

kpt. mgr inż. **Andrzej Krauze**¹
mł. bryg. dr inż. **Adam Krasuski**¹
inż. **Bartłomiej Ślęczkowski**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 18.09.2015;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 02.05.2016;
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

Studium teoretyczne przewidywania ryzyka wystąpienia rozgorzenia, wstecznego ciągu płomieni oraz zapalenia gazów pożarowych³

Theoretical Study of Fire Behaviour Concerned with the Prediction of Threats from Flashover, Backdraft and Ignition of Gases

Теоретическое исследование прогнозирования угрозы вспышки, обратной тяги и воспламенения пожарных газов

ABSTRAKT

Cel: Niniejszy artykuł opisuje zjawiska występujące podczas przebiegu pożarów wewnętrznych. Szczególną uwagę poświęcono mechanizmowi powstawania wstecznego ciągu płomieni oraz rozgorzenia. Zaprezentowano również możliwości ich przewidywania na podstawie symptomów związanych z rozwojem pożaru oraz zgromadzonych danych sensorycznych. Artykuł ukazuje również potrzebę stworzenia systemu, który wspomagałby kierującego działaniem ratowniczym na miejscu akcji.

Wprowadzenie: Nieliniowe efekty pożaru, takie jak rozgorzenie, wsteczny ciąg płomieni, czy też zapalenie lub wybuch gazów pożarowych stanowią poważne zagrożenie dla strażaków. Czynnikiem stwarzającym niebezpieczeństwo dla ratowników, będącym skutkiem gwałtownego rozwoju pożaru w obiekcie, są przede wszystkim wysoka temperatura i związane z nią promieniowanie cieplne. Na podstawie danych zgromadzonych w trakcie rozpoznania trudno jest dokładnie określić szanse wystąpienia wspomnianych zjawisk. Istnieje zatem konieczność podjęcia prac nad stworzeniem systemu, posiadającego możliwość przewidywania wystąpienia wstecznego ciągu płomieni oraz rozgorzenia, także na podstawie danych sensorycznych pochodzących z pomieszczenia objętego pożarem. Wspomniany system byłby niewątpliwie przydatnym narzędziem zwiększającym efektywność i bezpieczeństwo działań strażaków. Ponadto taki system dałby kierującemu działaniem ratowniczym większą pewność w podejmowaniu decyzji oraz pozwalałby na eliminację decyzji prowadzących do powstania rozgorzenia lub wstecznego ciągu płomieni.

Metodologia: Przy opracowaniu artykułu bazowano na dwóch metodach naukowych: analizie i krytyce piśmiennictwa, stanowiącej punkt wyjściowy do analiz i źródło hipotez naukowych podlegających weryfikacji oraz uogólnionej metodzie ankietowej polegającej na konfrontacji obecnego stanu wiedzy reprezentowanego przez piśmiennictwo z wiedzą ekspercką doświadczonych dowódców PSP.

Wnioski: Nieliniowe efekty pożaru, w przypadku ich wystąpienia, stanowią duże zagrożenie dla strażaków-ratowników. Stworzenie systemu analizującego na bieżąco dane sensoryczne gromadzone w miejscu prowadzonych działań pozwoliłoby na przewidywanie z wyprzedzeniem ich powstania, co wpłynęłoby na podniesienie bezpieczeństwa strażaków. System taki mógłby działać zarówno w oparciu o dane pochodzące z czujników, jak i z rozpoznania – strażak wprowadzałby dane do urządzenia ręcznie, co dawałoby możliwość pełnego wykorzystania jego potencjału.

Słowa kluczowe: nieliniowe efekty pożaru, rozgorzenie, wsteczny ciąg płomieni, zapalenie gazów pożarowych

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Aim: This article describes events, which occur during the development of a fire inside buildings. Special attention is devoted to the development of backdraft and flashover. Additionally, the article identifies possibilities for earlier prediction of potential developments based on symptoms and data from sensors. Furthermore, the article highlights a need to build a system, which supports commanders at the scene of an incident.

Introduction: Extreme fire behaviour such as ventilation induced flashover, backdraft, and gas ignition or smoke explosion, pose significant threats to human life and property. A factor contributing to the significant risk for firefighters is associated with the rapid increase in the rate of heat release and temperature within structures. Based on data gathered from a reconnaissance, it is difficult to predict the probability of above mentioned events happening. Therefore, there is a need to devise a system with the potential for prediction of extreme fire behaviour, based on sensor data derived from premises engulfed by a fire. Such a system will undoubtedly be a useful tool, which will enhance the effectiveness and

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

² Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy / Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute;

³ Procentowy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu / Percentage contribution: A. Krauze – 55%; A. Krasuski – 35%; B. Ślęczkowski – 10%;

safety of firefighters. Furthermore, such a tool will support incident commanders in decision making and allow for the elimination of decisions, which could lead to development of flashover or backdraft.

Methodology: The study utilised two scientific approaches: review and critical analysis of literature, which provided an exit point and source of verifiable scientific hypotheses. This was enhanced by survey methods based on a contrast of current knowledge identified in literature with practical know how of experienced commanders from the Polish State Fire Service.

Conclusions: Non-linear progression and unpredictable fire behaviour, when it occurs, creates significant dangers to firefighters. Development of a system, which can analyse current sensor data gathered at the scene of a fire incident, will allow for the anticipation of extremes in fire progression with a consequential impact on safety. Such a system could function on the basis of data obtained from sensors as well as from information gathered during a reconnaissance - a firefighter could enter data manually, thus maximising the use of the system potential.

Keywords: extreme fire behaviour, flashover, backdraft, ignition of gases

Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Цель: Статья описывает явления, происходящие во время внутренних пожаров. Особое внимание было уделено механизму формирования обратной тяги пламени и вспышки. Были представлены также возможности их прогнозирования на основании признаков, связанных с развитием пожара и собранных сенсорных данных. В статье показана необходимость создания системы, которая могла бы поддержат руководителей спасательной операции на месте действия.

Введение: Нелинейные признаки пожара, такие как вспышка, обратная тяга пламени или взрыв, а также возгорание горючих газов представляют собой серьезную угрозу для пожарных. Фактором, создающим опасность для спасателей, который является результатом быстрого развития пожара на объекте, является, в первую очередь, высокая температура и связанное с ней тепловое излучение. На основе данных, собранных в ходе диагностики, тяжело есть точно определить вероятность возникновения этих явлений. Существует, следовательно, необходимость проведения работы по созданию системы, которая сможет прогнозировать возникновение обратной тяги пламени, а также возгорания на основе сенсорных данных полученных из помещения охваченного пожаром. Эта система, несомненно, была бы инструментом для повышения эффективности и безопасности действий пожарных. Кроме того, такая система была бы, без сомнений, инструментом, который дал бы руководителю спасательной операции уверенность в принятии решений и позволяла бы устранить те, которые приводят к созданию вспышки или обратной тяги.

Методология: Во время создания статьи авторы опирались на два научных метода: анализ и критику литературы, которая является начальной точкой для анализа и источником научных гипотез, которые будут подданы проверке и обобщенному методу опроса, заключающимся в сопоставлении нынешнего состояния знаний в литературе с экспертными знаниями опытных командиров ГПС.

Выводы: Нелинейные признаки пожара, в случае их появления, представляют собой серьезную угрозу для пожарных-спасателей. Создание системы, которая анализировала бы сенсорные данные, собранные на месте проводимых действий, позволило бы предсказывать их появление, что способствовало бы повышению безопасности пожарных. Такая система могла бы работать как на основе данных с датчиков, так и распознавания - пожарный вводил бы данные в устройство вручную, что дало бы возможность полностью использовать его потенциал.

Ключевые слова: нелинейные признаки пожара, вспышка, обратная тяга, воспламенение пожарных газов

Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

Wdrażanie innowacji technologicznych w gospodarkach państw skutkuje m.in. wprowadzaniem do powszechnego użytku wielu nowych materiałów i tworzyw. Wymagania przeciwpożarowe dla elementów wykończenia wnętrz i wyposażenia stałego, a także warunki przechowywania materiałów palnych w obiektach regulują akty prawne [1-2]. Niemniej jednak prowadzone przez Państwową Straż Pożarną statystyki wskazują, że większość pożarów występuje w obiektach mieszkalnych, w których nie prowadzi się kontroli (lub jest ona bardzo ograniczona) w rozumieniu postępowania administracyjnego [3]. W związku z powyższym, dzisiejsze pożary mieszkań charakteryzują się zwiększoną intensywnością wydzielania ciepła oraz większą ilością powstającego dymu. Produkty spalania, czyli gazy pożarowe powstające w wyniku rozwoju pożaru, cechują się dużą toksycznością, jak również podatnością na zapalenie [4]. W przypadku pożarów zewnętrznych, większość ciepła powstającego podczas spalania paliwa jest emitowana poprzez konwekcję oraz promieniowanie i nie wraca do przestrzeni objętej spalaniem. Natomiast w inny sposób przebiegają pożary w przestrzeniach zamkniętych (obiekty budowlane). Materiały stanowiące wyposażenie oraz konstrukcję pomieszczeń pochłaniają część promieniowania cieplnego emitowanego ze strefy spalania. Pozostała część energii promieniowania, która nie została pochłonięta, jest odbijana i powraca do przestrzeni, w której rozwija się pożar. Prowadzi to do wzrostu temperatury środowiska pożarowego oraz przyspieszenia procesów pirolizy i spalania. Procesy te dodatkowo są mocno określane przez warunki wen-

tylacji [5]. Zgodnie z obowiązującym prawem budowlanym, budynki powinny charakteryzować się określoną szczelnością powietrzną [2]. Dzisiaj powstają budynki energooszczędne i pasywne, gdzie wszystkie rodzaje strat ciepła powinny być ograniczone do minimum, a zatem ich szczelność powietrzna jest bardzo wysoka. Ponadto zgodnie z przepisami [2] budynki i urządzenia z nim związane powinny być tak zaprojektowane i wykonane, aby w trakcie pożaru była m.in. ograniczona możliwość rozprzestrzenienia się ognia, dymu oraz przedostania się pożaru na sąsiednie budynki. Przepis ten dotyczy również instalacji wentylacyjno-klimatyzacyjnych, przepustów instalacyjnych, czy też szybów kablowych, występujących niemal w każdym obiekcie. W związku z powyższym pożar rozwijający się w jednym z pomieszczeń danego budynku może wejść w fazę pożaru kontrolowanego przez wentylację. Wpływ warunków wentylacji na przebieg pożaru, został dokładniej przedstawiony w kolejnych rozdziałach artykułu.

Działania związane z podawaniem prądów rozproszonych wody, czy też stosowanie wentylacji nadciśnieniowej, są metodami stosowanymi przez strażaków w celu opanowania pożaru rozwijającego się wewnątrz obiektów budowlanych. Niemniej jednak podczas każdego pożaru wewnątrz budynku istnieje poważne ryzyko powstania bardzo niebezpiecznych zjawisk, takich jak rozgorzenie, wsteczny ciąg płomieni czy zapalenie lub wybuch gazów pożarowych. Artykuł jest wprowadzeniem teoretycznym do zagadnienia wykrywania efektów nieliniowych rozwoju pożaru wewnętrznego na podstawie różnych typów danych. W niniejszej pracy opisano aktualne możliwości przewidywania zjawisk nieliniowych po-

żaru oraz przedstawiono obowiązującą metodykę w zakresie prowadzonych szkoleń dla strażaków. Zrozumienie, a także umiejętność rozpoznawania czynników i warunków prowadzących do powstania ekstremalnego rozprzestrzeniania się pożaru wewnętrznego, jest decydujące dla prawidłowego, bezpiecznego oraz skutecznego prowadzenia działań gaśniczych wewnątrz obiektów. Z uwagi na powyższe stwierdza się wysoką potrzebę opracowania dodatkowej metody (systemu), która oprócz odpowiedniego treningu i szkolenia, a także doświadczenia nabytego w czasie wcześniejszych akcji, pozwoli dowódcy/strażakom bardziej precyzyjnie przewidywać możliwość wystąpienia zjawisk wpisujących się w tzw. Extreme Fire Behaviour [5]. Analiza wielu tragicznych w skutkach pożarów pozwala dzisiaj stwierdzić, że działania prowadzące do uzyskania kontroli nad rozwojem pożaru są priorytetem w akcjach strażaków i powinny być zawsze podejmowane w pierwszej kolejności (nawet przed przeszukaniem objętego ogniem pomieszczenia). W drugim rozdziale artykułu przedstawiono szczegółowy opis wspomnianych zjawisk, czyli tzw. nieliniowych efektów rozwoju pożaru wewnętrznego. Następne rozdziały omawiają czynniki wpływające na przebieg pożarów wewnętrznych, a także symptomy i oznaki związane z przebiegiem pożarów. Artykuł kończy się podsumowaniem, w którym zawarto konkretne propozycje dotyczące możliwości dopracowania aktualnej metodyki przewidywania niebezpiecznych zjawisk pożarowych podczas działań prowadzonych przez strażaków.

2. Nieliniowe efekty pożaru

Do nieliniowych efektów pożaru (inaczej z ang. Extreme Fire Behavior) zaliczamy takie zjawiska jak: rozgorzenie, wsteczny ciąg płomieni oraz zapalenie/wybuch gazów pożarowych [5]. Związane z tymi zjawiskami bardzo szybkie rozprzestrzenianie się pożaru, stanowi ogromne niebezpieczeństwo dla strażaków, głównie z uwagi na bardzo duży wzrost temperatury i promieniowania cieplnego [6-7]. Jednocześnie niezwykle trudno nauczyć się przewidywania powyższych zdarzeń, bazując tylko na tradycyjnym rozpoznaniu [5]. Prawidłowe wyjaśnienie przywołanych zagadnień wymaga w pierwszej kolejności wyczerpującego omówienia przebiegu pożaru wewnętrznego.

Pożar może zostać zapoczątkowany w różny sposób, np. poprzez celowe podpalenie lub nieświadome pozostawiony tłący się papieros, czy też zwarcie w urządzeniu elektrycznym. W sytuacji, gdy pożar nie jest wynikiem podpalenia, pierwszym etapem rozwoju pożaru może być tzw. faza inkubacji (faza tlenu). Na tym etapie nie ma jeszcze spalania płomieniowego, natomiast zachodzi proces utleniania się materiału palnego. W momencie zainicjowania spalania płomieniowego pożar wchodzi w tzw. fazę wzrostu. Podczas spalania materiału do otoczenia uwalniana jest energia w postaci ciepła. Uwolnione ciepło może ulegać akumulacji, w szczególności dotyczy to pożarów rozwijających się w pomieszczeniach zamkniętych. W rezultacie ogrzewane są kolejne materiały znajdujące się w sąsiedztwie, które najpierw ulegają rozkładowi termicznemu (pirolizie), a następnie zapaleniu. Powstanie odpowiednich proporcji palnych mieszanin gazowych (produktów niepełnego spalania i pirolizy), a także przekroczenie wartości krytycznych temperatury oraz promieniowania cieplnego (temperatura gazów pożarowych pod sufitem pomieszczenia osiąga temperaturę 500-600°C, a gęstość strumienia promieniowania cieplnego na poziomie podłogi 15-20 kW/m² [8]), powoduje nagłe, niemalże jednoczesne zapalenie wszystkich zgromadzonych w pomieszczeniu materiałów. Moment przejścia pożaru rozwijającego się do stadium w pełni rozwiniętego (spalaniem objęte są wszystkie dostępne materiały palne) nazywamy rozgorzeniem. Po pewnym cza-

sie temperatura pożaru stopniowo maleje. Jest to związane z wypalaniem się paliwa oraz wyczerpywaniem utleniacza. Przyjmuje się, że gdy temperatura spadnie o co najmniej 1/5 jej maksymalnej wartości podczas pożaru, pożar przechodzi w kolejne stadium, czyli w tzw. fazę wypalania się materiału palnego oraz stopniowego stygnięcia (faza zaniku pożaru). Niemniej jednak przejścia pomiędzy poszczególnymi fazami są trudne do uchwycenia podczas realnych pożarów. Ponadto kształt krzywej mocy pożaru zależy ściśle od ilości i rodzaju paliwa, a także warunków wentylacji [5]. Trzeba podkreślić, że zjawiska rozgorzenia nie należy rozumieć jako jednego z podstawowych etapów rozwoju pożaru, lecz jako bardzo gwałtowne przejście z fazy wzrostu pożaru do fazy pożaru w pełni rozwiniętego. Kluczem do zrozumienia zachowania się i przebiegu rozwoju pożaru wewnętrznego jest umiejętność rozróżnienia i opisanie pożaru kontrolowanego przez paliwo oraz pożaru kontrolowanego przez wentylację.

2.1. Rozgorzenie

Rozgorzenie może wystąpić tylko w przypadku, gdy pomieszczenie, w którym rozwija się pożar, posiada odpowiedni poziom wentylacji pozwalającej na dopływ powietrza [5]. Rozgorzenie występuje w chwili, gdy promieniowanie ciepłe od źródła pożaru i palnych gazów zgromadzonych pod sufitem przekroczy wartość graniczną. Dzieje się tak, gdy temperatura gazów pożarowych pod sufitem pomieszczenia osiąga temperaturę 500-600°C, a gęstość strumienia promieniowania cieplnego na poziomie podłogi 15-20 kW/m² [8].

Rozgorzenie występuje podczas zwyczajnego przebiegu pożaru z wystarczającym dopływem powietrza od momentu rozpoczęcia spalania. Jednakże możliwa jest sytuacja, w której pożar przed wystąpieniem rozgorzenia będzie kontrolowany przez wentylację. Wtedy dopływ powietrza (np. wybite pod wpływem wysokiej temperatury okno) spowoduje rozgorzenie.

2.2. Wsteczny ciąg płomieni

Wsteczny ciąg płomieni lub inaczej ognisty podmuch jest polskim tłumaczeniem terminu *backdraft* [10]. Warunki do powstania wstecznego ciągu płomieni tworzą się podczas niecałkowitego spalania, przy małej objętości płomieni lub wręcz ich braku, przy występującym żarzeniu w słabo wentylowanych pomieszczeniach [5]. Niedostateczna ilość tlenu prowadzi do powstawania niepełnych produktów spalania, które są palne. W wyniku dalej postępującego procesu pirolizy powstają gazy, które mogą ulec zapaleniu (głównie C_xH_y oraz CO). Czynnikiem inicjującym powstanie wstecznego ciągu płomieni może być np. otwarcie drzwi. Do pomieszczenia dostaje się wtedy silny strumień powietrza, formując strugę, w której mieszają się gazy pożarowe z powietrzem [11]. W strudze mieszają się gazy pożarowe z powietrzem. Powstaje „kanał palnej mieszanki”, który rozszerza się od drzwi w głąb pomieszczenia. Mieszanka ta dociera do żarzącej się powierzchni i wtedy następuje zapłon. Gazy pożarowe wymieszane z tlenem zaczynają się palić i płomień przemieszcza się w stronę przeciwną do ruchu powietrza, czyli w miejsce, skąd dociera świeże powietrze. Ruch płomienia jest przyspieszony, im bliżej drzwi, tym więcej tlenu. Osiąga maksymalną prędkość (deflagacja lub eksplozja). Towarzystwo ma huk, dźwięk przypominający pociąg jadący w tunelu. Płomień, często w postaci kuli ognia, przedostaje się przez drzwi i ulega urwaniu, jeżeli nie ma dalej gazów pożarowych, które mogą ulec zapaleniu. Biorąc pod uwagę średnie rozmiary pomieszczeń, czas między otwarciem drzwi, wybiciem okna, czy też otwarciem doprowadzającego powietrze, a wyrzutem płomieni wynosi od kilku do kilkunastu sekund. Jednak bywają sytuacje, w których opóźnienie jest znacznie większe [5].

Odpowiednie rozpoznanie warunków pożarowych umożliwia strażakom podjęcie możliwie najbardziej efektywnych działań, które będą jednocześnie dopuszczalne z uwagi na ich bezpieczeństwo. Każdy pożar wysyła sygnały, które świadczą o fazie jego rozwoju. Istnieją również symptomy mogące wskazywać na możliwość pojawienia się wstecznego ciągu płomienia:

- „tłusty”, czarny dym wydostający się z pomieszczeń,
- dym lub języki płomieni pojawiające się w otworach i mające pulsujący, okresowy charakter,
- drżące w oknach szyby, wydające charakterystyczny dźwięk i jednocześnie tak gorące, że nie można ich dotknąć,
- dym „zassany” z powrotem do pomieszczenia,
- pojawienie się niebieskich płomieni,
- szum w uszach powodowany przez ruch powietrza skierowany ku źródłu ognia i tworzący zawirowania dymu.

Należy w tym miejscu podkreślić, że pożary piwnic i innych zamkniętych pomieszczeń zwiększają prawdopodobieństwo pojawienia się wstecznego ciągu płomieni.

Szybkość uwalniania energii podczas wstecznego ciągu płomieni jest niezwykle duża. Ponadto gwałtowny wzrost mocy pożaru jest zazwyczaj krótki, przejściowy [5], [11]. Niemniej jednak w pewnych warunkach zależnych m.in. od ilości paliwa czy źródła zapłonu, możliwe jest wydzielenie dużej ilości energii we względnie długim przedziale czasu. Znane są przypadki przebiegu tego zjawiska, nawet przez około 5 minut.

Zjawisko wstecznego ciągu płomieni jest wywołane dopływem dodatkowego powietrza, podobnie jak w przypadku rozgorzenia (wywołanego np. poprzez wybicie okna). Zasadnicza różnica pomiędzy tymi dwoma zjawiskami leży w intensywności i szybkości przyrostu mocy pożaru. Wsteczny ciąg płomieni jest błyskawicznym spalaniem (deflagacją, eksplozją), natomiast w rozgorzeniu nie mamy do czynienia z tak szybką reakcją utleniania gazów pożarowych i pirolitycznych.

Powołując się na publikacje [4] oraz [12], *backdraft* możemy podzielić na 6 podstawowych, umownych etapów:

1. Podobnie jak w przypadku zjawiska rozgorzenia, wsteczny ciąg płomieni może powstać w wyniku zainicjowania spalania jednego przedmiotu znajdującego się w pomieszczeniu. Pożar rozwija się w miarę upływu czasu i ogień może objąć kolejne przedmioty znajdujące się w pomieszczeniu poprzez propagację płomieni lub zapalenie wywołane promieniowaniem cieplnym pochodzącym głównie od gorącej warstwy podsufitowej dymu. Pożar może przestać się rozwijać lub nawet zacząć przygasać, jeżeli pomieszczenie będzie zamknięte i zacznie brakować tlenu. Podczas tzw. pożaru niedowentylowanego powstaje duża ilość niepełnych produktów spalania oraz pirolizy, które są palne. W miarę upływu czasu dym zaczyna wypełniać całą objętość pomieszczenia. Zasadniczo istnieją dwie możliwości, po których proces niekontrolowanego spalania w pomieszczeniu zamkniętym, może stać się pożarem niedowentylowanym. W pierwszym przypadku wzrost mocy pożaru jest obserwowany do momentu wyczerpania tlenu znajdującego się w pomieszczeniu. Nie ma żadnego dodatkowego źródła napływu powietrza, które mogłoby podtrzymać spalanie. W drugim przypadku ilość tlenu znajdującego się w pomieszczeniu jest wystarczająca, aby wystąpiło zjawisko rozgorzenia i pożar przeszedł w fazę pożaru w pełni rozwiniętego. Po wystąpieniu rozgorzenia intensywność spalania jest bardzo duża, a zużycie tlenu jest tak intensywne, że pożar przechodzi w fazę kontrolowaną przez wentylację.
2. Po otwarciu drzwi, okna lub powstania innego otworu w pomieszczeniu, zaczyna napływać grawitacyjnie powietrze, które jest zasysane z dużą szybkością w kierunku

ku strefy spalania. Jednocześnie z pomieszczenia zaczyna wypływać dym zawierający również palne produkty niepełnego spalania oraz pirolizy. Z uwagi na różnicę w gęstości napływającego powietrza oraz wypływającego dymu, tworzą się dwie „warstwy (korytarze) przepływu”. Dym wypływa poprzez górną część otworu, natomiast powietrze napływa dolną częścią otworu.

3. Tworzy się mieszanina palna, w pierwszej kolejności na granicy mieszania warstwy dymu oraz napływu powietrza.
4. W obszarze mieszania powinno istnieć źródło zapłonu (tłące się materiały, płomień, gorąca powierzchnia itp.), które zainicjuje reakcję gwałtownego spalania mieszaniny dymu z powietrzem.
5. Czoło płomienia przemieszcza się wzdłuż pomieszczenia w kierunku otworu, z którego napływa powietrze. Przemieszczanie płomienia, a także zwiększenie intensywności spalania prowadzi do gwałtownego wzrostu ciśnienia oraz bardziej nasilonego mieszania palnych produktów spalania i pirolizy z powietrzem. W związku z tym powstaje coraz większa ilość mieszaniny będącej w granicach zapalności.
6. Wzrost ciśnienia powoduje burzliwy wyrzut dymu poprzez otwór. Dym formuje kulę, która miesza się z powietrzem i ulega zapaleniu. Efektem jest tzw. wyrzut kuli ognia, na odległość nawet kilkunastu metrów na zewnątrz od pomieszczenia.

2.3. Zapalenie lub wybuch gazów pożarowych

Zapalenie gazów pożarowych jest zjawiskiem podobnym w skutkach i przebiegu do wstecznego ciągu płomieni, jednak istnieją różnice, przez które zjawiska te klasyfikowane są jako odrębne [13]. Warunkami koniecznymi do wystąpienia wstecznego ciągu płomienia jest wysoka temperatura (powyżej temperatury samozapłonu) oraz wysokie stężenie palnych produktów spalania i pirolizy (powyżej granicy zapalności), a także niskie stężenie tlenu. Natomiast, aby wystąpiło zjawisko zapalenia gazów pożarowych, muszą się one znajdować w mieszaninie z powietrzem, która będzie w granicach zapalności, ale jednocześnie temperatura tej mieszaniny będzie poniżej temperatury samozapłonu. Czynnikiem inicjującym zapalenie gazów pożarowych jest punktowy bodziec energetyczny, ale może też to być wzrost temperatury mieszaniny palnej do temperatury samozapłonu. Pod wieloma względami zjawisko zapalenia/wybuchu gazów pożarowych jest podobne do wybuchu propanu lub gazu ziemnego wewnątrz budynku. Czynniki, które wpływają na gwałtowność i intensywność przebiegu tego zjawiska to:

- stopień ograniczenia mieszaniny przez elementy wyposażenia i konstrukcji wewnątrz obiektu,
- wartość stężenia palnych gazów pożarowych i pirolitycznych w mieszaninie z powietrzem.

Im bardziej hermetyczne jest pomieszczenie oraz im bliższa jest wartość stężenia mieszaniny palnych gazów z powietrzem względem stężenia mieszaniny idealnej (stechiometrycznej), tym reakcja spalania jest intensywniejsza.

3. Czynniki wpływające na przebieg pożaru wewnętrznego

Podstawowymi czynnikami i zmiennymi wpływającymi na rozwój i przebieg pożaru wewnętrznego (w pomieszczeniu) są [5]:

- rodzaj, ilość i rozmieszczenie materiału palnego (paliwa),
- warunki wentylacji (dostępności powietrza z zewnątrz),
- układ, kształt i konfiguracja elementów konstrukcyjnych oraz wyposażenia pomieszczenia.

Właściwości fizyczne i chemiczne materiału palnego oraz jego dostępność determinują całkowitą energię potencjalną (obciążenie ogniowe) oraz potencjalną szybkość uwalniania ciepła (HRR).

W przypadku braku napływu wystarczającej ilości świeżego powietrza, pożar przechodzi w tzw. fazę kontrolowaną przez wentylację. Prowadzi to do zmniejszenia szybkości spalania palnych gazów pirolitycznych, przy jednoczesnym wzroście powstawania kolejnych porcji palnego paliwa w fazie gazowej. Palne składniki dymu (gazy pożarowe i pirolityczne) są krytycznym czynnikiem warunkującym powstawanie takich zjawisk jak rozgorzenie spowodowane poprawą warunków wentylacji, wsteczny ciąg płomieni czy zapalenie/wybuch gazów pożarowych. W związku z powyższym bardzo ważne jest, aby strażacy mieli świadomość, że dym jest jak dodatkowy materiał palny (paliwo).

4. Wskaźniki, objawy oraz oznaki przebiegu i rozwoju pożaru

Pod koniec lat 90., zaczęto szkolić strażaków w zakresie odczytywania podstawowych symptomów związanych z rozwojem pożaru. Od początku 2000 roku do programu szkoleń wprowadzono metodę SHAF, która wskazuje na konieczność obserwacji czterech głównych oznak przebiegu pożaru: *smoke* (dym), *air track* (dopływ powietrza), *heat* (ciepło) oraz *flame* (płomień). W 2005 roku do wspomnianego skrótu dodano również literę B, która oznacza budynek (*building*) [9]. Ostatecznie opracowano procedurę B-SHAF (wymowa tożsama z *be safe* – bądź bezpieczny). Metoda pomaga strażakom w odczytaniu aktualnego przebiegu pożaru oraz w przewidywaniu dalszego rozwoju pożaru, przy wykorzystaniu jedynie własnego doświadczenia oraz zmysłów (wzrok, słuch, zmysły somatyczne itp.) [5], [9]. Opierając się na opracowanych zasadach, strażak powinien uważnie obserwować oznaki rozwoju pożaru w kontekście charakterystyki obiektu, właściwości dymu, dopływu powietrza do pożaru, emisji ciepła oraz cech płomienia. Niektóre spośród wymienionych czynników, takie jak np. charakterystyka obiektu, są niezmiennie, natomiast inne ulegają zmianie wraz z rozwojem pożaru (właściwości dymu, cechy płomienia).

W przypadku charakterystyki obiektu możliwe jest ustalenie parametrów budynku przed ewentualnym wybuchem pożaru, już nawet na etapie projektowania. Niestety w wielu obiektach nie ma obowiązku dokładnego analizowania warunków ochrony przeciwpożarowej (np. budynki mieszkalne, domy jednorodzinne). Niemniej jednak poprzez odpowiedni system szkoleń, prób w warunkach poligonowych oraz porównanie rzeczywistych pożarów z przeszłości, jest możliwe wypracowanie metodyki oceny wpływu parametrów obiektu na przebieg pożaru. Te zagadnienia są przedmiotem pracy m.in. stowarzyszenia CFBT-US LLC [9]. Natomiast kluczowa jest obserwacja reakcji budynku na już rozwijający się pożar (drżenie szyb, stopień nagrzania elementów konstrukcyjnych oraz wykończeniowych itd.). Jednocześnie należy zauważyć, że bez wątpienia najistotniejsze czynniki, dające informację o przebiegu pożaru, są związane z właściwościami dymu. Stopień zadymienia, wygląd i temperatura dymu mogą dostarczyć cennych wskazówek na temat umiejscowienia pożaru, rodzaju płonącego materiału, warunków wentylacji, czy też fazy rozwoju pożaru. W większości przypadków istnieje możliwość pewnej wstępnej oceny dymu oraz warunków wentylacji już z zewnątrz obiektu. Obserwacja prędkości przepływu/wypływu dymu, zachowanie się elementów konstrukcji i wyposażenia pod wpływem temperatury, a także odczuwanie zmian temperatury przez strażaka, stanowią kolejny element oceny oraz prognozy dalszego rozwoju pożaru. Niemniej jednak należy pamiętać, że ubranie ochronne strażaka zapewnia

pewną izolację, w związku z tym może być trudne dokładne wychwycenie zmian temperatury. Parametry płomienia takie jak: umiejscowienie, kolor, objętość itp. są istotne, ale muszą być odczytywane łącznie i w odniesieniu do pozostałych wskaźników, tak aby możliwe było uzyskanie pełnego obrazu sytuacji pożarowej.

5. Podsumowanie

Aby zapobiec groźnym konsekwencjom związanym z narażeniem strażaka na wysokie temperatury oraz promieniowanie cieplne występujące podczas rozgorzenia, należy ostrzec go przynajmniej minutę przed pojawieniem się tego zjawiska [14]. W przypadku wstecznego ciągu płomienia, ostrzeżenie powinno zostać przekazane strażakom zanim podejść oni w okolice pomieszczenia (bezwzględnie przed otwarciem pomieszczenia, np. drzwi). Biorąc pod uwagę powyższe, należy stwierdzić, że poprawa bezpieczeństwa strażaków, wymaga stworzenia systemu, który będzie przewidywał możliwość wystąpienia nieliniowych efektów pożaru.

Strażacy powinni otrzymać narzędzie, które umożliwi śledzenie danych pochodzących z zainstalowanych lub mobilnych sensorów, co umożliwi określenie czasu lub szansy wystąpienia wstecznego ciągu płomieni lub rozgorzenia. Zasadniczo przyjmuje się, że zjawisko wstecznego ciągu płomieni może wystąpić, gdy ułamek objętościowy palnych gazów pożarowych w zamkniętym pomieszczeniu przekroczy pewną wartość graniczną. Natomiast, gdy stężenie palnych gazów pożarowych jest zdecydowanie większe niż teoretyczna dolna granica zapalności mieszaniny określonych gazów palnych, wtedy zjawisko wstecznego ciągu płomieni przebiega gwałtownie i bardzo wyraźnie, ponieważ towarzyszy mu wyrzut kuli ognia przez otwór na zewnątrz pomieszczenia. Jednak ilość wytwarzanych palnych gazów pożarowych, podczas niepełnego spalania, jest inna dla każdego z materiałów spalanych. W związku z tym dolne granice wybuchowości/zapalności oraz minimalna wartość ułamka objętościowego paliwa w mieszaninie, która doprowadzi do *backdraft*, również zależy od materiału, jaki jest spalany, i jest odmienna dla różnych pożarów. W oparciu o powyższe założenia konieczne jest dokładne zbadanie warunków krytycznych do wystąpienia zjawiska wstecznego ciągu płomienia [15]. Wyniki takich badań stanowiłyby podstawę do stworzenia algorytmu przewidującego możliwość wystąpienia wstecznego ciągu płomienia na podstawie pomiaru stężeń gazów pożarowych. Jednocześnie należy rozwiązać problem pozyskiwania danych sensorycznych, czyli stężeń gazów pożarowych. Stworzona metoda musi być opracowana w kontekście możliwości pobierania takich danych w przypadku realnych działań ratowniczo-gaśniczych.

Uzupełnieniem może być system oceny symptomów wstecznego ciągu płomieni, na podstawie informacji pochodzących z rozpoznania przeprowadzanego przez strażaków lub też z sensorów, np. sensor mierzący poziom drgań szyb, sensor mierzący temperaturę drzwi itp. W pierwszym przypadku rozwiązaniem może być aplikacja, w której będzie można szybko zaznaczyć obserwowane symptomy np. w postaci dotykowego pulpitu lub poprzez rozwijaną listę. Druga opcja to zupełnie autonomiczny system pracujący w oparciu o dane sensoryczne z urządzeń pomiarowych umieszczanych w/na/przy budynku przez strażaków lub też będących elementami wyposażenia obiektu. Powinny zostać podjęte prace badawcze, które będą miały na celu zdefiniowanie funkcji szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia wstecznego ciągu płomienia lub rozgorzenia wywołanego zmianą warunków wentylacji, dla której wejściem będą symptomy przebiegu pożaru. W celu sprecyzowania stopni ważkości (istotności) każdej z tych obserwacji, muszą zostać wykonane prace ba-

Tabela 1. Zestawienie symptomów obserwowanych podczas pożaru, charakterystycznych dla określonej fazy przebiegu pożaru

	Faza I Stadium początkowe pożaru, faza inkubacji	Faza II Faza wzrostu pożaru	Faza III Faza pożaru w pełni rozwiniętego	Faza IV Faza gaśnięcia pożaru
Obiekt	- Kondensacja pary wodnej na szybach - Niewielka ilość dymu - Brak wyraźnie zarysowanej warstwy podsufitowej dymu - Kolor dymu jasny - Niska wyporność dymu	- Możliwe pojawienie się brązowych plam na szybach - Może dojść do pęknięcia szyb - Widoczna warstwa podsufitowa dymu - W przypadku mniejszych pomieszczeń dym może wypływać przez drzwi, okna lub inne otwory	- Szyby ciemnieją - Szyby pękają - Duża objętość dymu wypływająca przez otwory	- Zaczernione okna - Gorące okna - Gorące drzwi - Dym obniża się do poziomu podłogi - Wysoka gęstość optyczna dymu - Dym o jasnym lub ciemnym kolorze staje się gęsty i przybiera barwę szaro-żółtą
Dym	- Niewielka ilość dymu - Brak wyraźnie zarysowanej warstwy podsufitowej dymu - Kolor dymu jasny - Niska wyporność dymu	- Widoczna warstwa podsufitowa dymu - W przypadku mniejszych pomieszczeń dym może wypływać przez drzwi, okna lub inne otwory	- Szyby ciemnieją - Szyby pękają - Duża objętość dymu wypływająca przez otwory	- Zaczernione okna - Gorące okna - Gorące drzwi - Dym obniża się do poziomu podłogi - Wysoka gęstość optyczna dymu - Dym o jasnym lub ciemnym kolorze staje się gęsty i przybiera barwę szaro-żółtą
Wentylacja	-	- Dwkierunkowy przepływ powietrza (w dolnej części otworu drzwiowego) i dymu (w górnej części otworu drzwiowego)	- Bardzo silny dwukierunkowy przepływ powietrza (w dolnej części otworu drzwiowego) i dymu (w górnej części otworu drzwiowego)	- Przepływy mogą mieć charakter pulsujący, a wypływ dymu będzie szybki oraz turbulentny
Temperatura	- Niewielki wzrost temperatury powyżej temperatury otoczenia - Z zewnątrz widoczne podniesienie się temperatury na termogramie kamery termowizyjnej	- Wyraźny wzrost temperatury powyżej temperatury otoczenia - Z zewnątrz możliwa obserwacja zmian temperatury i przepływu ciepła na termogramie kamery termowizyjnej	- Wysoka temperatura, odczuwana przez ubranie ochronne	-
Płomień	- Brak spalania płomieniowego	- Widoczne płomienie obejmujące część dostępnego materiału palnego	- Płomienie obejmują wszystkie dostępne materiały palne - Możliwa obserwacja spalania płomieniowego przebiegającego w warstwie gorących gazów pożarowych na kamery termowizyjnej - Płomienie wychodzą przez otwory poza obszar pomieszczenia	- Zapalanie się dymu wypływającego przez szczeliny - Znikające, urywające się płomienie
Możliwe przejścia pomiędzy fazami	Faza I à Faza II	Faza II à Faza III (moment przejścia to rozgorzenie) Faza II à Faza IV	Faza III à Faza IV	Faza IV à Faza III (moment przejścia to wsteczny ciąg płomieni lub rozgorzenie wywołane zmianą warunków wentylacji)

Źródło: Opracowanie własne.

Table 1. Table of symptoms observed during a fire, characteristics for specific stage of a fire

	Stage I Ignition	Stage II Growth	Stage III Fully developed	Stage IV Decay
Structure	- Steam condensation on panes	- Possible appearance of brown marks on panes - Possible cracking of panes	- Panes become black - Panes crack	- Blackened windows - Hot windows - Hot doors
Smoke	- A small amount of smoke - Lack of a clear layer of ceiling smoke - Light smoke - Low displacement of smoke	Clear layer of ceiling smoke - In case of smaller rooms smoke may flow out through doors, windows or other openings	- Large volume of smoke flowing out through openings	- Smoke drops to floor level - Large optical density of smoke - Light or dark smoke becomes dense, yellow-grey in colour
Ventilation	-	- Two-way air flow (in lower part of doorway) and smoke (in upper part of doorway)	- Very strong two-way air flow (in lower part of doorway) and smoke (in upper part of doorway)	- Flow may be pulsating and inflow of smoke may be fast and turbulent
Temperature	- Small growth in temperature above environmental levels - Noticeable growth in temperature level, observed externally through an infrared camera	- Large growth in temperature above environmental levels - Possible external observation to changes in temperature and heat flow, with the aid of an infrared camera	- High temperature, perceptible through firefighting clothing	-
Flame	- Lack of flame combustion	- Visible flames surrounding part of the flammable material	- Flames surrounding all available flammable materials - Possible observation on infrared camera; flame combustion progressing along layer of hot gas - Flames flowing outside confined space through openings	- Ignition of smoke flowing out through openings - Vanishing, flame tongue
Possible transitions between stages	Stage I à Stage II	Stage II à Stage III (flashover occurs during transition period) Stage II à Stage IV	Stage III à Stage IV	Stage IV à Stage III (during transition period transforms into backdraft or flashover caused by change of ventilation conditions)

Source: Own elaboration.

dawcze w małej i dużej skali. Stanowiska badawcze powinny odwzorowywać pomieszczenia zamknięte i zostać wyposażone w aparaturę pomiarową, która pozwoli na dokładną analizę charakteru oraz intensywności występowania poszczególnych symptomów. Kompletny system powinien umożliwić odpowiednio wczesne przekazanie informacji strażakom o konieczności opuszczenia danej przestrzeni w budynku, a także w ramach integracji z innymi systemami wskazać bezpieczną drogę ucieczki. Wspomniane prace badawcze powinny być również ukierunkowane na udoskonalenie stanowisk oraz programu szkoleń dla strażaków w zakresie wykrywania oraz przeciwdziałania nieliniowym efektem pożaru [9].

Artykuł został opracowany w ramach projektu rozwojowego pn. „Nowoczesne narzędzia inżynierskie do wspomagania decyzji przeznaczone dla dowódców podczas działań ratowniczo-gaśniczych PSP w obiektach budowlanych” nr O/ROB/0010/03/001 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz. U. 2010 Nr 109, poz. 719 z późn. zm.).
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2002 Nr 75, poz. 690 z późn. zm.).
- [3] Janik P., *Diagnoza pożarowa*, „Przegląd Pożarniczy” nr 11, 2013.
- [4] Kokot-Góra S., *Standardy szkolenia i rzeczywistość*, „Przegląd Pożarniczy” nr 7, 2013.
- [5] Grimwood P., Hartin E., McDonough J., Raffle S., *3D Fire Fighting: Training, Techniques, and Tactics*, Fire Protection Publications, 1st Edition 2005.
- [6] Stawicki T., *Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru*, „Bezpieczeństwo pracy”, Issues 7-8, 2004.
- [7] Foster J.A., Roberts G.V., *Measurements of the Firefighting Environment - Research Report Number 61*, 1994.
- [8] Peacock R.D., Reneke P.A., Bukowski R.W., Babrauskas V., *Defining Flashover for Fire Hazard Calculations*, “Fire Safety Journal”, Vol 32 Issue 4, 1999, pp. 331-345.
- [9] <http://www.cfbt-us.com/resources.html> [dostęp 10.08.2015]
- [10] Fietz-Strychalska U., Kociołek K., Półka M., Koldej J., *Podręcznik dla słuchaczy kursu kwalifikacyjnego szeregowych Państwowej Straży Pożarnej Fizykochemia spalania i środki gaśnicze*, Wydawnictwo KG PSP i Fundacji EDURA, Warszawa 2005.
- [11] Porowski R., Lesiak P., Rudy W., Strzyżewska M., *Zjawisko ciągu wstecznego – backdraft*, BiTP Vol. 30 Issue 2, 2013, pp. 41-50.
- [12] Fleischmann C.M., *Backdraft phenomena*, NIST-GCR-94-646, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 1994.
- [13] Fleischmann C.M., Chen Z., *Defining the difference between backdraft and smoke explosions*, “Procedia Engineering” Vol. 62, 2013, pp. 324-330.
- [14] Cyganski D., Duckworth R.J., Notarianni K., *Development of a Portable Flashover Predictor (Fire-Ground Environment Sensor System)*, FEMA AFG 2008 Scientific Report, Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- [15] 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” Vol. 24, 2011, pp. 632-637.
- [16] 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” Vol. 33 Issue 4, 2009, pp. 261-282.
- [17] Strona internetowa projektu pn. ICRA, <http://icra-project.org/?node=0>, [dostęp: 10.08.2015].
- [18] Bukowski R.W., *Modeling backdraft: the fire at 62 Watts Street*, “NFPA J.” Vol. 89: November/December 1995, pp. 85-89.
- [19] Gottuk D.T., Peatross M.J., Farley J.P., Williams F.W., *1995 class B Firefighting doctrine and tactics: Final Report*, NRL/MR/6180-97-7909, Naval Research Laboratory, Washington, DC, January 13, 1997.
- [20] 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”, Vol. 24 Issue 5, 2011, pp. 632-637.
- [21] Cyganski D., Duckworth R.J., Notarianni K., *Development of a Portable Flashover Predictor (Fire-Ground Environment Sensor System)*, FEMA AFG 2008 Scientific Report, Worcester Polytechnic Institute, 2010.

* * *

kpt. mgr inż. Andrzej Krauze – asystent w Zakładzie Informatyki i Łączności Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

mł. bryg. dr inż. Adam Krasuski – adiunkt w Zakładzie Informatyki i Łączności Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

inż. Bartłomiej Ślęczkowski – absolwent studiów pierwszego stopnia na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Specjalista w obszarze: podręcznego sprzętu gaśniczego, środków gaśniczych oraz stałych urządzeń gaśniczych w Zespole Laboratoriów Urządzeń i Środków Gaśniczych CNBOP-PIB.