

## Modelowanie spalania kabli metodą FDS

Seweryn BRZOZOWSKI<sup>1</sup>, Jolanta Maria RADZISZEWSKA-WOLIŃSKA<sup>2</sup>

### Streszczenie

Przedstawiono symulacje rozprzestrzeniania się płomienia po kablach i ich wiązках umiejscowionych pionowo. Modelowanie wykonano w zakresie prac w projekcie TRANSFEU, realizowanym w projekcie 7RP UE. Artykuł obejmuje porównanie wyników badań w skali rzeczywistej, przeprowadzonych na zgodność z EN 45545-2 [2] z opracowanym modelem symulacji komputerowej z użyciem programu FDS służącym do modelowania rozwoju pożaru za pomocą numerycznej mechaniki płynów. Wykazano przydatność obliczeń numerycznych w analizie procesów spalania kabli elektrycznych.

**Słowa kluczowe:** modelowanie pożaru, ochrona przeciwpożarowa, tabor pasażerski, szybkość wydzielania ciepła, wiązka kabli

### 1. Wstęp

Środki publicznego transportu powierzchniowego (do których należy również kolej), są uznawane za stosunkowo bezpieczne. Należy jednak wziąć pod uwagę, że w przypadku zaistnienia ewentualnego pożaru, warunki dla ludzi przebywających w pojazdach ulegają gwałtownemu pogorszeniu, szczególnie z powodu dymu i jego toksycznych składników, które bardzo utrudniają ewakuację. Pod koniec XX wieku zagrożenie pożarowe w pojazdach szynowych wzrosło ze względu na zwiększone zastosowanie tworzyw sztucznych w ich budowie i wyposażeniu. Potwierdzają to przypadki pożarów, które miały miejsce w ostatnich latach w Austrii, Bułgarii i Norwegii [10, 11]. Z tego względu pomiary toksyczności produktów spalania materiałów oraz zasady ich klasyfikacji, adekwatne do warunków panujących w jadącym pojeździe, są bardzo ważne i jednocześnie bardzo trudne do opracowania. Należy pamiętać, że w pojeździe, oprócz wydzielania dymu z jego toksycznymi składnikami, rozwój pożaru charakteryzuje się również szybkością i ilością wydzielania ciepła zróznicowaną w zależności

<sup>1</sup> Magister inżynier; Instytut Kolejnictwa; email: sbrzozowski@ikolej.pl; symulacje komputerowe, badania, rysunki, tablice, współautor tekstu.

<sup>2</sup> Doktor inżynier; Instytut Kolejnictwa; e-mail: jradziszewska-wolinska@ikolej.pl; pomysł na artykuł i jego układ, współautor tekstu.

od zastosowanych materiałów oraz innych pasywnych, także aktywnych środków zabezpieczeń.

Badania uświadomiły, że pożar w jadącym pociągu jest procesem złożonym, a testy laboratoryjne przeprowadzane w różnych krajach w warunkach statycznych są bardzo zróżnicowane i dalekie od warunków rzeczywistych. Za niezbędne uznano opracowanie kompleksowej metody pomiaru i klasyfikacji toksyczności produktów spalania z uwzględnieniem inżynierii pożarowej, pozwalającej na odzwierciedlenie warunków rzeczywistych i jednocześnie uzyskanie bardziej elastycznych i ekonomicznie uzasadnionych alternatywnych rozwiązań zabezpieczeń przeciwpożarowych z wykorzystaniem innowacyjnych technologii i materiałów. Realizacja przedmiotowego zadania stanowiła cel finansowanego w 7 Ramowym Programie UE (FP7-SST-2008-RTD-1 dla Transportu Powierzchniowego) z projektu TRANSFEU (*Transport Fire Safety Engineering in the European Union*) „Inżynieria ochrony przeciwpożarowej w transporcie UE” [10, 11].

## 2. Założenia projektu TRANSFEU

Projekt TRANSFEU był realizowany od kwietnia 2009 do listopada 2012 r. przez konsorcjum składające się z 21 następujących partnerów: Belgia (UNIFE), Finlandia (VTT), Francja (ALMA, ALSTOM, LNE – koordynator, RATP, SNCF), Niemcy (CENTC256, CUR, DB, SIEMENS, UoW), Włochy (AB, LSFIRE, TRENT), Polska (Instytut Kolejnictwa), Hiszpania (CIDEMCO), Szwecja (SP), Szwajcaria (BT), Wielka Brytania (BW, BRE). Głównymi celami projektu były następujące zadania:

- rozwinięcie metody FSE i jej adaptacja na potrzeby środków transportu powierzchniowego z wykorzystaniem modelowania numerycznego oraz innowacyjnej metody pomiaru toksyczności,
- udoskonalenie zasad klasyfikacji własności pożarowych materiałów z uwzględnieniem rzeczywistego efektu toksyczności przy naukowym podejściu z zastosowaniem FSE,
- wprowadzenie wyników projektu do normalizacji europejskiej i szerokie rozpowszechnienie wyników projektu w obszarze wszystkich środków transportu powierzchniowego.

Projekt był realizowany w siedmiu Grupach Roboczych (WP1 do WP7). W grupie roboczej WP5 – „Rozwój metod numerycznych do szacowania czasu bezpiecznej ewakuacji oraz dobór narzędzia pomocnego w projektowaniu pociągów” w Instytucie Kolejnictwa przeprowadzono symulacje spalania kabli elektrycznych, które stanowią główny temat niniejszego artykułu.

Właściwości palne przewodów i kabli są istotnym parametrem mającym wpływ na określenie bezpieczeństwa pożarowego instalacji elektrycznej. Pod-

trzymanie funkcji elektrycznych wiązek kabli, dopuszczalny czas palenia, szybkość rozprzestrzeniania się ognia, właściwości dymowe oraz toksyczne, stanowią podstawowe wymagania, które muszą spełniać przewody w zakresie ochrony przeciwpożarowej [13]. Zakres prac obejmował zaproponowanie modelu symulacji komputerowej rozprzestrzeniania się płomienia z użyciem programu FDS (ang. *Fire Dynamic Simulator*) oraz porównanie wyników symulacji z badaniami laboratoryjnymi w celu ich walidacji.

### 3. Opis działania programu FDS

Modelowanie to matematyczna metoda przybliżenia zjawisk zachodzących w przyrodzie. Jednym z nich jest pożar, powszechnie nazywany niekontrolowanym procesem spalania w miejscu do tego nie przeznaczonym. Metoda opisuje uproszczony obraz procesów fizykochemicznych zachodzących podczas jego trwania za pomocą modeli matematycznych i wykorzystuje komputerowy aparat do ich analizy.

Program FDS jest jednym z programów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) opisujących zjawiska pożaru w określonej przez użytkownika przestrzeni na podstawie modeli turbulencji oraz uśrednionych równań Reynoldsa (zasada zachowania pędu, masy, energii) [1]. FDS został stworzony przez NIST (*National Institute of Standards and Technology*, USA) i jest dalej rozwijany wspólnie z VTT. Program pozwala na symulację rozprzestrzeniania się pożaru w przyjętym scenariuszu. Rozwój pożaru zdefiniowany jest za pomocą parametrów zmiennych w czasie takich, jak: strumień energii cieplnej, temperatura gazów pożarowych w pomieszczeniu, kubatura produktów spalania i rozkładu termicznego, prędkość przepływu oraz gęstość optyczna dymu [12].

W zależności od celu symulacji, do wyboru mamy dwa procesy obliczeniowe. Pierwszy z nich, ustawiony jako domyślny, jest symulacją za pomocą tzw. dużych wirów LES (ang. *Large Eddy Simulation*). Model spełnia swoją rolę w przypadku wystąpienia wirów o wielkości podobnej do siatki obliczeniowej. Zaletą tej metody jest możliwość symulacji przepływu gorących gazów pożarowych i dymu w dużych i złożonych przestrzeniach ograniczonych. Drugim, możliwym mechanizmem obliczeniowym procesów spalania jest zastosowanie bezpośrednich równań Naviera-Stokesa (Metoda DNS – *Direct Numerical Simulation*). Metoda ta nadaje się do obliczania przepływów w małej skali geometrycznej z zastosowaniem odpowiednio gęstej siatki obliczeniowej [1].

## 4. Opis metod symulacji z użyciem programu FDS

### 4.1. Symulacja z zastosowaniem Metody I – Źródło przypisane

Zasadą tej metody jest zamodelowanie określonej dla materiału wartości szybkości wydzielania ciepła, przypadającej na jednostkę powierzchni, z którego zostało ono uwolnione podczas reakcji egzotermicznej. W rezultacie, użytkownik FDS kontroluje źródło ognia i jego rozprzestrzenianie (np. jaki materiał będzie brał udział w procesie spalania oraz z jaką intensywnością). Pierwszym etapem jest zdefiniowanie skali danych wejściowych modelu produktu. Danymi wejściowymi, których program potrzebuje (tabl. 1) są według przyjętych w projekcie TRANSFEU (materiał grupy roboczej WP5, niepublikowany, Camillo A. i inni):

- szybkość wydzielania ciepła ( $HRR$ ) wyrażona w  $\text{kW/m}^2$ , określana zgodnie z ISO 5660-1 [5] w teście przeprowadzonym na kalorymtrze stożkowym, a wyniki przedstawione za pomocą krzywej zmian  $HRR$  w czasie; dodatkowo, podlegający spalaniu obiekt może składać się z kilku materiałów składowych,
- przybliżona powierzchnia spalonej części próbki określona w wyniku badań laboratoryjnych.

Tablica 1

Dane wejściowe dla Metody I FDS

Parametr	Symbol	Jednostka
Szybkość wydzielania ciepła z jednostki powierzchni	HRRPUA*	$\text{kW/m}^2$
Powierzchnia spalonego materiału	S	$\text{m}^2$

\*Heat Released Rate Per Unit Area

W tej metodzie nie jest brany pod uwagę czas, przez który strumień natężenia ciepła oddziałuje na produkt w celu jego zapalenia. To użytkownik z góry zakłada wartość szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni produktu, który ma ulec spaleni, a właściwości termiczne, tj.(przewodnictwo cieplne, pojemność cieplna, emisyjność) nie mają w tym przypadku znaczenia. Ponadto, użytkownik FDS powinien oszacować obszar spalonego materiału i czas jego zapłonu, a następnie zastosować krzywą szybkości wydzielania ciepła, uzyskaną w toku przeprowadzonych badań na kalorymtrze stożkowym (materiał grupy roboczej WP5, niepublikowany, Camillo A. i inni). W celu porównania analizy numerycznej i wyników eksperymentalnych jest ważne, aby zrozumieć zalety i ograniczenia stosowania Metody I.

- **Zalety:** Metoda nie wymaga wielkiej ilości danych wejściowych oraz dalszego rozwoju obecnych modeli obliczeniowych. Niezbędne dane wejściowe mogą być uzyskane z konwencjonalnych badań określonych w CEN TS 45545-2 [2],

- **Wady:** Szybkość uwalniania ciepła i powierzchnia spalonego materiału są ustalane przez użytkownika i tak naprawdę, rozprzestrzenianie ognia jest modelowane bezpośrednio przez operatora programu. Metoda oferuje ograniczoną zdolność do przewidywania zachowania się źródła ognia. Ze względu na jego prostotę i małą ilość danych wejściowych, czas obliczeń jest krótki – kilka godzin (materiał grupy roboczej WP5, niepublikowany, Camillo A. i inni).

## 4.2. Symulacja z zastosowaniem Metody II – Piroliza narzucona

W przedmiotowej metodzie, materiał jest podzielony na kilka lub kilkanaście komórek objętościowych, stanowiących dalej siatkę obliczeniową. Rozmiar oczek zależy od kubatury przyjętej siatki i odpowiedniego stosunku rozmiaru oczka, np. do długości boków opisywanego elementu. Dla każdego z oczek siatki przeprowadzany jest bilans cieplny w celu obliczenia propagacji płomienia. Właściwości materiału, tj. (gęstość, przewodność cieplna, pojemność cieplna) oraz temperatura zapłonu są określane dla każdego elementu siatki. Pierwszym krokiem jest doprowadzenie ciepła do każdej komórki w celu podgrzania materiału i osiągnięcia jego temperatury zapłonu (materiał grupy roboczej, niepublikowany, Camillo A. i inni).

Następnym etapem jest zastosowanie dla danej powierzchni materiału, stałej zalecanej szybkości uwalniania ciepła otrzymanej według ISO 5660-1 [5] wyrażonej w  $\text{kW/m}^2$ . Wskutek czego rozpoczyna się proces propagacji płomienia sterowany za pomocą bilansu cieplnego.

- **Zalety:** dane wejściowe (tabl. 2) mogą pochodzić z konwencjonalnych badań określonych w CEN TS 45545-2 oraz dodatkowych badań z oznaczenia właściwości termicznych materiału z zastosowaniem analizy termogravimetrycznej lub kalorymetrii skaningowej. Metoda ta pozwala na określenie rozprzestrzeniania się płomienia dla materiału składającego się nawet z kilku warstw. Jedną z danych, którą można otrzymać to całkowita ilość ciepła wydzielonego podczas spalania danego materiału.
- **Wady:** Metoda nie uwzględnia zmian szybkości uwalniania ciepła w funkcji strumienia cieplnego. Wówczas gdy materiał osiągnie temperaturę zapłonu rozpoczyna się zdefiniowana szybkość uwalniania ciepła ( $HRR = f(t)$ ).
- **Zastosowanie:** Metoda może być stosowana do celów technicznych, a czas obliczeń może sięgać nawet kilku dni (materiał grupy roboczej WP5, niepublikowany, Camillo A. i inni).

Tablica 2

## Dane wejściowe dla Metody II FDS

Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka
1	Szybkość wydzielania ciepła z jednostki powierzchni	HRRPUA	kW/m <sup>2</sup>
2	Powierzchnia spalonego materiału	$S$	m <sup>2</sup>
3	Temperatura zapłonu	$T_{ig}$	°C
4	Gęstość	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
5	Ciepło właściwe	$c(T)$	kJ / (kg·K)
6	Przewodność cieplna	$k(T)$	W / (m·K)
7	Emisyjność	$\varepsilon$	–

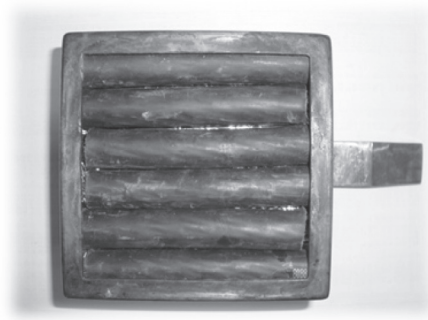
## 5. Oznaczenie wartości HRR dla kabli według ISO 5660-1

W celu otrzymania krzywej szybkości wydzielania ciepła, przeprowadzono badania na kalorymetrze stożkowym według ISO 5660-1 [5]. W czasie testu, spalaniu ulega próbka materiału poddana działaniu promiennika stożkowego o określonej mocy w zakresie do 100 kW/m<sup>2</sup>, z zastosowaniem (lub nie) palnika pilotowego łuku wysokiego napięcia. Metoda ta wykorzystuje zasadę kalymetrii tlenowej (każdy 1 kg tlenu zużyty w procesie spalania powoduje wydzielenie 13,1 MJ ciepła) i dzięki precyzyjnym pomiarom koncentracji tlenu oraz prędkości przepływu spalin w kanale wylotowym wyliczana jest intensywność wydzielania ciepła z jednostki powierzchni –  $HRR$  [kW/m<sup>2</sup>]. Podczas testu są rejestrowane:

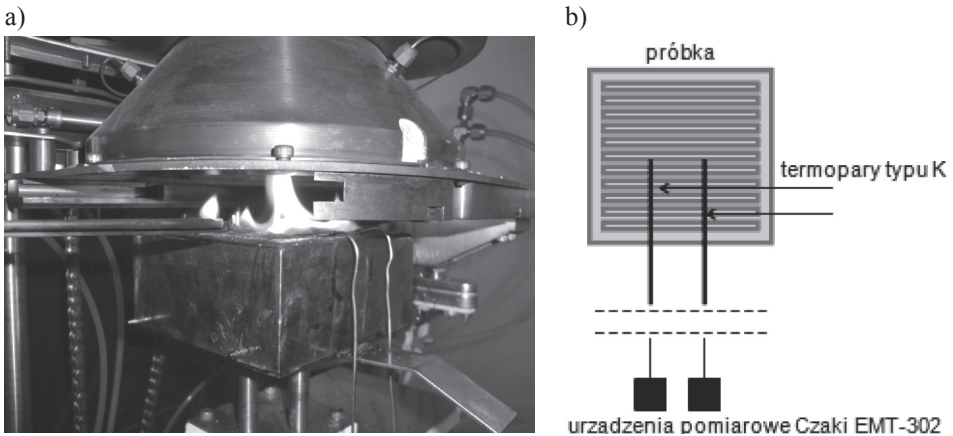
- $HRR_{180}$  [kW/m<sup>2</sup>] – średnia szybkość wydzielania ciepła w ciągu pierwszych 180 s spalania,
- $HRR_{300}$  [kW/m<sup>2</sup>] – średnia szybkość wydzielania ciepła w ciągu pierwszych 300 s spalania,
- $HRR_{max}$  [kW/m<sup>2</sup>] – maksymalna wartość szybkości wydzielania ciepła,
- $HRR_{sr}$  [kW/m<sup>2</sup>] – średnia wartość szybkości wydzielania ciepła,
- $THR$  [MJ/m<sup>2</sup>] – całkowita ilość wydzielonego ciepła,
- $HOC$  [MJ/kg] – efektywne ciepło spalania,
- $t_{ig}$  [s] – czas zapłonu próbki,
- $MLR$  [g/m·s] – ubytek masy w czasie.

Testy wykonano na czterech rodzajach kabli, wytypowanych w projekcie TRANSFEU. Próbkę badawczą stanowiły ściśle dopasowane odcinki przewodów elektrycznych szczelnie wypełniających ramkę o wymiarach 100 mm x 100 mm (rys. 1). Badania wykonano przy natężeniu promieniowania 50 kW/m<sup>2</sup> z włączonym palnikiem pilotowym. Dodatkowo, w celu otrzymania przybliżonej tempera-

tury zapłonu kabli, na powierzchni próbki umieszczano dwie termopary typu K, podłączone do rejestratora temperatury Czaki EMT-302 (rys. 2).

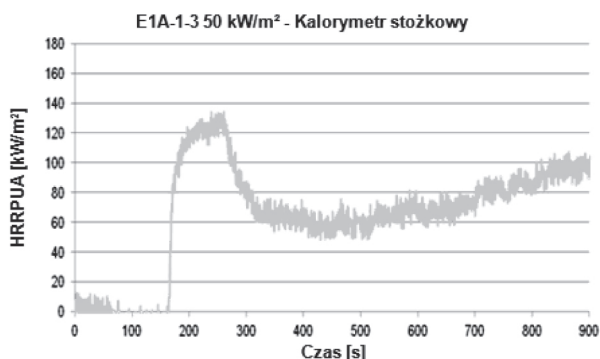


Rys. 1. Odcinki przewodu elektrycznego E1A-1-3 umieszczone w ramce badawczej [fot. S. Brzozowski]



Rys. 2. Test na kalorymetrze stożkowym: a) stanowisko do badań [fot. S. Brzozowski], b) schemat pomiaru temperatury

Rysunek 3 przedstawia przykładową krzywą zmian szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni w czasie, stanowiącą średnią z trzech powtórzeń wykonanych dla przewodu E1A-1-3. Natomiast w tabelicy 3 przedstawiono charakterystykę techniczną testowanych kabli oraz wyniki badań na kalorymetrze stożkowym łącznie z zarejestrowaną temperaturą zapłonu. Z uwagi na fakt, że pomiar temperatury mógł być obarczony błędem wynikającym z wpływu promiennika oraz niedokładnego przylegania termopar do powierzchni izolacji przewodów, przyjęto również dodatkowe temperatury zapłonu, w ostatniej kolumnie tabelicy 3, w celu porównania ich wpływu na wyniki symulacji.



Rys. 3. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-3

Tablica 3

## Zestawienie wyników badań kabli na kalorymetrze stożkowym

Lp.	Oznaczenie kabla	Średnica zewnętrzna kabla [mm]	Masa izolacji/ masa miedzi o długości 10 cm [g]	$HRR_{max}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Temperatura zaplonu [°C]	Dodatkowe temperatury zaplonu [°C]
1	E1A-1-3	15,5	16/58,8	138	415	350 395
2	E1A-1-5	3,2	0,9/1,2	240	405	350 395
3	E1A-1-8	17	11/98,6	148	380	330 350
4	E1A-2-2	8,2	4,5/9,3	345	360	300 350

## 6. Symulacja spalania kabli według ISO 5660-1

### 6.1. Założenia dla Metody I

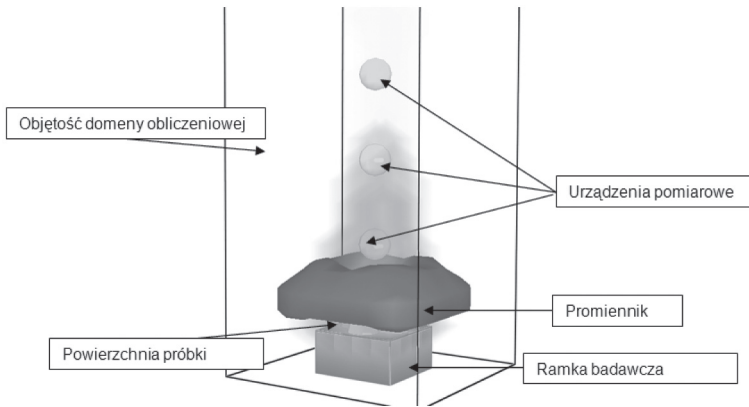
W celu przeprowadzenia symulacji spalania próbki kabli według ISO 5660-1 [5], założono wykorzystanie:

- modelu kalorymetru stożkowego opracowanego przez LNE (*Laboratoire National de métrologie et d'essais*, Paryż, Francja) w projekcie TRANSFEU, przedstawionego na rysunku 14,
- wartości  $HRR_{PUA}$  (ang. *Heat Release Rate per Unit Area*) [kW/m<sup>2</sup>] oznaczonych według ISO 5660-1 [5] (jako  $HRR_{max}$ ) przedstawionych w tablicy 3.

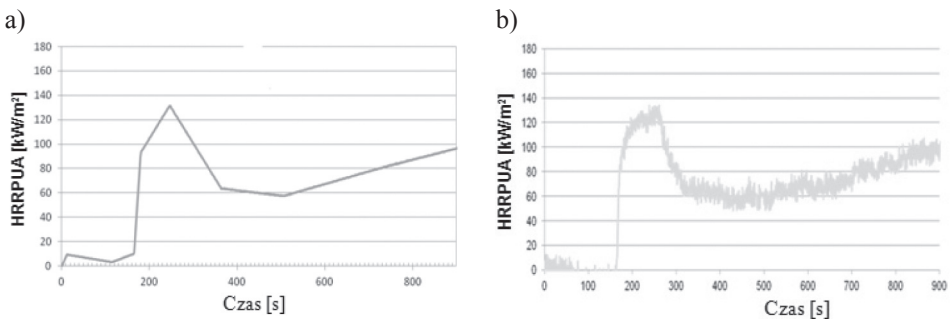


## 6.2. Wyniki symulacji Metodą I

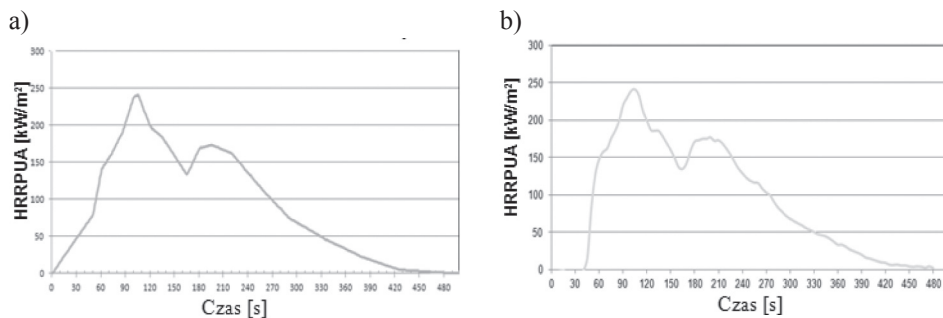
Rysunek 4 stanowi wizualizację przeprowadzonej symulacji Metodą I. Na rysunkach 5–8 przedstawiono wykresy rozkładu szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni próbek poszczególnych kabli, które otrzymano w wyniku symulacji oraz uzyskane w testach na kalorymetrze stożkowym. Jak z nich wynika, krzywe obliczeniowe dla wszystkich typów kabli, zgodnie z ideą tej metody, odzwierciedlają wyniki badań laboratoryjnych.



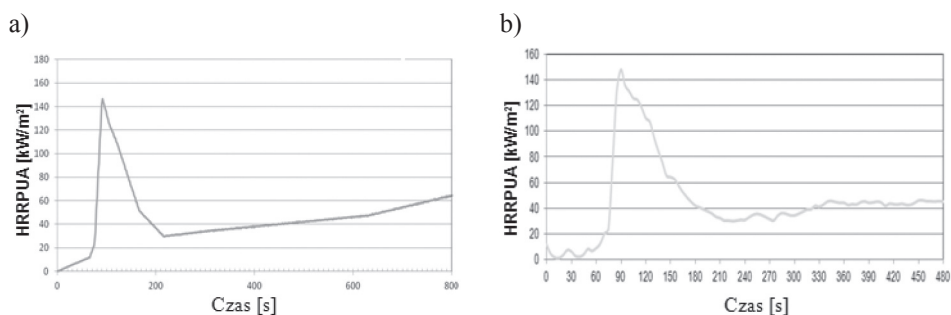
Rys. 4. Symulacja spalania według ISO 5660-1 [5]



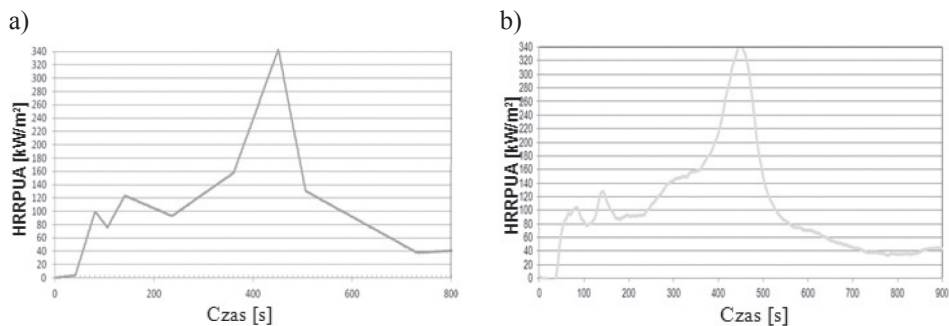
Rys. 5. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-3 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody I, b) badań laboratoryjnych



Rys. 6. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-5 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody I, b) badań laboratoryjnych



Rys. 7. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-8 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody I, b) badań laboratoryjnych



Rys. 8. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-2-2 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody I, b) badań laboratoryjnych

### 6.3. Założenia dla Metody II

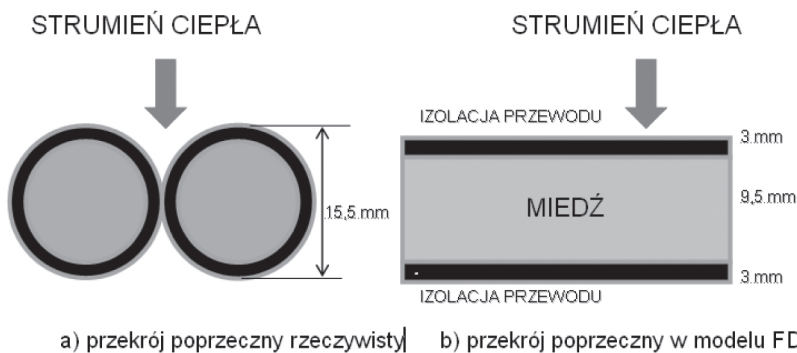
Metoda II polega na zastosowaniu parametrów z Metody I oraz dodatkowych właściwości dla poszczególnych materiałów składowych opisanych w punkcie 4.2

niniejszego artykułu. W tabelicy 4 umieszczono dane wejściowe przyjęte w przeprowadzonych obliczeniach, natomiast na rysunku 9 przedstawiono rzeczywisty poprzeczny przekrój próbek przewodów umieszczonych w ramce w badaniu według ISO 5660-1 [5] oraz schemat uproszczonego przekroju zastosowanego w procesie symulacji.

Tabela 4

**Dane wejściowe dla symulacji spalania na kalorymetrze stożkowym  
Metodą II**

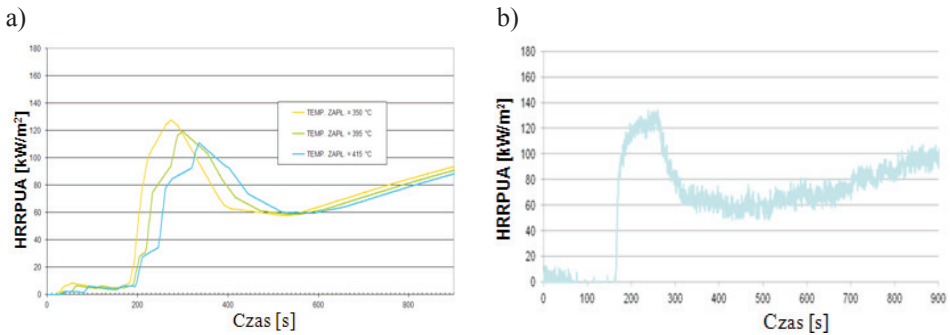
Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka	Miedź		Izolacja kabla	
				Wartość	Źródło	Wartość	Źródło
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Szybkość wydzielenia ciepła z jednostki powierzchni	$HRRPUA$	$\text{kW/m}^2$	–	–	Adekwatna dla każdego kabla	Według tabelicy 3
2	Powierzchnia spalonego materiału	S	$\text{m}^2$	–	–	Adekwatna dla każdego kabla	Badania laboratoryjne
3	Temperatura zapłonu	$T_{ig}$	$^{\circ}\text{C}$	–	–	Adekwatna dla każdego kabla	Według tabelicy 3
4	Gęstość	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	8940,0	[4]	920,0	[2, 4]
5	Ciepło właściwe	$c(T)$	$\text{kJ / kg}\cdot\text{K}$	0,3	[2, 4]	1,9	[2, 4]
6	Przewodność cieplna	$k(T)$	$\text{W / m}\cdot\text{K}$	387,0	[2, 4]	0,3	[2, 4]
7	Emisyjność	$\varepsilon$	–	–	–	–	–



Rys. 9. Przekrój poprzeczny przewodów a) rzeczywisty, b) przyjęty w modelu

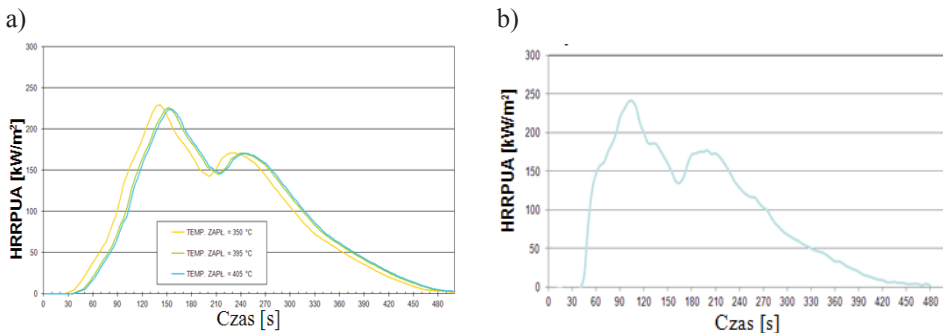
## 6.4. Wyniki symulacji Metodą II

Na rysunkach 10–13 przedstawiono rozkład szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni analizowanych kabli, otrzymany w wyniku symulacji FDS Metodą II. Obliczenia przeprowadzono dla temperatur zapłonu określonych eksperymentalnie oraz dla dodatkowo przyjętych (patrz tabl. 3). Na rysunkach umieszczono również średnie przebiegi  $HRR$  uzyskane podczas badań w kalorymetrze stożkowym. Jak wynika z wykresów, dla trzech kabli otrzymano duże podobieństwo wyników (rys. 10–12), przy czym największa zbieżność między rozkładem  $HRR$  doświadczalnym i obliczeniowym wystąpiła dla niższych temperatur niż otrzymane na kalorymetrze stożkowym. Zauważalne różnice w przebiegu krzywych, które wystąpiły dla kabla E1A-1-8, najprawdopodobniej wynikają z odmiennego składu (dane zastrzeżone przez producenta) jego polimerowej izolacji odbiegającej znacznie parametrami od danych teoretycznych przyjętych do obliczeń (patrz tabl. 4).



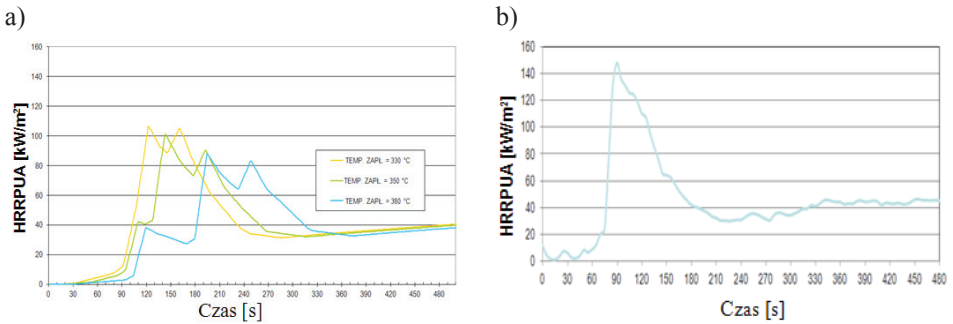
Rys. 10. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-3 otrzymany w wyniku:

a) symulacji z użyciem Metody II, b) badań laboratoryjnych

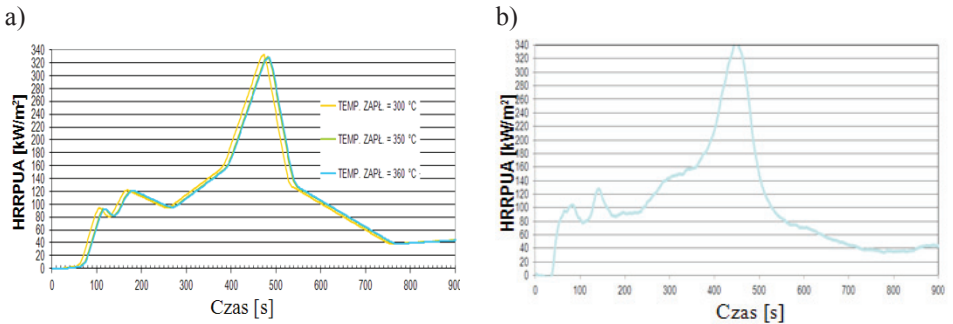


Rys. 11. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-5 otrzymany w wyniku:

a) symulacji z użyciem Metody II, b) badań laboratoryjnych



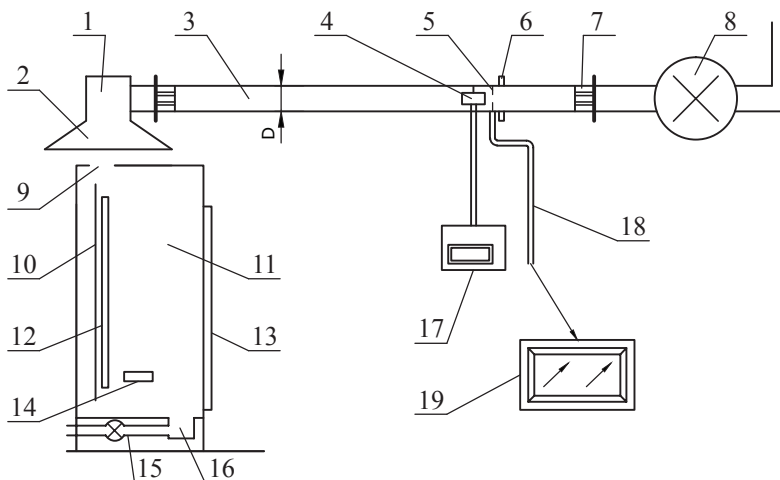
Rys. 12. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-1-8 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody II, b) badań laboratoryjnych



Rys. 13. Rozkład HRRPUA w czasie dla przewodu E1A-2 otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem Metody II, b) badań laboratoryjnych

## 7. Symulacja rozprzestrzeniania płomienia po wiązce kabli ułożonych pionowo

Badanie rozprzestrzeniania się płomienia po wiązce kabli według EN 60332-3 [3] jest jednym z testów klasyfikacyjnych kabli przeznaczonych do taboru szynowego. Badanie to przeprowadza się w komorze (rys. 14) o wysokości 4 m, głębokości 1m i szerokości 2 m. Odcinki kabli o długości 3,5 m (co ma lepiej odzwierciedlać naturalne warunki w porównaniu z innymi testami laboratoryjnymi wykonywanymi na próbkach o niewielkich rozmiarach) umieszcza się pionowo, mocując je do specjalnych drabin (zależnych od rodzaju badania).



Rys. 14. Schemat stanowiska do badań według PN-EN 50399 [9]: 1) komora okapu, 2) okap, 3) kanał wyciągowy, 4) sonda dwukierunkowa, 5) sonda próbkująca, 6) sprzęt do pomiaru dymotwórczości, 7) łopatkę kierującą, 8) wentylator, 9) wylot spalin, 10) drabina, 11) komora badawcza, 12) próbki kabli, 13) drzwi, 14) palnik, 15) kanał wlotowy świeżego powietrza, 16) kufer zbiorczy, 17) czujnik ciśnienia, 18) linia próbkująca, 19) analizator tlenu i dwutlenku węgla

Źródło zapłonu stanowi palnik (lub zestaw dwóch palników) zasilany propanem. W trakcie badania rejestruje się:

- szybkość wydzielania ciepła w funkcji czasu,
- szybkość wydzielania dymu w funkcji czasu,
- występowanie opadania oraz czas trwania palących się cząstek lub kropli.

Po zakończeniu testu dodatkowo określa się spaloną długość próbek, czyli zasięg płomienia ( $FS$ ) oraz wylicza się następujące parametry:

- $HRR_{av}(t)$  – maksymalna wartość szybkości wydzielania ciepła,
- $SPR_{av}(t)$  – maksymalna szybkość wydzielania dymu,
- $THR_{1200}$  – całkowita ilość wydzielonego ciepła,
- $TSP_{1200}$  – całkowita ilość wydzielonego dymu,
- $FIGRA$  [W/s] – maksymalna wartość współczynnika  $HRR_{av}(t) / (t-t_b)$ , gdzie:  $t_b$  – czas zapłonu palnika.

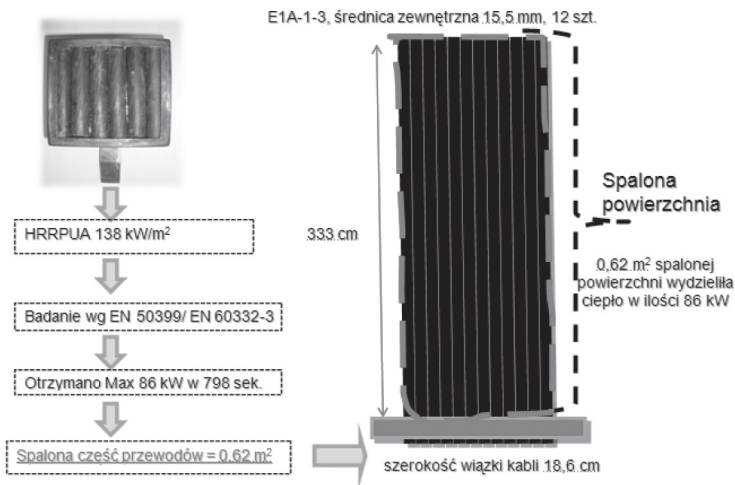
Symulacje rozprzestrzeniania się płomienia po wiązce kabli, na podstawie EN 60332-3 [3], z uwagi na bardziej skomplikowany przebieg procesu związany z transportem ciepła i otrzymania temperatury zapłonu przeprowadzono tylko z zastosowaniem Metody I.

## 7.1. Założenia dla Metody I

Jako zadanie symulacji założono numeryczne odwzorowanie procesu badawczego według normy EN 60332-3 [3] wykonanego w projekcie TRANSFEU w LSF (L.S. Fire Testing Institute S.R.L, Włochy). W tym celu przyjęto następujące dane wejściowe:

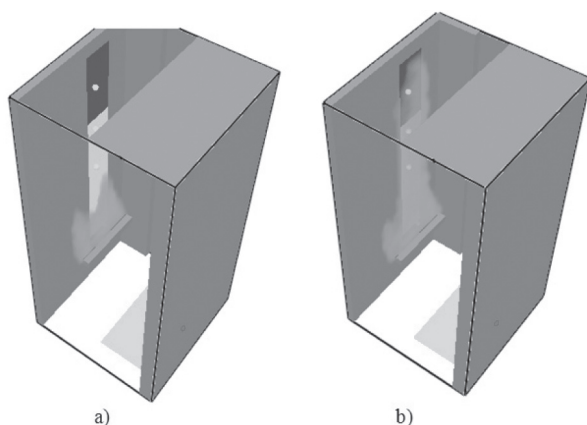
- rozdzielczość siatki obliczeniowej: od 5 cm do 10 cm,
- komora badawcza o wymiarach: szerokość: 2 m, głębokość 1 m, wysokość: 4 m [3],
- długość wiązki kabli: 3,5 m,
- ilość powietrza wtłaczanego do komory:  $(5000 \pm 500)$  l/min,
- moc palnika: 20,5 kW przez 20 min [3],
- $HRR_{PUA}$  (kW/m<sup>2</sup>) dla poszczególnych kabli według tablicy 3.

Na rysunku 15 przedstawiono tok postępowania przyjęty w procesie modelowania. Znając maksymalną wartość szybkości wydzielania ciepła z jednostki powierzchni  $HRR$  kW/m<sup>2</sup> dla poszczególnych kabli otrzymanych na podstawie przeprowadzonych badań według ISO 5660-1 [5] oraz najwyższej wartości wydzielanego ciepła osiągniętej w określonym czasie badania  $HR_{max}$  kW, zgodnie z EN 60332-3 [3], otrzymano przybliżoną powierzchnię spalonych części przewodów elektrycznych. Dla przewodu E1A-1-3 wyniosła ona 0,62 m<sup>2</sup>. Pozwoliło to na określenie spalonej długości kabli, która wynosi 333 cm dla E1A-1-3, przy uwzględnieniu ich liczby w wiązce (12 szt.) oraz średnicy (15,5 mm) i uproszczeniu według rysunku 9, polegającego na tym, że są one ułożone ściśle w prostokącie o szerokości 18,6 cm.

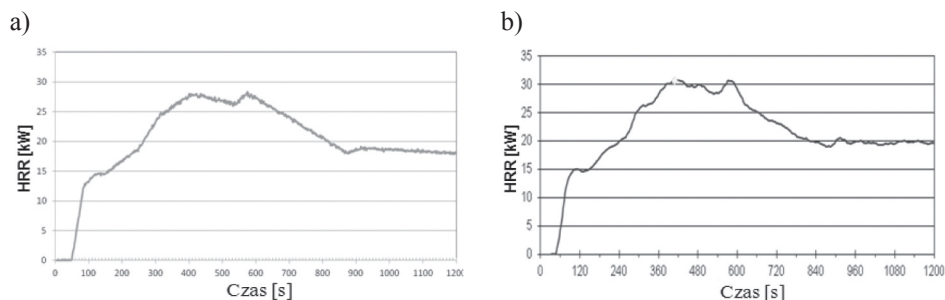


Rys. 15. Sposób zamodelowania wiązki kabli z zastosowaniem Metody I

Za pomocą Metody I zasymulowano rozkład szybkości wydzielania ciepła ( $HRR$ ) z wiązki kabli zamocowanych pionowo. Ta metoda pozwala na dowolne modelowanie rozprzestrzeniania płomieni po wiązce przewodów. Przykładową symulację wykonano dla wiązki kabli E1A-1-8, dla których w badaniu według normy EN 60332-3 wystąpiło niecałkowite spalenie przewodów, czyli wygaszenie płomieni przed osiągnięciem górnego końca kabli. Rysunek 16 przedstawia model komory badawczej z płonąącą wiązką kabli E1A-1-8 w dwóch punktach czasowych, natomiast na rysunku 17 zaprezentowano przebiegi  $HRR$  w czasie dla wymienionej wiązki kabli, uzyskane w wyniku symulacji oraz w testach laboratoryjnych według normy EN 60332-3 [3]. Obie krzywe wykazują dużą zbieżność.



Rys. 16. Model komory w trakcie badania: a) 40 sekund testu, b) 400 sekund testu



Rys. 17. Rozkład  $HRR$  w czasie dla wiązki kabli E1A-1-8, otrzymany w wyniku:  
a) symulacji z użyciem metody I, b) badań laboratoryjnych



## 8. Podsumowanie i wnioski

Symulacje procesów spalania, a przede wszystkim pożarów przy użyciu metody CFD, są coraz powszechniej stosowanym narzędziem w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

Wyniki symulacji rozprzestrzeniania się płomienia po kablach elektrycznych Metodą I, wykazują znaczną powtarzalność i mogą być stosowane w celu porównania ich z wynikami otrzymanymi w badaniach w skali naturalnej. Przeprowadzone symulacje potwierdziły, że program FDS pozwala na odwzorowanie dowolnego procesu spalania przy wprowadzeniu stosunkowo niewielkiej liczby danych wejściowych (literaturowych oraz doświadczalnych).

Wyniki symulacji Metodą II, w dużym stopniu zależą od operatora i dokładności przyjętych przez niego danych dla materiałów oraz stopnia uszczegółowienia modelu i rozdzielczości siatki obliczeniowej. Bardzo ważne jest, aby takie symulacje wykonywały osoby o odpowiednim doświadczeniu z zachowaniem zasad pełnej rzetelności i etyki badacza. Pomimo konieczności stosowania pewnych uproszczeń, w wielu przypadkach modelowanie komputerowe staje się jedyną możliwością zdecydowanie ograniczającą ich czas i koszty oraz pozwalającą na uzyskanie rozwiązania lub kierunku dalszych poszukiwań. Modelowanie jest też bardzo przydatną walidacją prowadzonych badań laboratoryjnych.

## Bibliografia

1. Chybowski R., Konecki M., Tuśnio N.: *Wykorzystanie programu komputerowego FDS do modelowania pożaru w tunelu kablowym*, Zeszyty Naukowe SGSP, nr 39.
2. EN 45545-2:2012, *Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components*.
3. EN 60332-3-10, *Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 3-10: Test for vertical flame spread of vertically-mounted bunched wires or cables – Apparatus*.
4. Hietaniemi J., Hostikka S., & Vaari. J: *FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data*, Espoo, 2004.
5. ISO 5660-1:2002 *Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*.
6. Janowska G., Przygocki W., Włochowicz A.: *Palność polimerów i materiałów polimerowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007.
7. McGrattan K, Hostikka S., Floyd Jason: *Fire dynamic simulator (Version 5) – User’s Guide*, NIST special publication 1019-5, 09/2009.
8. Milczarek D., Radziszewska-Wolińska J., Zienkiewicz-Gałąj B., *Plastics Development In Rolling Stock*, INMAT 2005, s. 123–132, CTO, AKWILON, Gdańsk, 2005.
9. PN-EN 50399:2011, *Wspólne metody badania palności przewodów i kabli – Pomiar wydzielania ciepła i wytwarzania dymu przez kable podczas sprawdzania rozprzestrzeniania się płomienia – Aparatura probiercza, procedury, wyniki*.
10. Radziszewska-Wolińska J.: *Rozwój bezpieczeństwa pożarowego w Polsce i Europie*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 153, s. 83–91, IK, Warszawa, 2011.
11. Radziszewska-Wolińska J.: *Transport fire safety engineering in the European Union – project TRANSFEU*, Transport Problems, Tom 6 Zeszyt 4, s. 35–40, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011.
12. Smardz P., Paliszek-Saładyga. J.: *Zalecenia dotyczące prawidłowego stosowania modelu CFD w symulacjach pożarowych dla programu Fire Dynamics Simulator*.
13. Sosnowski I.: *Metody badań palności kabli*, W akcji, 4/2009.

## Modelling of cables combustion using FDS

### Summary

Presents simulations of the flame spread on cables and bundles located vertically. Modelling work done in the TRANSFEU Project realized within the 7FW EU. Article includes a comparison of the results of research carried out on a Real scale according to EN 45545-2 [2] with a computer simulation model developed using FDS software for modelling fire development by computational fluid dynamics. Demonstrated the usefulness of numerical analysis of combustion on electric cables.

**Keywords:** fire modelling, fire protection, passenger rolling stock, heat release rate, bundle cables

## Моделирование сгорания кабелей по методу FDS

### Резюме

Представлены имитации распространения пламени по кабелям и их пучкам, расположенным вертикально. Моделирование проведено в пределах работ по проекту TRANSFEU, выполняемому в рамках седьмой общей программы ЕС. В статье сопоставлены результаты испытаний, проведённых в реальном масштабе по соответствию требованиям EN 45545-2 [2], с разработанной компьютерной имитационной моделью, применяющей программу FDS, предназначенную для моделирования распространения огня при помощи цифровой гидромеханики. Доказана полезность цифровых вычислений при анализе процессов сгорания электрических кабелей.

**Ключевые слова:** моделирование пожара, противопожарная защита, пассажирский подвижной состав, быстрота тепловыделения, пучок кабелей