

dr inż. **Rafał POROWSKI**<sup>1,2</sup>  
inż. **Piotr LESIAK**<sup>1</sup>  
mgr inż. **Wojciech RUDY**<sup>3</sup>  
mgr **Martyna STRZYŻEWSKA**<sup>1</sup>

## ZJAWISKO CIĄGU WSTECZNEGO – BACKDRAFT

### The backdraft phenomenon

#### Streszczenie

Zjawisko ciągu wstecznego (ang. *backdraft*) jest zjawiskiem stosunkowo słabo poznanym i nadal badanym przez wiele ośrodków naukowych na świecie. Aby wystąpił backdraft, pożar musi mieć miejsce w pomieszczeniu słabo wentylowanym i być rozciągnięty w czasie. Zjawisko to zachodzi, gdy w powyższych warunkach pożar zużyje większość tlenu, przygaśnie i w pomieszczeniu zostanie utworzony otwór np. poprzez otwarcie drzwi czy wybitcie okna. W otworze utworzą się dwa grawitacyjne strumienie o przeciwnych kierunkach ruchu. Pierwszy z nich – górny – to wypływający strumień gorących gazów pożarowych, drugi – dolny – to dopływający strumień świeżego powietrza. Gdy świeże powietrze dotrze do źródła zapłonu (najczęściej jest to początkowe miejsce pożaru), następuje zapłon i spalanie wytworzonej mieszaniny. Gwałtowność i długotrwałość procesu zależy od ilości wytworzonej mieszaniny w granicach palności i może jej towarzyszyć kula ognia. Pierwsza wzmianka o backdraft wraz z próbą wyjaśnienia zjawiska pojawiła się w 1914 r. Backdraft wyjaśniono jako „zapłon dymu lub sadzy”. Do lat 70. praktycznie nie było żadnych badań ukierunkowanych na wyjaśnienie tego zjawiska. Od lat 80. do chwili obecnej obserwowane jest wyraźne zainteresowanie badaniami eksperymentalnymi nad backdraft wraz z próbami określenia warunków granicznych do jego zaistnienia. Niewątpliwie przyczyniły się do tego pożary z backdraft, podczas których niestety zginęli strażacy. Badane są różne materiały palne: ciała stałe, ciecze i gazy. W zależności od badanego materiału minimalne warunki do backdraft zmieniają się od 2,5 do 10% udziału objętościowego paliwa w objętości. W ostatnim 15-leciu poza zainteresowaniem badaniami eksperymentalnymi obserwuje się wyraźny wzrost wykorzystania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych do symulacji pożaru i backdraft. Ciągłe doskonałe modele obliczeniowe wraz z coraz szybszymi komputerami są w stanie odtworzyć skutki backdraft na ekranie domowego komputera.

#### Summary

Backdraft is not a very well known phenomenon and is still undergoing research by many science and research centres across the world. Backdraft takes place in poorly ventilated confinements and develops over an extended timescale. It occurs when the fire in a room has consumed most of the oxygen, partly burned itself out and a void is created within e.g. by opening a door or breaking a glass window. Two gravitational streams are created, each pulling in the opposite direction. The first, at the upper level, will consist of escaping hot gasses from the fire. The second, at lower level, will be incoming fresh air. When fresh air reaches the source of ignition (more often it is the starting point of the fire) the new mixture will ignite and burn. The ferocity and duration of the process depends on volume of the new mixture within the flammable range and it may be accompanied by a fireball. The first mention of backdraft, accompanied by an attempt to explain the phenomenon, appeared in 1914. Backdraft was explained as the “ignition of smoke and soot”. Until the 1970’s there was practically no research undertaken to explain this phenomenon. From the 1980’s until now one can see a clear interest in experimental research of backdraft, accompanied by tests to determine conditional parameters for it to occur. Undoubtedly, backdraft fires contributed to the deaths of fire fighters. Experimental studies were conducted on a range of flammable materials; solids, liquids and gasses. Depending on materials tested, minimal backdraft conditions vary from 2.5% to 10% of unburned fuel concentration by volume. During recent 15 years, apart from experimental research interest, one can detect a significant growth in the use of state of the art tools for backdraft fire simulation. Continuously improved sophisticated modelling programmes, accompanied by faster computers, are capable of reproducing consequences of backdraft on home computers.

**Słowa kluczowe:** ciąg wsteczny, zagrożenie pożarem, modelowanie pożaru;

**Keywords:** backdraft, fire hazard, fire modelling;

<sup>1</sup> Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości, Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów k. Otwocka, Polska; każdy ze współautorów wniósł równy wkład w powstanie artykułu (po 25%);

<sup>2</sup> rporowski@cnbop.pl

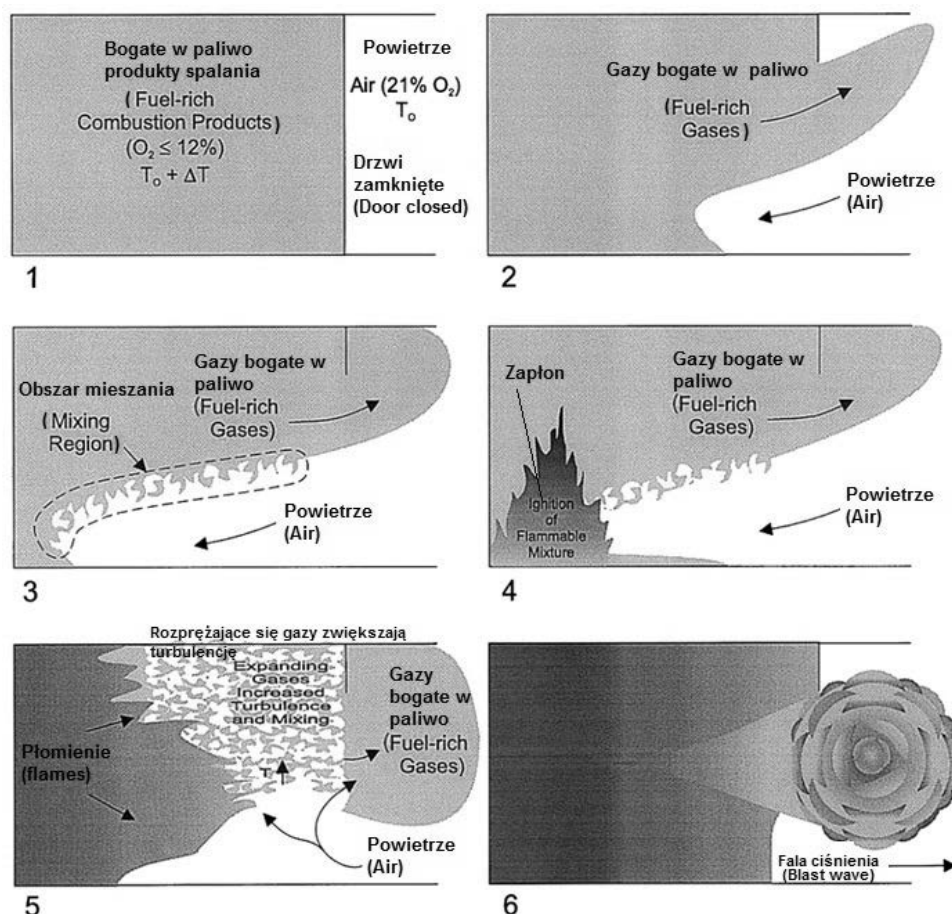
<sup>3</sup> Instytut Techniki Ciepłej Wydział MEiL Politechniki Warszawskiej, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, Polska;

## Wprowadzenie

W ostatnich latach powstała znaczna liczba publikacji naukowych w literaturze światowej (głównie w USA) traktujących o zjawisku ciągu wstecznego lub ognistego podmuchu (ang. *backdraft*) [1]. Niewątpliwie wpłynęły na to tragiczne zdarzenia, jakie miały miejsce w USA w przeciągu ostatnich kilkunastu lat. W Polsce zjawisko to nie jest tak powszechnie znane i badane. Backdraft określane jest jako spalanie płomieniowe mające miejsce w wyniku wejścia utleniacza (najczęściej powietrza) do pomieszczenia wypełnionego zgromadzonymi produktami niepełnego i niecałkowitego spalania oraz rozkładu termicznego (pirolizy). Schematycznie zjawisko to przedstawiono na Ryc. 1 [1]. W pomieszczeniu zamkniętym wybuchła pożar. Pomieszczenie jest na tyle szczelne, że nie pozwala na dopływ świeżego powietrza z zewnątrz w dużych ilościach, i na tyle nieszczelne, że nie zachodzi znaczny wzrost ciśnienia w pomieszczeniu na skutek wzrostu ilości produktów spalania. Temperatura w pomieszczeniu stopniowo rośnie, pożar zużywa tlen nagromadzony w pomieszczeniu, powodując stopniowy spadek jego stężenia. Na skutek spadku ilości tlenu pożar stopniowo zanika, jednocześnie nie pozwalając na zupełne spalanie się płonących przedmiotów – dominującym zjawiskiem zaczyna być piroliza. Pomieszczenie wypełnia się więc produktami niezu-

pełnego i niecałkowitego spalania o stosunkowo wysokiej temperaturze <math>200-300^{\circ}\text{C}</math> (Ryc. 1-1). Na skutek nagłego otwarcia pomieszczenia (wybicie szyby, otwarcie drzwi) w powstałym otworze pojawiają się dwa strumienie gazów o przeciwnych kierunkach ruchu: pierwszy – świeżego powietrza poruszający się w dolnej części powstałego otworu w kierunku „do pomieszczenia” i drugi – produktów niepełnego spalania nagromadzonych w górnej części pomieszczenia, wypływający „z pomieszczenia” przez górną część otworu (Ryc. 1-2). Napływające dołem świeże powietrze miesza się z produktami niepełnego spalania (Ryc. 1-3). W momencie, gdy bogata w tlen mieszanina gazów dotrze do źródła zapłonu – najczęściej źródłem jest pożar, który stopniowo zanikł – następuje zapłon znacznej objętości wymieszanych z powietrzem gazów (Ryc. 1-4). Powstałe płomienie dodatkowo powodują powstanie przepływu turbulentnego w pomieszczeniu, zwiększając szybkość mieszania się pozostałych gazów ze świeżym powietrzem (Ryc. 1-5). Następuje przyspieszenie płomieni, nagły wzrost objętości i ciśnienia gazów. Z otworu wypływa struga gorących produktów spalania, której może towarzyszyć również fala uderzeniowa (Ryc. 1-6). Płonące, wypływające gazy przekształcają się następnie w kulę ognia.

Zjawisko backdraft jest szczególnie niebezpieczne dla strażaków w momencie wchodzenia do po-



Ryc. 1. Schemat powstania backdraft [1]  
Fig. 1. The backdraft development mechanism [1]

mieszceń, w których stwierdzono obecność pożaru. Czas trwania powstałej strugi jest uzależniony głównie od objętości pomieszczenia (ilości nagromadzonych gazów) i wielkości otworu, w jakim struga powstaje. W ostatnich latach powstało wiele prac naukowych, które miały głównie na celu określenie granicznych warunków powstania backdraft. Znajomość tych warunków jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa służbom pożarniczym prowadzącym akcje gaśnicze.

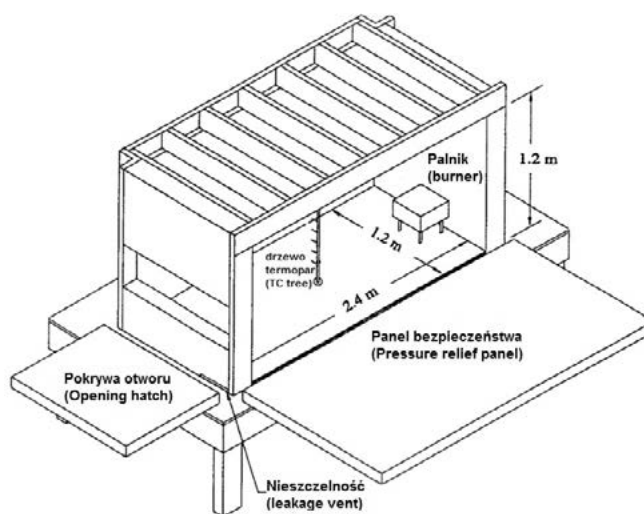
Celem niniejszej pracy jest przybliżenie zjawiska backdraft oraz określenie warunków koniecznych do jego zaistnienia na podstawie najnowszych publikacji naukowych w literaturze światowej. Poza pracami czysto eksperymentalnymi przytoczono najnowsze badania numeryczne opisujące zjawisko ciągu wstecznego. Badania numeryczne dzięki wciąż doskonalonym modelom matematycznym, jak również wzrostowi możliwości obliczeniowych komputerów, stają się coraz bardziej użytecznymi narzędziami do symulacji rozwoju pożarów i towarzyszących im zjawisk.

## 1. Badania eksperymentalne

Po raz pierwszy wzmianka o zjawisku backdraft pojawiła się w roku 1914 [2]. Zjawisko to nie było jeszcze prawidłowo zidentyfikowane i nazwano je „wybuchem dymu”. Następne próby wyjaśnienia backdraft doprowadziły do tego, że nazwano je zapłonem gazów albo zapłonem cząstek sadzy w temperaturach niższych niż 500°C [3]. Do początku lat 80. istniała tylko jedna publikacja opisująca występowanie zjawiska ciągu wstecznego. Badania te przeprowadzono w 1976 r. w skali laboratoryjnej [4] i były wynikiem pożaru, jaki wystąpił w roku 1975 w hali, w której składowano piankowe materace [5]. W pomieszczeniu o objętości 1,4 m<sup>3</sup> składowano piankę używaną do wypełniania materacy. Po jej podpaleniu, kiedy znaczna część tlenu została zużyta, spalanie płomieniowe pianki ustało i następowała jej powolna piroliza. Po uchyleniu jednej ze ścian i przyłożeniu płomienia przy podłodze, następował wybuch zgromadzonych gazów.

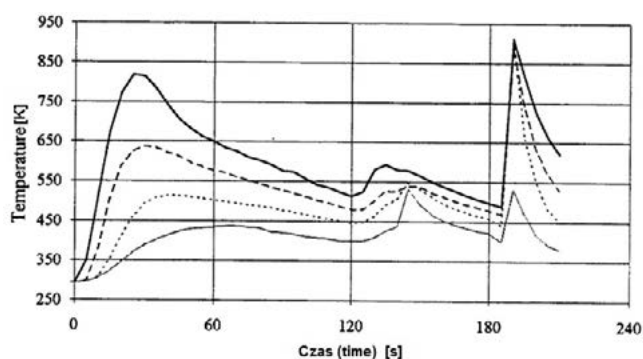
Analiza danych zebranych w latach 1972-1976 [6] obejmujących 127 pożarów z eksplozjami mającymi miejsce w Wielkiej Brytanii, Stanach Zjednoczonych i Kanadzie wykazała, że aż w 109 z nich wystąpił backdraft. Znaczące zainteresowanie zjawiskiem nastąpiło w latach 90. w USA po kilku spektakularnych pożarach, w których zginęli strażacy. Chociaż pożary z udziałem backdraft zdarzały się dużo wcześniej [5-8], dopiero nagłośniona w prasie śmierć trzech strażaków podczas pożaru hotelu w Nowym Jorku w 1994 r. [9] skłoniła świat nauki do głębszej analizy tego zjawiska. W roku 1993 zjawisko ciągu wstecznego eksperymentalnie i numerycznie przebadał Fleischmann [10]. Raport z badań obejmował:

- badania wstępne mające na celu opisać podstawowe cechy zjawiska,
- badania z wykorzystaniem słonej wody w małej skali,
- badania końcowe w ilości 28 z wykorzystaniem palnika metanowego.



Ryc. 2. Schemat stanowiska do badania backdraft [10]  
Fig. 2. Experimental facility for backdraft research [10]

Badania wstępne obejmowały 23 eksperymenty. Oprzyrządowanie pozwalało na pomiar temperatury na różnych wysokościach objętości, przepływu masowego paliwa, ciśnienia w pomieszczeniu, jak również wielkości kuli ognia wytworzonej podczas zjawiska backdraft. Modyfikowanymi parametrami były: przepływ masowy metanu, czas włączenia palnika, moment otwarcia i liczba otworów. Jedynie 8 eksperymentów doprowadziło do zjawiska backdraft. Przykładowe wskazania temperatur na różnych wysokościach w pomieszczeniu pokazano na Ryc. 3. Po początkowym wzroście temperatury następuje jej spadek na skutek obniżania się zawartości tlenu w pomieszczeniu, po ok. 120 s płomień odrywał się od palnika i zaczynał rozprzestrzeniać się tuż przy powierzchni podłogi. Zjawisko to jest prawdopodobnie spowodowane nierównomiernym stężeniem tlenu w warstwie podłogowej, do której tlen w niewielkiej ilości docierał z nieszczelności stanowiska. Otwarcie pomieszczenia nastąpiło w 180 s i po ok. 5 s dało się zaobserwować backdraft z kulą ognia (pik temperatury od ok. 190 s). Czas od momentu otwarcia kłapy do wystąpienia backdraft wynosił od 4,1 do 6,4 s. Zaobserwowano również, że im większy był czas opóźnienia zapłonu, tym backdraft przebiegał w sposób bardziej dynamiczny. Wyjaśnieniem jest tutaj dłuższy czas mieszania się powietrza z gazami a tym samym większa objętość mieszaniny w granicach palności.



**Ryc. 3.** Pomiar temperatury na różnych wysokościach w pomieszczeniu. Od góry:  $h=1,02$  m,  $h=0,72$  m,  $h=0,42$  m,  $h=0,12$  m [10]

**Fig. 3.** Temperature profiles at different heights. From the top:  $h=1,02$  m,  $h=0,72$  m,  $h=0,42$  m,  $h=0,12$  m [10]

Kolejny etap badań obejmował badania z wykorzystaniem słonej wody. Badania tego typu przeprowadza się w małej skali i polegają one na obserwacji rozprzestrzeniania się płynu o większej gęstości (słona woda) w płynie o mniejszej gęstości (czysta woda). Dzięki wprowadzeniu współczynnika wyporu, odpowiednich liczb podobieństwa i bezwymiarowych prędkości możliwe jest określenie w sposób ilościowy procesu mieszania się dwóch strumieni płynu o różnych gęstościach, podobnie jak ma to miejsce w przypadku tworzenia backdraft. Analiza wyników pokazała, że bezwymiarowa prędkość obu strumieni (wlotowego – gęstego i wylotowego – rzadszego) jest niezależna od współczynnika wyporu, a zależy jedynie od położenia i kształtu otworu.

Ostatnim etapem badań były eksperymenty określające warunki brzegowe konieczne do zaistnienia zjawiska backdraft. Wykorzystano w tych eksperymentach termopary, analizatory gazów, czujniki ciśnienia, szybką kamerę cyfrową oraz przepływomierze. Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że do zaistnienia backdraft powinny być spełnione następujące warunki:

- stężenie paliwa w pomieszczeniu musi być  $>10\%$ , dla stężeń paliwa  $>15\%$  pojawia się duża kula ognia, której średnica rośnie wraz ze wzrostem

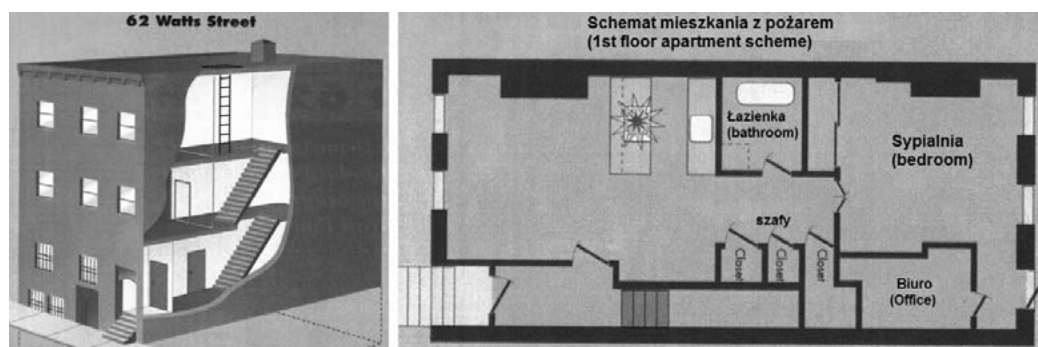
stężenia paliwa, podobny trend wykazują rejestrowane wartości nadciśnienia,

- źródło ognia musi być relatywnie małe (zastosowano palnik 70 kW) tak, żeby stężenie tlenu malało w sposób ustabilizowany.

Bodźcem do kolejnych badań okazał się pożar 1. piętra w trzykondygnacyjnym hotelu w Nowym Jorku przy ulicy Watts zginęło wtedy 3 strażaków [9]. Podczas zdarzenia wystąpił backdraft o niespotykane długim czasie trwania – ok. 6,5 min, a płomienie objęły praktycznie całą klatkę schodową budynku, odcinając strażaków od wyjścia. Jak pokazały późniejsze oględziny miejsca zdarzenia, pożar strawił jedynie około połowę powierzchni pierwszego piętra i drewniane schody na klatce schodowej. Reszta pomieszczeń w budynku pozostała praktycznie nietknięta.

Dalsze badania wykazały, że źródłem zapłonu był palnik pilotowy w piecyku gazowym, który zapalił położoną na nim plastikową torbę na śmieci. Płomienie objęły kolejne elementy znajdujące się w pobliżu oraz drewnianą podłogę. Do momentu wejścia strażaków do pomieszczenia pożar trwał ok. 60 min. Domownicy potwierdzili, że wszystkie okna oraz drzwi były pozamykane. Kanał wentylacyjny okapu zapewnił początkowo stałe ciśnienie w pomieszczeniu, a po obniżeniu się warstwy spalin poniżej jego poziomu zapewnił wentylację dymu. Pożar zgłoszono w momencie, gdy jeden z sąsiadów zauważył dym wydostający się z komina budynku.

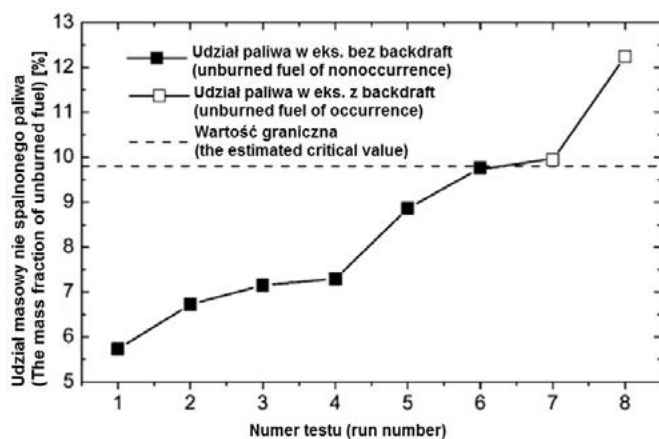
Kolejne badania w zakresie zjawiska ciągu wstecznego przeprowadzili Weng i Fan [11]. Eksperymenty miały na celu określenie warunków granicznych, dla których backdraft może zaistnieć oraz jeśli do niego dojdzie, to o jakiej będzie intensywności. Stanowisko badawcze składało się z pomieszczenia o wymiarach  $1,2 \times 0,6 \times 0,6$  m z zamkniętym otworem o wymiarach  $0,2 \times 0,6$  m, położonym centralnie na jednym z boków. Podczas każdego eksperymentu rejestrowano temperatury na różnych poziomach w badanej objętości, udziały objętościowe paliwa, CO i CO<sub>2</sub> w badanej objętości oraz nadci-



**Ryc. 4.** Schemat 3-kondygnacyjnego hotelu i 1. piętra z pożarem przy ulicy 62 Watts w Nowym Jorku, w którym miał miejsce 6,5-min backdraft [9]

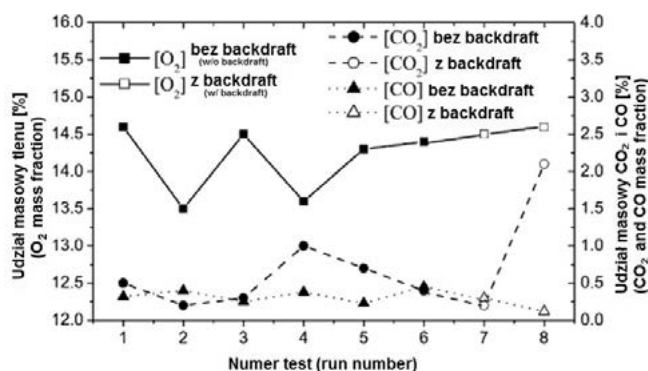
**Fig. 4.** 62 Watts Street hotel in New York: 3 floors building where the 6,5 min backdraft took place [9]

śnienie generowane przez backdraft. Znaczna ilość przeprowadzonych eksperymentów pozwoliła na określenie istotnych dla wystąpienia zjawiska parametrów oraz ich granicznych wartości. Najważniejszym parametrem determinującym backdraft okazał się udział niespalonego paliwa w mieszaninie (w tym przypadku był to metan). Dla udziałów metanu w mieszaninie w ilości przewyższającej 9,8% backdraft miał miejsce (Ryc. 5). Zawartość tlenu węgla była praktycznie stała (ok. 0,5%) we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach (Ryc. 6), skąd można wyciągnąć wniosek o jego niskim wpływie na backdraft. Zawartość tlenu w zakresie 13,5-14,5% również nie wykazała trendu mogącego mieć jakikolwiek wpływ na występowanie tego zjawiska. Występujące nadciśnienia ściśle zależą od zawartości niespalonego paliwa w mieszaninie. W trakcie eksperymentów rejestrowano także wielkość wytworzonej w trakcie backdraft kuli ognia. Jej zasięg w poziomie wykazał również zależność wprost proporcjonalną do zawartości paliwa.



Ryc. 5. Wpływ zawartości niespalonego paliwa na występowanie backdraft [11]

Fig. 5. The unburned fuel mass fraction influence on backdraft occurrence [11]

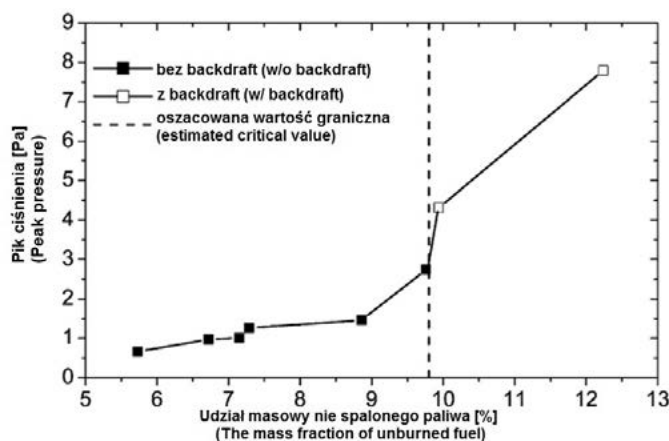


Ryc. 6. Wpływ zawartości O<sub>2</sub>, CO i CO<sub>2</sub> na występowanie backdraft [11]

Fig. 6. O<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub> mass fraction influence on backdraft occurrence [11]

Najnowsze badania eksperymentalne i teoretyczne [12] ukierunkowano na poznanie ogólnych zależ-

ności, które mogą opisywać pożary ciał stałych i ciekłych, mogące doprowadzić do zjawiska backdraft. Zauważono, że występowanie ciągu wstecznego jest zależne od udziału paliwa w powietrzu. Jednocześnie wartość graniczna udziału paliwa jest różna dla różnych materiałów palnych. Przebadane pożary drewna i n-heptanu wykazały, że krytyczne wartości udziałów niespalonych gazów dla tych substancji wynoszą odpowiednio 8,7% oraz 2,5%. Aby zapalić dowolny gaz w powietrzu, musi się on znajdować w zakresie stężeniowym granic palności. Zaproponowano wprowadzenie parametru  $\beta$  odpowiadającego stosunkowi udziału niespalonych gazów w objętości do dolnej granicy palności danej mieszaniny. Z przeprowadzonej analizy wynika, że niezależnie od zastosowanego materiału, wartość współczynnika  $\beta$  jest bardzo zbliżona i równa ok. 1,4, co oznacza, że stężenie gazów palnych w objętości musi być co najmniej 1,4 razy większe niż dolna granica palności takiej mieszaniny. Zależność tę dla drewna i n-heptanu przedstawiono na Ryc. 8.



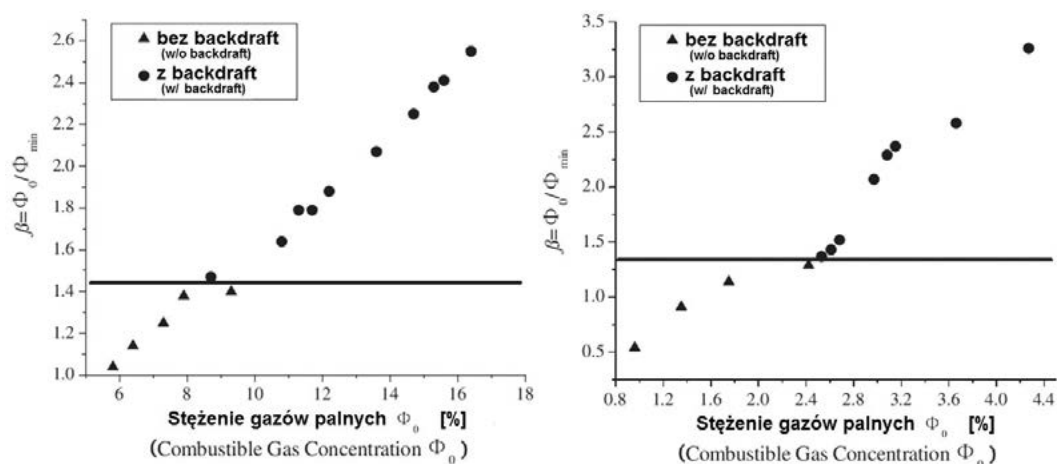
Ryc. 7. Wpływ zawartości niespalonego paliwa na występujące nadciśnienia i backdraft [11]

Fig. 7. The unburned fuel mass fraction influence on backdraft occurrence and overpressures [11]

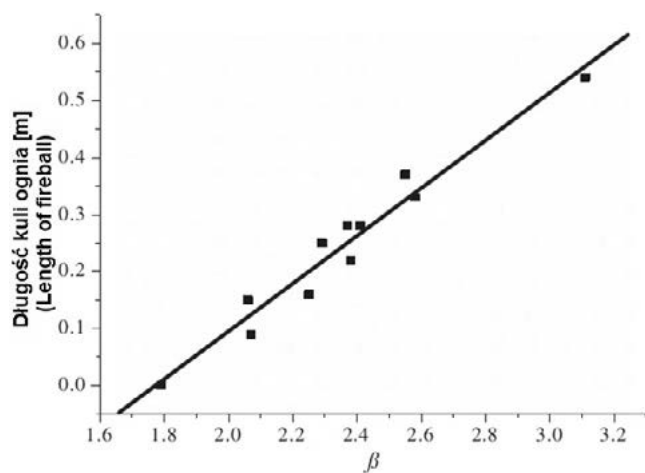
Wprowadzony parametr  $\beta$  pozwolił również na określenie jego granicznej wartości dla występowania kuli ognia ( $\beta = 1,84$ ), tuż po zjawisku backdraft, jak również zasięgu (w tym wypadku długości) kuli. Zależność na zasięg ( $L'$ ) kuli ognia wygląda zatem następująco:

$$L' = 0,42 \beta - 0,74 \quad (1)$$

Zależność ta jest wynikiem aproksymacji wyników badań doświadczalnych, co przedstawiono na Ryc. 9.



Ryc. 8. Wpływ parametru  $\beta$  na występowanie backdraft dla drewna (lewy) i n-heptanu (prawy) [12]  
 Fig. 8. The  $\beta$  parameter influence on backdraft occurrence in wood (left) and n-heptane (right) fire [12]



Ryc. 9. Zależność na zasięg kuli ognia w funkcji parametru  $\beta$  [12]

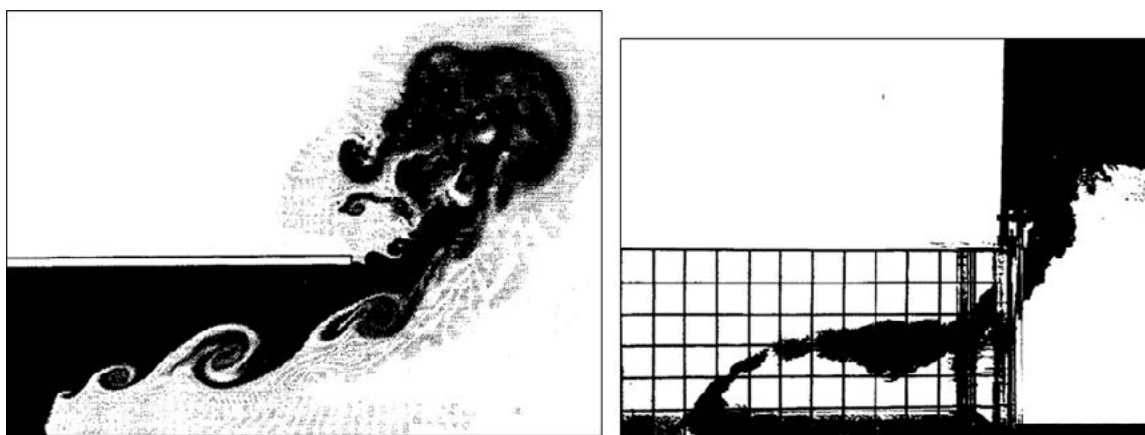
Fig. 9. The fire ball range in a function of  $\beta$  parameter [12]

## 2. Symulacje numeryczne

W ostatnich latach coraz częściej w projektowaniu inżynierskim wykorzystuje się nowoczesne narzędzia obliczeniowe. Narzędzia te umożliwia-

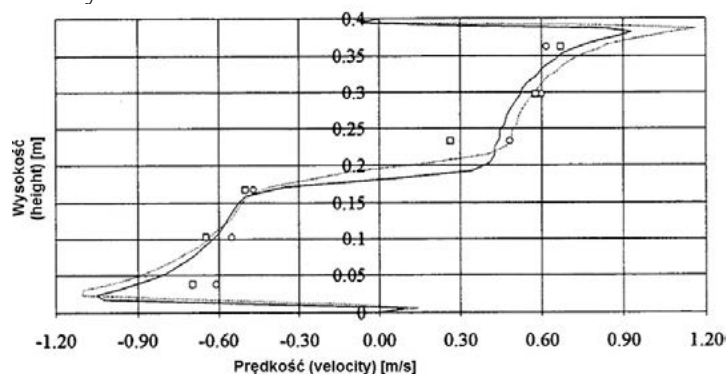
ją prowadzenie obliczeń wytrzymałości materiałów i konstrukcji, wymiany ciepła, rozkładu przepływów homo- i heterogenicznych, mieszania i spalania oraz wielu innych. Coraz szersze zastosowanie spowodowane jest wzrostem mocy obliczeniowych komputerów oraz powstaniem bardziej efektywnych metod numerycznych. Ponadto, prowadzenie obliczeń jest zdecydowanie tańsze niż długotrwałe badania eksperymentalne i dostarcza znacznie więcej danych o badanym zjawisku. Obliczenia numeryczne znacznie skracają również czas projektowania i przygotowania do produkcji nowych elementów i urządzeń. Jednym z wielu zastosowań obliczeń numerycznych jest symulacja rozwoju pożarów. Istnieją w tym zakresie dwa podejścia: symulacja przy pomocy modelu strefowego i symulacja typu CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics* – obliczeniowa dynamika płynów).

Jedne z pierwszych obliczeń numerycznych przeprowadził Fleischmann [10] w 1994 r. Symulacje przeprowadzono w geometrii o wymiarach 0,3x0,15 m dla przepływu słonej wody. Na Ryc. 10 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane na



Ryc. 10. Symulacja numeryczna (lewy) i eksperyment (prawy) przepływu słonej wody [9]  
 Fig. 10. Numerical simulation (left) and experiment (right) of salt water flow [9]

podstawie symulacji przepływu słonej wody oraz zdjęcia z badań doświadczalnych. W eksperymencie ze względu na zastosowanie fenolaftalenu w komorze (pH ~6,8) i wodorotlenku sodu (pH ~11.7) w komorze zewnętrznej, strefa mieszania się dwóch strumieni przybierała barwę czerwoną, co na przytoczonych czarno-białych zdjęciach odpowiada barwie czarnej. Na Ryc. 11 znajduje się porównanie profili prędkości w otworze, uzyskane za pomocą symulacji i badań eksperymentalnych. Jak wykazały porównania profili prędkości oraz dalsze obliczenia zawarte w tej pracy, symulacje wykazują prawidłowe odwzorowanie przepływu strumieni w komorze, zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym.



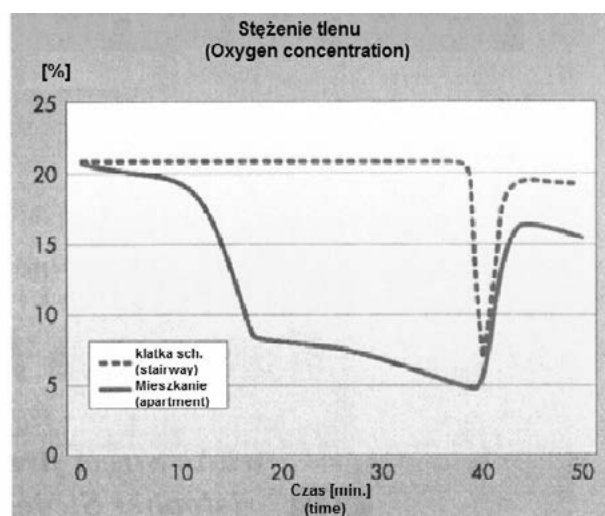
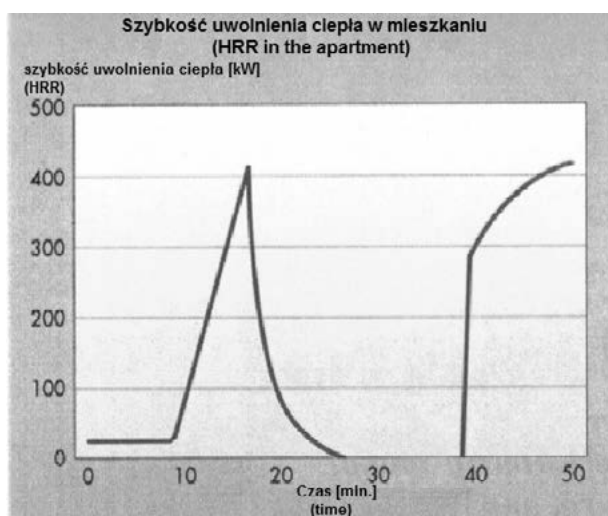
**Ryc. 11.** Profil prędkości wzdłuż wysokości otworu w pomieszczeniu po różnych czasach od otwarcia. Linie – symulacje numeryczne (linia ciągła  $t = 4$  s, linia punktowa  $t = 8$  s), punkty – dane eksperymentalne (kwadraty  $t = 4$  s, koła  $t = 8$  s) [10]

**Fig. 11.** Velocity profiles along the orifice height at different time. Lines – numerical simulations (solid line  $t = 4$  s, dot line  $t = 8$  s), Points – experimental data (squares  $t = 4$  s, circles  $t = 8$  s) [10]

Kolejne symulacje przeprowadzono w programie CFAST [9], wykorzystującym do obliczeń modele strefowe. Symulacja, którą przeprowadzono,

miała na celu odwzorować warunki zaistniałe w opisanym już wcześniej pożarze w Nowym Jorku [9]. Symulacja ta obejmowała pomieszczenie objęte pożarem oraz klatkę schodową z otworami wentylacyjnymi na górze oraz otwartymi drzwiami na dole. Na potrzeby symulacji założono, że drzwi zostały otwarte po 37,5 min od momentu rozpoczęcia obliczeń. Zarejestrowana szybkość wydzielania ciepła (ang. HRR – *Heat Release Rate*) oraz średnie stężenie tlenu w pomieszczeniu i na klatce schodowej przedstawiono na Ryc. 12 [9]. Na podstawie przeprowadzonych kalkulacji zauważono nagły spadek stężenia tlenu w pomieszczeniu do ok. 8%, a następnie pożar coraz wolniej zużywał tlen, który osiągnął stężenie ok. 5% po czasie 37,5 min. Po otwarciu drzwi nastąpił nagły dopływ tlenu do mieszkania, po wymieszaniu się z produktami niepełnego spalania doszło do zapłonu tej mieszaniny i wypływu przez otwór drzwiowy. Zjawisko to przedstawiono na Ryc. 13, na którym widać wyraźny wzrost temperatury na klatce schodowej do około 1200°C. Zmierzona moc pożaru w przekroju drzwi osiągnęła wartość prawie 5 MW. Czas trwania przepływu płomieni przez otwór drzwiowy wyniósł ok. 7 min, co wykazuje zgodność z zarejestrowanym rzeczywistym czasem trwania zjawiska backdraft (6,5 min.).

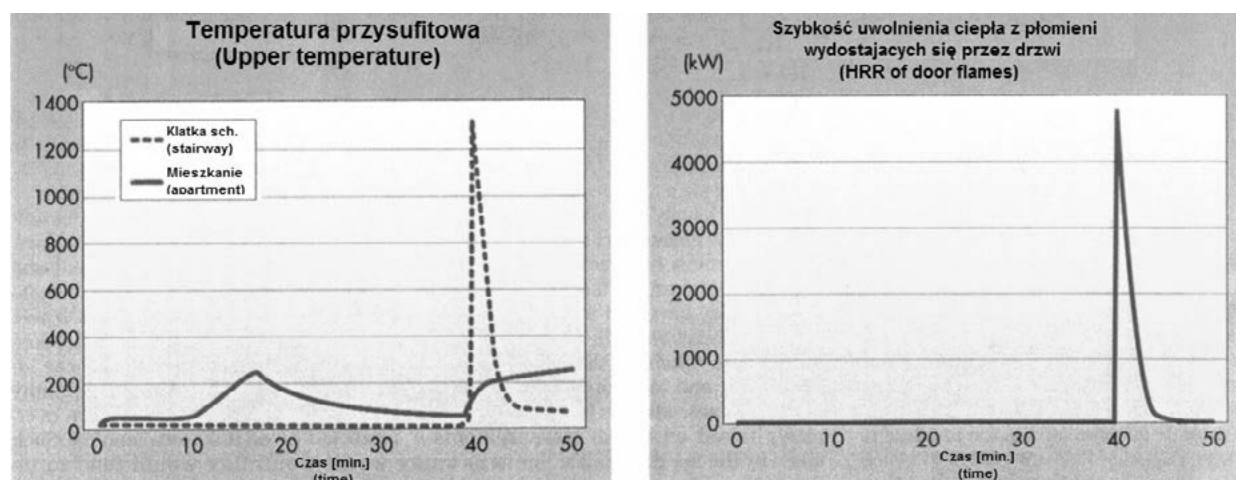
Mimo że przytoczona symulacja numeryczna bazowała na pewnych założeniach początkowych, które mogą mieć wpływ na uzyskane wyniki, to jednak udowodniła, że możliwe jest trwanie zjawiska backdraft przez tak długi okres. Analiza wyników wykazała również, że na długość backdraft mają wpływ takie czynniki jak kubatura pomieszczenia, stopień szczelności otworów okiennych i drzwiowych, położenie otworów wentylacyjnych oraz moment otwarcia pomieszczenia. Kolejnym bardzo ważnym wnioskiem z analizowanego zdarzenia jest nieefektywność wyposażenia jednostek straży pożarnej w przypadku zaistnienia tak długotrwałego oraz dynamicznego zjawiska.



**Ryc. 12.** Szybkość wydzielania ciepła (HRR) w mieszkaniu (lewy) i średnie stężenie tlenu w mieszkaniu i na klatce schodowej (prawy) zarejestrowana podczas symulacji komputerowej [9]

**Fig. 12.** Heat Release Rate (left) and mean oxygen concentration in the apartment and on stairway [9]

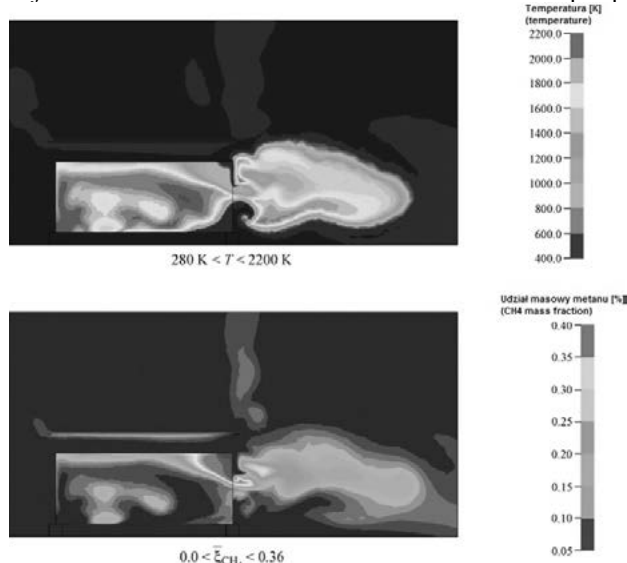




Ryc. 13. Temperatury w warstwie podsufitowej w mieszkaniu i klatce schodowej (lewy) i szybkość wydzielania ciepła z przekroju drzwi wejściowych do mieszkania (prawy) [9]

Fig. 13. Temperature history near the ceiling in the apartment and in the stairway (left) and Heat Release Rate from the open door (right) [9]

Kolejne symulacje numeryczne zjawiska backdraft przeprowadzili Horvat i inni [13-14]. Modelowana geometria była identyczna, jak w eksperymentach prowadzonych w Lund University w Szwecji w 2000 r. [15]. Do obliczeń użyto programu CFX-5 oraz modelowania typu DES (ang. *Detached Eddy Simulation*), czyli pewnego rodzaju hybrydy dwóch modeli turbulencji RANS (ang. *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) i LES (ang. *Large Eddy Simulation*). Przykładowe kontury temperatury i stężenia metanu uzyskane w symulacji przedstawiono na Ryc. 14. Symulacja pokazała, że spalanie ma miejsce nie tylko w samej objętości, ale również poza nią, jeśli po zapłonie ciśnienie gazów rośnie wystarczająco szybko. Mieszanina palna znajdująca się przy otworze zostaje wypchnięta, a po zapłonie tworzy kulę ognia. Zjawisko to zaobserwowali również Chen i in. [12].



Ryc. 14. Rozkład temperatury i stężenia metanu w symulacji backdraft w programie CFX-5 [13]

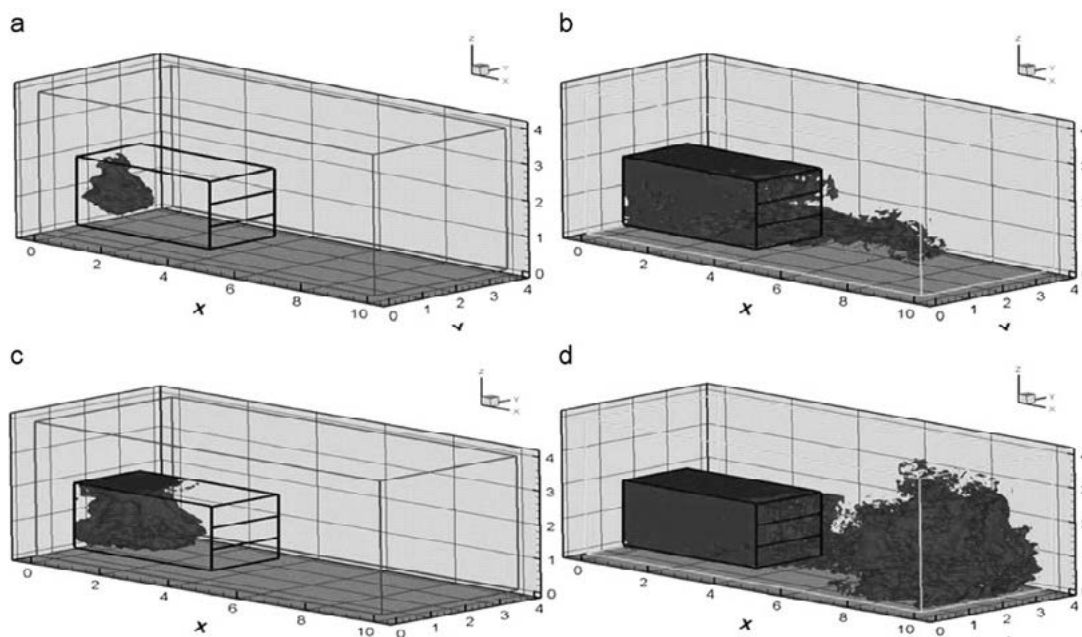
Fig. 14. Temperature (top) and methane concentration (bottom) contours of backdraft simulation in CFX-5 code [13]

Podczas badań eksperymentalnych zjawisko backdraft występowało po czasie opóźnienia (od momentu otwarcia otworu do zauważenia płomieni na zewnątrz) od 15 do 46 s. Czas opóźnienia zapłonu uzyskany w symulacji wyniósł 11,4 s. Należy jednak zauważyć, że jest to czas zapłonu w tylnej części objętości, stąd wartość ta jest nieznacznie заниżona. Ponadto doświadczalna wartość czasu opóźnienia wykazuje cechy stochastyczne, bez wyraźnej zależności od parametrów początkowych.

Wpływ występowania przeszkód na rozwój backdraft przebadali numerycznie Pérez-Jiménez i inni [16]. Odzworowane stanowisko podobnie jak w pracach [13-14] zaczerpnięto z badań prowadzonych w Lund University [15]. Przeszkody miały na celu modyfikację przepływu w momencie otwarcia okna. Wytwarzający się dolny strumień świeżego powietrza miał przez to odmienny charakter. Symulacje numeryczne wykazały, że przeszkody znacznie opóźniają (ok. 2-krotnie) wystąpienie backdraft, jednocześnie wydłużając czas trwania zjawiska po jego wystąpieniu. Może mieć to istotny wpływ na prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych w miejscach gęsto wypełnionych przeszkodami np. stołem, krzesłami, fotelami lub szafkami w budynkach z otwartą powierzchnią biurową.

Inne symulacje odwzorowujące badania doświadczalne z Lund University przeprowadzili Ferraris i inni [17]. Do obliczeń tych wykorzystano program FDS (ang. *Fire Dynamics Simulator*) [18]. Jest to darmowy program, powszechnie używany do obliczeń rozprzestrzeniania się pożaru i dymu w obiektach budowlanych. Po pewnych modyfikacjach kodu źródłowego, które wprowadzili autorzy pracy [17], możliwe jest użycie programu do obliczeń zjawiska back draft (Ryc. 15.). Podobnie jak w innych pracach [13, 14], obliczenia wykazały, że spalanie gazów może mieć miejsce również poza analizowaną objętością, jeśli sam proces spalania będzie





Ryc. 15. Symulacja zjawiska backdraft w programie FDS [17]

Fig. 15. The FDS code backdraft simulation [17]

wystarczająco dynamiczny. Ponadto nie wszystkie gazy zawierają się w granicach palności i osiągają ją dopiero po wyjściu z objętości. Opóźnienie zapłonu w symulacjach wyniosło 18 s, co stanowi wartość bliższą wynikom badań eksperymentalnych, niż uzyskane w poprzednich pracach.

### 3. Podsumowanie i wnioski

W powyższej pracy przedstawiono przegląd badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych odnoszących się do zjawiska ciągu wstecznego – backdraft. Zjawisko to jest nadal słabo poznane i wymaga prowadzenia dalszych prac, w szczególności nakierowanych na określenie ilościowe parametrów granicznych jego występowania. Znaczna ilość materiałów, które biorą zazwyczaj udział w spalaniu prowadzącym do backdraft, bardziej komplikuje to zadanie. Pierwsze kroki w tym kierunku zostały jednak już podjęte [12]. Backdraft to złożone zjawisko i zależy od wielu czynników, w tym między innymi od:

- rodzaju materiałów (ciała stałe, ciecze, gazy) biorących udział w spalaniu,
- stopnia uszczelnienia pomieszczenia,
- czasu trwania pożaru,
- czasu otwarcia i wielkości otworu.

Wszystkie te czynniki mają wpływ na ilość wygenerowanych gazów palnych znajdujących się w rozpatrywanej objętości, a jak pokazało wiele prac [10-16] udział objętościowy tych gazów ma kluczowe znaczenie. Symulacje numeryczne stanowią przydatne narzędzie, ale obecnie nie są jeszcze w stanie prawidłowo odwzorować przebiegu pełnego zjawiska pożaru z backdraft. Problemem jest między in-

nymi właściwy model spalania, który byłby w stanie odwzorować prawidłowo proces zaniku płomieni i przejście pożaru w tlenie. Dalszy przebieg zjawiska – wyrzut płomieni, kula ognia i fala nadciśnienia – jest symulowany w sposób jakościowo i ilościowo prawidłowy. Oprócz kilku wad, symulacje numeryczne posiadają również wiele zalet, które decydują o ich wykorzystaniu w zagadnieniach zarówno naukowych, jak i inżynierskich. Ciągły rozwój metod numerycznych oraz sprzętu komputerowego niewątpliwie doprowadzi do powstawania modeli rozwoju pożaru (w tym backdraft) i szacowania jego skutków.

### Literatura

1. Gottuk D.T., Peatross M.J., Farley J.P., Williams F.W., *The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study*, 'Fire Safety Journal', 33, 2009.
2. Steward P., *Dust and smoke explosions*, 'NFPA Quarterly', 7, 1914.
3. Roblee C. L., *Backdraft*, Fire Chief, December 1977.
4. Pagni P. J., Shih T. M., *Excess Pyrolyzates*, 16<sup>th</sup> Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1976.
5. Anon, *Fatal Mattress Store Fire at Chatham Dockyard*, 'Fire', 67, 1975.
6. Croft W. M., *Fires involving Explosions – a literature review*, 'Fire Safety Journal', 3, 1980.
7. Russel D., *Seven Fire Fighters Caught in Explosion*, 'Fire Engineering', 1983.
8. *Backdraft: A Horrible Reality that Kills or Maims in Seconds*, Fire Fighting in Canada, April-May, 1980.

9. Bukowski R. W., *Modelling Backdraft: the fire at 62 watts street*, 'National Fire Protection Association Journal', 89, 1995.
10. Fleischmann C. M., *Backdraft Phenomena*, National Institute of Standards and Technology, Report no. NIST-GCR-94-646, 1994.
11. Weng W.G., Fan W.C., *Critical condition of backdraft in compartment fires: a reduced-scale experimental study*, 'Journal of Loss Prevention in the Process Industries', 16, 2003.
12. Chen A., Zhou L., Liu B., Chen W., *Theoretical analysis and experimental study on critical conditions of backdraft*, 'Journal of Loss Prevention in the Process Industries', 24, 2011.
13. Horvat A., Sinai Y., *Numerical simulation of backdraft phenomena*, 'Fire Safety Journal', 42, 2007.
14. Horvat A., Sinai Y., Gojkovic D., Karlsson B., *Numerical and experimental investigation of backdraft*, 'Combustion Science and Technology', 180, 2008.
15. Gojkovic D., *Initial backdraft experiments. Report 3121*, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2000.
16. Pérez-Jiménez C., Guigay G.J., Horvat A., Sinai Y., Fransse J.-M., *Influence of obstacles on the development of gravity current prior to backdraft*, 'Fire Technology', 45, 2009.
17. Ferraris S.A., Wen J.X., Demble S., *Large eddy simulation of the backdraft phenomenon*, 'Fire Safety Journal', 43, 2008.
18. <http://code.google.com/p/fds-smv/>

**inż. Piotr Lesiak** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Absolwent studiów inżynierskich na kierunku chemia w Wojskowej Aka-

demii Technicznej. Pełni służbę w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej PIB w Józefowie, na stanowisku starszego specjalisty w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości.

**dr inż. Rafał Porowski** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W latach 2008-2009 był uczestnikiem studiów podyplomowych z inżynierii bezpieczeństwa wodorowego w University of Ulster w Irlandii Północnej. W roku 2010 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W latach 2009-2010 w ramach stypendium Fulbrighta pracował w California Institute of Technology. Obecnie pełni funkcję kierownika Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej – PIB w Józefowie.

**mgr inż. Wojciech Rudy** – absolwent Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W latach 2008-2009 był uczestnikiem studiów podyplomowych z inżynierii bezpieczeństwa wodorowego w University of Ulster w Irlandii Północnej. Obecnie jest doktorantem w Instytucie Techniki Ciepłej Wydziału MEiL Politechniki Warszawskiej. Tematyka badawcza związana ze spalaniem i wybuchowością mieszanin gazowych.

**mgr Martyna Strzyżewska** – absolwentka Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego. Pracuje na stanowisku młodszego specjalisty w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej – PIB w Józefowie.