różnych wariantów wyliczenia strumienia ciepła w odniesieniu do wyników badań kanadyjskich w pomieszczeniu z otworem o wielkości: a) 1.1 x 1.45 b) 1.45 x 1.45 c) 2.5 x 1.45m (Tc – temperatura pomieszczenia, Tw – temperatura w płaszczyźnie otworu okiennego, k – współczynnik emisyjności płomieni)

Fig 4. Comparison of various calculation variants of the heat flux in relations to Canadian test results in a room with an opening of: a) 1.1 x 1.45 b) 1.45 x 1.45 c) 2.5 x 1.45m (Tc – compartment temperature, Tw – window temperature, k – flame emissivity coefficient)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5-6].
Source: Own elaboration based on [5-6].

5. Omówienie wyników

Wyniki dwóch omawianych w artykule badań zostały otrzymane z wykorzystaniem podobnych, ale w pewnym stopniu różniących się od siebie pomieszczeń badawczych. W badaniach kanadyjskich zmienna jest wielkość otworu, a w czeskosłowackich obciążenie ogniowe. Obydwe te wielkości wpływają na charakterystykę pożaru wewnątrz pomieszczenia, temperaturę w pomieszczeniu oraz wielkość i temperaturę płomieni na zewnątrz. Pomieszczenie w badaniach kanadyjskich charakteryzuje się współczynnikami wentylacji 0,018 do 0,041, podczas gdy ten współczynnik dla pomieszczenia czeskosłowackiego wynosi 0,062. Przy tej samej mocy pożaru (prędkości wydzielania ciepła) powinno to się wiązać z lepszym dostępem powietrza, większym udziałem procesu spalania wewnątrz pomieszczenia oraz mniejszym promieniowaniem od płomieni zewnętrznych. Nie potwierdza tego jednak temperatura pomieszczenia, która w badaniach czeskosłowackich jest niższa. Zdaniem autorów na wyniki w badaniach kanadyjskich znaczący wpływ miała bardzo dobra izolacyjność materiału ściennego. W porównaniu do betonowych ścian pomieszczenia czeskosłowackiego, ocieplone ściany pomieszczenia kanadyjskiego pochłaniały mniej ciepła, a co za tym idzie zmierzono temperatury pomieszczenia były wyższe. Widać to również w wynikach obliczeniowych temperatury w pomieszczeniu, które w przypadku badań czeskosłowackich są większe niż wyniki eksperymentalne, a w przypadku badań kanadyjskich na odwrót. Niestety nie ma dostępnych danych z badania czeskosłowackiego dotyczących wielkości i temperatury płomieni zewnętrznych oraz temperatury w płaszczyźnie okna, dlatego ten aspekt nie może zostać porównywany i omówiony. Należy zwrócić również uwagę na to, że w obydwu badaniach występowały dwa różne zakresy odległości pomiarowych (4,5-10 m w czeskosłowackim i 2,4-4 w kanadyjskim). Porównując dokładność predykcji, należy też pamiętać o tym, że na wyniki pomiaru może mieć też wpływ miejsce eksperymentu (przestrzeń otwarta czy hala badawcza) ze względu na panujące w nim warunki środowiska (absorpcja promieniowania, wiatr, temperatura zewnętrzna).

Zgodnie z metodologią modelowania przedstawioną w raporcie kanadyjskim zamiast temperatury pomieszczenia, jako temperaturę prostokąta promieniującego powinno się przyjmować temperaturę płomienia w płaszczyźnie okna (lub temperaturę wyższą spośród tych dwóch). W metodzie wykorzystano także większy współczynnik emisyjności płomieni k (0,5 zamiast 0,3). Zastosowanie powyższych metod poprawia wyniki prognozy wykonywane przez FireRad oraz metodą Eurokodu do poziomu bardzo dobrej zgodności z eksperymentem.

W przypadku danych czeskosłowackich przewidywana temperatura w pomieszczeniu, obliczona zgodnie z Eurokodem, okazała się znacznie wyższa niż zmierzona, niezależnie od korekty. Jeżeli jako temperatura promieniującego prostokąta przyjęta zostanie temperatura pomieszczenia, wtedy już sama wielkość strumienia ciepła na bazie promieniującego prostokąta jest zbliżona do łącznego strumienia mierzonego. Oznacza to, że pierwsze wyzwanie w prognozowaniu strumienia ciepła polega na dokładnym prognozowaniu temperatury. W danych czeskosłowackich można zauważyć pewną anomalie dla radiometrów znajdujących się w większych odległościach od otworu okiennego (8-10 m), które wydają się znacznie zaniżać wielkość strumienia ciepła, nawet gdy uwzględnimy tylko promieniujący prostokąt. Może to być oznaką złej kalibracji lub absorpcji promieniowania przez powietrze na większych odległościach.

Kanadyjscy badacze sugerują, że udział promieniowania od zewnętrznych płomieni w odniesieniu do całkowitego strumienia ciepła wynosi 20-60% (25-44% w pożarach drewna). Me-

toda Eurokod pozwala otrzymać zbliżone wartości – 30-50% – w przypadku danych kanadyjskich. Należy przypomnieć, że wielkość udziału promieniowania od płomieni zewnętrznych była już wcześniej szacowana w badaniach eksperymentalnych. Znana badaczka brytyjska Margaret Law [2] w swojej pracy doświadczalnej przy użyciu radiometru ze specjalną osłoną ustaliła ten udział na maksymalnie 20%. W badaniu przeprowadzonym przez Law wykorzystano pomieszczenie o wymiarach 7,7 x 3,7 x 3 m ze współczynnikami wentylacji 0,022, 0,044 i 0,089 i obciążeniem ogniowym 7,5, 15,30 i 60 kg/m². Autorka eksperymentu stwierdziła, że stosowanie przegród z materiałów izolacyjnych zwiększa strumień ciepła o ok. 15%.

Ważnym pytaniem w odniesieniu do omawianych badań jest to, jakie wielkości strumienia ciepła powinny być porównywane tzn. wielkości maksymalne czy uśredniane. W przypadku obu badań nie jest jasne, jaki rodzaj danych jest ujęty w raportach – maksymalne chwilowe wartości lub uśrednione w czasie. W opinii autorów uproszczone metody powinny uwzględniać poziom uśredniony strumienia ciepła, który może zostać zastosowany do oceny zagrożenia budynków.

6. Wnioski

Najnowsze badania doświadczalne wykonane w Kanadzie wykazują, że promieniowanie ciepłe od zewnętrznych płomieni może być istotnym źródłem promieniowania ciepłego, lecz nie jest to poparte w takim samym stopniu przez badania czeskosłowackie. Zastosowanie izolacji z włókna na ścianach pomieszczenia mogło przyczynić się do powstania wyższych strumieni ciepła w ostatnim eksperymencie kanadyjskim. Kluczowym czynnikiem wpływającym na wyniki predykcji jest dokładność temperatury pomieszczenia i temperatury płomienia w płaszczyźnie otworu. W celu uzyskania najbardziej wiarygodnych wyników, jako temperaturę promieniującego prostokąta należy przyjąć wyższą z dwóch wspomnianych temperatur, a emisyjność płomieni oparzyć na współczynniku $k = 0,5$. Biorąc pod uwagę rozkład probabilistyczny zewnętrznego promieniowania do celów inżynierskich, metoda oparta na Eurokodie jest zdaniem autorów wystarczająco konserwatywna (jej wyniki są często zbliżone do pomiarów eksperymentalnych). Dla pomieszczeń o wysokim współczynniku otworów (ang. *opening factor*) promieniowanie od zewnętrznych płomieni jest znacznie niższe i oznacza to, że prostą metodę promieniującego prostokąta można uznać wtedy za wystarczającą.

Bardziej dokładne wyliczenia przestrzennych rozkładów strumienia ciepła mogą okazać się istotne dla optymalizacji projektu budowlanego. Program FireRad udostępnia wiele opcji do obliczeń strumienia ciepła w zależności od założeń i wymagań poszczególnych krajów.

Literatura

- [1] Law M., *Heat radiation from fires and building separation*, "Fire Research Technical Paper" 1963, No. 5.
- [2] Law M., *Radiation from fires in a compartment*, "Fire Research technical Paper" 1968, No. 20.
- [3] Mcguire J.H., *Fire and the spatial separation of buildings*, "Fire Technology" 1965, 1(4), 278-287
- [4] Reichel V., *Navrhování požární bezpečnosti staveb - Odstupové vzdálenosti [ZŠ 16]*, Česká státní pojišťovna, Praha 1984.
- [5] Cheng H., Hadjisophocleous G.V., *Experimental study and modeling of radiation from compartment fires to adjacent buildings*, "Fire Safety Journal" 2012, 53, 43-62.
- [6] Cheng H., *Modeling of fire spread in buildings and modeling of fire spread from the fire building to adjacent buildings*, PhD thesis, Carleton Univ., 2010.
- [7] EN 1991-1-2: Eurocode 1. Actions on Structures, Part 1-2.
- [8] Oprogramowanie Fire Engineering Platform (FEP), <http://www.fireplatform.eu>, [dostęp: 10.06.2016].

* * *

st. kpt. dr inż. Piotr Tofiło – adiunkt w Zakładzie Bezpieczeństwa Pożarowego Budynków w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Prowadzone przedmioty na studiach dziennych, zaocznych i podyplomowych: bezpieczeństwo pożarowe budynków, stosowanie narzędzi inżynierii w zakresie ochrony obiektów przed zadymieniem, stosowanie narzędzi inżynierii w zakresie oceny warunków ewakuacji.

dr hab. inż. Vladimír Mozer – prodekan Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego ds. rozwoju i współpracy międzynarodowej Uniwersytetu w Żylinie.